

ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ



4(70) 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
В. А. Проценко (г. Киев)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
Д.т.н. В. Т. Дейнега (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов (г. Одесса)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Л. М. Лейдерман (г. Одесса)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
К.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков (г. Одесса)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д.ф.-м.н. П. В. Сербя (г. Таганрог)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва,
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»,
Одесский национальный
политехнический университет,
Редакция журнала «ТКЭА»

Техническая политика

Проблемы применения аппаратурных средств для экологического мониторинга техногенных электромагнитных полей. *Грудзинский Э. М., Дуб П. Б., Ничога В. А., Самсонюк О. В.* 3

Еще раз о развитии солнечной энергетики и рынке кремниевого сырья в 2007—2010 гг. *Наумов А. В.* 8

Электронные средства: исследования, разработки

Трехкоординатный пьезокерамический сканер на биморфных пьезоэлементах для зондового наномикроскопа. *Шарапов В. М., Гуржий А. Н., Филимонов С. А.* 13

Сенсоэлектроника

«Электронный нос» на основе матрицы элементарных полупроводниковых резистивных сенсоров. *Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Шустров А. В.* 16

Оптический датчик температуры на основе нанокристаллической пленки SiC. *Лопин А. В., Семёнов А. В., Пузииков В. М.* 19

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Особенности фотоэлектрических характеристик фотоэлектронпреобразовательных структур. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Гиясова Ф. А., Азимов Т. М., Бузруков У. М., Якубов А. А.* 23

Алмазные фотоприемники ультрафиолетового диапазона. *Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Горохов Е. В., Феценко В. С., Талипов Н. Х.* 29

Технологические процессы и оборудование

Моделирование технологии изготовления субмикронных КМОП СБИС с помощью систем TCAD. *Глушко А. А., Родионов И. А., Макачук В. В.* 32

Установка для экспресс-контроля глубины охлаждения термоэлектрических микромодулей Пельтье. *Ащеулов А. А., Величук Д. Д., Романиук И. С.* 35

Вычисление дифракционной составляющей глубины резко изображаемого пространства в оптическом микроскопе. *Боровицкий В. Н.* 38

Материалы электроники

Строение и высокотемпературная сверхпроводимость пленок $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$. *Самойлович М. И., Беянин А. Ф., Илюшечкин А. Ю.* 48

Метрология. Стандартизация

Оформление конструкторской документации на печатные платы в условиях автоматизированного проектирования и подготовки производства. *Ефименко А. А., Васильева Л. П., Ткаченко О. Р.* 61

Библиография

Новые книги 12, 22, 28, 34, 37, 47, 60

В портфеле редакции 47

Выставки. Конференции 15, 2-я, 3-я, 4-я стр. обл.

ЗМІСТ

Технічна політика

Проблеми застосування апаратних засобів для екологічного моніторингу техногенних електромагнітних полів. *Грудзинський Е. М., Дуб П. Б., Нічого В. О., Самсонюк О. В.* (3)

Ще раз про розвиток сонячної енергетики та ринок кремнієвої сировини у 2007—2010 рр. *Наумов О. В.* (8)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Трьохкоординатний п'єзокерамічний сканер на біморфних п'єзоелементах для зондового наномікроскопа. *Шарапов В. М., Гуржій А. М., Філімонов С. О.* (13)

Сенсоелектроніка

«Електронний ніс» на основі матриці елементарних напівпровідникових резистивних сенсорів. *Алтухов А. О., Митягін О. Ю., Шустров О. В.* (16)

Оптичний датчик температури на основі нанокристалічної плівки SiC. *Лопін О. В., Семенов О. В., Пузиков В. М.* (19)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Особливості фотоелектричних характеристик фотоелектроперетворювальних структур. *Каримов А. В., Йодгорова Д. М., Гиясова Ф. А., Азимов Т. М., Бузруков У. М., Якубов А. А.* (23)

Алмазні фотоприймачі ультрафіолетового діапазону. *Алтухов А. О., Митягін О. Ю., Горохов Є. В., Фещенко В. С., Таліпов Н. Х.* (29)

Технологічні процеси та обладнання

Моделювання технології виготовлення субмікронних КМОН НВІС за допомогою систем TCAD. *Глушко А. О., Родіонов І. А., Макаrchук В. В.* (32)

Установка для експрес-контролю глибини охолодження термоелектричних мікромодулів Пельтьє. *Ащеулов А. А., Величук Д. Д., Романюк І. С.* (35)

Вичислювання дифракційної складової глибини різко зображувального простору у оптичному мікроскопі. *Боровицький В. М.* (38)

Матеріали електроніки

Структура і високотемпературна надпровідність плівок $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$. *Самойлович М. І., Белянін О. Ф., Ілюшечкін О. Ю.* (48)

Метрологія. Стандартизація

Оформлення конструкторської документації на друковані плати в умовах автоматизованого проектування та підготовки виробництва. *Сфіменко А. А., Васильєва Л. П., Ткаченко О. Р.* (61)

CONTENT

Technical polytic

Problems of usage of apparatus facilities for ecological monitoring of technogenic electromagnetic fields. *Grudziński E. M., Dub P. B., Nichoga V. O., Samsoniuk O. V.* (3)

Once more about the development of solar energy industry and raw silicon market in 2007—2010. *Naumov A. V.* (8)

Electronic means: investigations, development

Three-coordinate the piezoceramic scanner on bimorphic piezoelements for probe nanomicroscope. *Sharapov V. M., Gurjiy A. N., Filimonov S. A.* (13)

Sensoelectronics

Electron nose based on the elementary semiconductor sensors of resistive type. *Altukhov A. A., Mityagin A. Yu., Shustrov A. V.* (16)

Optical temperature sensor based on the nanocrystalline silicon carbide film. *Lopin A. V., Semenov A. V., Puzikov V. M.* (19)

Functional micro- and nanoelectronics

Features of the photo-electric characteristics of photoelectric converter of structures. *Karimov A. V., Yodgorova D. M., Giyasova F. A., Azimov T. M., Buzrukov U. M., Yakubov A. A.* (23)

Diamond ultra-violet photoreceivers. *Altukhov A. A., Mityagin A. Yu., Gorokhov E. V., Feshchenko V. S., Talipov N. Kh.* (29)

Technological processes and equipment

Technological processes modelling of submicron CMOS VLSI producing with the modern TCAD systems. *Glushko A. A., Rodionov I. A., Makarchuk V. V.* (32)

Setup for express-control of cooling depth of thermoelectric Peltier micromodules. *Ascheulov A. A., Velichuk D. D., Romanuk I. S.* (35)

Calculation of the diffraction part of focus depth in a light microscope. *Borovytsky V. N.* (38)

Materials of electronics

Structure and high-temperature superconductivity of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ films. *Samoylovich M. I., Belyanin A. F., Ilyushechkin A. Yu.* (48)

Metrology. Standartization

Registration of the design documentation on printed-circuit-boards in conditions of the automated designing and preparation of manufacture. *Efimenko A. A., Vasil'eva L. P., Tkachenko O. P.* (61)

Д. т. н. Э. М. ГРУДЗИНСКИЙ, П. Б. ДУБ, д. т. н. В. А. НИЧОГА,
к. т. н. О. В. САМСОНЮК

Польша, Технический ун-т „Вроцлавская политехника”;
Украина, г. Львов, Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко,
Нац. ун-т „Львовская политехника”
E-mail: eugeniusz.grudzinski@pwr.wroc.pl, nich@ipm.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
30.01—02.07 2007 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Н. МАКСИМЕНКО
(ЗАО «Укрналит», г. Киев)

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТУРНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Показана необходимость согласования параметров измерительной аппаратуры с действующей нормативной базой, определяющей предельно допустимые уровни электромагнитных полей.

Быстрое развитие систем электроэнергетики, телекоммуникаций, телевидения, радиолокации, а также большое количество электронных устройств в медицине, промышленности и домашнем хозяйстве, привели к постепенному росту интенсивности техногенных электромагнитных полей (ЭМП) на рабочем месте, в быту и в окружающей среде [1—3]. Это привело к необходимости, с одной стороны, определить безопасные для человека уровни техногенных ЭМП и, с другой стороны, обеспечить удовлетворительный их контроль.

Влияние техногенных ЭМП на человеческий организм изучено недостаточно [1]. В связи с этим еще более актуальной становится проблема корректного измерения этих ЭМП, разработки и применения соответствующей электрорадиоизмерительной аппаратуры. Одновременно актуальным остается вопрос состояния действующей нормативной документации (НД), которая регламентирует предельно допустимые уровни (ПДУ) полей с точки зрения их безопасности [3—5].

Задачей настоящей работы является рассмотрение вопросов, связанных с особенностями измерения ЭМП в непосредственной близости от источника излучения. При этом особое значение имеет интерпретация результатов измерений и согласование параметров измерительной аппаратуры с действующей нормативной базой, определяющей ПДУ поля с точки зрения его безопасности.

Проведение этих измерений является сложной задачей по нескольким причинам. Одной из них является то, что очень часто неизвестны параметры источника излучения, а иногда даже его местонахождение. Причиной, существенно осложняющей процесс измерения и интерпретацию результатов, является влияние предметов и условий внешней среды.

Специфика измерений заключается еще и в том, что источники излучения очень часто находятся непосредственно возле человека, т. е. в ближней зоне (зоне индукции) [6]. Следует отметить также, что во многих случаях излучение источника связано с про-

хождением в нем сильных токов, т. е. поле по своему характеру преимущественно магнитное, а из-за пониженного (в сравнении с дальней зоной) значения характеристического импеданса среды в поле индукции адсорбируемость мощности органическим материалом (оператором-человеком) увеличивается [1, 2, 5].

Характеристика датчиков ЭМП

Большинство измерителей электрической и магнитной составляющих поля, которые рекомендуются НД для определения уровней полей, используют датчики или зонды, которые должны отвечать определенным требованиям. Основными из них являются: 1) чувствительность, 2) полоса частот, 3) динамический диапазон, 4) точность.

Для минимизации погрешностей измерения или исследования влияния поля на биологические или технические объекты сейчас везде применяют малые электрические зонды с линейной, круговой или сферической характеристиками по схемам, которые показаны на рис. 1.

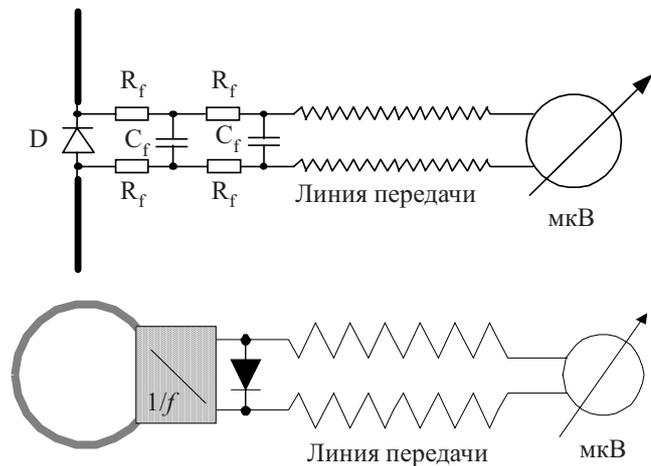


Рис. 1. Примеры самых простых схем линейных зондов напряженности электрического и магнитного полей

Техногенное ЭМП фактически выступает как индукционное ближнее поле. Здесь электрическую и магнитную составляющие необходимо измерять отдельно — в отличие от дальнего поля, где по одной измеренной составляющей можно через волновой импеданс среды Z найти другую. Вектор Пойнтинга в ближнем поле является комплексной вели-

чиной, его направление и значение зависят от структуры источника излучения и расстояния от источника. В ближнем поле имеются сложные фазовые зависимости между электрической E и магнитной H составляющими. В зависимости от отношения E/H ближнее поле может быть высокоимпедансным (электрическим, $Z_E = E/H > 120\pi$) или низкоимпедансным (магнитным, $Z_E = E/H < 120\pi$).

Точность измерения определяют не только малые размеры датчика (зонда) по отношению к длине волны, но и наименьшее расстояние от источника, на котором выполняется измерение. Погрешность измерений зависит также от согласования датчика (зонда) измерительного устройства с источником, от присутствия вокруг измерителя и датчика различных предметов с изменяющейся формой, от других факторов, например, многолепестковости диаграммы направленности зонда. Влияние разных факторов приводит к существенной (около 50%) [6—8] погрешности измерений в ближнем поле.

Измерение техногенных ЭМП может проводиться как селективными, так и широкополосными измерителями. Широкополосные измерения очень просты, быстры и в большинстве случаев не вызывают серьезных затруднений. Значительные трудности может вызывать интерпретация результатов измерений, особенно при сравнении их с ПДУ на границах диапазонов частот, где значения ПДУ могут сильно отличаться [3, 5, 9—11], и это является одним из недостатков метода.

Селективные измерения сложнее, и не всегда по их результатам можно оценить соответствие измеренных E или H значениям ПДУ, нормируемым в определенных границах или участках частотного диапазона.

В [10] приведен перечень приборов, рекомендуемых в Украине для измерения уровней ЭМП, основными из которых являются:

- 1) измеритель напряженности поля ближнего NFM-1 (ФРГ), частотный диапазон по E : 50 Гц, 60 кГц...350 МГц, по H : 10 кГц...10 МГц;
- 2) измерители напряженности ПЗ-15, -16, -17, -21 (Россия), частотный диапазон по E : 10 кГц...300 МГц, по H : 100 кГц...10 МГц;
- 3) измеритель напряженности радиопомех FSM-6 (ФРГ), частотный диапазон по E и H : 0,1...30 МГц;
- 4) измеритель напряженности радиопомех FSM-8 (ФРГ), частотный диапазон по E : 30...1000 МГц.

Следует отметить, что указанные приборы не покрывают весь диапазон частот, особенно начиная с 2 Гц до 10 кГц, по электрической и магнитной составляющим. Погрешность каждого из них различна, не говоря уже о суммарной погрешности измерений на рабочем месте.

Как показано в [8], селективные измерения техногенных ЭМП неприемлемы при сравнении результатов измерений с нормативной базой, в которой ПДУ излучений нормируются по диапазонам частот [3, 5, 6, 9, 10].

Пространственное распределение поля неизвестного источника может существенно отличаться от

образцового поля плоской волны, в котором, например, был прокалиброван датчик измерителя. По этой причине погрешность большинства прецизионных измерителей поля в дальней зоне (зоне излучения) не превышает 10%, в то время как при измерении в ближнем поле (зоне индукции) погрешность измерений может составить 20...50% [6].

Измеритель типа МЕН для определения интенсивности техногенного излучения

С учетом отмеченных выше особенностей в лаборатории эталонов и метрологии ЭМП Технического университета „Вроцлавская политехника” был разработан [8] ряд широкополосных специализированных зондов для измерения составляющих электрического и магнитного поля на основе использования малых дипольных электрических и рамочных магнитных антенн с непосредственным детектированием сигнала на зажимах измерительного зонда (датчика) и передачей постоянной составляющей непосредственно на измеритель типа МЕН-1. В этом случае измерение ЭМП в заданных диапазонах частот проводится одним измерителем МЕН-1 и несколькими сменными антеннами (фактически “точечными” зондами), предназначенными для определенных полос частот, на которых регламентированы ПДУ излучения в НД Польши [9]. Такой подход позволяет избежать многих погрешностей, возникаю-

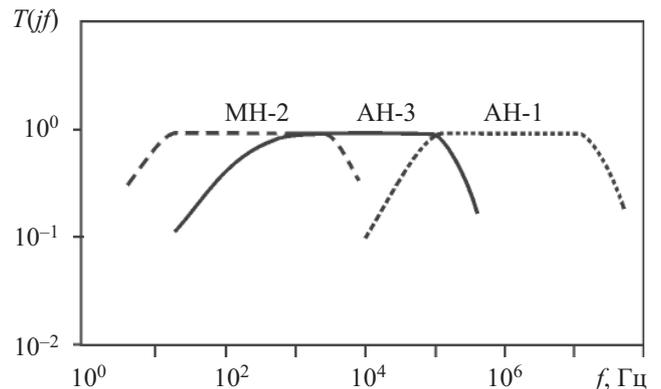


Рис. 2. Нормированные частотные характеристики измерителя типа МЕН-1 с зондами магнитного поля типа МН-2 (20...2000 Гц), АН-3 (1...100 кГц) и АН-1 (0,1...10 МГц)

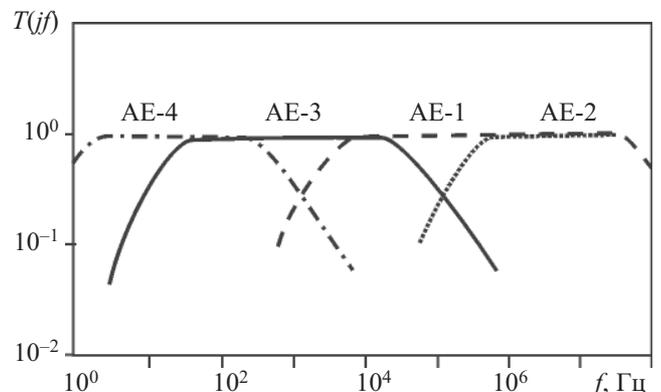


Рис. 3. Нормированные частотные характеристики измерителя типа МЕН-1 с зондами электрического поля типа АЕ-4 (20...1000 Гц), АЕ-3 (1...100 кГц), АЕ-1 (0,1...300 МГц) и АЕ-2 (10...300 МГц)

ших как из-за усреднения поля на измерительной антенне, так и из-за искажений измеряемого поля, вызванных этой антенной.

На рис. 2 и 3 показаны нормируемые АЧХ, т. е. приведенные к значению АЧХ в области ее уплощенной части, $T(f)$ нескольких электрических и нескольких магнитных антенн-зондов, которые работают с измерителем типа МЕН-1. В табл. 1 представлены параметры некоторых зондов электрического и магнитного полей [8]. Зонды типа AS предназначены для измерения плотности потока энергии ЭМП S .

Таблица 1

Параметры зондов для измерительного прибора МЕН-1

| Тип зонда | Измеряемое поле | Диапазон частот | Диапазон измеряемых ЭМП |
|-----------|-----------------|-----------------|----------------------------|
| АЕ-НР | E | 0,1—30 МГц | 0,1—10 В/м |
| АЕ-1 | E | 0,1—300 МГц | 2—1000 В/м |
| АЕ-2 | E | 10—300 МГц | 0,5—25 В/м |
| АЕ-3 | E | 1—100 кГц | 5—1000 В/м |
| АЕ-4 | E | 10—1000 Гц | 1—30 кВ/м |
| AS-1 | S | 0,3—3 ГГц | 0,05—100 Вт/м ² |
| AS-3 | S | 0,3—38 ГГц | 0,05—10 Вт/м ² |
| АН-1 | H | 0,1—10 МГц | 1—250 А/м |
| АН-2 | H | 10—30 МГц | 1—250 А/м |
| АН-3 | H | 1—100 кГц | 1—250 А/м |
| АН-27 | H | 10—60 МГц | 0,1—20 А/м |
| МН-2 | H | 20—2000 Гц | 0,2—300 А/м |

Следует отметить, что полосы пропускания всех отмеченных зондов типа АН и АЕ отвечают полосам пропускания, в которых НД Польши нормируют ПДУ ЭМП [9]. Чувствительность по магнитному полю G измерителя типа МЕН-1 на частотно-независимой “плоской” части АЧХ с зондом типа МН-2 составляет 0,5 В/А/м, АН-3 — 0,2 В/А/м, АН-1 — 0,2 В/А/м. Чувствительность по электрическому полю (т. е. действующая высота h) с зондом типа АЕ-4 составляет 0,002 м, АЕ-3 — 0,1 м, АЕ-1 — 0,1 м и АЕ-2 — 0,4 м.

Анализ проведенных в [6, 8] исследований показывает, что одним из основных требований метрологии полей близких источников является независимое измерение обеих составляющих поля — E и H . Кроме того, измерения должны быть “точечными”.

На рис. 4 приведены результаты измерения электрической составляющей произвольного источника ЭМП на низких частотах разными измерителями при изменении расстояния от источника [8]: кривая 1 отвечает результатам измерения измерителем типа МЕН-1 с электрическим зондом типа АЕ-НР и длиной диполя ≈ 20 см (Польша); кривая 2 — измерителем типа ADA-120 (США) с электрической штыревой антенной; кривая 3 — измерителем типа ВВН-1100 производства США с ферритовой антенной длиной около 60 см; кривая 4 — измерителем типа LZM-5 с рамочным зондом RAL-5 и диаметром рамки ≈ 60 см (Польша—Германия).

Все четыре измерителя были прокалиброваны в образцовом электрическом поле волновода с поперечной электромагнитной волной (линии ТЕМ) напряженностью E (измерители 1 и 2) и в соответствую-

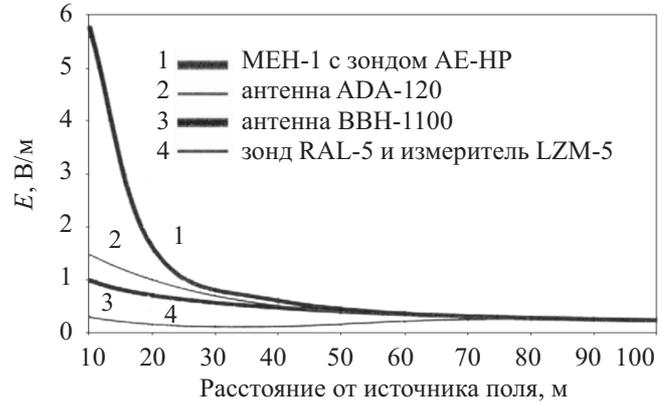


Рис. 4. Результаты измерения электрической составляющей произвольного источника ЭМП на низких частотах разными измерителями при различном расстоянии от источника

ющем образцовом магнитном поле напряженностью $H=E/120\pi$ (измерители 3 и 4).

Анализ результатов, представленных на рис. 4, показывает, что измерители 3 и 4 (с магнитными зондами) демонстрируют существенно меньшие значения напряженности поля по сравнению с измерителями 1 и 2. Объясняется это тем, что в ближнем электрическом поле $E/H > 120\pi$, а в ближнем магнитном поле $E/H < 120\pi$. На первый взгляд, измеритель типа ADA-120 (кривая 2 на рис. 4) должен был бы показать измеренное значение напряженности электрического поля, близкое к показаниям прибора МЕН-1 (кривая 1). Но в силу того, что зонд измерителя 2 имеет значительно большую длину, чем зонд прибора 1, и интегрирует значение E по своей длине, его показания существенно меньше. Самыми точными будут значения напряженности поля, полученные прибором МЕН-1 с коротким электрическим зондом [8]. Все эти особенности должны учитываться при измерениях ЭМП на близких расстояниях от источника.

Учитывая, что рынок измерительных приборов для метрологии ЭМП очень насыщен, измерительные приборы имеют разнообразные схемные решения, измеряют разные параметры поля и проходят калибровку в различных условиях, добиться существенного снижения погрешности измерений, особенно в ближнем поле, довольно сложно. Чтобы обеспечить правильность и сравнимость результатов измерений ЭМП, необходимо было бы оснастить все службы и метрологические лаборатории одинаковыми измерительными приборами. К сожалению, как видно из приведенных выше сведений, приборы, которыми сейчас пользуются не только в Украине, но и вне ее, имеют разные технические характеристики и не всегда отвечают существующим нормативным документам — как отечественным, так и международным.

Вышеупомянутый универсальный широкополосный измеритель напряженности поля типа МЕН-1 дает возможность проводить дистанционное измерение горизонтальной и вертикальной составляющих электрических и магнитных полей, а также исследовать влияние на структуру поля таких факторов как погода, здания, деревья, линии электропередач и т. п. С помощью такого измерителя на частоте

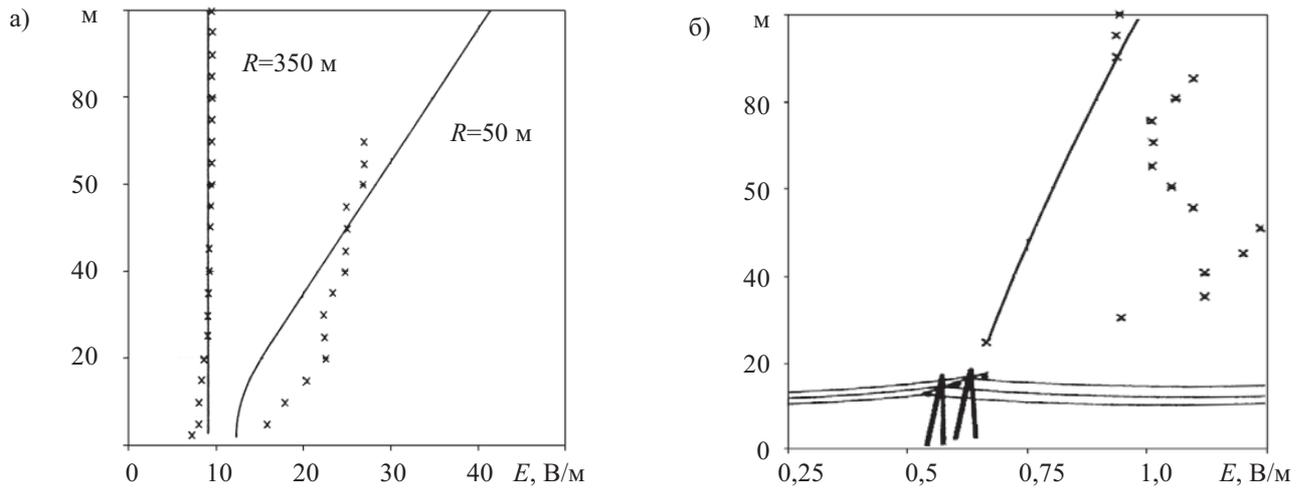


Рис. 5. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных измерений ЭМП для двух различных случаев конфигурации окружающей среды

200 кГц были измерены техногенные поля вблизи радиостанций. Электрические зонды поднимались на воздушном шаре на высоту до 100 м, а универсальный измеритель МЕН был расположен на земле. Передача измерительного сигнала от зонда к прибору МЕН осуществлялась по кабелю. Измерения проводились на двух вертикальных профилях на расстояниях R 50 и 350 м от антенной мачты радиостанции (рис. 5, а), а также на другом вертикальном профиле вблизи высоковольтной линии электропередачи (рис. 5, б).

На рис. 5 линии отвечают теоретическим расчетам напряженности ЭМП, а точки — результатам измерений. На расстояниях порядка 350 м (рис. 5, а) расчетные и экспериментальные данные близки между собой. На малом расстоянии от передающей антенны (50 м) наблюдается отличие между расчетом и измерением. Здесь влияние поверхности земли вызвало наклон кривой.

Влияние линии электропередачи на результаты измерений видно из рис. 5, б, на котором наблюдается существенный (в 1,5—2 раза) разброс результатов измерений по сравнению с теоретическими расчетами.

Аппаратурные возможности и нормативные документы

Безопасные для человека уровни техногенных электромагнитных полей определяются предельно допустимыми значениями. При этом существуют значительные отличия в значениях ПДУ в различных странах, в том числе в странах Восточной Европы [4]. Пример таких отличий для одной только сотовой телефонии, которая сейчас применяется повсеместно в мире, дан в табл. 2.

В Физико-механическом институте НАН Украины им. Г. В. Карпенко (ФМИ НАНУ) на протяжении последних 45 лет проводятся работы по созданию высокочувствительных датчиков для измерения преимущественно низкочастотных и инфранизкочастотных ЭМП применительно к задачам геофизики, космических исследований, технической диагностики объектов, прогнозу землетрясений по электромагнитным предвестникам, измерению техногенных полей

[12, 13]. Одной из последних разработок было создание информационно-измерительной системы „Каскад” для диагностики низкочастотных магнитных полей на пилотируемых космических станциях [14, 15].

Институт телекоммуникаций, телеинформатики и акустики (ИТГА) „Вроцлавской политехники” в течение свыше 30 лет занимается метрологией электромагнитных полей в широких частотном и динамическом диапазонах. Изначально было принято измерять в широкой полосе напряженность электрического поля электрически короткими симметричными дипольными антеннами, а напряженность магнитного поля — электрически малыми рамочными антеннами с детектированием сигнала на зажимах антенны или в непосредственной близости к ней [8].

Плодотворное сотрудничество ФМИ НАНУ, «Львовской политехники» и «Вроцлавской политехники» привело к разработке и созданию целого ряда приборов, устройств, первичных преобразователей, датчиков.

Однако, как было показано выше, корректное проведение измерения электромагнитного поля является вопросом сложным и требует специальных знаний не только в области метрологии, электродинамики и распространения волн, а также в области электромагнитной безопасности биоэкосистем.

Таблица 2

Значения ПДУ напряженности ЭМП для сотовой телефонии, принятые в некоторых странах (организациях)

| Страна (организация), год | ПДУ, Вт/м ² | |
|--|------------------------|----------|
| | 900 МГц | 1800 МГц |
| Великобритания, 1993 | 33 | 100 |
| Канада, 1993; США, 1997 | 6 | 10 |
| Международная комиссия по радиационной защите населения от неионизирующих излучений (ICNIRP), 1998 | 4,5 | 9 |
| Австралия, 1998 | 2 | 2 |
| Россия, 1988; Италия, 1999; Польша, 1998, 2003 | 0,1 | 0,1 |

При измерении напряженности ЭМП в условиях естественной среды важным является не только выбор методики измерений, измерительной аппаратуры, времени и условий измерений, но и интерпретация результатов измерений в соответствии с существующей нормативной базой, регламентирующей электромагнитную безопасность человека и окружающей среды. Поэтому отдельным направлением работы является разработка методических рекомендаций и проектов нормативной документации, которые позволяют эффективно проводить исследования техногенного электромагнитного загрязнения окружающей среды [4, 8, 11, 12, 14—16].

Вопросы определения ПДУ и методики измерения ЭМП расплывлены в многочисленных стандартах, нормативных актах, санитарных нормах и т. д. При проведении измерений, анализе полученных результатов приходится пользоваться большим количеством разных по содержанию НД, что часто приводит к неоднозначной интерпретации результатов измерений. Условия проведения измерений и их специфика не регламентированы в полной мере существующей НД, в особенности если речь идет о проведении измерений в непосредственной близости от источников ЭМП.

Выводы

Представленные материалы показывают, что теоретические расчеты параметров ЭМП вблизи источников не всегда совпадают с экспериментальными результатами, и поэтому окончательная оценка техногенного загрязнения рабочего места или окружающей среды возможна лишь на основе тщательных и корректных измерений специальной аппаратурой с учетом отмеченных выше особенностей.

Результаты измерений свидетельствуют о возможных значительных расхождениях при измерениях поля на близких от источника ЭМП расстояниях при использовании различных измерителей. По этой причине такие измерения должны проводиться специальными измерительными приборами, снабженными «точечными» датчиками *E*- и *H*-типа с полосами пропускания, соответствующими тем полосам, в которых нормативные документы регламентируют ПДУ ЭМП.

Такие измерители ЭМП должны иметь унифицированный измерительный канал (для уменьшения погрешностей измерения), специальный набор широкополосных датчиков *E*- и *H*-компонент ЭМП для каждого задаваемого диапазона частот и проходить метрологическую аттестацию в образцовом магнитном и электрическом полях.

Чтобы охрана среды от облучения техногенными ЭМП была результативной, в нормативных документах Украины должны быть однозначно сформулированы требования к оценке и интерпретации результатов измерений, к выбору методики и аппаратуры для проведения измерений. Все эти требования должны быть сосредоточены в одном документе и понятны для контрольно-инспекционных служб и других пользователей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Григорьев Ю. Г., Степанов В. С., Григорьев О. А., Меркулов А. В. Электромагнитная безопасность человека.— М.: Рос. нац. комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999.
2. Шевель Д. М. Электромагнитная безопасность.— Киев: Век+, НТИ, 2002.
3. Нічога В., Сопільник Л., Дуб П. Гармонізація стандартів східноєвропейських країн по гранично допустимих рівнях електромагнітних полів // Вимірювальна техніка та метрологія.— 2002.— Вип. 61.— С. 33—43.
4. Nichoga V., Dub P., Grudziński E. Peculiarities of European Union countries and Ukraine approach to estimation of technogenic electromagnetic fields influence on biosystems // International Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006).— Lviv-Slavsko, Ukraine.— 2006.— P. 11—14.
5. Нічога В., Сопільник Л., Грудзинский Э. и др. Сравнительная оценка предельно допустимых уровней влияния техногенных электромагнитных полей, нормированных в Украине, России и Польше // V Междунар. симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (ЭМС-2003).— Санкт-Петербург, Россия.— 2003.— С. 381—384.
6. Grudziński E., Nichoga V., Sopilnyk L. Aspekty aparaturowe w ochronie przed polami elektromagnetycznymi // Bulletin Wojskowej Akademii Technicznej. Elektronika i Optoelektronika.— 2003.— Vol. VII, N 4.— S. 55—70.
7. Nichoga V., Grudzicki E., Dub P., Isayev I. Calculation and measuring of electromagnetic fields in near zone // VIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED'2003).— Lviv, Ukraine.— 2003.— P. 202—207.
8. Grudzicki E. Laboratorium wzorców i metrologii pola elektromagnetycznego w świetle nowych unormowań // Przegląd Telekomunikacyjny.— 2001.— N 8—9.— S. 541—549.
9. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 2 stycznia 2001r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy // Dziennik Urzędowy.— 2001.— N 4.— S. 36—51.
10. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань.— Київ: МОЗ України, 1996.
11. Нічога В. О., Дуб П. Б., Грудзінський Е. М. Гранично допустимі рівні техногенних електромагнітних полів країн Європейського Союзу і України // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації.— 2006.— Вип. 557.— С. 134—140.
12. Нічога В. А. Измерение весьма слабых низкочастотных магнитных полей в геофизических и космических исследованиях // Отбор и передача информации. (Львов).— 1993.— Вип. 9 (85).— С. 70—77.
13. Нічога В. О. Розвиток досліджень по створенню високочутливих давачів змінних магнітних полів у відділі відбору і обробки стохастичних сигналів Фізико-механічного інституту НАНУ // Відбір і обробка інформації. (Львів).— 2004.— Вип. 21.— С. 40—46.
14. Нічога В., Шабельников В., Дуб П. та ін. Інформаційно-вимірювальна система «Каскад» для діагностики низькочастотних магнітних полів на космічній станції «Мир» // Там же.— 2003.— Вип. 18.— С. 46—52.
15. Nichoga V., Dub P., Sopilnyk L. et al. Usage of information-measuring system «Kaskad» for diagnostics of electromagnetic radiation of some objects // International Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2004).— Lviv-Slavsko, Ukraine.— 2004.— P. 536—539.
16. Нічога В. А., Сопільник Л. И., Дуб П. Б., Грудзинский Э. Техногенные низкочастотные электромагнитные поля и аварийность на автодорогах // Мат-лы 6-го междунар. симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии.— Санкт-Петербург.— 2005.— С. 293—296.

А. В. НАУМОВ

Россия, ООО «КВАР»

Перепечатано из журнала «Известия вузов. Материалы электронной техники», № 1`2007

ЕЩЕ РАЗ О РАЗВИТИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РЫНКЕ КРЕМНИЕВОГО СЫРЬЯ В 2007—2010 гг.

На основе публикаций последних лет продолжен (см. Наумов А. В. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2006, № 4, с. 3—8) обзор современных планов производства фотоэлектрических преобразователей, рассмотрены разные возможные сценарии развития отрасли до 2010 г.

За последние два года кардинально изменилось положение в солнечной энергетике. В 2005 г. произведено фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) суммарной мощностью 1656 МВт (в том числе 1500 МВт на кремнии, 165 МВт на других материалах; рост объема производства составил 30 % по отношению к 2004 г.). В 2006 г. произведено 2400 МВт (рост производства — 45 %). После 2004—2005 гг. солнечная индустрия стала развиваться быстрыми темпами. Общий валовый доход отрасли (с учетом внутриотраслевых продаж) в 2005 г. составил ~12 млрд. дол. США, а общая условно чистая (до уплаты налогов) прибыль — ~2,7 млрд. дол. США. В 2006 г. общий валовый доход составил ~19 млрд. дол. США, а условно чистая прибыль — ~5,7 млрд. дол. США.

Следствием этого бума явился сохраняющийся до настоящего времени дефицит исходного сырья для производства фотоэлектрических преобразователей — поликристаллического кремния [1—4].

Данная работа является продолжением ранее опубликованной [5] и ставит целью рассмотрение разных сценариев развития солнечной энергетике на период 2007—2010 гг. Также предпринята попытка определения оптимальных сроков для реализации отечественных проектов развития производства поликристаллического кремния.

Общие положения

Известно, что в настоящее время все произведенные ФЭП можно разделить на две категории:

- ФЭП на основе кристаллического Si — монокристаллические слитки кремния (~35 % всех ФЭП), мультикристаллические слитки кремния (~56 %) и ленты кремния (~4 %);
- ФЭП на основе прочих материалов — пленки α -Si, CdTe, CuInSe₂ (или CIS) ~5—8 % ФЭП.

Более чем на 90 % солнечная энергетика базируется на полупроводниковом кремнии и в силу этого является частью электронной промышленности, имея общую с ней базу в виде поликристаллического кремния («электронного» или «солнечного» качества). Удельный вес «солнечного» кремния в общем выпуске поликристаллического кремния растет, и, по-видимому, общая ситуация еще долго будет определяться наложением циклов потребления «электронного» и «солнечного» кремния.

Большинство прогнозов развития спроса и потребления на поликристаллический кремний до 2010—2011 гг. строится исходя из следующих факторов:

- ожидаемых темпов роста потребления электронного поликристаллического кремния;
- ожидаемых темпов роста потребления солнечного поликристаллического кремния;
- заявленных производителями темпов роста выпуска поликристаллического кремния.

На рис. 1 приведен типичный прогноз развития рынка [1]. Недостатком такого подхода является то, что нельзя ответить на вопрос: не будет ли тот прогнозируемый дисбаланс, который должен сохраниться в 2010—2011 гг., восполнен какими-либо иными способами? Например, снижением норм расхода на производство ФЭП на основе кристалли-

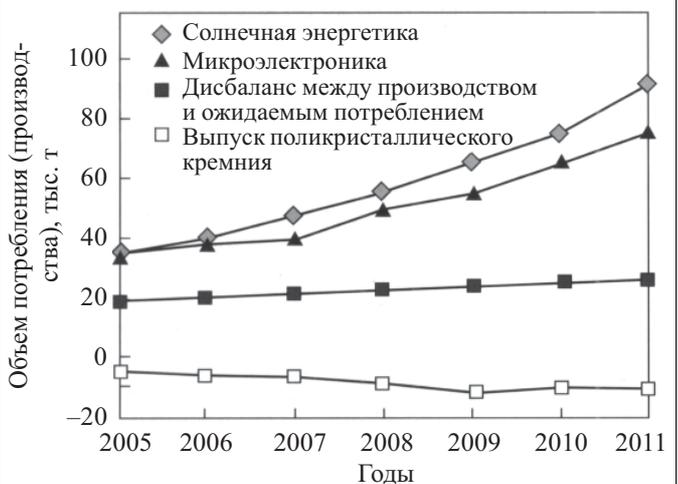


Рис. 1. Оценка развития потребности рынков электроники и солнечной энергетике и выпуска поликристаллического кремния (источник — SINTIF Materials, ECN)

ческого кремния, ростом производства ФЭП на основе иных материалов, появлением дополнительного количества кремния на рынке от новых производителей и пр. Если упомянутый дисбаланс будет восполнен такими источниками, то это означает, что рынок солнечной энергетики в целом окажется сбалансированным и цена на поликристаллический кремний пойдет вниз.

Поэтому, рассматривая возможные пути развития солнечной энергетики, необходимо также учесть следующее:

- рост предложения поликристаллического кремния из всех теоретически возможных источников;
- прогресс в области расхода кремния для ФЭП на кристаллической основе;
- перспективы развития других ФЭП (тонкопленочные на CdTe, CuInSe₂, A^{III}B^V).

Это позволит, оценив ожидаемый выпуск поликремния (солнечного и электронного) к 2010 г., рассчитать суммарный возможный выпуск ФЭП и сравнить эту величину с ранее достигнутой динамикой развития солнечной энергетики. Таким образом, косвенно можно будет оценить, останется ли рынок сырья несбалансированным или нет.

Динамика развития электронной промышленности и солнечной энергетики

Оптимистичный взгляд. Во-первых, если в период 2007—2010 гг. темп роста электронной промышленности будет превышать 15 % в год, то никаких усилий производителей поликристаллического кремния не хватит для того, чтобы удовлетворить этот темп и одновременно сохранить рост солнечной энергетики. Впрочем, электронная промышленность, вероятнее всего, вошла в фазу завершения очередного цикла развития, и этот вариант маловероятен. Кроме того, действие известного закона Мура, согласно которому число полевых транзисторов в интегральных схемах на единичный кристалл увеличивается экспоненциально со временем, удваиваясь каждые 2—3 года, приводит к тому, что потребление поликристаллического кремния для электроники растет медленнее, чем развитие самой электроники в целом [6].

Во-вторых, рынок солнечной энергетики, по мнению аналитиков [4], в период 2007—2010 гг. останется далеким от насыщения: сегодня общий спрос на ФЭП, производящие электрическую энергию по цене 3,50—4,50 дол. США/Вт, составляет 5,0 ГВт при производстве в 2006 г. ~2,4 ГВт. В 2008 г. ожидается спрос от 8,0 до 10,0 ГВт при ожидаемом производстве 5,0 ГВт. Перепроизводство рынку до 2010 г., вероятно, не грозит.

Пессимистичный взгляд. Существует вероятность того, что в 2007—2010 гг. и глобальная экономика, и электронная промышленность переживут спад. Если в рассматриваемый период произойдет резкий спад электронной промышленности, подобный спаду 1997 и 2001 гг., то на рынке солнечного поликристаллического кремния появится предложение материала в количестве, достаточном для реализации любой динамики роста солнечной энергетики. Од-

нако в случае глобального спада электронной промышленности конечная продукция солнечной энергетики — солнечные станции — вряд ли найдет своих покупателей [2, 3, 5].

Все дальнейшие рассуждения исходят из умеренного прогноза развития электронной промышленности (главное снижение темпов роста до 3—4 % в год) и «оптимистического» прогноза развития солнечной энергетики (рост производства сдерживается только предложением сырья).

Рост выпуска поликристаллического кремния

Все существующие производители поликристаллического кремния — HEMLOCK, Wacker Chemie, MEMC (США и Италия), Tokuyama Soda и другие — объявили о планах существенного роста объемов выпуска. Если в 2005 г. (по разным данным) было произведено 30—34 тыс. т поликристаллического кремния, то к 2010 г. общий выпуск этого материала ожидается в пределах от 85 до 120 тыс. т (рост в ~2,7—3,5 раза). Различные варианты прогнозов роста производства поликристаллического кремния приведены на рис. 2 [7—9].

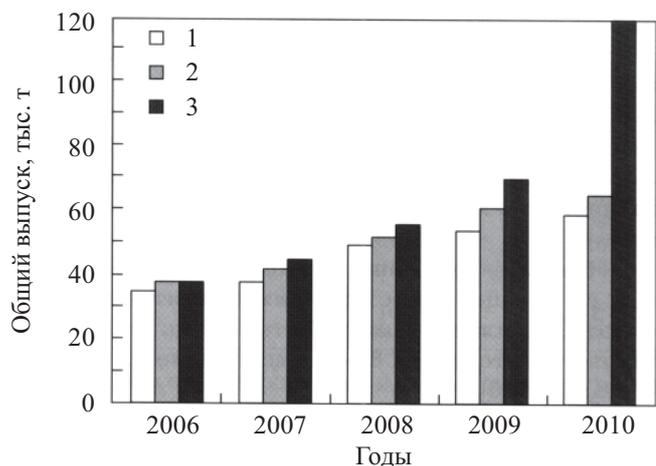


Рис. 2. Производство поликристаллического кремния в 2006 г. и прогноз до 2010 г.:

1 — пессимистичный прогноз; 2 — умеренный; 3 — оптимистичный

Пытаясь более точно определить ситуацию, очевидно, стоит учесть следующие соображения.

1. *Сырьевая база.* Для создания предприятия для выпуска поликристаллического кремния традиционными методами нужны только время (12—36 мес.) и деньги (250—500 млн. дол. США). Сырье для производства поликристаллического кремния — это кремний, который является вторым по распространенности элементом на Земле. Технический (металлургический) кремний ($Si_{mg} > 98,5 \%$), получаемый восстановлением SiO_2 углеродом по реакции $SiO_2 + C \rightarrow Si_{mg} + CO_2$, служит исходным сырьем.

Если принять, что к 2010 г. будет произведено по традиционным технологиям ~65—70 тыс. т поликристаллического кремния, то для обеспечения такого количества сырьем потребуется увеличить производство $SiHCl_3$ (ТХС) в ~4—5 раз, SiH_4 (МС) — в ~2—3 раза (предполагается, что ~70 % поли-

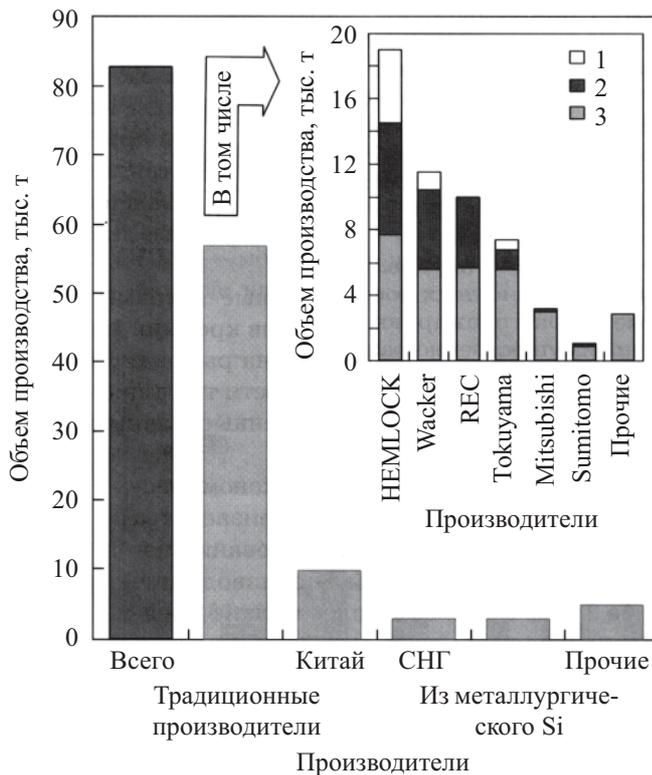


Рис. 3. Прогноз производства поликристаллического кремния к 2010 г. (по различным источникам): 1 — существующее производство; 2 — вводимое с 2008 г.; 3 — вводимое с 2010 г.

кристаллического кремния будет производиться водородным восстановлением ТХС, а ~30 % — пиролизом МС). Задача представляется вполне осуществимой, так как нет принципиальных трудностей для обеспечения сырьевой базой [5—7].

2. Традиционные производители и новые участники. Основным производителям поликремния из ТХС и МС — HEMLOCK, Wacker Chemie, MEMC, Tokuyama Soda, REC (SGS+ASiMi), Mitsubishi и другим — принадлежит сегодня ~90 % всего мирового рынка поликристаллического кремния. Согласно планам развития их производства (рис. 3, вставка), к 2010 г. основные производители выпустят ~57—60 тыс. т поликристаллического кремния. Эту цифру можно принять достаточно точной, так как речь идет о проектах высокой степени готовности.

Сложнее оценить, сколько поликремния новые производители добавят к этой величине к 2010 г.

Из возможных новых производителей поликристаллического кремния называют следующие страны:

— Китай — ожидания расходятся от 5 тыс. т к 2010 г., по оценкам сторонних аналитиков, до 14 тыс. т, по планам самого Китая (табл. 1). Представляется, что цифра 8—10 тыс. т является вполне реальной [5];

— страны СНГ — после того, как бум поликристаллического кремния стал очевиден для собственников химических и электронных производств, намечается ряд проектов по восстановлению старых производств (Подольский ХМЗ, ЗТМК, Донецкий ХМЗ, Таш-Кумырский ХМЗ), завершению уже начатых (г. Железнодорожск) или созданию новых. Так, немецкая фирма Folgat в 2006 г. получила разрешение Антимонопольного комитета Украины на создание консорциума по производству поликристаллического кремния на Украине. Представляется, что большая часть этих проектов будет завершена после 2010 г., для 2010 г. цифра 1—2 тыс. т является вполне реальной;

— прочие — неудовлетворенные темпами развития традиционных поставщиков кремния, многие новые игроки планируют выйти на рынок (используя преимущественно разновидности традиционных технологий). Некоторые объявленные планы приведены в табл. 2.

Таблица 1

Планы развития производства поликристаллического кремния в Китае до 2010 г.

| Компания | Объем производства, т/год | |
|---|---------------------------|----------|
| | 1-я фаза | 2-я фаза |
| Eimei Semiconductor Materials (Emeishan) | 100 (в 2005 г.) | 220 |
| China Silicon High-Tech Co. Ltd. (Luoyang) | 300 (в 2005 г.) | 3000 |
| Sichuan Xingguang Silicon Technology (Leshan) | 1000 (в 2005 г.) | 3000 |
| Ningxia Sunshine Silicon (Shizushan) | 1000 | 4000 |
| CSG Holding Co. (Yichang) | 1500 | 4500 |
| Yunnan Qujing Aixingui Ltd. (Qujing) | 3000 | 10000 |
| Suntech Power Co. Ltd. (Wanzhou) | 3000 | 6000 |

Таблица 2

Новые проекты производства поликристаллического кремния в мире

| Компания | Страна/Партнеры | Заявленная мощность, тыс. т | Примечание |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|
| Joint Solar Silicon GmbH | Германия/SolarWorld, Degusa | 0,85 к 2008 г. | Технология — полунепрерывный пиролиз моносилана |
| Isofoton | Испания/Правительство, Endesa | 2,5 | — |
| DC Chemical | Корея/SunPower | 3,0 | Начало в 2008 г. |
| ARISE Technologies | Канада/Инвестиционные фонды | 2,0 к 2010 г. | 200 т — опытный проект в 2008 г. |
| Hoku Scientific | США/Инвестиционные фонды | 1,5 к 2008 г. | Расположение — Сингапур |
| M. Setek | Япония/E-Top | 3,0 к 2010 г. | — |

Производители «солнечного» кремния из металлургического

| Компания | Страна | Стадия готовности производства | Производительность, т/год | | Время реализации, год |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|----------|-----------------------|
| | | | на сегодня | плановая | |
| JFE Steel | Япония | Полупромышленная | 100 | 800—1000 | 2007 |
| ELKEM Solar | Норвегия | Полупромышленная | 100—250 | 5000 | 2008 |
| Dow Corning Solar Solutions | США | Полупромышленная | 1000(?) | 5000 | 2010 |
| Scheuten Solar | Нидерланды | Опытная | — | — | 2008 |
| GT Equipment | США | Лабораторная | — | — | — |
| Solsilk Development Co. | Нидерланды | Лабораторная | — | 100 | 2007 |
| Solarvalue Production | Германия/Словения | Лабораторная | — | 5000 | 2010 |

Видимо, смягчатся также экономические ограничения на масштаб производства поликремния. Право на существование получают не только гиганты, производящие свыше 2 тыс. т/год, но и более мелкие предприятия производительностью ~500 т/год. Ситуация осложняется тем, что производство поликристаллического кремния не продается «под ключ», поэтому новым производителям потребуется больше времени для пусковых работ, но можно предположить, что еще 3 тыс. т добавится от новых производителей.

3. *Производители солнечного кремния из металлургического.* Многолетние исследования возможности производства поликристаллического кремния солнечного качества непосредственно очисткой металлургического Si_{mg}, минуя газовую фазу, стали переходить в опытно-промышленную стадию. В 2006 г. Dow Corning Solar Solutions Group объявила о разработке солнечного поликристаллического кремния из металлургического. Лидерами, видимо, останутся по-прежнему норвежское предприятие Elkem Solar AS и японская компания Japan Ferrous Engineering (JFE Steel, бывшая Kawasaki Steel). Elkem Solar, занимаясь проблемой с 1980 г., в 2004 г. получила кремний солнечного качества, произвела и исследовала ФЭП на мультикристаллических пластинах, в 2006 г. — на монокристаллических пластинах. В планах предприятия — в 2007 г. выйти на промышленное производство. JFE Steel, занимаясь проблемой с 1996 г., в 2001 г. выпустила первые 200 т солнечного поликристаллического кремния, с 2005 г. выпуск вырос до 800 т/год. Во всех случаях удалось получить ФЭП с КПД 14—16 %. В настоящее время идут полупромышленные испытания таких ФЭП. Объявленные планы приведены в табл. 3.

По-видимому, до 2010 г. нетрадиционный поликристаллический кремний не станет сколько-нибудь заметным источником сырья для солнечной энергетики, но 3 тыс. т даже осторожные аналитики принимают для расчетов [3, 4].

Таким образом, по оценкам, общее количество поликристаллического кремния, который будет произведен к 2010 г., составит ~75—80 тыс. т (рис. 3), из которых 25—30 тыс. т пойдут для электронной промышленности, а ~50 тыс. т — для солнечной [1—5].

Прогресс в области использования монокристаллического кремния

Производители пластин, получаемых резкой монокристаллических слитков, выращенных по методу Чохральского, или мультикристаллических слитков, уменьшают толщину пластин при резке. Ожидается, что к 2010 г. большинство производителей достигнут уровня 220—240 мкм вместо ~300 мкм на сегодняшний день.

Производители пластин, полученных из лент кремния, оказались в более выигрышной позиции в условиях дефицита 2005—2006 гг. Выращенные из расплава ленты кремния толщиной ~300 мкм скрайбируют лазером на пластины, сразу пригодные для последующих операций формирования ФЭП, избегая операции резки слитка на пластины. Такие технологии требуют меньшего количества кремния (~60 % от традиционного). Ленты кремния наиболее часто выращивают следующими методами [10]:

- рост ленты кремния из расплава — рост ленты с краевой поддержкой, в котором роль боковых дендритов играют поддерживающие струны из другого материала («string ribbon»);

- рост полого многогранника кремния методом Степанова из расплава с помощью капиллярной фильеры (метод EFG — edge defined film fed growth).

Так, компания Evergreen Solar (США), использующая метод «string ribbon», достигла выпуска 50 МВт/год в 2006 г. Компания RWE Schott Solar, использующая EFG-метод, выращивает полые восьмигранники, которые режет на пластины. Компания произвела более 100 МВт/год пластин и модулей в 2006 г. Производители лент также опережающими темпами идут по пути снижения толщины вытягиваемых лент. Ожидается, что достигнутый на сегодня уровень 300 мкм снизится до 150 мкм уже в 2007 г. [4].

Увеличение удельного веса тонких кремниевых лент в общем выпуске пластин приведет к снижению «средней» толщины пластины с ~260 мкм в 2005 г. до 175 мкм в 2010 г. Это, наряду с другими факторами, приведет к снижению нормы расхода кремния на 1 Вт с 11,5 г/Вт в 2006 г. до 7,0 г/Вт к 2010 г. Если в 2005—2006 гг. снижение до этой величины ожидалось лишь в самых смелых прогнозах, то сегодня большинство экспертов считают расход кремния 7,0 г/Вт вполне достижимой величиной [3, 4].

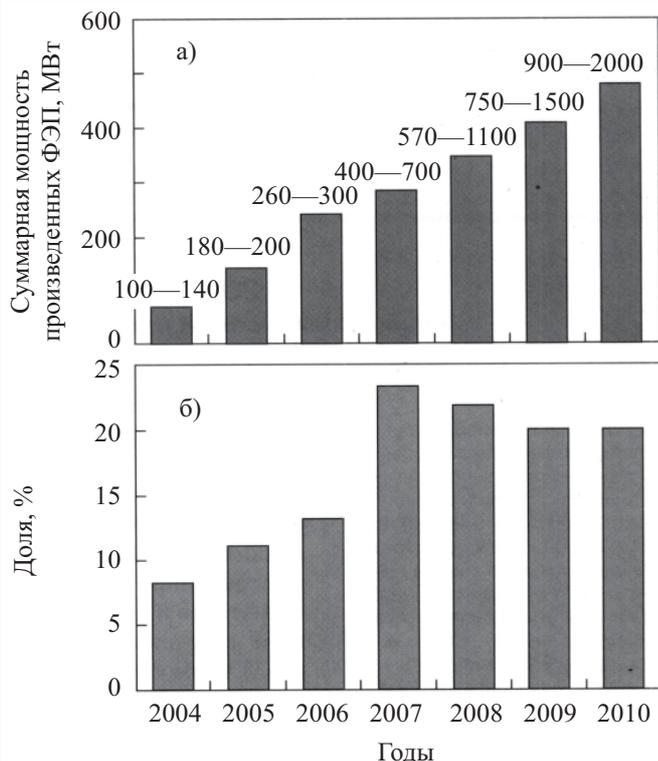


Рис. 4. Ожидаемая динамика производства ФЭП на прочих материалах (а) и доля этих приборов на общем «солнечном» рынке (б).

Источники — CLSA ASIA-Pasific Markets, Piper Jaffray Solar Ind.

Перспективы использования других материалов

Производители ФЭП на основе других материалов (аморфный Si, CdTe, CuInSe₂) в условиях дефицита кремния также получают шанс укрепить свои позиции. В первую очередь это фирмы: Bangkok Solar (Таиланд), Solar Cells Ltd. (Хорватия), выпускающие модули на аморфном кремнии; Wuth Solar (Германия) — модули на CuInSe₂; First Solar (США) — модули на CdTe; Telecom STV (Россия) — модули на A^{III}B^V с концентратором и другие.

В целом, по оценкам аналитиков [3, 4], производители ФЭП на некристаллической основе увеличат свои мощности (рис. 4, а). Так, в 2006 г. калифорнийская компания Nanosolar объявила об инвестировании 100 млн. дол. США в строительство завода по выпуску 200 млн. штук ФЭП в год общей мощностью 430 МВт на основе CuInSe₂-технологии.

Это означает, что до сих пор крупнейший в мире завод компании Sharp, выпустивший в 2005 г. традиционных Si-ФЭП на 427,5 МВт, окажется на втором месте. Однако в общей картине солнечной индустрии доля новых материалов до 2010 г. существенно не вырастет (см. рис. 4, б) из-за опережающего роста традиционных ФЭП [6—8].

Заключение

Представленный умеренно оптимистичный сценарий предполагает, что к 2010 г. из разных источников будет произведено 78—80 тыс. т поликристаллического кремния, из которых 27—30 тыс. т пойдет для электронной промышленности, а ~50 тыс. т — для солнечной, кроме того, ~10 % от электронной промышленности — в виде скрапа, т. е. ~3 тыс. т [2—4, 8].

Это, в свою очередь, означает, что из данного количества сырья при норме расхода кремния 7 г/Вт будет получено ФЭП суммарной мощностью ~7,5 ГВт. К этому добавится ~1,5 ГВт от ФЭП на основе других материалов, что составит в сумме 9,0 ГВт. Рост в 5,4 раза по сравнению с 2005 г. равен темпу роста солнечной энергетики за предыдущие 5 лет (с 2000 по 2005 гг. — в 5,7 раза). В таком случае ажиотажный спрос на сырье должен к 2010 г. заметно уменьшиться, хотя и после 2010 г. в целом рынок еще долго будет оставаться «рынком продавцов», т. е. рынком, где цены определяют производители поликристаллического кремния.

Для реализации отечественных проектов строительства или восстановления производства поликремния, видимо, оптимальным является период до ~2010—2011 гг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

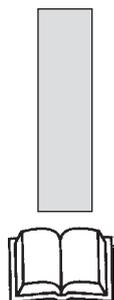
1. European Photovoltaic Projects 1999—2002 // Europ. Comm. Unit A-3. 2003. P. 194. (www.europa.eu.net).
2. Rogol M. // CLSA Asia-Pacific Markets. 2004. P. 76.
3. Rogol M. // Ibid. 2005. P. 85. (www.clsa.com).
4. Rogol M. // Ibid. 2006. P. 40. (www.photon.com).
5. Наумов А. В. // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. 2006. № 2. С. 29—35.
6. Двуреченский А. В. // Там же. 2006. № 2. С. 72—74.
7. Peter K., Kopecek R., Pernau T. et al. // Mater. 31 IEEE PVSC.— Lake Buena (Florida), 2005.— P. 152—156.
8. Mater. Third Solar Silicon Conf.— Munich (Germany), 2006.— P. 205.
9. Mater. «SEMICON».— Munich (Germany), 2006.— P. 157.
10. Sachs W. M., Ely D., Serdy J. // J. Crystal Growth. 1987. N 82. P. 117—125.

НОВЫЕ КНИГИ

Бортовые интеллектуальные системы. Ч. 2. Корабельные системы.— М.: Радиотехника, 2006.— 80 с.

Рассмотрены технологии искусственного интеллекта и их приложения при создании бортовых корабельных интеллектуальных систем обеспечения мореходности, непотопляемости и управления в сложных ситуациях.

Для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся проблемами создания искусственного интеллекта.



Д. т. н. В. М. ШАРАПОВ, д. т. н. А. Н. ГУРЖИЙ,
С. А. ФИЛИМОНОВ

Украина, Черкасский государственный технологический университет
E-mail: v_sharapov@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
19.02—02.07 2007 г.

Оппонент к. т. н. М. В. ЯДРОВА
(ОНПУ, г. Одесса)

ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ СКАНЕР НА БИМОРФНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТАХ ДЛЯ ЗОНДОВОГО НАНОМИКРОСКОПА

Предложена и исследована конструкция пьезокерамического сканера для наномикроскопов на основе биморфных пьезоэлементов. Построена и исследована модель сканера при помощи программы MicroCap 7.0.

Сканирующий зондовый микроскоп предназначен для измерения с высоким разрешением и анализа микро- и субмикрорельефа поверхностей, объектов микро- и нанометрового размерного диапазона. Области его применения — физика твердого тела, тонкопленочные технологии, нанотехнологии, микро- и нанотрибология, микроэлектроника, оптика, испытательные системы прецизионной механики, магнитной записи, вакуумной техники и др. [1, 2].

Принцип работы сканирующего зондового микроскопа удобно рассмотреть на примере атомно-силового микроскопа, в котором используется силовое взаимодействие атомов между зондом и исследуемым образцом. Для регистрации силового взаимодействия используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Радиус кривизны зонда составляет величину порядка десятков нанометров. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью [1, 2].

Конструкция атомно-силового микроскопа (рис. 1) содержит зонд, кантилевер (консоль), пьезокерамический сканер для перемещения зонда или образца, систему отслеживания отклонения зонда, электрон-

ную цепь обратной связи и компьютер для управления процессом сканирования, получения и обработки изображений.

Атомно-силовой микроскоп представляет собой электромеханическую систему с отрицательной обратной связью. Система обратной связи поддерживает постоянное расстояние между зондом и исследуемым образцом. Контроль расстояния между зондом и поверхностью осуществляется посредством перемещения вдоль оси Z пьезокерамического сканера, на котором расположен образец. То есть сканер здесь является одним из основных элементов, который существенно влияет на качество получаемого изображения.

Широкое распространение получили сканеры на основе биморфных пьезоэлементов (БПЭ), состоящих из пары пьезоэлементов или из пьезоэлемента и металлической пластины, соединенных между собой с помощью эпоксидного клея или легкоплавкого припоя. Биморфные пьезоэлементы, состоящие из двух пьезоэлементов, были названы симметричными. (Здесь речь идет о симметрии материала биморфного элемента относительно нейтральной плоскости при его изгибе.) Биморфные пьезоэлементы, состоящие из пьезоэлемента и металлической пластины, по этим же соображениям были названы асимметричными. Асимметричные биморфные преобразователи отличаются более простой технологией изготовления и большей механической прочностью [3].

Цель настоящей работы — построение и исследование трехкоординатного пьезокерамического сканера на основе биморфных пьезоэлементов. Предложенная авторами конструкция такого сканера изображена на рис. 2 [4, 5].

Четыре биморфных пьезоэлемента 1, 4, 7, 12, состоящие из металлических пластин 11 и пьезоэлементов 13, соединены между собой на основании 14. Парно эти биморфные пьезоэлементы 12, 4 и 1, 7 обеспечивают перемещение биморфного пьезоэлемента 6 по координатам X и Y . БПЭ 6 предназначен для перемещения исследуемого образца или зонда (на рис. 2 не показан) по координате Z . Биморфный пьезоэлемент 6, состоящий из металлической пластины 2 и пьезоэлемента 9, закреплен на биморфных пьезоэлементах 1, 4, 7, 12 с помощью упругих пластин 3, 5, 8, 10, имеющих различную жесткость по координатам X, Y, Z [4, 5].

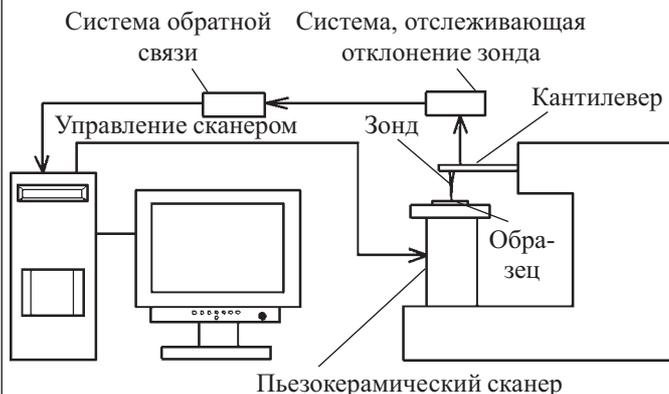


Рис. 1. Схема сканирующего атомно-силового микроскопа

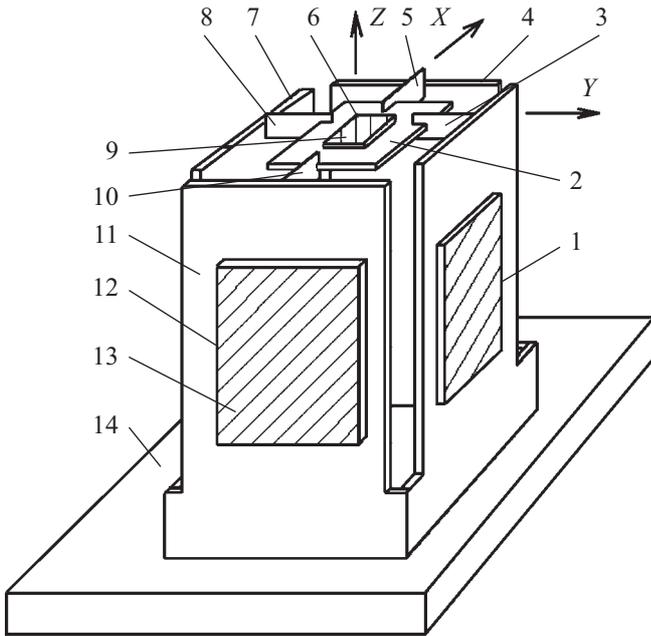


Рис. 2. Трехкоординатный пьезокерамический сканер: 1, 4, 7, 12 — БПЭ для перемещения по координатам X и Y ; 2, 11 — металлические пластины; 3, 5, 8, 10 — упругие элементы; 6 — БПЭ для перемещения по оси Z ; 9, 13 — пьезоэлементы; 14 — основание

Сканер работает следующим образом. При подаче пилообразного напряжения на два противоположных биморфных пьезоэлемента происходит синфазное перемещение этих элементов, которые используются для сканирования по осям X и Y . При подаче пилообразного напряжения на биморфный пьезоэлемент 6 , на котором закреплен объект или зонд, осуществляются перемещения по оси Z , т. е. конструкция позволяет выполнять перемещения по всем трем координатам.

Соединение биморфных элементов через упругие элементы $3, 5, 8, 10$, жесткость которых существенно отличается в зависимости от того, по какой координате происходит движение, позволило уменьшить влияние колебаний по одной из координат на перемещение по другим координатам. Следовательно

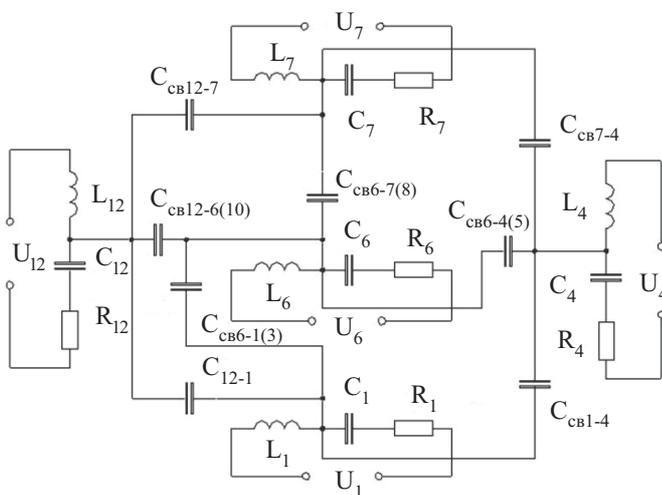


Рис. 3. Уточненная модель трехкоординатного пьезокерамического сканера на основе биморфных пьезоэлементов

но, получаемое с помощью сканера изображение является более адекватным реальному.

Для построения модели используется метод электромеханических аналогий [6]. Эквивалентная электрическая схема пьезокерамического сканера на основе биморфных пьезоэлементов приведена на рис. 3. Числовые индексы на этой схеме соответствуют позициям на рис. 2. Например, $C_{св\ 12-6(10)}$ характеризует связь БПЭ 12 с БПЭ 6 через упругий элемент 10.

Для расчетов модели использовалась программа MicroCap 7.0.

Определялось влияние колебаний БПЭ 12 на БПЭ 1, 4, 6, т. к. эти связи вызывают нежелательные перемещения зонда (объекта) по другим координатам. При этом на БПЭ 12 подавалось напряжение U_1 в диапазоне 2—3,5 кГц (область резонанса БПЭ 12), а с БПЭ 1, 4, 6 снималось напряжение в этом же диапазоне.

На рис. 4, а показаны расчетные амплитудно-частотные характеристики биморфных пьезоэлементов сканера, а на рис. 4, б — результаты физических экспериментов. Результаты моделирования показыва-

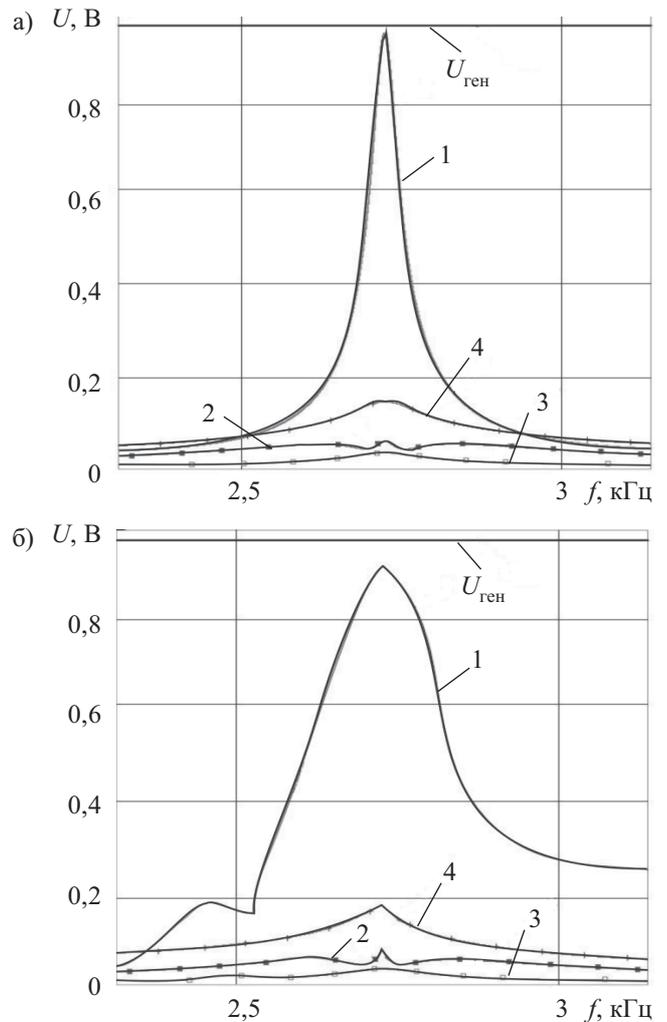


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики биморфных пьезоэлементов сканера:

а — результаты компьютерного моделирования; б — экспериментальные результаты:

1 — БПЭ 12; 2 — БПЭ 1; 3 — БПЭ 4; 4 — БПЭ 6

ют хорошее совпадение с экспериментальными результатами.

Из рисунка видно, что на резонансной частоте 2,7 кГц уровень связи между биморфными пьезоэлементами не превышает -20 дБ. В дорезонансной и послерезонансной областях этот уровень составляет около 25 дБ.

Выводы

Как показали исследования пьезокерамического сканера для сканирующих зондовых микроскопов на основе биморфных пьезоэлементов, уровень связи между биморфными пьезоэлементами, которые создают колебания по координатам X, Y, Z, не превышает -20 дБ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии.— М.: Техносфера, 2004.
2. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю. А. Чаплыгина.— М.: Техносфера, 2005.
3. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики.— М.: Техносфера, 2006.
4. Пат. 22600U України. П'езосканер / В. М. Шарапов, А. М. Гуржій, С. О. Філімонов.— 2007.— Бюл. № 5.
5. Шарапов В. М., Гуржій А. Н., Філімонов С. А. Трехкоординатные пьезокерамические сканеры для зондовых наномикроскопов на основе компланарных биморфных пьезоэлементов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.— 2006.— № 4.— С. 80—83.
6. Островский Л. А. Основы общей теории электроизмерительных устройств.— Л.: Энергия, 1971.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



AISS-AUTOMATICА-2007

АВТОМАТИЗАЦИЯ: ПРИМЕНЕНИЕ, ИННОВАЦИИ, РЕШЕНИЯ, СИСТЕМЫ



28-30 ноября КИЕВ

www.aisss-automatica.com.ua



МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:
КИЕВ ЭКСПОПЛАЗА
ул. Салютная 2-Б.г. Киев, Украина





К. т. н. А. А. АЛТУХОВ, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,
А. В. ШУСТРОВ

Россия, г. Москва, ООО "УралАлмазИнвест";
г. Фрязино, Институт радиотехники и электроники
E-mail: info@ural-almaz.ru, alexandr-mityagin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
13.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Н. МАКСИМЕНКО
(НИИ "Укрналит", г. Киев)

«ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС» НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ

Химический сенсор, основанный на матричной полисенсорной структуре, содержит 16 газовых моносенсоров, компьютерную программу контроля и математическую программу обработки результатов.

В последние годы на смену традиционным методам анализа многокомпонентных газовых смесей, таким как хромато-масс-спектрометрия и лазерная спектроскопия в видимой и ИК-области спектра, приходят новые. Все большее распространение получают приборы типа «электронный нос». Это абсолютно новый тип электронного анализатора паров различных веществ. В основе его работы лежит мультисенсорная система, представляющая собой матрицу датчиков — сенсоров, выполненных по микроэлектронной технологии. По сути прибор имитирует работу органа обоняния живых существ. Чувствительность анализаторов запаха такого прибора значительно превосходит чувствительность газоанализаторов, основанных на традиционных технологиях, и достигает чувствительности человеческого носа.

Прибор может применяться в следующих областях:

- обнаружение следов токсичных, ядовитых и опасных реагентов;
- контроль состава воздушной среды помещений, качества газоздушных выбросов промышленных предприятий;
- поиск пропавших людей в завалах и труднодоступных объектах (например развалы домов после землетрясений и техногенных катастроф);
- контроль утечек природного газа и других опасных жидких и газообразных веществ;
- обнаружение вредных примесей или загрязнителей в воздухе, грунтовых водах или водоемах;
- обнаружение взрывчатых веществ и наркотиков.

В целом «электронные носы» в перспективе смогут частично заменить сложное лабораторное оборудование и существенно упростить и ускорить процесс проведения анализа газовых смесей.

Экспериментальные результаты

Принцип действия прибора типа «электронный нос» сводится к следующему. В приборе использу-

ется полупроводниковый микрочип площадью в несколько квадратных миллиметров. Сенсоры, размещенные на таком чипе, состоят из множества чувствительных элементов (матрица элементарных сенсоров), служащих для захвата отдельных молекул анализируемой газовой смеси. Данные с сенсоров передаются на обработку в компьютер, который и определяет химический состав смеси.

Технически «электронный нос» представляет собой комплексную систему, в которую входят несколько базовых функциональных узлов, работающих в режиме периодического восприятия запахов:

- система пробоотбора и пробоподготовки;
- матрица сенсоров с заданными свойствами;
- блок процессорной обработки сигналов сенсоров.

Анализируемая проба засасывается воздушным насосом через входной патрубок в термостатируемое кюветное отделение с установленной в нем матрицей сенсоров («моносенсоров»), причем последовательный опрос показаний каждого сенсора дает в результате сложную многомерную картину («образ», гистограмму) величин их откликов (показаний), которые по сложному алгоритму обрабатываются микропроцессором.

Созданные в компании «УралАлмазИнвест» микроэлектронные газочувствительные сенсоры (ГЧС) [1] можно объединять в сложные мультисенсорные системы средствами интегральной технологии микроэлектроники. Действующие образцы многоэлементных интегральных ГЧС с высокой надежностью и достоверностью определяют наличие в воздухе малых концентраций искомым примесей и преобразуют их в электрический сигнал тока/напряжения. Сенсоры обладают высоким быстродействием (менее 2 мс) и предназначены для использования в любых системах

Параметры микроэлектронных газочувствительных сенсоров

| | |
|--|--------------------------------------|
| Предельная чувствительность, г/см ³ | 10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹² |
| Быстродействие, мс | 2 |
| Напряжение питания, В | до 2 |
| Потребляемая мощность, Вт | до 0,04 |
| Размеры, не более, мм | 3×3 |
| Масса, г | менее 2,0 |

контроля летучих компонентов и газовой среды. В таблице приведены основные параметры микроэлектронных газочувствительных сенсоров.

На рис. 1 показана схема многоэлементного интегрального ГЧС. Здесь в 64-выводной металлокерамический корпус матрицы устанавливается кристалл

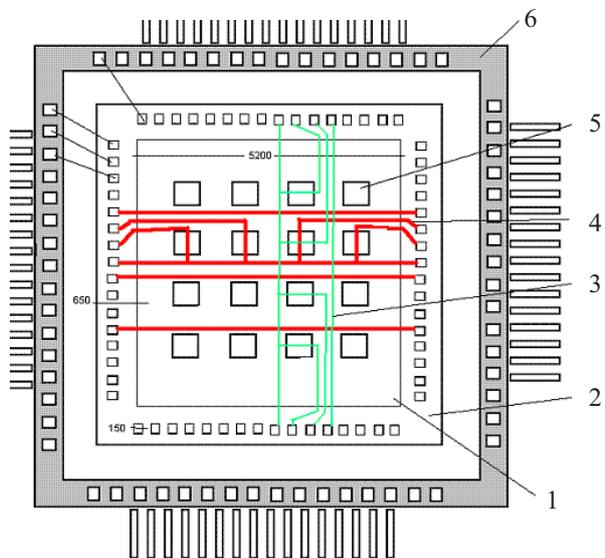


Рис. 1. Схема многоэлементного интегрального газочувствительного сенсора:

1 — мембрана; 2 — кристалл матрицы; 3 — разводка чувствительных слоев для отдельных сенсоров матрицы; 4 — разводка слоев микронагревателей; 5 — сенсоры матрицы; 6 — корпус

с максимальными размерами 7,5×7,5 мм. Размеры мембраны 16-элементной матрицы 5,2×5,2 мм, максимальные размеры микронагревателя для каждого сенсора 250×250 мкм.

На базе таких интегральных сенсоров созданы действующие макеты детектирующих устройств [2, 3] со следующими основными параметрами:

- достоверность обнаружения целевого вещества (ЦВ) — 0,96 при концентрации паров ЦВ $1,10^{-11}$ г/см³;
- вероятность ложных тревог — 0,03;
- достоверность обнаружения ЦВ при наличии мешающего вещества (МВ) (бензина) — 0,92 при концентрации паров бензина $0,252 \cdot 10^{-6}$ г/л (1,5 ПДК по бензину);
- среднее время цикла измерений — 5...85 с.

Функциональная схема детектирующего устройства представлена на рис. 2—4.



Рис. 2. Функциональная схема детектирующего устройства:

1 — ПЭВМ с платой NI PCI-6221; 2 — соединительный блок СВ-68LP с электронно-коммутационной платой; 3 — датчики в корпусе (2 шт.); 4 — соединительный кабель SHC 68-68-ERM

Для реализации алгоритмов управления и обработки сигналов ГЧС были созданы модели электронной и логической схемы управления ГЧС в составе

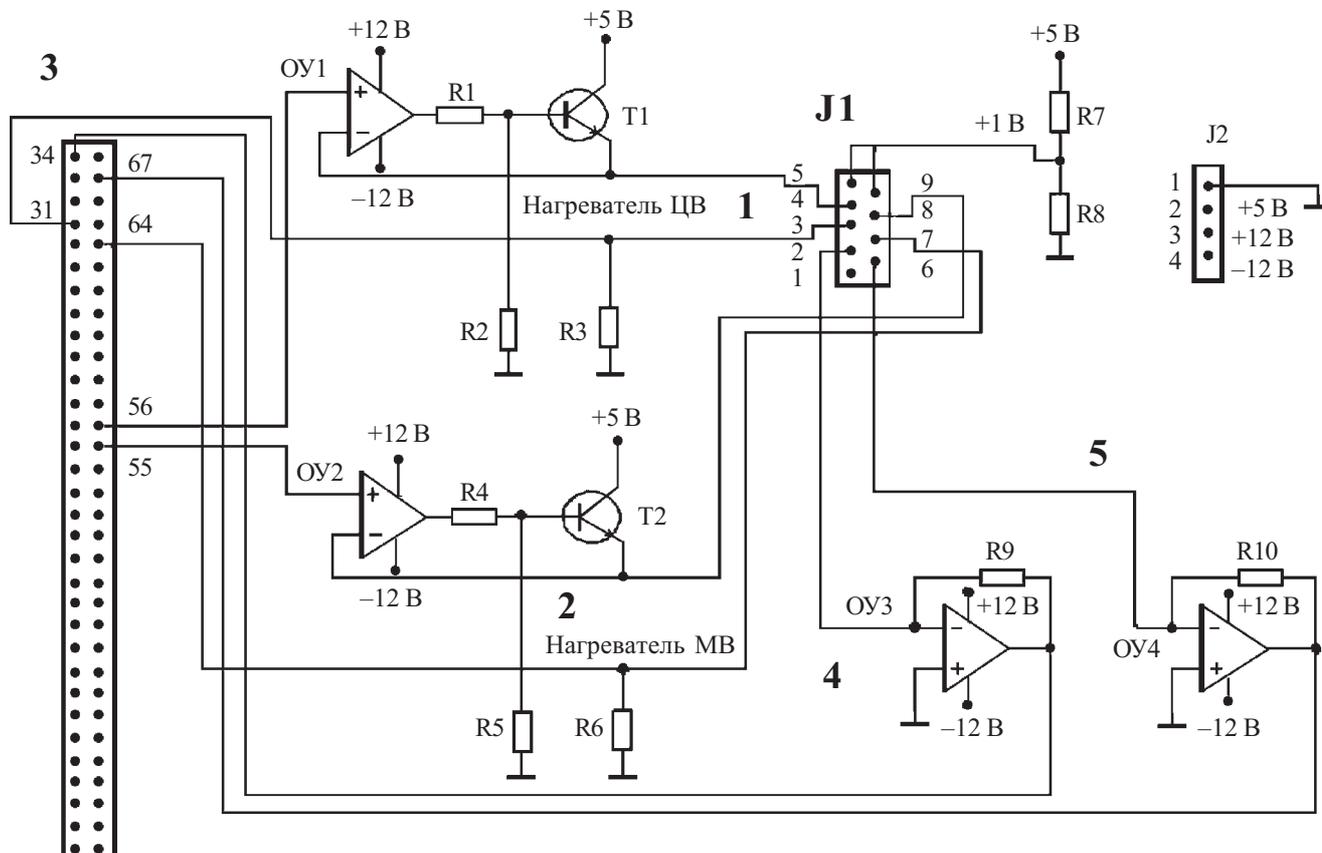


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема соединительного блока и электронно-коммутационной платы: 1 — нагреватель анализируемого ЦВ; 2 — нагреватель МВ; 3 — разъем интерфейсного блока CL68 LP; 4 — выход сигнала с чувствительного слоя (ЧС) ЦВ; 5 — выход сигнала с ЧС МВ

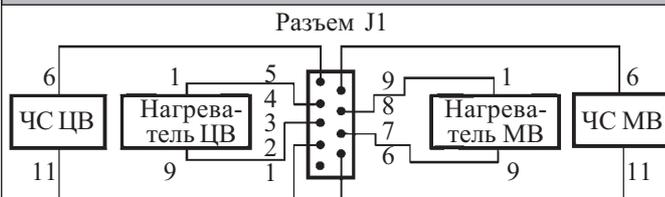


Рис. 4. Электрическая схема управления сенсорами на плате через разъем J1, см. рис. 3

макета детектирующего устройства. Два источника напряжения выполнены по классической схеме источника напряжения на одном операционном усилителе и транзисторе.

Работа устройства заключается в следующем. С управляющей электронно-коммутационной платы на нагреватели матрицы подаются управляющие импульсы определенной формы (обычно синусоидальной или трапецевидной), и производится последовательный опрос показаний каждого сенсора. В результате это дает гистограмму величин откликов (показаний) каждого сенсора, которые по сложному алгоритму обрабатываются микропроцессором, в данном случае — компьютером. Отклики сенсоров неравнозначны, и иногда множество сенсоров реагирует на одно и то же вещество, т. е. происходит наложение (перекрывание) сигналов. Вследствие этого необходим математический аппарат, обеспечивающий распознавание вещества.

Основной задачей, решаемой “электронным носом”, является идентификация запаха образца и, по возможности, установление концентрации пахучего вещества, что связано с обработкой данных и идентификацией многомерной картины сенсорных сигналов (“образа запаха”). Как правило, задача решается в четыре последовательных стадии: предварительной обработки данных, выделения отличительных признаков, классификации и принятия решения.

На стадии предварительной обработки устраняется дрейф сенсоров, производится сжатие сенсорных данных с учетом переходных процессов и минимизируются относительные ошибки. При этом применяются традиционные приемы обработки сигналов, используемые, например, в хроматографии: учет дрейфа нулевой линии, нормализация сенсорных откликов для полной линейки сенсоров и др.

Выделение отличительных признаков преследует две цели: снижение размерности пространства измерений и извлечение информации, необходимой для распознавания обонятельного образа. Например, если матрица содержит 16 элементов, то пространство измерений характеризуется 16 компонентами, что представляет сложность как на момент создания достаточной базы данных, так и при дальнейшей статистической обработке результатов. В силу того, что сенсоры характеризуются перекрестной чувствительностью, в большинстве практических случаев такое их количество является заведомо избыточным. Поэтому оправданным является снижение размерности пространства измерений за счет выделения наиболее информативных сенсорных элементов. Эти операции осуществляются с использованием математического аппарата принципиального компонентного анализа

(ПКА) или линейного дискриминационного анализа (ЛДА). ПКА-метод обеспечивает нахождение направления максимальной дискриминации картин сенсорных откликов и наиболее часто используется в линейном приближении. Однако для решения классификационных задач ПКА-метод не является оптимальным. Чаще используется ЛДА-метод, т. к. он позволяет находить направление, по которому достигаются наибольшие различия между образцами с различными запахами, и при этом минимизируются различия между образцами с одинаковыми запахами.

В силу того, что при функционировании “электронного носа” вероятны достаточно большие отклонения от линейности, для получения корректной количественной информации требуются методы, способные обрабатывать данные без априорного знания функциональных зависимостей между входными сигналами и выходными параметрами, т. е. методы нелинейные и непараметрические. Рядом исследовательских групп предложены нелинейные преобразования, такие как нелинейные карты Саммона и самоорганизующиеся карты Кохонена.

Карты Саммона обеспечивают преобразование данных в 2- или 3-мерное пространство, в котором сохраняется расстояние между каждой парой образцов в первоначальном n -мерном пространстве сенсоров. Карты Кохонена преобразуют n -мерное пространство сенсоров в 2-координатное пространство обрабатываемых элементов, называемых нейронами.

При построении математической модели поведения устройства «электронный нос» использовались два из вышеперечисленных методов обработки исходных данных — ПКА-метод и карты Кохонена. В настоящее время проводятся эксперименты по набору статистического материала для апробации математической модели обработки данных, а также для проверки работоспособности отдельных узлов устройства и устройства в целом.

Создан действующий макет устройства «электронный нос», основанный на матрице элементарных полупроводниковых сенсоров резистивного типа. Для реализации алгоритмов управления и обработки сигналов от моносенсоров были созданы модели электронной и логической схемы управления и разработана математическая модель поведения устройства.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алтухов А. А., Житковский В. Д., Митягин А. Ю., Шустров А. В. Полиструктуры полупроводниковых химических сенсоров с чувствительными слоями резистивного типа // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания.— 2005.— № 1–2.— С. 72.
2. Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Шустров А. В. Портативные детекторы паров опасных веществ на основе микроэлектронных полисенсорных полупроводниковых матриц // Инженерная физика.— 2005.— № 3.— С. 28–32.
3. Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Шустров А. В. Эффективные анализаторы опасных и вредных веществ на основе полисенсорных полупроводниковых матриц // Наука и технологии в промышленности.— 2005.— № 3.— С. 26–30.

К. ф.-м. н. А. В. ЛОПИН, к. ф.-м. н. А. В. СЕМЁНОВ,
д. ф.-м. н. В. М. ПУЗИКОВ

Украина, г. Харьков, Институт монокристаллов
E-mail: semenov@isc.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
12.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ SiC

На основе нанокристаллических пленок кубического поли типа карбида кремния, полученных прямым ионным осаждением на подложке из лейкосапфира, разработан интерференционный датчик температуры.

В связи с бурным развитием автоматизированных систем контроля и управления и переходом к гибким автоматизированным производствам стремительно растет потребность в надежных датчиках различных физических величин, в частности, датчиков температуры с широким диапазоном измерений. Помимо высоких метрологических характеристик, датчики должны обладать высокой стабильностью и надежностью. Этим требованиям максимально удовлетворяют волоконно-оптические датчики температуры [1], основным узлом которых является термочувствительный элемент, определяющий эксплуатационные характеристики датчика.

В работе [2] показано, что наиболее чувствительным и помехозащищенным является метод лазерной интерференционной термометрии прозрачных или полупрозрачных пластин, исполняющих роль эталона Фабри–Перо для зондирующего излучения. Так как при нагревании изменяются показатель преломления и толщина пластинки, текущая температура определяется по изменению фазы волны оптических резонансов либо по изменению контраста интерференционных полос. В работе [3] проведено изучение резонансов эталонов Фабри–Перо, состоящих из стеклянных и кремниевых пластинок. Было показано, что по чувствительности этот метод на 3–4 порядка превосходит другие методы термометрии и имеет довольно широкий диапазон измеряемых температур. При использовании полупроводниковых диодных лазеров и волоконно-оптической линии связи метод достигает высокой надежности при малой массе и объеме датчика. Кроме того, такие системы устойчивы к электромагнитным наводкам, что обеспечивает работу датчика в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения и электромагнитных помех.

Для расширения высокотемпературной границы диапазона измерений необходимо применение более широкозонных и термостойких полупроводников и диэлектриков. В качестве высокотемпературных интерферометров Фабри–Перо могут быть использова-

ны пленки карбида кремния SiC, осажденные на пластины из лейкосапфира (Al₂O₃).

Известно, что SiC имеет по сравнению с кремнием большую ширину запрещенной зоны и более высокую температуру Дебая. Это обеспечивает увеличение области рабочих температур и высокую термическую стабильность материала. Карбид кремния обладает также большой радиационной и химической стойкостью. В то же время высокие температуры традиционных технологий выращивания кристаллических пленок карбида кремния существенно ограничивают возможности его применений в сенсорных устройствах. Выходом из этого положения может быть использование нанокристаллических пленок карбида кремния, температура получения которых значительно ниже. Один из методов получения нанокристаллических пленок SiC (**nc-SiC**) был разработан авторами и описан в [4].

Целью настоящей работы является изучение возможности построения на базе структуры "nc-SiC-пленка/лейкосапфир" волоконно-оптического датчика для измерения температуры в широком диапазоне.

Эксперимент и обсуждение результатов

Для приготовления нанокристаллических пленок из карбида кремния на диэлектрических подложках использован разработанный в Институте монокристаллов НАНУ метод прямого ионного осаждения с плазменным источником ионов, в котором использован катод из карбида кремния. Метод позволяет управлять энергией ионов и температурой подложки и осадить кристаллические пленки карбида кремния с различным политипным составом [5]. Мы использовали nc-SiC-пленки кубической модификации 3C-SiC, осажденные на подложку из полированного лейкосапфира (выращенного также в Институте монокристаллов) при температуре подложки $T_{\text{п}}=930^{\circ}\text{C}$ и энергии ионов 90 эВ [6].

На **рис. 1** представлены спектры рентгеновской дифракции nc-SiC-пленок толщиной примерно 3 мкм. Тонкие нанокристаллические пленки, осажденные при температурах подложки 850, 890 и 930^oC, демонстрировали пики рентгеновской дифракции, соответствующие основным отражениям от плоскостей (111) модификации 3C-SiC (пик при угле 35,5^o) с полуширинами линий 0,72^o, 0,6^o и 0,5^o, соответственно. Наиболее интенсивный рефлекс и, соответственно, наименьшая полуширина были получены для $T_{\text{п}}=930...950^{\circ}\text{C}$.

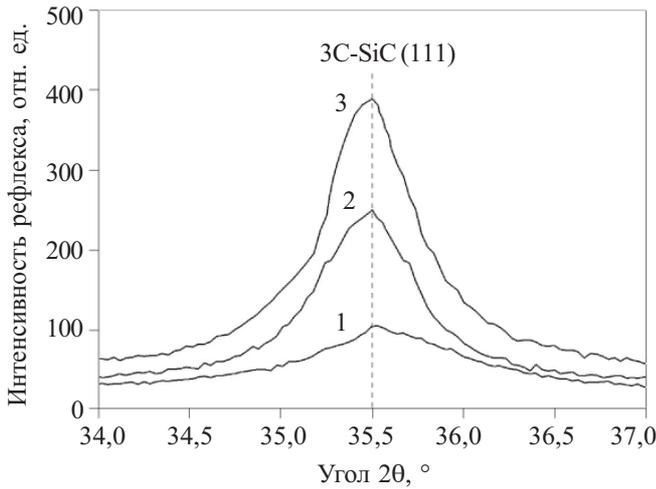


Рис. 1. Рентгеновская дифракция от пленок SiC, полученных при различных температурах подложки: 1 — дифракционная кривая для пленки, осажденной при температуре подложки 850°C; 2 — то же для 890°C; 3 — то же для 930°C

Кроме основных максимумов, имеются довольно слабые пики отражений от плоскостей (220) 3C-SiC, что свидетельствует о возможной текстуре слоев SiC, т. е. плоскости (111) параллельны плоскости подложки. В данных условиях были осаждены nc-SiC-пленки различной толщины на лейкосапфировые подложки.

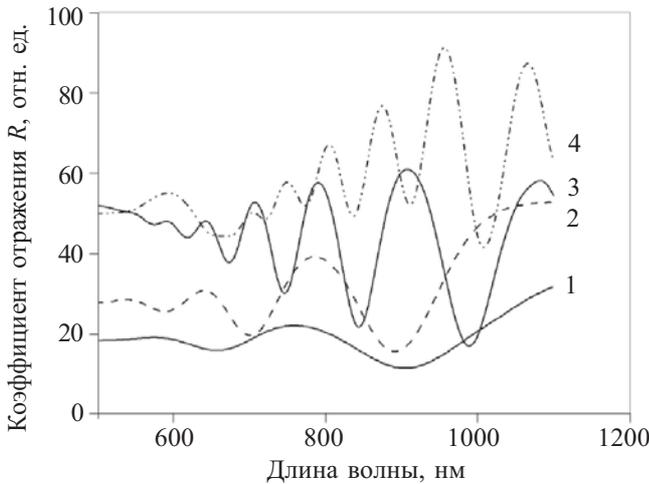


Рис. 2. Спектр отражения от пленок nc-SiC различной толщины L , осажденных при температуре подложки $T_n=930^\circ\text{C}$: 1 — $L=0,6$ мкм; 2 — $L=1,4$ мкм; 3 — $L=2$ мкм; 4 — $3,34$ мкм

Оптические свойства осажденных SiC-пленок изучались путем измерений и анализа спектров отражения и пропускания на спектрофотометре Lambda 35 фирмы Perkin Elmer с приставкой отражения при нормальном падении света в спектральном диапазоне 190—1100 нм. На рис. 2 представлены спектры отражения nc-SiC-пленок различной толщины на подложках из лейкосапфира в спектральном диапазоне 500—1100 нм. При толщинах пленки порядка длины волны излучения была получена устойчивая интерференционная картинка. Это свидетельствует, что верхние и нижние поверхности nc-SiC-пленки являются зеркалами интерферометра Фабри-Перо, который схема-

точно изображен на рис. 3. Здесь 1 — спектрометр Lambda 35; 2 — кварцевые световоды; 3 — согласующие линзы; 4 — зеркала плоские; 5 — фильтр, отсекающий ИК-излучение; 6 — фотоприемное устройство; 7 — компьютер; 8 — интерферометр Фабри-Перо; 9 — нагреватель; 10 — термопара для контроля температуры; θ_0 и θ'_0 — углы падения и отражения; θ_1 — угол преломления; n — показатель преломления.

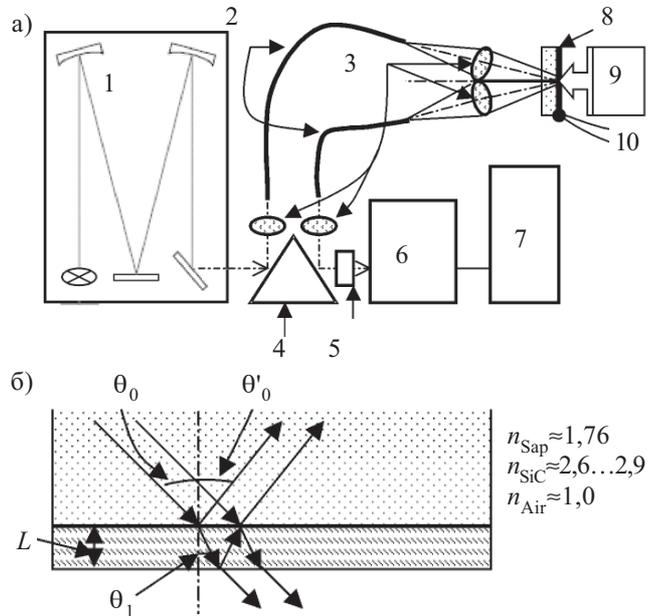


Рис. 3. Схема спектральной оптической системы для измерения температуры с помощью пленочного интерферометра Фабри-Перо, изготовленного из nc-SiC (а), и формирование интерференции в интерферометре Фабри-Перо (б)

Для двух соседних лучей, распространяющихся между зеркалами интерферометра под углом θ , оптическая разность хода волн, зависящая от температуры, определяется соотношением [7]

$$\Delta = 2n(\lambda, T) \cdot L(T) \cdot \cos\theta_i, \tag{1}$$

где $n=f(\lambda, T)$ — показатель преломления пленки SiC, являющийся функцией длины волны света λ и температуры T ; L — расстояние между зеркалами интерферометра (толщина nc-SiC-пленки), зависящее от температуры; θ_i — угол преломления светового луча в nc-SiC-пленке.

Оптической разности хода соответствует изменение разности фаз волн:

$$\Delta\Phi = 2\pi \cdot n(\lambda, T) \cdot L(T) / \lambda, \tag{2}$$

где $\theta_i=0$, $\cos\theta_i=1$.

Оптическая волна, отраженная от тонкопленочного nc-SiC-интерферометра Фабри-Перо, весьма чувствительна к возмущениям внешнего физического параметра — изменению температуры среды, которая влияет на оптическую разность хода отраженных световых пучков. Решив обратную задачу по определению изменений оптической разности хода когерентных световых пучков, можно определить изменения температуры интерферометра Фабри-Перо. В работе [7] температурная чувствительность изменения фазы была определена как

$$\Delta\Phi/\Delta T = 2\pi n L \kappa_\phi / \lambda. \quad (3)$$

Здесь $\kappa_\phi = \kappa_n + \kappa_L$; κ_n — термооптический коэффициент SiC-интерферометра, который равен $(1/n) \cdot (\Delta n / \Delta T)$, и $\kappa_L = (1/L) \cdot (\Delta L / \Delta T)$ — температурный коэффициент расширения (ТКР) пленки.

Из формулы (3) видно, что изменение фазы волны от температуры прямо пропорционально толщине и показателю преломления SiC-пленки, а также сумме термооптического коэффициента SiC-пленки и ее температурного коэффициента расширения. Таким образом, увеличение температурной чувствительности изменения фазы можно получить при осаждении более толстых пленок, например микрометровых толщин. Однако мы обнаружили, что при толщинах пс-SiC-пленок, больших чем 2 мкм, возникают искажения интерференционной кривой. Авторы полагают, что причиной этого эффекта могут быть остаточные напряжения в пленке пс-SiC, связанные с различием в температурных коэффициентах расширения SiC-пленки и подложки из Al_2O_3 , и, как следствие, появление оптической неоднородности в структуре, приводящее к размытию или модуляции интерференции. Результаты исследований пленок разной толщины (рис. 2) показывают, что наиболее оптимальными являются толщины от 1,5 до 2 мкм.

Для карбида кремния имеются достаточно надежные данные, касающиеся величин κ_n и κ_L , входящих в формулу (3). В работе [7] было показано, что для пленок SiC хорошо выполняется условие $\kappa_n \gg \kappa_L$. При этом формула (3) может быть преобразована в формулу [7, 8]

$$\Delta\Phi/\Delta T = (2\pi \cdot L / \lambda_m(T_0)) \cdot \{(1/\lambda_m(T_0)) \cdot (\Delta\lambda_m/\Delta T)\}. \quad (4)$$

Здесь $\lambda_m(T_0)$ — длина волны максимума интерференции при исходной температуре T_0 , $\Delta\lambda_m$ — изменение длины волны при нагреве интерферометра.

Таким образом, изменение показателя преломления и толщины пленки с изменением температуры обуславливает изменение длины волны интерференционных экстремумов. Из формулы (4) видно, что изменение фазы отраженной волны пропорционально сдвигу максимумов или минимумов интерференции при изменении температуры пленки. То есть при нагреве пленки интерференционные спектры отражения должны демонстрировать сдвиг своих экстремумов вдоль оси длин волн.

Схема установки для изучения резонансов эталона Фабри–Перо, состоящего из пс-SiC-пленки, осажденной на сапфировую подложку, показана на рис. 3, а. Зондирование образцов проводили монохроматическим излучением в диапазоне 500—1100 нм с помощью оптико-волоконной приставки. Для фокусировки пучка на поверхность пластин применяли линзы с фокусным расстоянием 10—16 мм, диаметр пучка на поверхности интерферометра соответствовал световому диаметру оптического волокна. Для этого торцы световодов и образец устанавливали на двойном фокусном расстоянии линз. Применение линз позволяло не только согласовать оптический тракт со световодами, но и направлять монохроматическое излучение на исследуемый образец под углом, меньшим 8—10°, что дает возможность прене-

брегать поляризационными составляющими отраженного света. Отраженный от интерферометрической системы световой поток с помощью оптического волокна и аналогичной линзовой системы фокусировался на фотоприемник спектрофотометра, пройдя предварительно через фильтр 5, который отсекает паразитное инфракрасное излучение, идущее от нагретого интерферометра.

Температуру образца повышали с помощью нагревателя от 25 до 600°C через каждые 25—50°C. Это позволило регистрировать изменения для нескольких периодов интерферограммы, по которым можно определить сдвиг экстремумов. Кроме того, для изучения статистики фазовых изменений на каждом образце зондировали 10 точек, расположенных вдоль произвольно выбранной линии на расстоянии 0,5—1,0 мм друг от друга. Исходная интерферограмма измерялась при комнатной температуре T_0 , а последующие интерферограммы — при нагреве датчика до температур $T_1 > T_0$. Температура интерферометра контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термомпары. Сигнал фотоприемника спектрофотометра после усиления регистрировался и обрабатывался с помощью компьютера.

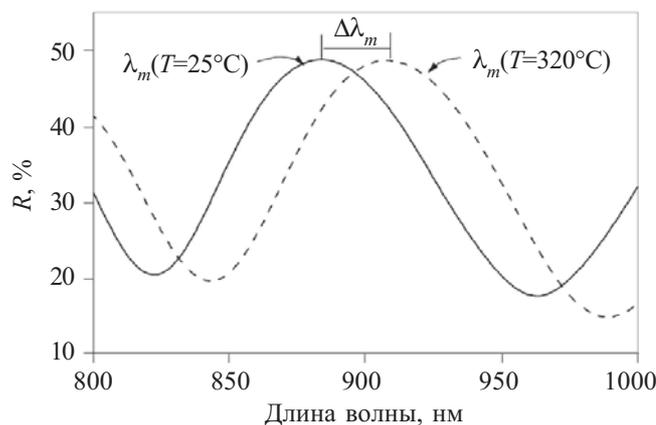


Рис. 4. Сдвиг интерференционного максимума при нагревании пс-SiC-пленочного интерферометра от комнатной температуры (25°C) до температуры 320°C.

Толщина пс-SiC-пленки 2 мкм

На рис. 4 показаны две интерференционные кривые отражения при разных температурах тонкопленочного интерферометра. Было установлено, что сдвиг интерференционных максимумов увеличивался с уменьшением порядка интерференции. Порядок интерференции был рассчитан для всех максимумов по методике, описанной в работе [5]. Расчет температурного изменения фазы по формуле (4) показал, что $\Delta\Phi/\Delta T$ для интерференционных максимумов с длинами волн $\lambda < 700$ нм существенно отличается (примерно на 60%) от вычислений изменения фазы на других λ_m . Это связано с появлением в этой спектральной области заметного поглощения при росте порядка m максимума коэффициента отражения (на этих длинах волн уже появляется хвост фундаментальной полосы поглощения пленок SiC), что и приводит к ошибке в определении местоположения интерференционного максимума и его сдвига. Поэтому для определения спектрального сдвига интерферен-

ционного максимума была выбрана спектральная область, где $\Delta\Phi/\Delta T$ одинакова. Для отобранных нами пленок эти условия выполняются в спектральном диапазоне 690—1000 нм, где и проводили измерения.

На рис. 4 спектры отражения записаны с интервалом длин волн 1 нм. Максимум отражения для $T=25^\circ\text{C}$ находится на длине волны $\lambda_1=884$ нм. При нагреве до 320°C этот максимум сдвигается в сторону более длинных волн и имеет $\lambda_2=907$ нм. Сдвиг максимума одного и того же порядка при нагревании составляет $\Delta\lambda=23$ нм.

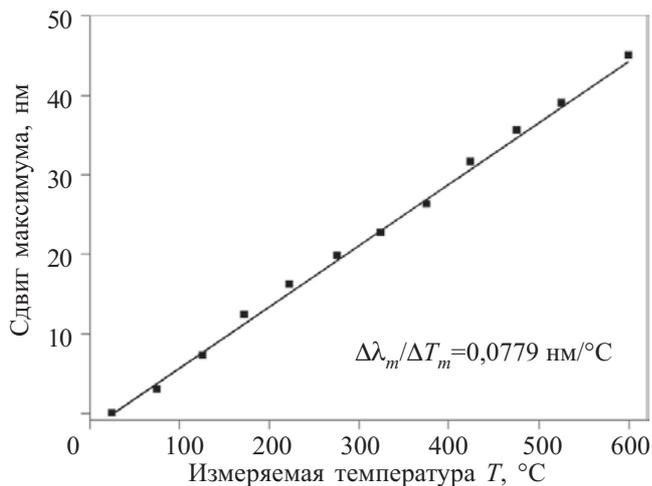


Рис. 5. Сдвиг интерференционного максимума как функция измеряемой температуры

(■ — экспериментальные точки; сплошная линия — линейная аппроксимация)

Оценка угла наклона характеристики $\Delta\lambda=f(\Delta T)$ дает значение $\Delta\lambda_{\max}/\Delta T_{\max}=0,0779$ нм/°C и соответствует вычислениям для максимумов $\lambda_1=771$ нм и $\lambda_2=794$ нм.

Для выбранного образца толщиной 2,0 мкм была построена зависимость $\Delta\lambda_{\max}/\Delta T_{\max}$ от температуры нагрева интерферометра, приведенная на рис. 5. Из графика видно, что спектральный сдвиг максимумов при нагреве может быть достаточно хорошо аппроксимирован линейной функцией, что является важным для калибровки датчика.

Авторы отмечают, что приведенная схема волоконно-оптического датчика температуры на основе SiC/сапфир-интерферометра является демонстрацион-

ной, конструкция рабочего варианта датчика должна иметь более простую и надежную схему измерения.

Выводы

Полученные методом прямого ионного осаждения пленки nc-SiC кубического политипа 3C-SiC обладали хорошей оптической однородностью и температурной стабильностью до 600°C . Показано, что nc-SiC-пленки на подложке из лейкосапфира могут быть использованы в качестве интерферометра Фабри-Перо для дистанционного измерения температуры. Макет датчика продемонстрировал хорошую крутизну температурной чувствительности сдвигов интерференционных максимумов и минимумов отраженной волны — $\Delta\lambda_{\max}/\Delta T_{\max}=0,0779$ нм/°C.

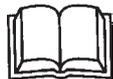
Высокотемпературная стабильность пленок SiC и лейкосапфира позволяют использовать предлагаемый датчик для дистанционного измерения температуры различных сред до 1000°C в условиях радиационных и электромагнитных воздействий.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Beheim G., Fritsch K., Anthan D. J. Fiber-optic temperature sensor using a spectrum-modulating semiconductor etalon / NASA Technical Memorandum 100153, 1987.
2. Taylor H. F. Fiber optic sensors based upon the Fabry-Perot interferometer / In: Fiber Optic Sensors / Eds.: F. T. S. Yu, S. Yin.— N. Y.: Marcel Dekker, Inc., 2002.— P. 41—71.
3. Магунов А. Н., Меркулов С. В. Амплитуда и форма резонансов Фабри-Перо в лазерной интерференционной термометрии полупроводников и диэлектриков // ЖТФ.— 2000.— Т. 70, вып. 2.— С. 58—63.
4. Semenov A. V., Lopin A. V., Puzikov V. M., Muto Sh. Ion plasma deposition and optical properties of SiC films // Functional Materials.— 2005.— Vol. 12, N 2.— P. 216—223.
5. Lopin A. V., Semenov A. V., Puzikov V. M., Trushkovsky A. G. Optical properties of silicon carbide obtained by direct ion deposition // Ibid.— 2006.— Vol. 13, N 4.— P. 631—636.
6. Семенов А. В., Пузилов В. М., Добротворская М. В., Федоров А. Г. Нанокристаллические пленки SiC, полученные методом прямого ионного осаждения // 7-я МНПК "Современные информационные и электронные технологии — СИЭТ-2006".— Одесса, Украина.— 2006.— Т. II.— С. 102.
7. Rao Y. J., Jackson D. A. Principles of fiber-optic interferometry // In: Optical Fiber Sensor Technology.— Eds.: K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt.— Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.— P. 167—191.
8. Lin Cheng. SiC thin-films on insulating substrates for robust MEMS // Ph. D. thesis, the University of Cincinnati, April 23, 2003.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Джексон Р. Новейшие датчики.— М.: Техносфера, 2007.— 384 с.

Стремительный рост числа разработок и применений датчиков на основе ранее не использовавшихся физических принципов и внедрения новых технологий для реализации известных эффектов стимулирует появление современных руководств. В учебнике-монографии изложены многие недавно сформировавшиеся или обновившиеся направления сенсорики, включая измерительную микромеханику, датчики на ПАВ, оптические, ионизационные и магнитные, химические микросенсоры, оптико-волоконные и интеллектуальные измерительные системы, расходомерию для нестационарных потоков и ряд других.

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,
Ф. А. ГИЯСОВА, Т. М. АЗИМОВ, У. М. БУЗРУКОВ,
А. А. ЯКУБОВ

Узбекистан, г. Ташкент, НПО "Физика-Солнце"
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию
08.02 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

ОСОБЕННОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Полученные результаты представляют интерес для создания фотоэлектронпреобразовательных структур, регистрирующих слабые световые сигналы при малых рабочих напряжениях.

В настоящее время для создания оптоэлектронных полупроводниковых приборов широко используются индий- и фосфорсодержащие гетерослои (GaInAs, GaAsP) с различной шириной запрещенной зоны. На их основе создаются эффективные светодиоды и быстродействующие фотодиоды, детекторы промышленных газов. При их изготовлении, наряду с барьерами Шоттки и $p-n$ -гетеропереходами, начали привлекаться также изотипные $n^+n^0n^-$ [1] и $m-p-p$ -гетеропереходы [2], обеспечивающие внутреннее усиление фототока. Процесс усиления фототока авторы работы [3] объясняют увеличением тока, протекающего через $p-n$ -структуру при освещении, благодаря инжекции темновых носителей в базу, что в результате приводит к модуляции (уменьшению) сопротивления базы, и, таким образом, усиление фототока обеспечивается за счет увеличения инжектируемых темновых составляющих.

Эффект усиления фототока за счет инжекции темновых носителей тока наблюдали и в изотипных $n^+GaSb-n^0GaInAsSb-n^+GaAlAsSb$ -структурах [1]. Характерным для этих структур являлось появление фототока в режиме прямого смещения в области напряжений до 0,6 В и его насыщение, а при обратных смещениях фототок возникал в узком интервале напряжений (0,63—0,75 В). Здесь следует отметить, что фототок можно создавать во всем рабочем диапазоне напряжений за счет фотогенерированных носителей в диодных $m-n-m$ -структурах [4]. Кроме того, использование в их базовой области изотипного $N-n$ -гетероперехода позволит обеспечить различную фоточувствительность, определяемую $m-n$ - и $N-m$ -барьерами "металл—полупроводник" при смене освещаемой поверхности и полярности рабочего напряжения.

Для удовлетворения возрастающей потребности в фотодиодных структурах, регистрирующих слабые оптические сигналы, стали интенсивно изучаться полупроводниковые структуры нового класса — структуры с барьерами Шоттки и $p-n$ -переходами, так называемые фотоэлектронпреобразователи [5]. К данным

фотоэлектронпреобразовательным структурам можно отнести $m-n-p-m$ - [6], $m-n-p$ - [7], $p-n^0-m$ - [8] и рассматриваемые ниже фотодиодные $m-N-n-m$ -структуры с внутренним фотоэлектрическим усилением.

В настоящей работе приведены результаты исследования токовых и фотоэлектрических характеристик фотоэлектронпреобразовательной $Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag$ -структуры на основе изотипного $N-n$ -гетероперехода с потенциальными барьерами из Ag .

Методика изготовления и исследование токовых характеристик $Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag$ -структур

Исследуемая структура получена на основе технологии изготовления трехбарьерного фотодиода [6], в котором p -область заменена на $NGaAs$, легированный кислородом, и поверх него жидкостной эпитаксией выращен изотипный эпитаксиальный гетерослой $nGaInAs$. Используемые подложки монокристаллического $NGaAs$ имеют концентрацию носителей $n \approx 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и толщину 350—400 мкм. Толщина выращенных гетерослоев $nGaInAs$ равнялась 2—4 мкм при концентрации носителей $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На поверхность эпитаксиального слоя, а также с тыльной стороны подложки, сформированы металлополупроводниковые переходы напылением Ag толщиной 50—70 Å.

Высоты потенциальных барьеров в $Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag$ -структуре найдены из зависимости корня квадратного из фотоотклика, пересчитанного на один фотон [9, с. 303—304], от энергии фотона для переходов $Ag-NGaAs$ и $nGaInAs-Ag$ соответственно для $\phi^{m-N} = 0,565 \text{ эВ}$, $\phi^{n-m} = 0,59 \text{ эВ}$. Входное сопротивление структуры при нулевом смещении $\approx 1 \text{ ГОм}$, что создает условия для получения высокой фоточувствительности от слабых оптических сигналов и высокой рабочей частоты.

Геометрическая конструкция исследуемой структуры приведена на **рис. 1, в**. Эквивалентная схема структуры (рис. 1, а) состоит из прямовключенных двух барьеров с общей базовой областью из изотипного гетеро- $N-n$ -перехода, в которой в зависимости от режима включения внешнего напряжения поочередно будут запираются $Ag-NGaAs$ - и $nGaInAs-Ag$ -барьеры, поэтому в обоих направлениях имеем обратные ветви ВАХ. При подаче напряжения отрицательной полярности со стороны подложки в режиме $(-)m-N-n-m(+)$ создается общее напряжение $U_{\text{общее}}^{m-Nn-m} = U_{\text{обр}}^{m-N} + U_{\text{прям}}^{n-m}$, а при полярности $(+)m-N-n-m(-)$

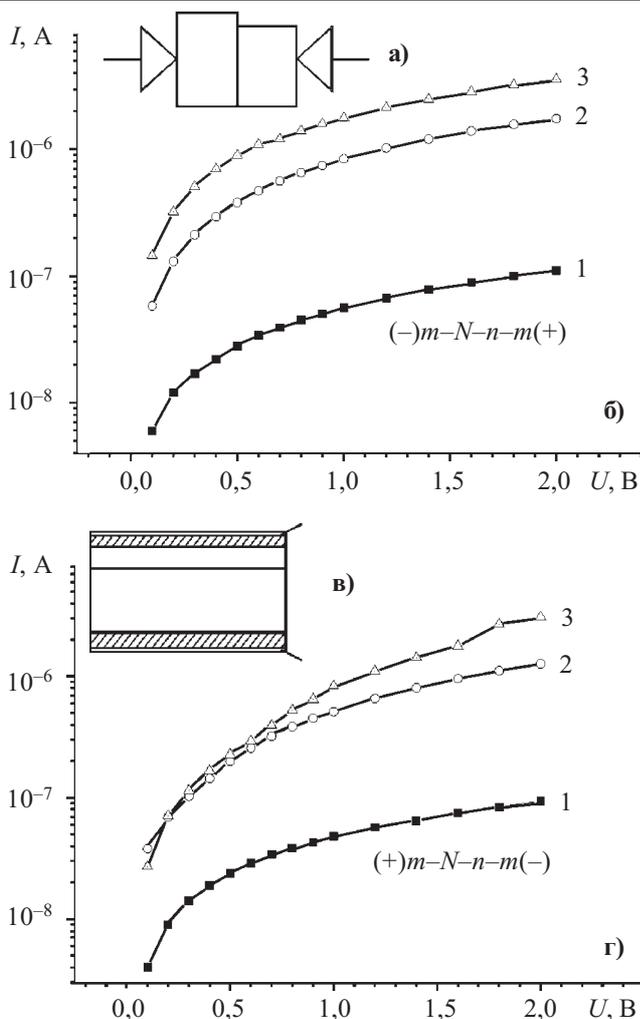


Рис. 1. ВАХ Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag-структуры: 1 — в темноте; 2 — 100 лк; 3 — 1000 лк

имеем $U_{\text{общ}}^{m-Nn-m} = U_{\text{прям}}^{m-N} + U_{\text{обр}}^{n-m}$. Поскольку величины напряжений, падающих в прямовключенных переходах, составляют незначительную часть прилагаемого напряжения, то в электронных процессах решающим является запираемый переход.

Ход зависимости темновых и световых токов, за исключением случая 1000 лк, в режимах запираения Ag-NGaAs- и nGaInAs-Ag-барьеров от напряжения

носит степенной характер ($I \sim U^N$) с показателем степени 1,0. Это указывает на то, что механизм токопередачи обусловлен термоэлектронной эмиссией носителей через запираемые барьеры, имеющие толщину слоя объемного заряда одного порядка — $W_{\text{обр}}^{m-N} \approx W_{\text{обр}}^{n-m}$. Однако в случае освещенности 1000 лк (рис. 1, з, кривая 3) поведение светового тока в зависимости от напряжения носит несколько иной возрастающий характер, связанный со сложным механизмом токопередачи. В частности, в данном случае в интервале напряжений 0,1—0,6 В показатель степени равен 1,2—1,4, и далее с увеличением напряжения его значение возрастает до 2—2,5, что объясняется диффузионно-генерационными токами с участием дефектных уровней и туннелированием фотоносителей через nGaInAs-Ag-барьер.

Анализ физических процессов, происходящих в потенциальных барьерах

Физические процессы, протекающие в последовательно соединенных потенциальных барьерах, определяются падающими напряжениями в каждом из переходов, обусловленными перераспределением приложенного внешнего напряжения. Эти падающие напряжения находятся из экспериментальных кривых вольт-амперных характеристик (рис. 1, б, з) по методике, описанной в работе [10] (табл. 1). Используя данные, приведенные в таблице, определим напряжения с учетом контактной разности потенциалов, которая компенсирует падающее напряжение в прямых переходах, а в обратных переходах добавляется к падающему напряжению. Величина этой разности потенциалов, величина напряжения, "создающего слой объемного заряда в барьерах", меняется в зависимости от режима включения. В прямосмещаемом переходе nGaInAs-Ag напряжение, создающее слой объемного заряда, ($W_{\text{прям}}^{n-m}$) состоит из разницы между контактной разностью потенциалов и падающим напряжением: $U_{\text{прям}}^{*(n-m)} = U_K^{n-m} - U_{\text{прям}}^{n-m}$. Контактная разность потенциалов представляет собой разность между высотой барьера "металл—полупроводник" (n-m) и зазором зоны проводимости с уровнем Ферми со стороны гетерослоя nGaInAs —

$$U_K^{n-m} = \phi^{n-m} - (E_c^{\text{GaInAs}} - E_F^{\text{GaInAs}}),$$

Таблица 1

Значения падающих напряжений на переходах при различных режимах

| $U_{\text{общ}}^{m-N-n-m}$, В | (-)m-Nn-m(+) | | | (+)m-Nn-m(-) | | |
|--------------------------------|--|-----------------------------|----------------------------|--|-----------------------------|----------------------------|
| | $I_{\text{общ}}^{m-N-n-m}$, 10^{-8} А | $U_{\text{прям}}^{n-m}$, В | $U_{\text{обр}}^{m-N}$, В | $I_{\text{общ}}^{m-N-n-m}$, 10^{-8} А | $U_{\text{прям}}^{m-N}$, В | $U_{\text{обр}}^{n-m}$, В |
| 0 | 0 | 0 | 0,245 | 0 | 0 | 0,28 |
| 0,1 | 0,6 | 0,0546 | 0,0454 | 0,4 | 0,05 | 0,05 |
| 0,2 | 1,2 | 0,1092 | 0,0908 | 0,9 | 0,1125 | 0,0875 |
| 0,4 | 2,2 | 0,2002 | 0,1998 | 1,9 | 0,2375 | 0,1625 |
| 0,6 | 3,4 | 0,2548 | 0,3452 | 2,9 | 0,2375 | 0,3625 |
| 0,8 | 4,5 | 0,2548 | 0,5452 | 3,8 | 0,2375 | 0,5625 |
| 1,2 | 6,7 | 0,2548 | 0,9452 | 5,7 | 0,2375 | 0,9625 |
| 1,6 | 8,9 | 0,2548 | 1,3452 | 7,5 | 0,2375 | 1,3625 |
| 2 | 11,1 | 0,2548 | 1,7452 | 9,4 | 0,2375 | 1,7625 |

где ϕ^{n-m} — высота потенциального барьера со стороны пленки;
 E_c^{GaInAs} — энергия в зоне проводимости пленки;
 E_F^{GaInAs} — энергия уровня Ферми пленки,

а на запирающем Ag–NGaAs-переходе напряжение, создающее слой объемного заряда, ($W_{обр}^{m-N}$) определяется суммой контактной разности потенциалов с падающим напряжением —

$$U_{обр}^{*(m-N)} = U_K^{m-N} + U_{обр}^{m-N},$$

где контактная разность потенциалов представляет собой разность между высотой барьера "металл—полупроводник" ($m-N$) и зазором зоны проводимости с уровнем Ферми со стороны подложки NGaAs:

$$U_K^{m-N} = \phi^{m-N} - (E_c^{GaAs} - E_F^{GaAs}).$$

В режиме $(+)m-Nn-m(-)$ аналогично имеем напряжения, создающие слой объемного заряда в Ag–NGaAs-переходе — $U_{прям}^{*(m-N)} = U_K^{m-N} - U_{прям}^{m-N}$ и в $nGaInAs$ –Ag-переходе — $U_{обр}^{*(n-m)} = U_K^{n-m} + U_{обр}^{n-m}$, соответственно. Толщины слоев объемного заряда запираемого Ag–NGaAs-перехода в режиме $(-)m-Nn-m(+)$ оцениваются на основе выражения

$$W_{обр}^{m-N} = \left(\frac{2\epsilon^{GaAs}\epsilon_0 (U^{*(m-N)})}{q N_N} \right)^{1/2}$$

(где q — заряд электрона), а для запираемого $nGaInAs$ –Ag-перехода в режиме $(+)m-Nn-m(-)$ используется выражение [11, с. 256—260]

$$W_{обр}^{n-m} = \left(\frac{2\epsilon^{GaInAs}\epsilon_0 (U^{*(n-m)})}{q N_n} \right)^{1/2},$$

где ϵ^{GaAs} — диэлектрическая проницаемость GaAs;
 ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость;
 N_N — концентрации носителей GaAs;
 ϵ^{GaInAs} — диэлектрическая проницаемость $Ga_{0,9}In_{0,1}As$;
 N_n — концентрации носителей $Ga_{0,9}In_{0,1}As$.

Ход зависимости токовых характеристик от падающих напряжений определяет интервалы изменения толщины слоя объемного заряда и напряженности электрического поля в каждом из переходов (табл. 2, $\xi_{обр}^{m-N}$ — электрическое поле на запираемом переходе "металл—подложка" в режиме $(-)m-Nn-m(+)$, $\xi_{прям}^{n-m}$ — электрическое поле на прямосмещаемом переходе "металл—пленка" в режиме $(-)m-Nn-m(+)$).

Из таблицы видно, что толщина слоя объемного заряда в равновесном состоянии ($U_{общ}^{m-N-n-m} = 0$) определяется контактной разностью потенциалов U_K^{m-N} , U_K^{n-m} , и разность толщин слоев объемного заряда прямо- и обратновключенных переходов связана с разницей контактных разностей потенциалов каждого из переходов и концентрации носителей N и n облас-

Таблица 2

Электрофизические данные, характеризующие темновые параметры соответствующих переходов в различных режимах

| (-)m-Nn-m(+) | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| $U_{общ}^{m-N-n-m}$, В | $I_{общ}^{m-N-n-m}$, 10^{-8} А | $U_{обр}^{*(m-N)}$, В | $W_{обр}^{m-N}$, 10^{-5} см | $\xi_{обр}^{m-N}$, 10^4 В/см | $U_{прям}^{*(n-m)}$, В | $W_{прям}^{n-m}$, 10^{-5} см | $\xi_{прям}^{n-m}$, 10^4 В/см |
| 0 | 0 | 0,245 | 2,73 | 0,90 | 0,28 | 2,24 | 1,25 |
| 0,1 | 0,6 | 0,29 | 2,97 | 0,98 | 0,23 | 2,01 | 1,12 |
| 0,2 | 1,2 | 0,34 | 3,19 | 1,05 | 0,17 | 1,75 | 0,97 |
| 0,4 | 2,2 | 0,44 | 3,68 | 1,21 | 0,08 | 1,20 | 0,67 |
| 0,6 | 3,4 | 0,59 | 4,24 | 1,39 | 0,03 | 0,67 | 0,37 |
| 0,8 | 4,5 | 0,79 | 4,90 | 1,61 | 0,03 | 0,67 | 0,37 |
| 1,2 | 6,7 | 1,19 | 6,01 | 1,98 | 0,03 | 0,67 | 0,37 |
| 1,6 | 8,9 | 1,59 | 6,95 | 2,29 | 0,03 | 0,67 | 0,37 |
| 2 | 11,1 | 1,99 | 7,78 | 2,56 | 0,03 | 0,67 | 0,37 |
| (+)m-Nn-m(-) | | | | | | | |
| $U_{общ}^{m-N-n-m}$, В | $I_{общ}^{m-N-n-m}$, 10^{-8} А | $U_{прям}^{*(m-N)}$, В | $W_{прям}^{m-N}$, 10^{-5} см | $\xi_{прям}^{m-N}$, 10^4 В/см | $U_{обр}^{*(n-m)}$, В | $W_{обр}^{n-m}$, 10^{-5} см | $\xi_{обр}^{n-m}$, 10^4 В/см |
| 0 | 0 | 0,245 | 2,73 | 0,90 | 0,28 | 2,24 | 1,25 |
| 0,1 | 0,4 | 0,195 | 2,43 | 0,80 | 0,33 | 2,44 | 1,35 |
| 0,2 | 0,9 | 0,132 | 2,01 | 0,66 | 0,37 | 2,57 | 1,43 |
| 0,4 | 1,9 | 0,0075 | 0,48 | 0,16 | 0,44 | 2,82 | 1,57 |
| 0,6 | 2,9 | 0,0075 | 0,48 | 0,16 | 0,64 | 3,40 | 1,89 |
| 0,8 | 3,8 | 0,0075 | 0,48 | 0,16 | 0,84 | 3,89 | 2,16 |
| 1,2 | 5,7 | 0,0075 | 0,48 | 0,16 | 1,24 | 4,73 | 2,63 |
| 1,6 | 7,5 | 0,0075 | 0,48 | 0,16 | 1,64 | 5,44 | 3,02 |
| 2 | 9,4 | 0,0075 | 0,48 | 0,16 | 2,04 | 6,06 | 3,37 |

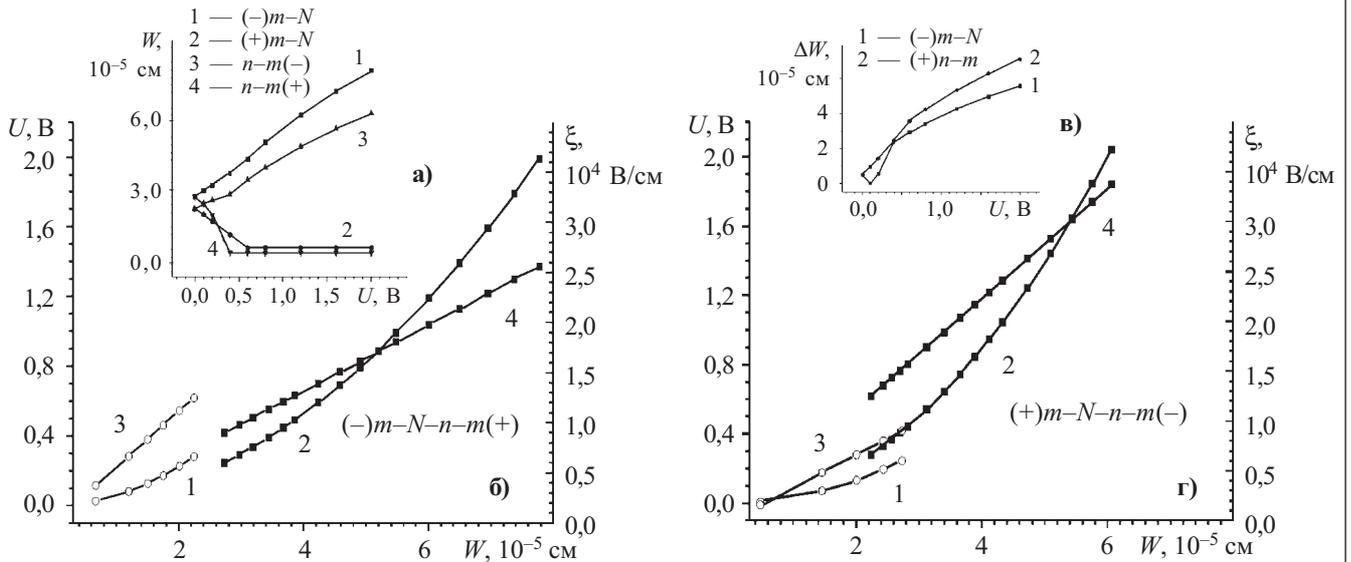


Рис. 2. Зависимости толщины слоя объемного заряда отдельных переходов от величины падающих напряжений и напряженности электрического поля при различных режимах

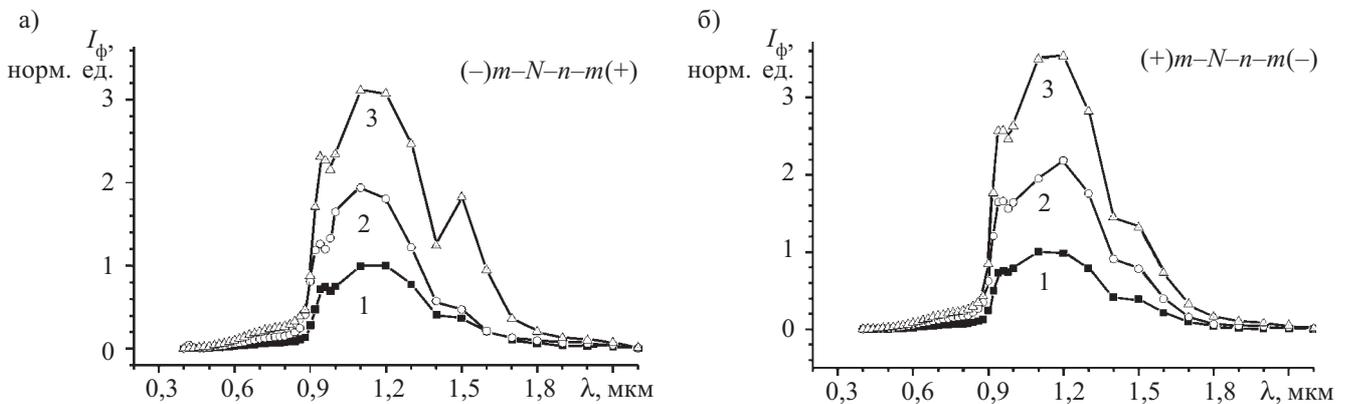


Рис. 3. Спектральная характеристика Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag-структуры при освещении запираемых переходов: 1 — $U=1$ В; 2 — $U=2$ В; 3 — $U=3$ В

тей: $\Delta W_0 = W_0^{m-N} - W_0^{n-m}$. В случае $U_{\text{общ}}^{m-N-n-m} \neq 0$ толщина слоя объемного заряда определяется напряжениями, создающими слой объемного заряда, $U_{\text{прям}}^{*(n-m)}$, $U_{\text{обр}}^{*(n-m)}$, $U_{\text{обр}}^{*(m-N)}$, $U_{\text{прям}}^{*(m-N)}$, и в каждом из переходов имеем ее уменьшение в прямовключенных переходах, а также ее увеличение в запираемых переходах в обоих режимах — $W_{\text{прям}}^{m-N} < W_0^{m-N} < W_{\text{обр}}^{m-N}$ и $W_{\text{прям}}^{n-m} < W_0^{n-m} < W_{\text{обр}}^{n-m}$ (рис. 2, а, б, кривые 1, 2).

Аналогичный ход изменения наблюдается и в зависимости напряженности электрического поля от толщины, но с линейным характером (рис. 2, а, б, кривые 3, 4). При этом разность толщин слоев объемного заряда прямо- и обратновключенных переходов в режиме $(-)m-N-n-m(+)$ возрастает более эффективно по сравнению с режимом $(+)m-N-n-m(-)$, что связано с большей глубиной модуляции базовой области в режиме $(-)m-N-n-m(+)$, причем тем выше, чем больше рабочее напряжение (рис. 2, в). Поэтому в режиме $(+)m-N-n-m(-)$ имеем подавление пика в примесной области спектра ($\lambda=1,55$ мкм, рис. 3, б).

Анализ хода зависимостей толщины слоя объемного заряда и напряженности электрического поля для обоих режимов указывает на то, что в режиме $(-)m-N-n-m(+)$ процесс расширения слоя объемного

заряда опережает прирост электрического поля от напряжения, поэтому напряженность электрического поля в режиме запираемого $(-)m-N$ -перехода меньше, чем в режиме $(+)m-N-n-m(-)$ запираемого $n-m(-)$ -перехода (рис. 2, а, б, кривые 4).

Особенности фоточувствительности двухбарьерных фотоэлектрореобразовательных структур

Эффективность расширения слоя объемного заряда запираемых переходов определяет степень увеличения количества генерируемых фотоносителей с напряжением, т. е. коэффициент внутреннего фотоэлектрического усиления. Оценка коэффициента усиления проводилась по методике, приведенной в [12]. В режиме $(-)m-N-n-m(+)$ наблюдаем фотоэлектрическое усиление с самого начального участка (рис. 4, кривые 1, 2), а в случае превалирования роста электрического поля в режиме $(+)m-N-n-m(-)$ фотоэлектрическое усиление на начальном участке мало, величина его увеличивается с ростом рабочего напряжения (рис. 4, кривые 3, 4). Это объясняется тем, что в режиме $(+)m-N-n-m(-)$ вместе с появлением туннельного тока в освещаемом запираемом $nGaInAs$ -Ag-барьере происходит инжекция темновых дырок

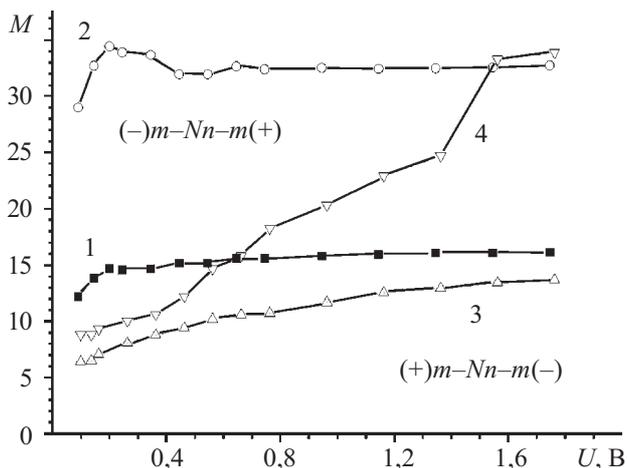


Рис. 4. Зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления M от рабочего напряжения при освещении запираемых переходов:
1 — 100 лк; 2 — 1000 лк; 3 — 100 лк; 4 — 1000 лк

из металла через прямовключенный барьер Ag-NGaAs.

Особенность фотоэлектрической характеристики Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag-структуры заключается в том, что возбуждение фотоносителей осуществляется непосредственно из области объемного заряда потенциального барьера, где поле велико. Кроме того, насыщающийся характер зависимости толщины слоя объемного заряда от напряжения обеспечивает высокую фоточувствительность при малых интенсивностях освещения, т. е. прирост фотогенерируемых носителей уменьшается с напряжением. Поэтому наблюдается большее возрастание фоточувствительности при меньших интенсивностях (100 лк) в обоих режимах (рис. 5, кривые 1, 3).

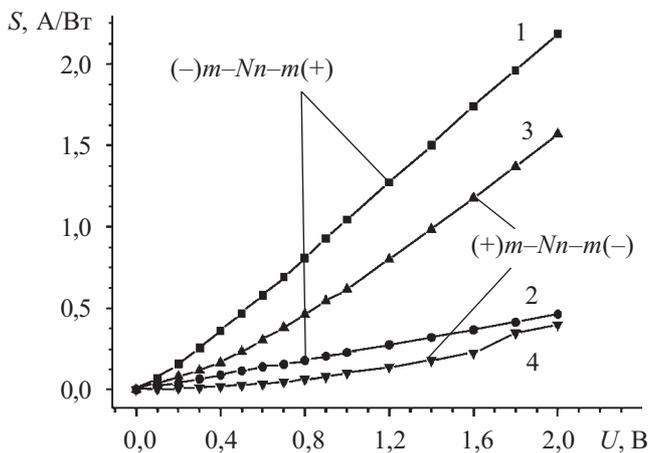


Рис. 5. Зависимости фоточувствительности S от рабочего напряжения при освещении запираемых переходов:
1 — 100 лк; 2 — 1000 лк; 3 — 100 лк; 4 — 1000 лк

Наблюдаемые фотоэлектрические характеристики более полно можно пояснить с помощью энергетических зонных диаграмм. В исследуемой Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag-структуре (см. рис. 6) световое излучение со стороны Ag-NGaAs-перехода напрямую попадает в область объемного заряда и в квазинейтральную часть объемного GaAs:O. При этом будут воз-

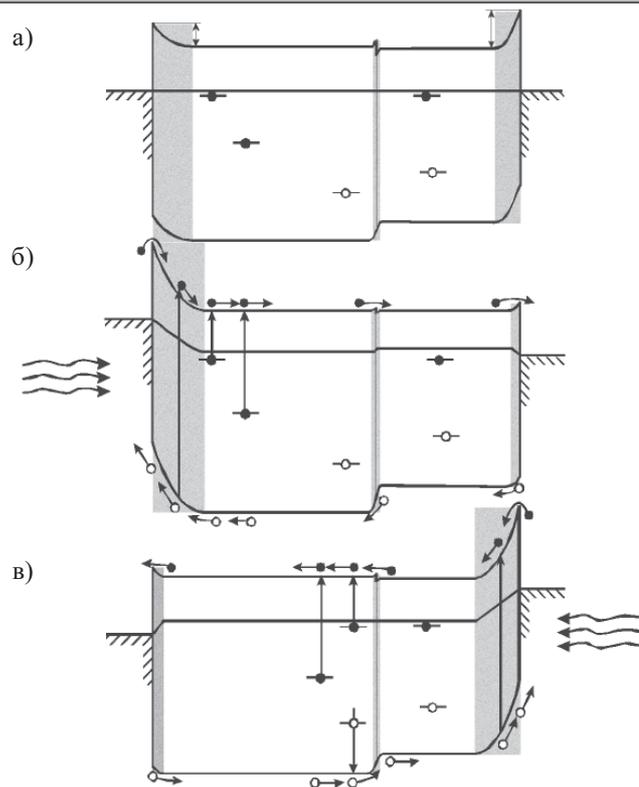


Рис. 6. Энергетическая зонная диаграмма Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag-структуры

буждаться носители из собственной и из примесной области поглощения GaAs, как показано на рис. 6, б. С повышением величины приложенного напряжения будет увеличиваться толщина слоя объемного заряда и величина фототока с преобладанием прироста в примесной области спектрального диапазона (рис. 3, а, кривые 2, 3).

При освещении структуры со стороны гетерослоя пик примеси кислорода ($\lambda=1,55$ мкм) превращается в полочку (рис. 3, б). Это можно объяснить тем, что излучение сначала попадает в слой объемного заряда потенциального барьера, затем поглощается в гетерослое (толщиной 1—2 мкм), а излучение с длиной волны больше ширины запрещенной зоны проникает в объемный GaAs и возбуждает носители с его примесных уровней (рис. 6, в). В результате при поочередном освещении барьеров возбуждение носителей с примесных уровней осуществляется преимущественно с объемной части базы из nGaAs (рис. 6, в). Вместе с тем в области спектра 1,2—1,3 мкм имеем максимальный фототок (рис. 3, а, б), связанный с собственными дефектами с уровнями залегания 0,35—0,4 эВ [13] в nGaAs и в гетерослое nGaInAs.

Заключение

Таким образом, отличительным для Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag-структуры является то, что в ней использование изотипного N-n-гетероперехода в базовой области открывает возможность увеличения фоточувствительности в примесной области поглощения, обусловленной собственными дефектами и примесями кислорода, имеющимися в подложке из GaAs. Их наличие обеспечивает фоточувствительность в областях спектра 1,2—1,3 и 1,55 мкм, перспективных для

волноводных фотоприемников, и одновременно эти же дефекты, выступая в роли рекомбинационных центров в подбарьерной области, подавляют фоточувствительность в коротковолновой части спектра, не влияя на фоточувствительность в примесной области спектра.

Ввиду того, что толщина объемной части базовой области NGaAs больше, чем толщина гетерослоя $n\text{GaInAs}$, то падающее в базовой области напряжение приходится в основном на NGaAs , и возбуждение фотоносителей с его примесных уровней будет эффективным, т. к. концентрация носителей в гетерослое ($7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) больше, чем в подложке ($4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Именно это обстоятельство принято за основу при создании фотоэлектронпреобразовательной $\text{Ag-NGaAs-nGaInAs-Ag}$ -структуры. Структуры с двумя потенциальными барьерами могут служить в качестве модельных для зондирования имеющихся в базовом материале уровней.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Слободчиков С. В., Салихов Х. М., Яковлев Ю. П., Самурков Б. Е. О механизмах усиления фототока в изотипных гетероструктурах $n^+-\text{GaSb}-n^0-\text{GaInAsSb}-n^+-\text{GaAlAsSb}$ // Письма в ЖТФ.— 1998.— Т. 24, № 10.— С. 37—42.
 2. Слободчиков С. В., Салихов Х. М., Руссу Е. В. Полупроводниковые фотодетекторы с палладиевым контактом как детекторы водорода и водородосодержащих газов // Прикладная физика.— 2000.— № 6.— С. 100—105.

3. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Радио и связь, 1990.
 4. Ёдгорова Д. М., Якубов Э. Н. Детекторы оптического сигнала на основе структур Au-nSi-Al , Au-nSi // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2005.— № 4.— С. 39—42.
 5. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. Полупроводниковые фотоэлектронпреобразователи для ультрафиолетовой области спектра // ФТП.— 2003.— Т. 37, вып. 9.— С. 1025—1055.
 6. Каримов А. В. Трехбарьерный фотодиод // Лазерная техника и оптоэлектроника.— 1991.— № 3.— С. 67—70.
 7. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Yakubov E. N. Research of structures corrugated photoreceiving surface // Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics.— 2004.— Vol. 7, N 4.— P. 378—382.
 8. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М. Инжекционно-полевой фотодиод // Радиозлектроника.— 2006.— № 2.— С. 76—80.
 9. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.— М.: Мир, 1984.
 10. Ёдгорова Д. М., Каримов А. В. Определение характеристик двухбарьерных фотодиодных структур с металлополупроводниковыми переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2005.— № 5.— С. 27—30.
 11. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники.— М.: Сов. радио, 1971.
 12. Karimov A. V., Karimova D. A. Three-junction $\text{Au/AlGaAs(n)/GaAs(p)/Ag}$ photodiode // Materials Science in Semiconductor Processing.— 2003.— Vol. 6, Is. 1—3.— P. 137—142.
 13. Жовнир Г. И., Коваленко В. Ф., Краснов В. А., Марончук И. Е. Жидкофазная эпитаксия трехкомпонентных твердых растворов // ЖТФ.— 1985.— Т. 56, № 9.— С. 1814—1815.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



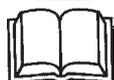
Кларк Э. Р., Эберхард К. Н. Микроскопические методы исследования материалов.— М.: Техносфера, 2007.— 376 с.

За последние десятилетия в области материаловедения был совершен огромный скачок вперед. Одновременно очень быстро развивались и оптические методы исследования материалов. В компьютерной микроскопии произошли столь значительные изменения, что появилась потребность в книге, описывающей возможности новейших оптических микроскопов, используемых для исследования конструкционных материалов.

В книге рассматриваются основы оптической микроскопии, описываются методы оптических исследований, как классические (методы темного поля и интерференционная микроскопия), так и новейшие, а также неоптические — например, акустические и рентгеновские. Рассматривается построение двумерного изображения на основе трехмерного массива данных и методы преобразования цифрового изображения на компьютере, изучается работа конфокального лазерного сканирующего микроскопа, приводятся примеры трехмерной реконструкции структуры композитов.

Книга будет полезна ученым, специалистам в области материаловедения, аспирантам.

НОВЫЕ КНИГИ



Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры корреляционного типа.— М.: Радиотехника, 2007.— 184 с.

Рассмотрены акустооптические сигнальные процессоры корреляционного типа, являющиеся перспективным классом устройств функциональной электроники, существенно расширяющим возможности современных средств обработки сигналов. Предложены оригинальные структуры видео- и радиочастотных акустооптических корреляторов с временным и пространственным интегрированием, теоретически и экспериментально обоснована их работоспособность и установлены предельно достижимые значения основных параметров данного класса устройств.

К. т. н. А. А. АЛТУХОВ, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,
Е. В. ГОРОХОВ, к. ф.-м. н. В. С. ФЕЩЕНКО,
к. ф.-м. н. Н. Х. ТАЛИПОВ

Россия, г. Москва, ООО «УралАлмазИнвест»;
г. Фрязино, Институт радиотехники и электроники
E-mail: info@ural-almaz.ru, alexandr-mityagin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
12.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

АЛМАЗНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

Изготовлены и исследованы планарные алмазные «солнечно-слепые» фотоприемники УФ-диапазона. Приведено теоретическое обоснование принципов работы и экспериментальные параметры фотоприемников в фоторезистивном и фотодиодном режимах.

Широкий круг современных технических задач диктует необходимость построения нового типа многоспектральных помехозащищенных оптоэлектронных систем с предельными обнаружительными характеристиками в ультрафиолетовой области спектра. Основой оптоэлектронной системы является фотоприемник.

Большие перспективы в развитии фотоприемников ультрафиолетового (УФ) диапазона связаны с алмазными материалами — благодаря их уникальным свойствам. Наиболее значимыми в алмазных фотоприемниках [1] являются: возможность построения полностью "солнечно-слепого" фотоприемника — с чувствительностью в области жесткого УФ-излучения (<0,3 мкм); удивительно высокая спектральная селективность фотоприемников на основе совершенных и чистых кристаллов 2а-типа, для которых удается подавить чувствительность в видимой области спектра (0,4—0,7 мкм) более чем на три порядка по отношению к максимуму чувствительности в диапазоне УФ-С; возможность управления одним из важных параметров — областью спектральной чувствительности алмаза путем простого отбора естественных кристаллов с различной концентрацией примеси (дефектов).

В данной работе приведены результаты исследования алмазных УФ-фотоприемников с планарной и "сэндвич"-моделями расположения электродов на основе природного алмаза 2а-типа.

Для построения физической модели и эквивалентной схемы, для анализа механизмов фотоэффектов в алмазных фотоприемниках были изготовлены и исследованы четыре типа структур.

Структура ФП-1 типа "сэндвич": Al—алмаз—Al с концентрацией примесных атомов азота $N_A = 6,8 \cdot 10^{17}$ ат./см³. На плоском кристалле алмаза размерами 0,29×2,36×2,99 мм сверху и снизу (на поверхностях 2,36×2,99 мм) наносились алюминиевые контакты толщиной 0,03 мкм.

Структура ФП-2 планарного типа: Al—алмаз—Al, $N_A = 4,58 \cdot 10^{18}$ ат./см³. На плоском кристалле (0,27×3,52×2,71 мм) два алюминиевых электрода в виде двух параллельных полос изготавливались на одной поверхности кристалла (3,52×2,71 мм). Зазор между алюминиевыми полосами составлял 0,5 мм, толщина слоя — 5 мкм.

Структура ФП-3 представляла собой стандартный алмазный фотоприемник ФПЯ-1 № 003: Pt—алмаз—Al, $N_A = 1,45 \cdot 10^{19}$ ат./см³. На верхней, облучаемой поверхности формировался полупрозрачный Pt-контакт толщиной 0,03 мкм, а на нижней, неосвещаемой поверхности изготавливался алюминиевый электрод.

Структура ФП-4 симметричная с двух сторон алмаза: Pt—алмаз—Pt, $N_A = 4,02 \cdot 10^{18}$ ат./см³. Образец отличался от стандартной структуры ФП-3 тем, что не только на верхнюю, но и на нижнюю (неосвещаемую) поверхность наносится платиновый слой.

Так как алмаз в изготовленных структурах имеет толщину 0,2—0,3 мм, то его объемное сопротивление в эквивалентной схеме фотоприемника включено последовательно и может существенно влиять на параметры прибора. Чтобы оценить это сопротивление, были определены вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоприемников [2]. Обнаружено, что ВАХ фотоприемника ФП-1 (с "сэндвич"-электродами) нелинейна. Наклон ВАХ в обратном направлении (при подаче положительного смещения на нижний контакт) примерно в полтора раза больше, чем в прямом. В то же время для ФП-2 (с планарным расположением электродов) ВАХ практически линейна в диапазоне напряжения ±150 В.

Нелинейность ВАХ фотоприемника ФП-1 может свидетельствовать об асимметрии алюминиевых контактов данной структуры. Расчет показал, что удельная проводимость фотоприемника ФП-2 примерно на порядок выше, чем у ФП-1. Это может объясняться различным уровнем легирования азотом: во втором фотоприемнике концентрация азота в алмазе выше, но только на полпорядка. Можно предполагать, что в общую проводимость планарного фотоприемника ФП-2 вносит свой вклад поверхностная проводимость. Разрыв химических связей на поверхности алмаза может приводить к образованию поверхностных состояний. Плотность этих состояний может быть достаточной для возникновения прыжкового механизма переноса носителей по поверхностным локализованным состояниям. Различие в проводимостях может

быть связано также с концентрацией нескомпенсированных носителей ($N_d - N_a$, где N_d и N_a — концентрации соответственно доноров и акцепторов) или степени их взаимной компенсации. В таком случае можно при существенном различии в концентрациях азота в образцах алмаза получить примерно одинаковую проводимость.

Для исследования фотоэлектрических характеристик фотоприемника структуры освещались светом дейтериевой лампы ЛТ-6Б, пропущенным через монохроматор МДР-23, где и выделялось излучение нужной длины волны.

На рис. 1 приведена ВАХ фотоприемника ФП-3 при облучении светом с длиной волны 210 нм. ВАХ имеет явно выраженную нелинейность. Также следует отметить, что при нулевом напряжении смещения наблюдается небольшой фототок, что типично для классических $p-n$ - и Шоттки-барьерных фотодиодов. Этот ток течет в обратном направлении, так что алмаз проявляется в этом эффекте как полупроводник дырочного типа проводимости. Знак фототока обуславливает изгиб зон, характерный для дырочного полупроводника, и образование области пространственного заряда у поверхности алмаза на границе с Pt-электродом при его освещении. В то же время в отсутствие освещения ВАХ ФП-3 остается симметричной и линейной, что свидетельствует об отсутствии Шоттки-барьера, т. е. алмаз ведет себя как классический диэлектрик.

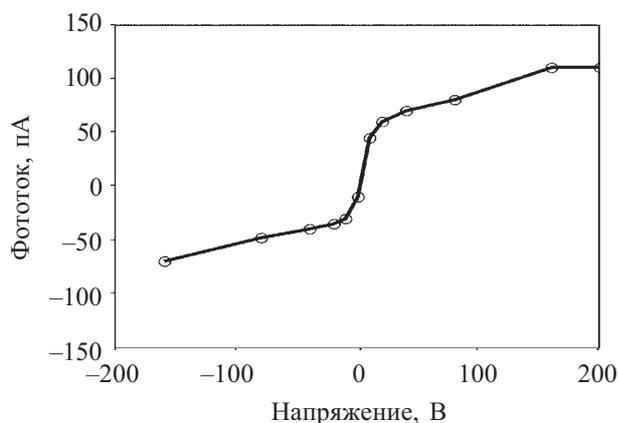


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика алмазного фотоприемника ФП-3 при облучении светом с длиной волны 210 нм

Столь большая несимметричность ВАХ облучаемого фотоприемника не может быть объяснена только повышением эффективности разделения зарядов на барьере Шоттки, т. к. она наблюдается (хоть и в меньшей степени) и при омических алюминиевых контактах. С другой стороны, эту несимметричность можно объяснить разным временем жизни носителей заряда. Как известно [3], почти полное поглощение света с длиной волны 210 нм происходит в алмазе на глубине 3—4 мкм. В случае если мы прикладываем положительный потенциал на нижний электрод, дырки дрейфуют к верхнему электроду, а электроны — к нижнему. При увеличении потенциала все большее количество дырок вытягивается из алмаза, и наступает момент, когда поле вытягивает все заряды из

освещенной области, и происходит насыщение ВАХ, характерное для инжекционных токов, ограниченных объемным зарядом [4].

При смене полярности насыщение происходит гораздо раньше в связи с тем, что дырки рекомбинируют в объеме алмаза, не доходя до противоположного электрода, и весь ток определяется электронами. Столь различное время жизни носителей связано со структурой примесных уровней в запрещенной зоне E_g алмаза (рис. 2).

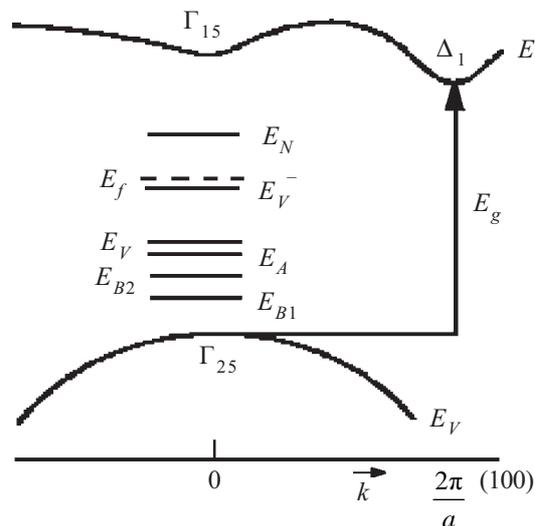


Рис. 2. Расположение примесных уровней в запрещенной зоне алмаза, согласно [3]:

E_N, E_V^-, E_A — донорные уровни; E_V — нейтральная вакансия; E_{B2}, E_{B1} — акцепторные уровни; E_f — уровень Ферми; Γ_{15}, Γ_{25} — характерные минимумы-максимумы на зонной диаграмме алмаза; E_c — уровень зоны проводимости; Δ_1 — уменьшение потенциального барьера для данного непрямого перехода; k — волновой вектор; a — постоянная решетки алмаза

В связи с тем, что примесные уровни в алмазе залегают глубоко, то при комнатной температуре они не оказывают никакого влияния на темновой ток и являются практически неионизованными. С другой стороны, рекомбинация зарядов в широкозонном полупроводнике идет в основном через уровень, расположенный вблизи уровня Ферми [5]. Для дырок это, очевидно, донорный уровень E_V^- . Для электронов такие уровни отсутствуют, что серьезно затрудняет рекомбинацию и увеличивает время их жизни.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики для образца ФП-4. В этой структуре обе ветви — прямая и обратная — почти линейны, причем в обратном смещении фоточувствительность вдвое выше, чем в прямом.

Вольт-емкостные характеристики $C(U)$ алмазных фотоприемников измерялись мостовым методом. Емкость образцов C практически не зависела от напряжения, что свидетельствовало о том, что в отсутствие облучения алмаз ведет себя как классический изолятор, и барьер Шоттки не образуется.

При измерениях частотных зависимостей емкости во всем диапазоне частот ($f=100$ Гц ... 20 кГц) измерительный мост показывал нулевое значение активной проводимости, что свидетельствовало о чисто емкостном характере проводимости фотоприемника на переменном сигнале.

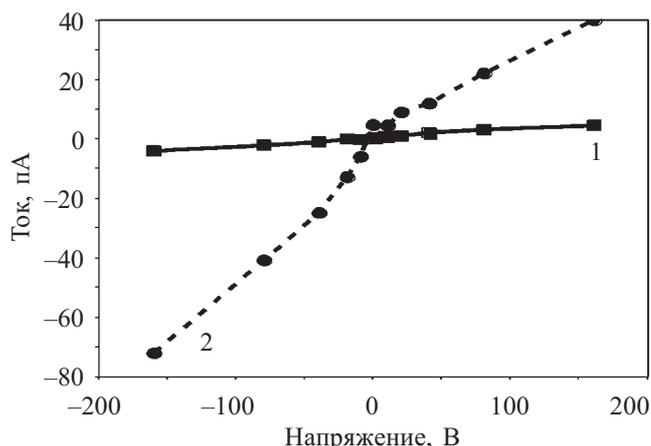


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структуры ФП-4: 1 — в отсутствие облучения; 2 — при облучении

Установлено, что вольт-ваттные характеристики алмазных фотоприемников линейны в диапазоне изменения облученности на четыре порядка.

На экспериментальных спектральных характеристиках максимум чувствительности всех измеренных образцов лежал практически на одной длине волны ($\lambda=0,21 \dots 0,215$ мкм), при этом длинноволновая граница чувствительности монотонно смещается вправо с соответствующим увеличением концентрации азота в алмазе.

Эквивалентная схема алмазного фотоприемника представляет собой параллельно соединенные конденсатор и генератор фототока. Особенностью алмазного приемника является существенная зависимость чувствительности от напряжения.

В 2003 г. сотрудниками «УралАлмазИнвест» впервые был разработан и запатентован УФ-фотоприемник на природном алмазе типа 2а с максимумом чувствительности на длине волны 0,21 мкм. Отношение сигнал/шум данного фотоприемника на модулированном потоке излучения достигает порядка 10^5 . Фотоотклик наблюдается только в области собственного поглощения алмаза ($E_g=5,5$ эВ; $\lambda_{max}=210$ нм). В видимом диапазоне fotocувствительность отсутствует до освещенности 10^{-3} Вт/см² (фотоотклик на контакте «металл—полупроводник»).

Фотоприемники изготавливаются серийно, герметизированы в металлокерамические корпуса: с усилителем на базе малошумящей микросхемы К744УД1а-1 в корпусе типа DIP-22 (ФПА-1) и без усилителя в корпусе DIP-16 (ФПЯ-1). Размеры алмазных fotocувствительных элементов могут изменяться от 1 до 10 мм². Фотоприемники ФПА-1 и ФПЯ-1 классифицируются как солнечно-слепые. Их спектральные характеристики позволяют без существенного снижения квантового выхода детектировать электромагнитное излучение вплоть до 0,1 нм (мягкий

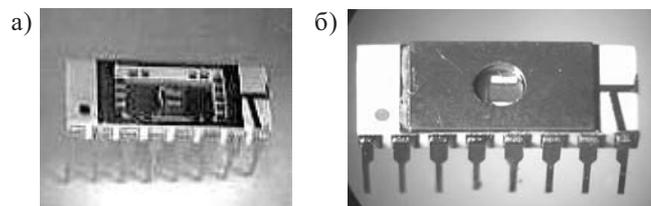


Рис. 4. Внешний вид фотоприемников ФПА-1 (а) и ФПЯ-1 (б)

Фотоэлектрические параметры фотоприемников ФПА-1 и ФПЯ-1

| Параметры | Тип фотоприемника | |
|---|------------------------------|------------------------------|
| | ФПА-1 | ФПЯ-1 |
| Спектральный диапазон чувствительности, нм | 180—250 | 180—250 |
| Максимум спектральной чувствительности λ_{max} , нм | 210 | 210 |
| Максимум спектральной плимесной чувствительности λ_{max} , нм | | 1130 |
| Полог чувствительности при λ_{max} , Вт/Гц ^{1/2} | $(1 \dots 2) \cdot 10^{-13}$ | $(1 \dots 2) \cdot 10^{-13}$ |
| Токовая чувствительность S_i при λ_{max} , А/Вт | | 0,15 |
| Вольтовая чувствительность S_V при λ_{max} , В/Вт | $2,3 \cdot 10^6$ | 0,15 |
| Размер fotocувствительной площадки, мм ² , не более | 1—10 | 1—10 |
| Напряжение смещения/питания, В | 5—60 | 5—100 |
| Динамический диапазон линейности, Вт/см ² | 10^4 | 10^4 |
| Напряжение шума, В/Гц ^{1/2} | — | $2,5 \cdot 10^{-9}$ |
| Постоянная времени фотопроводимости, с | $250 \cdot 10^{-6}$ | $100 \cdot 10^{-6}$ |

рентген). Они чрезвычайно устойчивы к ионизирующему излучению и способны работать в открытом космосе. В астрофизике такие фотоприемники можно использовать в приборах ориентации на Солнце, оценивать ультрафиолетовую составляющую спектра звезд и т. д.

На рис. 4 представлен внешний вид фотоприемников ФПА-1 и ФПЯ-1, в таблице приведены их фотоэлектрические параметры.

Выводы

Изготовленные и исследованные УФ-фотоприемники на основе природного алмаза 2а с различным содержанием азота продемонстрировали возможность реализации как фоторезистивного, так и фотодиодного принципов работы алмазных УФ-фотоприемников. Использование природных алмазов позволило создать уникальные «солнечно-слепые» УФ-фотоприемники с максимумом чувствительности на длине волны 0,21 мкм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуляев Ю. В., Алтухов А. А., Митягин А. Ю. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе алмаза 2а типа для нового поколения аппаратуры наблюдения и распознавания объектов // Наука и технологии в промышленности.— 2006.— № 4 (1).— С. 93—96.
2. Алтухов А. А., Киреев В. А., Кирилин Н. М. и др. Фотоприемники для оптоэлектронных систем УФ-диапазона на природных алмазах // Радиотехника и электроника.— 2006.— Т. 51, № 12.— С. 1526—1529.
3. Квасков В. Б. Природные алмазы России.— М.: Полярон, 1997.
4. Lampert M. A., Mark P. Current injection in solids.— New York: Academic Press, 1970.
5. Роуз А. Основы теории фотопроводимости.— М.: Мир, 1966.

А. А. ГЛУШКО, И. А. РОДИОНОВ, к. т. н. В. В. МАКАРЧУК

Россия, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана
E-mail: vlasov@iu4.bmstu.ru

Дата поступления в редакцию
01.03 2007 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ
(БГУИР, г. Минск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ КМОП СБИС С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ TCAD

Рассмотрены особенности технологических процессов изготовления субмикронных КМОП СБИС и их моделирования. Особое внимание уделено моделированию примесного профиля.

Математическое моделирование играет все большую роль в микроэлектронике, в частности, при изготовлении субмикронных СБИС, в противовес экспериментальному подходу к оптимизации конструкции элементов СБИС методом проб и ошибок. Моделирование технологических процессов существенно уменьшает затраты на экспериментальные работы. Однако при математическом моделировании субмикронных СБИС следует учитывать особенности их изготовления [1, 2]. Элементы СБИС имеют субмикронные характерные размеры порядка 0,5—0,35 мкм, а толщины слоев и глубины переходов составляют около 0,1 мкм.

Маршрут изготовления субмикронных СБИС должен удовлетворять следующим четырем основным требованиям.

Первое. Процессы должны проводиться при температурах, позволяющих свести к минимуму диффузию легирующих примесей в горизонтальном и вертикальном направлениях. Этого можно добиться, используя обработку при высоких температурах очень кратковременно, т. е. проводя быстрый термический или фотонный отжиг.

Второе важное требование — это малые сопротивления. Паразитные сопротивления и емкости могут приводить к существенному снижению быстродействия СБИС. Сопротивление дорожек и контактов с субмикронными размерами может быть уменьшено путем селективного выращивания и осаждения тугоплавких металлов на поликремниевые затворы, а также на истоки и стоки с последующим их силицидированием. Использование силицидов таких тугоплавких металлов как платина, титан и вольфрам позволяет существенным образом снизить вышеуказанные сопротивления.

Третье требование при изготовлении структур с субмикронными размерами — это плоскостность поверхности или планарность, необходимая в основном по трем причинам. Во-первых, для того, чтобы при оптическом экспонировании топологический рисунок был воспроизведен точно (наличие ступенек

существенно затрудняет выполнение этой задачи). Во-вторых, изменения топографии усложняют и без того очень трудную задачу фокусирования экспонирующего устройства (степпера), сокращают глубину фокуса, следовательно, уменьшают ширину процессного окна, а значит, ведут к нестабильности технологического процесса и зачастую к невозможности выполнения требований по надежности и проектным нормам. В-третьих, планарность необходима для обеспечения хорошего перекрытия ступенек в местах перехода от межсоединений к контактам.

И, наконец, четвертое. Для СБИС с размерами структур так называемого «глубокого субмикрона» (250 нм и менее) не представляется возможным разделять технологию производства СБИС и их проектирование [3, 4]. Для таких структур важно учитывать существенное отклонение геометрической формы полученной маски от ее изображения на фотошаблоне. Это отклонение вызывает волновые явления, если длина волны излучения, используемого степпером, сравнима с геометрическими размерами получаемой структуры.

Топологию СБИС изменяют путем введения сложных источников освещения, введения фигур коррекции эффектов близости, учета получаемого рельефа поверхности кристалла, эффекта больших полей, подготовки к последующим процессам фотолитографии и травления и, наконец, учета различных технологических "уходов" [5].

Все описанные корректировки топологии невозможно ввести эмпирическим путем, для этого потребовалось бы слишком много времени. Поэтому и используются все более мощные средства моделирования технологического процесса производства СБИС, к которым относятся системы TCAD.

Необходимо отметить, что в настоящее время существует несколько мощных систем TCAD таких, например, фирм как TMA Inc. (США), ISE Integrated Systems Engineering AG (Швейцария), Synopsys Inc. и Silvaco International (США). Эти системы TCAD обеспечивают возможность сквозного моделирования технологического процесса изготовления СБИС. Стоимость подобных программных средств исчисляется сотнями тысяч долларов за лицензию, не говоря уже о стоимости подготовки специалистов, способных грамотно их использовать. В настоящей статье речь пойдет о моделях, используемых в таких системах технологического моделирования.

На **рис. 1** представлен типичный технологический маршрут изготовления КМОП СБИС.

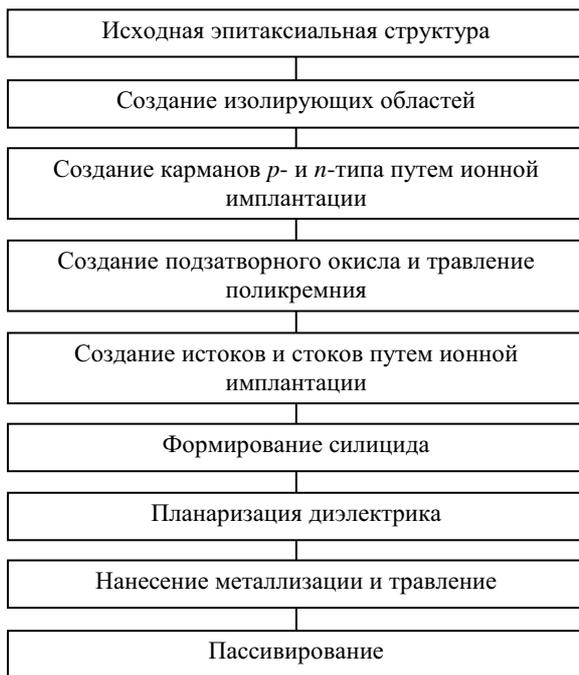


Рис. 1. Технологический маршрут изготовления КМОП-структур

Поперечное сечение реализуемой КМОП-структуры показано на **рис. 2**.

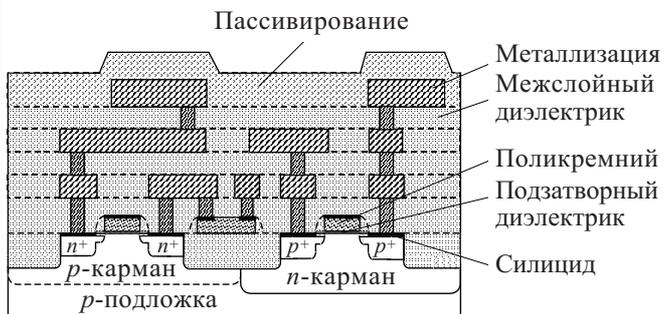


Рис. 2. Поперечное сечение КМОП-структуры

При разработке технологического маршрута формирования субмикронных КМОП СБИС и его моделировании в системах TCAD основной целью является получение заданного примесного профиля, который, в свою очередь, является основой для моделирования электрических характеристик. Из приведенных на рис. 1 технологических операций основную роль в формировании примесного профиля играют процессы ионной имплантации и последующего отжига.

Имплантация обеспечивает чрезвычайно однородные и воспроизводимые профили концентрации, задаваемые посредством управления током ионов во время процесса. Кроме того, оксидные слои, используемые в качестве масок при диффузии, можно применять и для маскирования по отношению к ионному пучку. Ионная имплантация является низкотемпературным процессом, однако для рекристаллизации поврежденных решетки и активирования примесей (пе-

ремещения атомов примеси из междоузлий в узлы решетки) требуется последующий отжиг.

Для расчета имплантационного примесного профиля в системе TCAD применяются аналитические методы, в основе которых лежат функции распределения Гаусса или Пирсона. В этих методах допускается, что каждый пучок имплантированных ионов вызывает перераспределение ионов в пластине в соответствии с вероятностными распределениями Гаусса и Пирсона. Для получения плотности распределения ионов от всего пучка применяют принцип суперпозиции.

Кроме того, для моделирования распределения имплантированных ионов и имплантационных дефектов применяется метод Монте-Карло. С помощью этого метода моделируются физические события, происходящие при торможении отдельных частиц. Ионы тормозятся при ядерных столкновениях и в результате электронного трения. Ядерные столкновения описываются формулой Линдхарда. Местоположение рассеивающих атомов мишени считается случайным.

Преимущество метода Монте-Карло заключается в присущем ему прямом соответствии реальным физическим событиям, а основной недостаток — в чрезмерных затратах машинного времени, необходимого для получения статистически надежных результатов.

Как отмечалось выше, после ионной имплантации необходимо проводить отжиг. Модель отжига в системах TCAD довольно сложна и учитывает как диффузионные процессы, так и процессы химических превращений на поверхности пластины. Если отжиг проводится за короткий промежуток времени, измеряемый секундами, то изменение концентрационного профиля в результате диффузии незначительно. Если же отжиг проводится длительное время, происходит значительное перераспределение примеси.

В основе моделирования диффузионного примесного профиля лежит диффузионное уравнение. Поскольку в ряде случаев это уравнение нелинейно (к примеру, если диффузия происходит при высокой концентрации имплантированной примеси), то необходимо пользоваться численными методами решения дифференциальных уравнений.

Процессы осаждения и травления можно рассматривать как вспомогательные для проведения селективной диффузии и имплантации. Точность проведения этих процессов влияет на качество полученной топологии кристалла, что становится особенно важным при проектировании субмикронных структур.

Осаждение и травление в первом приближении можно рассматривать как процессы, контролируемые скоростью поверхностной реакции. Каждая точка поверхности рассматривается как бесконечно малый источник Гюйгенса, а передвигающийся контур при этом представляет собой геометрическое место точек касания со всеми сферами влияния этих источников. Для выполнения точных и эффективных расчетов в алгоритмах необходимо учитывать особенности моделируемых процессов и соответствующие граничные условия.

И наконец, разработчику технологического процесса важно знать, как организована система моде-

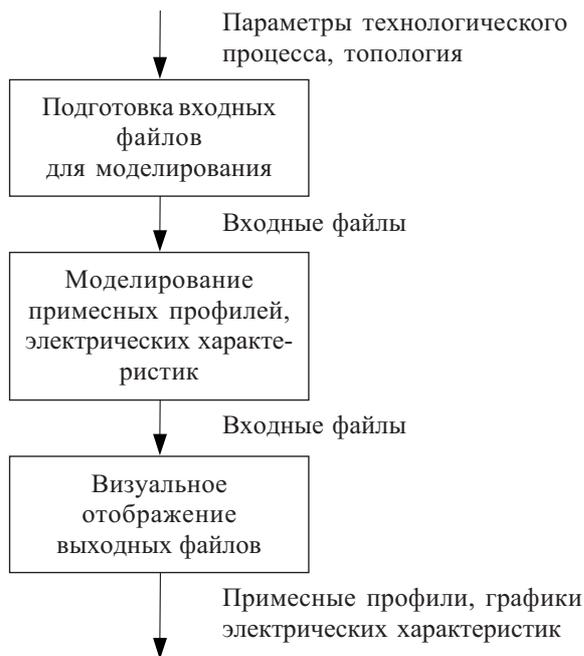


Рис. 3. Структура систем TCAD

лирования. Как видно из рис. 3, все программные компоненты систем TCAD можно условно разбить на три группы. Первая группа программ предназначена для подготовки входных файлов. Данные о технологическом процессе изготовления СБИС, о топологии проектируемой СБИС переводятся ими в программные коды. Вторая группа программ — собственно программы моделирования. Они, как правило, не имеют развитого графического интерфейса, но с их

помощью проводятся расчеты, результаты которых сохраняются в выходных файлах моделирования. Просмотреть результаты моделирования можно с помощью третьей группы программ — программ визуального отображения результатов моделирования.

На входе систем TCAD задаются параметры технологического процесса (последовательность выполнения операций и список необходимых данных для их выполнения), а также топология. На выходе получают профили распределения примесей в кремниевой пластине, которые, в свою очередь, являются исходными данными для последующего моделирования электрических характеристик.

С помощью систем TCAD становится возможным не только проектировать технологический процесс, но и отслеживать его, а также прогнозировать влияние отдельных параметров технологического процесса на качество получаемых СБИС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. МОП СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема.— М.: Радио и связь, 1988.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем.— М.: Мир, 1991.
3. Veendrick Ir. H. J. M. Deep-submicron CMOS ICs.— New York: Kluwer academic publishers, 2000.
4. Kennel H. W., Cea S. M., Lilak A. D. et al. Modeling of ultrahighly doped shallow junctions for aggressively scaled CMOS // International Electron Devices Meeting.— San Francisco, CA.— 2002.— P. 875—878.
5. Sixt P. Optical proximity correction (OPC) // Technology Review.— 2003.— Vol. 1, issue 7.— P. 1—8.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / А. М. Кудрявцев, И. Г. Мальтер, А. Е. Львов, О. П. Павловский, В. А. Шумилов, А. М. Щитов.— М.: Радиотехника, 2006.— 208 с.

Изложены результаты разработок узлов, используемых при создании радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов, рассмотрены общие вопросы ее создания и нормативная база; приведены теоретические основы создания и особенности конструктивного исполнения автогенераторов с электромагнитной и электрической перестройкой частоты, коаксиальных и волноводных направленных ответвителей, стробоскопических преобразователей, умножителей частоты, устройств на поверхностно-акустических волнах, термоэлектрических преобразователей и ряда других типов устройств; представлены методы измерения параметров, характеризующих работу устройств, их применение в радиоизмерительной технике и перспективы развития.

Для специалистов, занимающихся разработкой радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов радиотехнических факультетов.

Бойм К. Цифровая электроника.— М.: Техносфера, 2007.— 472 с.

В книге шаг за шагом раскрывается мир цифровой электроники, ее взаимосвязь с другими областями техники. При создании учебника автор использовал свой большой опыт преподавательской деятельности. Материал изложен последовательно и понятно, начиная с основ. Контрольные тесты с вопросами и задачами в конце каждой главы позволяют проверить понимание пройденного материала; в конце учебника приведены решения.

Книга предназначена для студентов электротехнических и машиностроительных специальностей, инженеров-практиков, техников, а также всех, кто интересуется современной цифровой техникой.



Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, Д. Д. ВЕЛИЧУК, к. т. н. И. С. РОМАНЮК

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества, ОАО «Кварц»
E-mail: om@inst.cv.ua

Дата поступления в редакцию
01.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. П. ЗАЙКОВ
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМОДУЛЕЙ ПЕЛЬТЬЕ

Предложена конструкция установки для экспрессного определения глубины охлаждения, оптимального тока, потребляемой мощности и холодопроизводительности термоэлектрических охладителей Пельтье в различных режимах.

В настоящее время термоэлектрические охладители Пельтье довольно широко распространены в приборостроении, измерительной, лазерной и ИК-технике, а также в медицине и других областях. Их развитие неразрывно связано с совершенствованием теоретических и экспериментальных методов определения параметров. При этом учет особенностей реального термоэлемента в различных условиях эксплуатации возможен только в ряде частных случаев [1]. Аналитическое определение предельных параметров охладителей различных конструкций в большинстве случаев практически неосуществимо и требует дополнительных экспериментальных исследований. Следует отметить, что и существующая контрольно-измерительная база [2—4] не отвечает полностью современным требованиям серийного производства термоэлектрических охладителей [5, 6], особенно в случае микромодулей Пельтье [7], для которых контактный метод контроля глубины охлаждения [8, с. 35—45] малопригоден.

В представленном сообщении приводится описание конструкции установки, предназначенной для экспресс-контроля параметров одно- и многокаскадных микромодулей [9]. Основные требования, предъявляемые к этой установке, — уменьшение величины погрешности контроля температуры охлаждаемых граней микромодулей при исключении брака и возрастании производительности измерений — решались выбором бесконтактного метода регистрации тепловых потоков охлаждаемых граней с помощью анизотропного тепломера [10]. Его высокая чувствительность при минимальном воздействии наверяемые микромодули позволила решить вопрос экспрессности контроля глубины микромодулей не только в режиме холостого хода, но и при заданных тепловых нагрузках в широких температурном и барическом интервалах.

Общая блок-схема этой установки (рис. 1) содержит высокоточный электротепломеханический узел

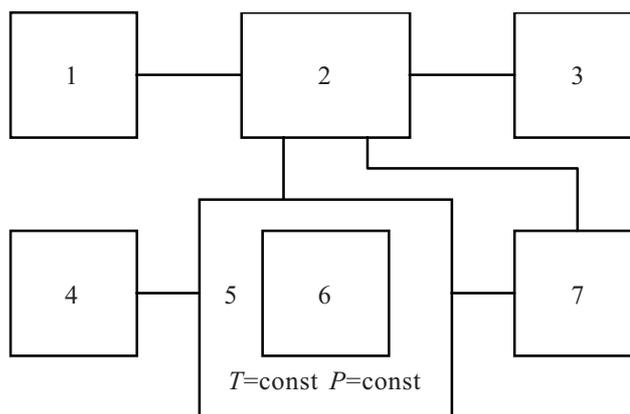


Рис. 1. Блок-схема установки для экспресс-контроля глубины охлаждения термоэлектрических микромодулей Пельтье:

1, 2 — измерительный и коммутационный блоки; 3, 4 — блоки управления и питания; 5 — камера тепла и холода; 6 — электротепломеханический узел; 7 — терморегулятор

6, расположенный в камере тепла и холода 5 (КТХ) [11], температура T внутреннего объема которой задается блоком управления 3 с помощью терморегулятора 7. Степень необходимого разрежения либо избыточного давления P определяется соответствующей вакуумной системой. Измерение термо-ЭДС термопар, падения электрического напряжения на микромодулях, а также тепловых нагрузок и величины протекающего электрического тока проводится измерительным блоком 1 через блок управления 3. Питание установки обеспечивается с помощью стабилизированного источника 4.

Основополагающим элементом установки является электротепломеханический узел (рис. 2). Он состоит из металлического диска-радиатора 5, прикрепленного через стойки 6 к металлическому основанию 1, в котором по окружности с помощью механических фиксаторов закрепляются микромодули — один эталонный (ТЭО-10) и сорок штук поверяемых (ТЭО-7). Эти модули прикреплены к основанию корпусов приборов, на обратных сторонах расположены электровыводы, соединенные с p - и n -ветвями батареи, а также с объектами охлаждения (например с фоточувствительными слоями на охлаждаемой грани). Для уменьшения переходного теплового сопротивления на боковые стенки фиксаторов и корпусов предварительно наносится слой диффузионного мас-

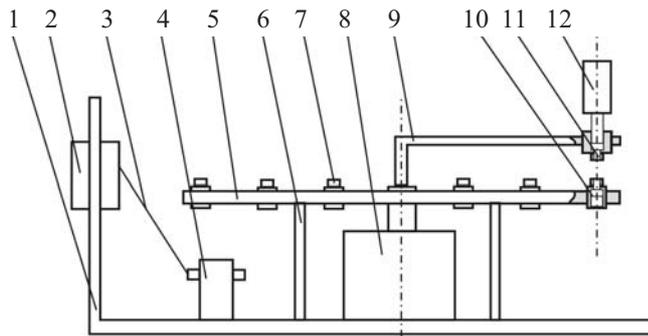


Рис. 2 Блок-схема электротепломеханического узла: 1 — основание; 2 — электровыводной разъем; 3 — соединительный кабель; 4 — электрораспределительная колодка; 5 — диск-радиатор с посадочными местами для микромодулей; 6 — крепежные стойки; 7 — поверяемые микромодули; 8 — шаговый электродвигатель; 9 — поворотный рычаг; 10 — эталонный микромодуль с микротермопарами; 11 — анизотропный тепломер; 12 — съемный механический индикатор для выставления зазоров

ла. Общая площадь диска-радиатора 5 при этом равна произведению площади эксплуатационного радиатора микромодуля на число радиаторов. Рабочая температура диска-радиатора контролируется с помощью дифференциальной термопары.

Анизотропный тепломер (АТ) 11 вместе с механическим индикатором 12 находится на поворотном рычаге 9, в свою очередь прикрепленном к оси электромагнитного шагового двигателя 8, расположенного соосно диску-радиатору 5. Электрические выводы тепломера 11 с помощью группы подвижных контактов в корпусе электромагнитного шагового двигателя 8 подключены к электровыводному разъему 2. Электрические выводы всех микромодулей (эталонного и поверяемых) соединены электрически последовательно, и с помощью распределительной колодки 4 через разъем 2 подключены к соответствующим внешним блокам (см. рис. 1, блоки 1—4). Туда же подведены и электрические выводы всех фоточувствительных слоев, а также микротермопар эталонного микромодуля ТЭО-10. Индикация местонахождения тепломера 11 (рис. 2) над соответствующим поверяемым ТЭО-7 осуществляется с помощью цифровых индикаторов блока управления 3 (рис. 1), также подключенных через соответствующие группы подвижных контактов шагового двигателя 8.

Холодная и горячая грани эталонного ТЭО-10, расположенного в позиции "0", содержит тарированные дифференциальные (в нашем случае медь-константановые) микротермопары, предназначенные для температурной градуировки анизотропного тепломера 11 во всем диапазоне рабочих температур установки. Механический индикатор перемещения 12 предназначен для выставления всех поверяемых ТЭО-7 относительно тепломера 11 на заданное расстояние d . После выставления и последующего крепления всех поверяемых микромодулей на заданном расстоянии индикатор 12 удаляется. Для предотвращения конвективных потоков, возникающих в объеме КТХ, электротепломеханический узел защищен металлическим изотермическим экраном с черной внутренней поверхностью (на рис. 2 экран не показан).

Анизотропный тепломер разновременного компарирования (рис. 3) выполнен на основе анизотропного термоэлектрического модуля АТЭМ-1 из эвтектического материала CdSb—NiSb [5], характеризуемого малой температурной зависимостью вольт-ваттной чувствительности. Его верхняя грань содержит тон-

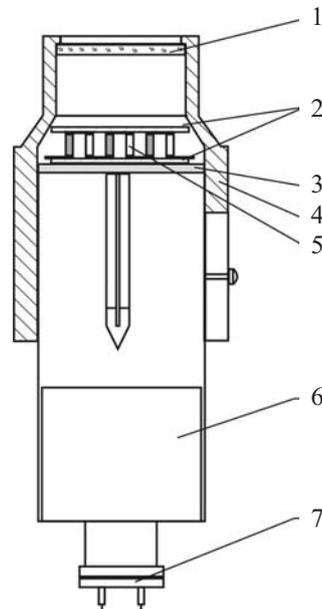


Рис. 3. Конструкция тепломера, работающего в режиме разновременного компаратора лучистых потоков: 1 — фильтр из CdSb; 2 — поглощающий слой; 3 — электроизоляционная теплопрокладка; 4 — корпус; 5 — АТ; 6 — теплоотвод; 7 — электровыводная колодка

кий слой неселективного поглощающего покрытия 2. Входное окно тепломера содержит оптический фильтр 1 из высокосовершенного монокристаллического CdSb стехиометрического состава, поверхность которого просветлена сернистым цинком (92%) на область максимального пропускания 8,0—12,0 мкм. Величина вольт-ваттной чувствительности тепломера при этом составляет $S_q = 0,52$ В/Вт при постоянной времени $\tau = 1,0$ с.

Предлагаемая установка работает следующим образом. В посадочных гнездах диска-радиатора 5 (см. рис. 2) методом кругового зажима закрепляются эталонный микромодуль (ТЭО-10) и сорок штук поверяемых ТЭО-7, выставленных на заданном расстоянии. Далее электротепломеханический узел накрывается тепловым экраном и помещается в КТХ (рис. 1), в которой с помощью блока управления задаются необходимые температурный (T_1) и барический (P_1) режимы. После установления этих режимов через эталонный микромодуль пропускают заданный рабочий ток, вызывающий понижение температуры холодной грани микромодуля, которая регистрируется тарированной микротермопарой. Поскольку приемная грань тепломера расположена напротив холодной грани эталонного микромодуля, то в результате лучистого теплообмена на выходе тепломера появляется электрический сигнал, величина которого пропорциональна температуре охлаждаемой грани ТЭО-10 (при заданных T_1 и P_1), т. е. осуществляется градуировка тепломера.

Поскольку через поверяемые ТЭО-7, находящиеся в позициях 1—40, проходит такой же электрический ток, то подавая поочередно электроимпульсы из блока управления на шаговый двигатель, последовательно переводят тепломер из позиции "0" в позиции

"1"—"40", где расположены поверяемые ТЭО-7. Так как выходной сигнал тепломера пропорционален глубине охлаждения, то при известной его чувствительности легко определяются значения температур охлаждаемых граней поверяемых ТЭО-7. (При необходимости можно определять величины максимального охлаждения поверяемых ТЭО-7 в режимах холостого хода и различных заданных тепловых нагрузок, их холодопроизводительность, а также соответствующие им оптимальные токи и потребляемые электрические мощности.)

Температурная чувствительность установки для экспресс-контроля параметров термоэлектрических модулей Пельтье последней модификации при расстоянии между тепломером и охладителем $d=0,5...1,0$ мм составляла $S_T=55...200$ мкВ/К. Это позволяет оценивать глубину охлаждения микромодулей (в диапазоне термостагирования $T=220...370$ К при давлении $P=10^{-3}...760$ мм рт. ст.) с погрешностью 5%. Время выхода установки на рабочий режим не превышает 1 ч, а ее производительность составляет 160 микромодулей в смену при отсутствии брака, возникающего в процессе измерений. Кроме этого, установка позволяет исследовать характеристики микромодулей при заданных тепловых нагрузках, что дает возможность определения их динамических нагрузочных характеристик. Ее длительная эксплуатация показала высокую надежность и работоспособность в условиях мелкосерийного производства.

Выводы

Создана установка для бесконтактного экспресс-контроля глубины охлаждения микромодулей Пельтье в широком температурном и барическом диапазонах с погрешностью 5%, производительностью 160 шт.

в смену. Длительная эксплуатация установки показала ее высокую эффективность.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Покорный Е. Г., Щербина А. Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств.— Л.: Наука, 1969.
2. Термоэлектрическое охлаждение. Текст лекций / Под общ. ред. Л. П. Булата.— СПб: СПбГУНиПТ, 2002.
3. Громов Г. Г., Драбкин И. А., Ершова Л. Б. Комплексный метод контроля качества конструкции и эксплуатационной надежности термоэлектрических модулей в составе оптоэлектронных приборов.— ЗАО «РМТ», Россия.— 2005.— www.rmtltd.ru/articles/Complex_method_rus.pdf.
4. Пат. 2285980 RU. Способ контроля качества термоэлектрического модуля / Г. Г. Громов, Л. Б. Ершова, В. В. Володин.— 2006.
5. Ащеулов А. А., Глемба Н. Н., Простеби Л. И. Прибор для экспрессного контроля параметров термоэлектрических охладителей // Электромеханика.— 1980.— № 12.— С. 1333—1334.
6. А. с. 991809 СССР. Устройство для измерения глубины охлаждения ТЭО Пельтье / А. А. Ащеулов, Н. Н. Глемба, В. Г. Горбатюк и др.— 1981.
7. А. с. 971052 СССР. Термоэлектрический модуль / А. А. Ащеулов, Н. Н. Глемба, Л. И. Простеби, Р. И. Плащенков.— 1980.
8. Вайнер А. Л. Термоэлектрические параметры и их измерение.— Одесса: Студия "Негоциант", 1998.
9. Ащеулов А. А., Романюк И. С. Некоторые особенности технологии ТЭМ Пельтье повышенной надежности на основе кристаллов Bi-Te-Se-Sb // Термоэлектричество.— 2004.— № 3.— С. 70—80.
10. Ащеулов А. А., Гуцул И. В. Исследование анизотропных оптикотермоэлементов в случае различных оптических и тепловых режимов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2005.— № 4.— С. 10—18.
11. Дунаенко А. Х., Фотий В. Д., Ащеулов А. А. Камера тепла и холода для изделий фотоэлектронной техники // Там же.— 2003.— № 6.— С. 51—52.

НОВЫЕ КНИГИ

Уразаев В. Г. Влагозащита печатных узлов.— М.: Техносфера, 2006.— 344 с.

Книга посвящена проблеме обеспечения влагостойкости, а следовательно, и надежности электронной аппаратуры.

Приведены базовые сведения из области химии и физики полимеров, необходимые для понимания современных технологий, используемых в производстве электронной аппаратуры. Рассмотрены механизмы отказов печатных узлов под действием внешних неблагоприятных факторов. Приведены сведения о технологиях изготовления печатных плат и современных базовых материалах, используемых в их производстве. Детально рассмотрены методы получения и свойства полимерных покрытий, используемых для влагозащиты печатных узлов в России и за рубежом. Особое внимание в книге уделено современным и перспективным технологиям влагозащиты печатных узлов.

Отдельная глава посвящена проблемам, возникающим при производстве электронной аппаратуры, и способам их решения.

Книга предназначена для технических специалистов, занимающихся разработкой и изготовлением электронной аппаратуры.



К. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, г. Киев, ООО «Информационные программные системы»
E-mail: volodymyr_borovytsky@iss.org.uaДата поступления в редакцию
05.03 2007 г.Оппонент В. В. ПОЛЕЖАЕВ
(ЦКБ «Арсенал», г. Киев)

ВЫЧИСЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГЛУБИНЫ РЕЗКО ИЗОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА В ОПТИЧЕСКОМ МИКРОСКОПЕ

Предложен математический аппарат для вычисления дифракционной составляющей глубины резко изображаемого пространства в оптическом микроскопе по критериям Рэля и Марешаля.

В настоящее время оптические микроскопы используются при производстве и контроле изделий микроэлектроники [1—5]. Для обеспечения максимальной пространственной разрешающей способности современные микроскопы оснащаются высокоапертурными микрообъективами, вследствие чего у микроскопов существенно уменьшается глубина резко изображаемого пространства [6, 7]. Глубина резко изображаемого пространства задается максимальной величиной смещения вдоль оптической оси микроскопа от поверхности наблюдаемого образца до положения плоскости предмета, при котором вносимые в изображение искажения являются пренебрежимо малыми [6—9]. Согласно положениям классической теории микроскопа глубина резко изображаемого пространства (ГРИП) содержит три составляющих [6—8]:

1. Аккомодационная составляющая ГРИП обусловлена способностью человеческого глаза изменять свою оптическую силу в определенном диапазоне [6, 7].

2. Геометрическая составляющая ГРИП является следствием ограниченного пространственного разрешения приемника изображения [6, 7]. Если искажения изображения, обусловленные смещением наблюдаемого образца, не превысят предела пространственного разрешения, то такое смещение и будет определять величину геометрической составляющей ГРИП [7]. В случае оптического микроскопа для визуального наблюдения геометрическая составляющая ГРИП будет определяться пределом пространственного разрешения человеческого глаза [7, 9].

3. Дифракционная составляющая ГРИП может быть объяснена тем, что при малых смещениях имеют место пренебрежимо малые aberrации дефокусировки [6, 7, 10, 11]. Именно эта составляющая будет играть существенную роль в высокоапертурной оптической системе микроскопа независимо от способа наблюдения — визуального или при помощи цифровых камер [7].

Известные формулы для вычисления дифракционной составляющей ГРИП были получены более

50—80 лет назад [6, 11]. В то время не было необходимости в обеспечении высокой точности вычисления дифракционной составляющей ГРИП, т. к. наблюдение в микроскоп было преимущественно визуальным [6, 10]. В настоящее время в микроэлектронной промышленности все большее распространение получают микроскопы, способные в автоматическом режиме производить съемку образцов с последующей цифровой обработкой изображений при помощи компьютеров [1—5, 12]. В этом случае используются программы числового увеличения ГРИП, и, как следствие, существенно повышаются требования к точности определения дифракционной составляющей ГРИП [13]. Поэтому задача точного вычисления дифракционной составляющей ГРИП становится актуальной как в оптической микроскопии, так и в оптической литографии [1, 3].

Целью данной работы является создание математического аппарата для точного вычисления дифракционной составляющей ГРИП, который непосредственно основывается на критериях качества оптического изображения. Это позволит обеспечить максимальную эффективность цифровых методов увеличения глубины резко изображаемого пространства в оптической микроскопии [13].

Сравнительный анализ методов определения дифракционной составляющей ГРИП

Наиболее распространенная формула для расчета дифракционной составляющей ГРИП имеет следующий вид [6—11]:

$$\Delta Z_1 = \frac{\lambda n}{2NA^2}, \quad (1)$$

где ΔZ_1 — величина дифракционной составляющей ГРИП;

λ — длина волны;

n — показатель преломления среды между предметом и первой поверхностью оптической системы (рис. 1);

NA — числовая апертура оптической системы микроскопа, $NA = n \cdot \sin(\sigma)$;

σ — апертурный угол в пространстве предмета (рис. 1).

Формула (1) получена по данным о трехмерном распределении энергии в изображении точечного источника, создаваемом дифракционно-ограниченной оптической системой [6, 7, 11]. При ее выводе имел место эмпирический подбор коэффициента, чтобы полученная формула наилучшим образом соответствовала экспериментальным данным [6, с. 88].

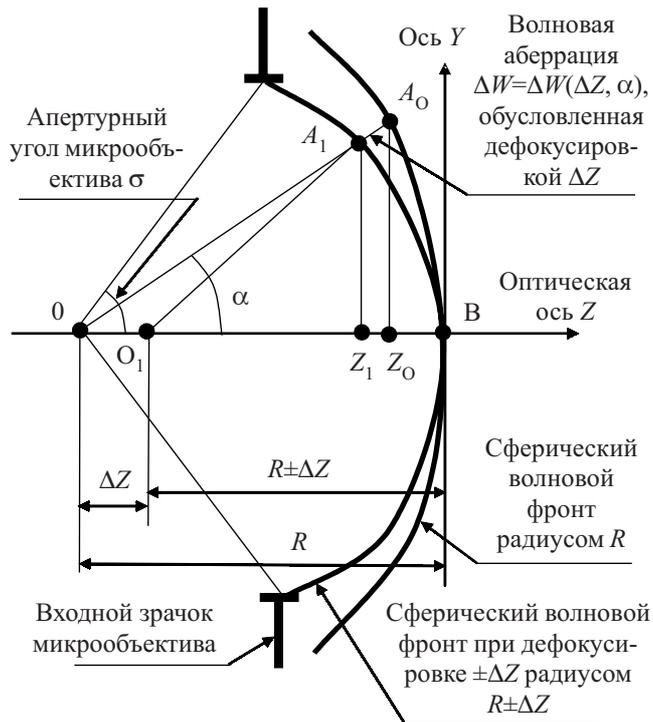


Рис. 1. Волновая aberrация при дефокусировке

Позднее предпринималось несколько попыток пересмотра формулы (1). Предложенные тогда формулы имели следующий вид:

$$\Delta Z_2 = \frac{\lambda}{4n \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2} \right)}; \quad (2)$$

$$\Delta Z_3 = \lambda \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{NA}{n} \right) \right)} \right)^2 =$$

$$= \lambda \frac{\left(\cos \left(\arcsin \left(\frac{NA}{n} \right) \right) \right)^2}{\left(\sin \left(\arcsin \left(\frac{NA}{n} \right) \right) \right)^2} = \lambda \frac{1 - \sin^2 \left(\arcsin \left(\frac{NA}{n} \right) \right)}{\sin^2 \left(\arcsin \left(\frac{NA}{n} \right) \right)} =$$

$$= \lambda \frac{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}{\left(\frac{NA}{n} \right)^2} = \lambda \left(\frac{n^2}{NA^2} - 1 \right), \quad (3)$$

где $\Delta Z_2, \Delta Z_3$ — величины дифракционной составляющей ГРИП согласно [14, 15], соответственно.

Формула (2) является одной из самых новых, она выведена с использованием критерия Рэлея для максимально упрощенного случая описания волновой aberrации дефокусировки [14]. Формула (3) приво-

дится в [15] со ссылкой на более ранние работы. Выполнив ряд преобразований, эту формулу можно привести к более простому виду. Отметим, что результаты расчетов величины дифракционной составляющей, полученные по формулам (1)–(3), имеют отличия, которые зависят от числовой апертуры оптической системы. Следовательно, в настоящее время имеет место неоднозначность в определении величины дифракционной составляющей ГРИП.

Точные формулы для расчета дифракционной составляющей ГРИП

Как было показано выше, дифракционная составляющая ГРИП определяется максимальной величиной смещения, при котором влияние aberrаций дефокусировки является пренебрежимо малым [6, 7, 11]. Aberrации дефокусировки наиболее часто оцениваются показателями, характеризующими волновые aberrации, — максимальным или среднеквадратическим отклонением волнового фронта в плоскости выходного зрачка [11]. Так, согласно критерию Рэлея, для получения качественного оптического изображения должно выполняться условие — максимальное отклонение волнового фронта в области не должно превышать четверти длины волны излучения [5, 11]. Критерий Марешаля требует выполнения другого условия — среднеквадратическое отклонение волнового фронта не должно превышать произведения длины волны излучения на коэффициент 14 [11]. Кроме показателей отклонения волнового фронта, aberrации дефокусировки могут оцениваться параметрами функции рассеяния точки, функции передачи модуляции и др. [8]. Однако использование показателей отклонения волнового фронта является предпочтительным, поскольку их связь с величиной смещения может быть установлена в аналитическом виде без сложных вычислений [6, 7].

Так как плоскости входного и выходного зрачка являются оптически сопряженными, то волновые aberrации в плоскости выходного зрачка могут быть пересчитаны и приведены к эквивалентным волновым aberrациям в плоскости входного зрачка оптической системы микроскопа [7]. Далее все вычисления будут проводиться для плоскости входного зрачка оптической системы, что существенно упростит математический аппарат.

Под волновой aberrацией дефокусировки понимается функция, описывающая отклонение волнового фронта от точечного источника, смещенного от плоскости предметов, до волнового фронта от точечного источника излучения в плоскости предметов (рис. 1). Оба волновых фронта при этом являются сферическими, но их радиусы отличаются, а их общей осью симметрии является оптическая ось.

Условия получения качественного изображения, которое задается показателями волновых aberrаций, могут быть записаны в следующем обобщенном виде:

$$\Delta W_R = \Delta W_R(\Delta Z_R, \sigma) = \max(\Delta W(\Delta Z_R, \alpha)) \leq k_R \lambda, \quad \alpha \in [0, \sigma]; \quad (4)$$

$$W_M = W_M(\Delta Z_M, \sigma) = \frac{\int_0^\sigma (\Delta W(\Delta Z_M, \alpha) - \bar{W})^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{\int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha} = k_M \lambda, \quad (5)$$

где $W(\Delta Z, \alpha)$, \bar{W} — волновая aberrация как осесимметричная функция наклона луча под углом α и дефокусировки ΔZ и ее среднее значение в пределах апертурного угла, соответственно;

$\Delta W_R, W_M$ — максимальное и среднеквадратическое отклонения волнового фронта, характеризующие волновую aberrацию, соответственно;

$\Delta Z_R, \Delta Z_M$ — дифракционные составляющие ГРИП по критериям Рэля и Марешаля, соответственно;

k_R, k_M — коэффициенты Рэля, $k_R=1/4$, и Марешаля, $k_M=1/14$, соответственно.

Определим связь параметров волновой aberrации $\Delta W_R, W_M$ (см. (4), (5)) с величиной смещения точечного излучателя вдоль оптической оси ΔZ . Для этого требуется рассчитать длину отрезка A_0A_1 , который лежит на линии, проходящей через осевую точку плоскости предмета O (рис. 1). Точка A_0 принадлежит сфере с центром в точке O и радиусом R , точка A_1 принадлежит сфере с радиусом $R \pm \Delta Z$. Из прямоугольного треугольника A_0A_1B величина отклонения волнового фронта может быть рассчитана следующим образом:

$$\Delta W(\Delta Z, \alpha) = |A_0A_1| = \frac{Z_0 - Z_1}{\cos(\alpha)} n, \quad (6)$$

где α — угол наклона луча OA_1 .

Обозначим через Z_1, Z_2 координаты точек пересечения луча OA_1 с волновыми фронтами, которые соответствуют несмещенному и смещенному на величину ΔZ положениям точечного излучателя, соответственно:

$$Z_1 = R \cdot \cos(\alpha). \quad (7)$$

Очевидно, что величину Z_2 можно вычислить по координатам точки пересечения луча OA_1 и сферического волнового фронта с радиусом $R \pm \Delta Z$. То есть величина Z_2 может быть найдена как корень следующей системы уравнений (см. рис. 1):

$$\begin{cases} y^2 + (Z + (R - \Delta Z))^2 = (R - \Delta Z)^2; \\ y = (Z + R) \cdot \text{tg}(\alpha). \end{cases} \quad (8)$$

Решение этой системы уравнений приведено в **Приложении 1**, искомый корень имеет вид

$$Z_2 = \frac{-\left(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z\right)}{\text{tg}^2(\alpha) + 1} + \frac{\sqrt{\left(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z\right)^2 - (\text{tg}^2(\alpha) + 1)R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha)}}{\text{tg}^2(\alpha) + 1}. \quad (9)$$

После подстановки полученных выражений (7), (9) в формулу (6) функция, которая описывает взаимосвязь между волновой aberrацией и величиной смещения, примет вид

$$\begin{aligned} \Delta W(\Delta Z, \alpha) &= \frac{Z_0 - Z_1}{\cos(\alpha)} n = \\ &= n \left(R - (R \cdot \text{tg}^2(\alpha) - R + \Delta Z) \cdot \cos(\alpha) - \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{(R \cdot \text{tg}^2(\alpha) - R + \Delta Z)^2 \cdot \cos^2(\alpha) - (\text{tg}(\alpha) \cdot R)^2} \right). \quad (10) \end{aligned}$$

Выражение для расчета величин дифракционных составляющих ГРИП по критериям Рэля и Марешаля может быть записано следующим образом:

$$\Delta Z_R : \Delta W_R(\Delta Z_R, \sigma) = k_R \lambda; \quad (11)$$

$$\Delta Z_M : W_M(\Delta Z_M, \sigma) = k_M \lambda. \quad (12)$$

Выражение (10) следует подставить в формулы (4), (5) и решить уравнения (11), (12) для определения точных значений дифракционной составляющей. (Следует подчеркнуть, что предложенные выражения справедливы только для дифракционно-ограниченных оптических систем [11, с. 402]). Качественные микрообъективы, такие как апохроматы, план-ахроматы, обладают малыми aberrациями [7, 8]. Эти малые aberrации могут быть внесены как дополнительные слагаемые при вычислении волновой aberrации $W(\Delta Z, \alpha)$, что позволит сделать анализ возможных отклонений искомых величин $\Delta Z_R, \Delta Z_M$ (4), (5). К сожалению, расчеты по точным формулам (11), (12) являются трудоемкими и сложными, они требуют вычислений интегралов, нахождения корней нелинейных уравнения и т. п. Это существенно ограничивает возможности применения предложенных формул (11), (12) в инженерной практике. Поэтому целесообразно найти более простые формулы для вычисления дифракционной составляющей ГРИП.

Приближенные формулы для расчета дифракционной составляющей ГРИП

Для упрощения формул (11), (12) примем допущение о том, что волновая aberrация прямо пропорциональна величине угла наклона луча α и прямо пропорциональна величине дефокусировки ΔZ . Такое допущение может быть оправдано на основании двух подходов. Во-первых, нелинейная функция $W(\Delta Z, \alpha)$ может быть разложена в ряд Тейлора [16]. При малых величинах ΔZ слагаемые ряда со степенью выше первой могут быть отброшены, т. е. функция $W(\Delta Z, \alpha)$ будет приведена к линейной функции. Во-вторых, из геометрических соотношений можно предположить, что при малых дефокусировках ΔZ , когда радиус волнового фронта R существенно больше ΔZ , волновая aberrация будет иметь вид, близкий к линейной функции от величины угла α (рис. 2). Данное допущение является справедливым: в оптической микроскопии радиус волнового фронта определяется величинами порядка миллиметра, а допустимая величина дефокусировки — это величины

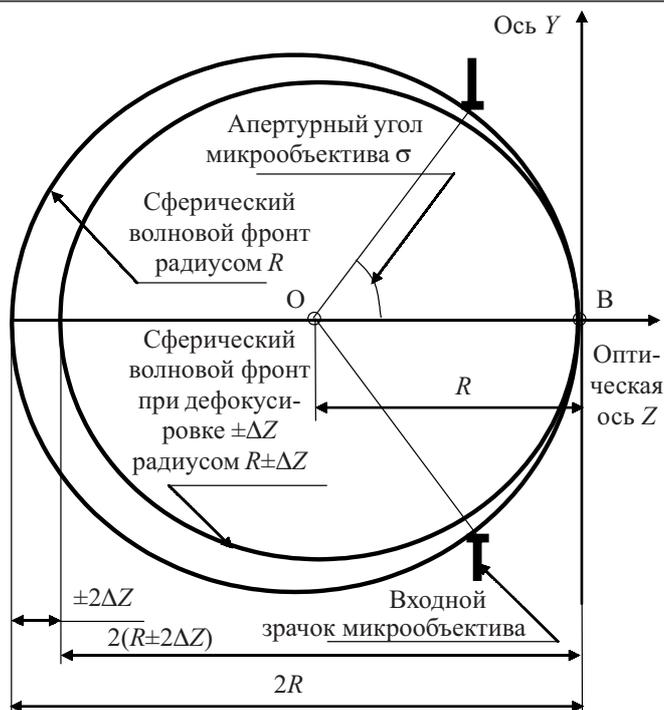


Рис. 2. Линейная аппроксимация волновой aberrации при дефокусировке

порядка микрометра [7, с. 202; 8, с. 112]. Из геометрических соотношений следует, что изменение радиуса волнового фронта на величину ΔZ приведет к волновой aberrации ΔZ при $\alpha = \pi/2$ (см. рис. 2).

В силу этого выражение для расчета волновой aberrации (10) может быть упрощенно записано в следующем виде:

$$\Delta W(\Delta Z, \alpha) \approx \Delta W_A(\Delta Z, \alpha) = \left(\frac{k_w}{\pi/2} n \cdot \Delta Z \right) \alpha, \quad (13)$$

где $\Delta W_A(\Delta Z, \alpha)$ — линейная аппроксимация функции $\Delta W(\Delta Z, \alpha)$ (10), составленная на основе принятого допущения о линейности величин ΔZ и α (рис. 3);

k_w — коэффициент учета нелинейности волновой aberrации, который может быть рассчитан так, чтобы приближенная линейная функция $\Delta W_A(\Delta Z, \alpha)$ приближалась к нелинейной функции $\Delta W(\Delta Z, \alpha)$ по критерию минимума среднеквадратического отклонения (рис. 3).

С учетом полученных результатов упрощенная формула для расчета дифракционной составляющей ГРИП согласно критерию Рэлея может быть записана с использованием (13) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta W_R &\approx \Delta W_{RA} = \max(\Delta W_A(\Delta Z_{RA}, \alpha)) \cdot \sin(\sigma) = \\ &= \max\left(\frac{k_w}{\pi/2} \alpha n \cdot \Delta Z_{RA}\right) \sin(\sigma) = \\ &= \left(\frac{2}{\pi} k_w \sigma n \cdot \Delta Z_{RA}\right) \sin(\sigma) = \\ &= \frac{2}{\pi} k_w \cdot \arcsin\left(\frac{NA}{n}\right) \Delta Z_{RA} \cdot NA = k_R \lambda. \end{aligned} \quad (14)$$

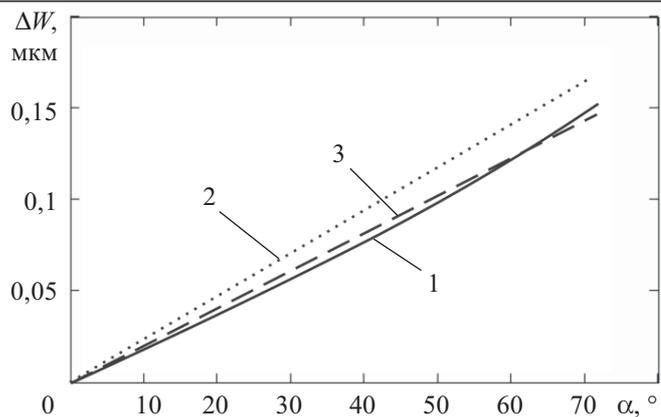


Рис. 3. График зависимости волновой aberrации от величины угла наклона луча для микрообъектива $100\times/0,95$ при дефокусировке $\Delta Z = \Delta Z_1 = 0,31$ мкм:

1 — волновая aberrация $\Delta W(\Delta Z, \alpha)$; 2 — линейная аппроксимация волновой aberrации при $k_w = 1$; 3 — линейная аппроксимация волновой aberrации $\Delta W_A(\Delta Z, \alpha)$ при k_w , рассчитанном по критерию минимума среднеквадратического отклонения

Из формулы (14) следует:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{RA} &= \frac{\pi}{2} \frac{k_R \lambda}{k_w NA} \frac{1}{\arcsin\left(\frac{NA}{n}\right)} = \\ &= \left(\frac{\pi k_R}{2 k_w}\right) \frac{\lambda}{NA \cdot \arcsin\left(\frac{NA}{n}\right)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где W_{RA} — максимальное значение линейной аппроксимации волновой aberrации (в данном случае это волновая aberrация на краю зрачка микрообъектива (рис. 1), которая по критерию Рэлея ограничена значением $k_R \lambda$);

ΔZ_{RA} — приближенное значение дифракционной составляющей ГРИП по критерию Рэлея.

Обратим внимание на появление множителя $\sin(\sigma)$ в формуле (14). Этот множитель отражает важный факт: проекция дефокусировки ΔZ в направлении луча под углом σ , проходящего через край апертурной диафрагмы, определяется величиной $\sin(\sigma)$. Эта проекция определяет расстояние между лучами, которые вышли из точек O и O_1 и прошли через край апертурной диафрагмы (рис. 1).

Аналогично может быть записана упрощенная формула для расчета дифракционной составляющей ГРИП по критерию Марешаля. В этом случае ограничение накладывается на величину среднеквадратического отклонения волнового фронта:

$$\begin{aligned} W_M &\approx W_{MA} = \\ &= \sqrt{\frac{\int_0^\sigma (\Delta W_A(\Delta Z_{MA}, \alpha) - \bar{W}_A)^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{\int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha}} = k_M \lambda, \end{aligned} \quad (16)$$

где W_{RM} — среднеквадратическая величина волновой aberrации (которая согласно критерию Марешала ограничена значением $k_R \lambda$), в числителе — интеграл для расчета квадратического значения, в знаменателе — интеграл для расчета площади волнового фронта в пределах телесного апертурного угла (рис. 1);

\bar{W}_A — среднее значение волновой aberrации в пределах апертурного угла (учитывая свойство осевой симметрии, данное значение может быть найдено как отношение следующих интегралов — в числителе интеграл для вычисления суммарной волновой aberrации, в знаменателе — интеграл для расчета площади волнового фронта в пределах телесного апертурного угла.

$$\bar{W}_A = \frac{\int_0^\sigma \Delta W_A(\Delta Z, \alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{\int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha}, \quad (17)$$

где ΔZ_{MA} — приближенное значение дифракционной составляющей ГРИП по критерию Марешала, полученное с использованием линейной аппроксимации волновой aberrации (13).

Из выражений (16), (17) может быть получена формула для расчета приближенного значения дифракционной составляющей ГРИП по критерию Марешала в аналитическом виде. Ввиду громоздкости вывод приведен в **Приложении 2**, а окончательное выражение имеет следующий вид:

$$\Delta Z_{MA} = \left(\frac{\pi k_M}{2k_w} \right) \frac{\lambda}{n} \times \left[\frac{\left(2 - \arcsin^2 \left(\frac{NA}{n} \right) \right) \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2} + 2 \cdot \arcsin \left(\frac{NA}{n} \right) \frac{NA}{n} - 2}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}} - \left[\frac{\frac{NA}{n} - \arcsin \left(\frac{NA}{n} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}} \right]^{0.5} \right]. \quad (18)$$

Полученные выражения (14)—(17) определяют приближенные значения дифракционной составляющей ГРИП по критериям качества изображения, которые основаны на анализе волновой aberrации при дефокусировке. Обратим внимание, что полученные выражения существенно отличаются от известных формул (1)—(3).

Сравнительный анализ известных и предложенных формул для расчета дифракционной составляющей ГРИП

Для сравнения известных и предложенных формул были выполнены расчеты дифракционной составляющей ГРИП для типовых микрообъективов

оптического микроскопа, а также для ультрафиолетовых микрообъективов, которые используются для контроля изделий микроэлектроники с технологическими нормами 0,090—0,15 мкм [1—5].

При расчете дифракционной составляющей ГРИП по критерию Рэлея полученные значения отличаются от результатов расчета по формулам (1), (2) (**табл. 1**). При малых числовых апертурах (менее 0,65) это различие достаточно мало — 0,5—4%, а при числовых апертурах более 0,65 — отличие возрастает до 34% (**табл. 1**, **рис. 4**). Характерной особенностью результатов, полученных по критерию Рэлея, является то, что рассчитанная дифракционная составляющая оказалась меньше, чем рассчитанная по формуле (1). Это может быть обусловлено тем, что критерий Рэлея накладывает жесткие ограничения на допустимое максимальное отклонение волнового фронта по сравнению с теми ограничениями, что заложены в формулах (1), (2). Также следует отметить, что для микрообъективов с малыми числовыми апертурами формулы (1), (2) удовлетворяют критерию качества изображения Рэлея. Сходство формул (11), (12) и формулы (2) можно объяснить тем, что формула (2) также получена с использованием критерия Рэлея, но другого вида системы уравнений (8) [14]. Использование приближенной формулы (12) позволяет производить вычисления с относительной ошибкой не более 6% (**табл. 1**).

При расчете дифракционной составляющей ГРИП по критерию Марешала полученные значения также отличаются от результатов расчета по формулам (1), (2) (**табл. 2**). При числовых апертурах менее 0,65 это различие составляет 2—5%, а при числовых апертурах более 0,65 — 14—36%. Следует подчеркнуть, что искомые величины, рассчитанные по критерию Рэлея, почти совпадают со значениями по критерию Марешала. Так, относительная ошибка при использовании точных формул для критериев Рэлея и Марешала (11), (12) составляет 2%, а при использовании приближенных формул (15), (18) не превышает 6,5% для всех микрообъективов, которые приведены в **табл. 1, 2**. Этот факт отражает две важные закономерности полученных формул. Во-первых, для волновых aberrаций дефокусировки критерии качества изображения Рэлея и Марешала являются полностью эквивалентными и взаимозаменяемыми с точки зрения расчета дифракционной составляющей ГРИП (**рис. 4**). Для инженерной практики использование критерия Рэлея, в том числе точной и приближенной формул (11), (15), является предпочтительным с точки зрения простоты получения результата. Во-вторых, в случае использования высокоапертурных оптических систем с $NA > 0,65$ изображения с высоким качеством, которое определяется критериями Рэлея и Марешала, могут быть получены при смещениях ΔZ , значительно меньших величины ΔZ_1 (1).

Область применения предложенной методики следует ограничить оптическими системами с высокой числовой апертурой ($NA > 0,65$). При малых числовых апертурах широко распространенная формула (1) обеспечивает требуемую точность — ошиб-

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Таблица 1

Результаты расчета дифракционной составляющей ГРИП по известным формулам и по предложенным формулам на основе критерия Рэлея

| Параметры микрообъектива (β/NA) | Известные формулы для расчета дифракционной составляющей ГРИП | | | Дифракционная составляющая ГРИП по критерию Рэлея | | | |
|--|---|--------------------|--------------------|---|-----------------------|--|---|
| | ΔZ_1 , мкм | ΔZ_2 , мкм | ΔZ_3 , мкм | ΔZ_R , мкм | ΔZ_{RA} , мкм | $\frac{\Delta Z_R - \Delta Z_{RA}}{\Delta Z_R} \times 100\%$ | $\frac{\Delta Z_1 - \Delta Z_R}{\Delta Z_1} \times 100\%$ |
| Типовые сухие микрообъективы ($n=1$), $\lambda=0,55$ мкм | | | | | | | |
| 5× / 0,1 | 27,50 | 27,43 | 54,45 | 27,41 | 27,71 | -1,1 | 0,3 |
| 10× / 0,2 | 6,88 | 6,81 | 13,2 | 6,80 | 6,81 | -0,14 | 1,0 |
| 20× / 0,4 | 1,72 | 1,65 | 2,89 | 1,65 | 1,63 | 1,2 | 4,2 |
| 40× / 0,65 | 0,65 | 0,57 | 0,752 | 0,57 | 0,57 | 0 | 12,0 |
| 50× / 0,8 | 0,43 | 0,34 | 0,31 | 0,34 | 0,35 | -2,9 | 20,0 |
| 63× / 0,85 | 0,38 | 0,29 | 0,21 | 0,29 | 0,30 | -3,5 | 23,7 |
| 100× / 0,95 | 0,31 | 0,20 | 0,059 | 0,2 | 0,21 | -5,0 | 34,4 |
| Типовые микрообъективы с масляной иммерсией, $\lambda=0,55$ мкм | | | | | | | |
| 25× / 0,65 | 0,99 | 0,94 | 2,45 | 0,94 | 0,91 | 3,2 | -4,9 |
| 50× / 1,0 | 0,42 | 0,37 | 0,72 | 0,37 | 0,36 | 2,7 | -12,4 |
| 100× / 1,3 | 0,25 | 0,19 | 0,20 | 0,19 | 0,19 | 0 | -24,2 |
| Ультрафиолетовые микрообъективы (сухие и с водяной иммерсией), $\lambda=0,365$ мкм | | | | | | | |
| 100× / 0,95 | 0,202 | 0,133 | 0,039 | 0,133 | 0,14 | -5,8 | -34,3 |
| 100× / 1,25 | 0,269 | 0,229 | 0,23 | 0,229 | 0,221 | 3,2 | -15,0 |
| Ультрафиолетовые микрообъективы (сухие и с водяной иммерсией), $\lambda=0,248$ мкм | | | | | | | |
| 100× / 0,90 | 0,137 | 0,09 | 0,027 | 0,09 | 0,095 | -5,8 | -34,4 |
| 200× / 1,20 | 0,106 | 0,071 | 0,033 | 0,071 | 0,072 | -1,7 | -32,9 |

Таблица 2

Результаты расчета дифракционной составляющей ГРИП по критерию Марешаля

| Параметры микрообъектива (β/NA) | Дифракционная составляющая ГРИП по критерию Марешаля | | | | Коэффициент k_w |
|--|--|-----------------------|--|---|-------------------|
| | ΔZ_M , мкм | ΔZ_{MA} , мкм | $\frac{\Delta Z_M - \Delta Z_{MA}}{\Delta Z_M} \times 100\%$ | $\frac{\Delta Z_1 - \Delta Z_M}{\Delta Z_1} \times 100\%$ | |
| Типовые сухие микрообъективы ($n=1$) | | | | | |
| 5× / 0,1 | 26,87 | 27,43 | -2,1 | 2,4 | 0,778 |
| 10× / 0,2 | 6,67 | 6,75 | -1,1 | 3,1 | 0,788 |
| 20× / 0,4 | 1,64 | 1,61 | 1,8 | 4,7 | 0,806 |
| 40× / 0,65 | 0,56 | 0,57 | -1,8 | 13,8 | 0,830 |
| 50× / 0,8 | 0,34 | 0,35 | -2,9 | 20,9 | 0,844 |
| 63× / 0,85 | 0,29 | 0,30 | -3,4 | 23,7 | 0,858 |
| 100× / 0,95 | 0,20 | 0,215 | -7,5 | 35,5 | 0,858 |
| Типовые микрообъективы с масляной иммерсией | | | | | |
| 25× / 0,65 | 0,91 | 0,90 | 1,1 | 8,1 | 0,824 |
| 50× / 1,0 | 0,36 | 0,35 | 2,8 | 14,3 | 0,843 |
| 100× / 1,3 | 0,18 | 0,18 | 0 | 28,0 | 0,859 |
| Ультрафиолетовые микрообъективы (сухие и с водяной иммерсией), $\lambda=0,365$ мкм | | | | | |
| 100× / 0,95 | 0,123 | 0,125 | -1,6 | 39,1 | 0,858 |
| 100× / 1,25 | 0,211 | 0,202 | 4,5 | 21,6 | 0,863 |
| Ультрафиолетовые микрообъективы (сухие и с водяной иммерсией), $\lambda=0,248$ мкм | | | | | |
| 100× / 0,90 | 0,084 | 0,085 | -1,6 | 38,7 | 0,858 |
| 200× / 1,20 | 0,066 | 0,64 | 2,1 | 38,8 | 0,886 |

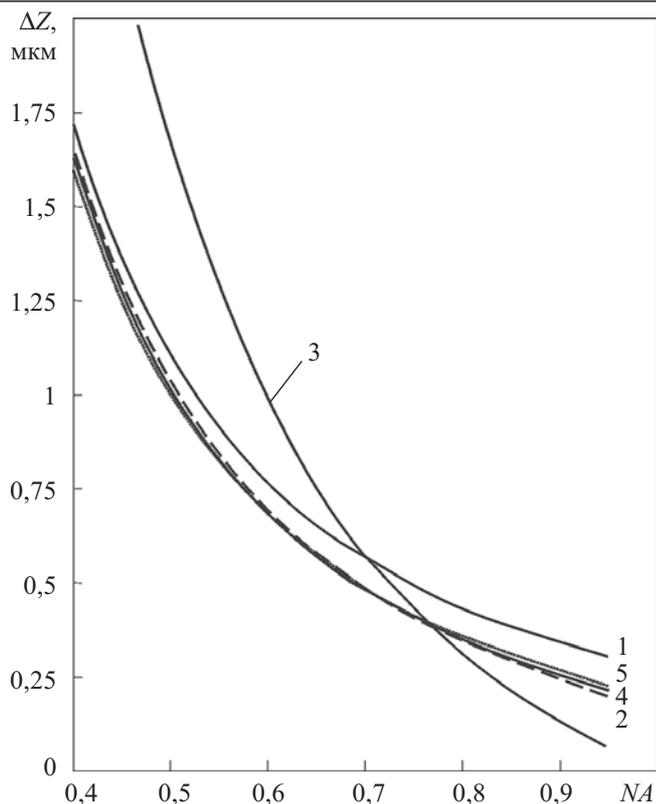


Рис. 4. Зависимости дифракционной составляющей ГРИП от величины числовой апертуры сухого микрообъектива ($n=1,0$), рассчитанные по следующим формулам: 1 — $\Delta Z_1 = \Delta Z_1(NA)$ (1); 2 — $\Delta Z_2 = \Delta Z_2(NA)$ (2); 3 — $\Delta Z_3 = \Delta Z_3(NA)$ (3); 4 — $Z_{RA} = \Delta Z_{RA}(NA)$ (15); 5 — $\Delta Z_{MA} = \Delta Z_{MA}(NA)$ (18)

ка вычисления не превышает 5% (табл. 1, 2). В высокоапертурных оптических системах использование формулы (1) значительно снижает точность вычислений — ошибка возрастает до величин 20—40% (табл. 1, 2). Поэтому при проектировании устройств автоматической фокусировки, программ цифрового увеличения глубины резко изображаемого пространства и систем оптической литографии для микроэлектронной промышленности следует использовать предложенные формулы, которые гарантируют получение высококачественных изображений.

Выводы

1. Предложен математический аппарат для определения дифракционной составляющей глубины резко изображаемого пространства по критериям качества изображения Рэля и Марешала. Дифракционная составляющая рассчитывается исходя из предельно допустимых максимального и среднеквадратического отклонений волнового фронта при дефокусировке. Для инженерной практики предложены упрощенные формулы, полученные методом линеаризации точных формул для расчета дифракционной составляющей ГРИП.

2. При использовании оптических систем микроскопов или установок для фотолитографии с числовой апертурой, большей 0,65, для точного вычисления дифракционной составляющей ГРИП необходимо использовать предложенные формулы. Они позволяют рассчитать допустимое смещение вдоль

оптической оси, которое гарантирует, что полученные изображения будут удовлетворять по качеству критериям Рэля и Марешала. При этом дифракционная составляющая ГРИП будет на 12—40% меньше величины, рассчитанной по широко распространенной формуле (1).

Приложение 1. Решение системы уравнений и получение точного выражения для расчета волновой аберрации при дефокусировке.

$$\begin{cases} Y^2 + (Z + (R - \Delta Z))^2 = (R - \Delta Z)^2; \\ Y = (Z + R) \cdot \text{tg}(\alpha); \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y^2 = (R - \Delta Z)^2 - (Z + (R - \Delta Z))^2; \\ Y^2 = (Z + R)^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha). \end{cases}$$

Получаем квадратное уравнение, одним из корней которого является искомое значение Z :

$$(R - \Delta Z)^2 - (Z + (R - \Delta Z))^2 = (Z + R)^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha);$$

$$(R - \Delta Z)^2 - Z^2 + 2(R - \Delta Z)Z - (R - \Delta Z)^2 =$$

$$= Z^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha) + 2ZR \cdot \text{tg}^2(\alpha) + R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha);$$

$$-Z^2 + 2(R - \Delta Z)Z = Z^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha) + 2ZR \cdot \text{tg}^2(\alpha) +$$

$$+ R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha);$$

$$Z^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha) + 2ZR \cdot \text{tg}^2(\alpha) + R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha) + Z^2 -$$

$$-2(R - \Delta Z)Z = 0;$$

$$(\text{tg}^2(\alpha) + 1)Z^2 + 2(R \cdot \text{tg}^2(\alpha) - R + \Delta Z)Z + R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha) = 0;$$

$$(\text{tg}^2(\alpha) + 1)Z^2 + 2(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z)Z + R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha) = 0;$$

$$Z = \frac{-2(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z)}{2(\text{tg}^2(\alpha) + 1)} \pm$$

$$\pm \frac{\sqrt{4(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z)^2 - 4(\text{tg}^2(\alpha) + 1)R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha)}}{2(\text{tg}^2(\alpha) + 1)};$$

$$Z = \frac{-(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z)}{\text{tg}^2(\alpha) + 1} \pm$$

$$\pm \frac{\sqrt{(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z)^2 - (\text{tg}^2(\alpha) + 1)R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha)}}{\text{tg}^2(\alpha) + 1}.$$

Из двух корней выбираем больший, который соответствует точке А, наиболее близкой к оси ОУ (рис. 1):

$$Z = \frac{-(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z)}{\text{tg}^2(\alpha) + 1} +$$

$$+ \frac{\sqrt{(R(\text{tg}^2(\alpha) - 1) + \Delta Z)^2 - (\text{tg}^2(\alpha) + 1)R^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha)}}{\text{tg}^2(\alpha) + 1} =$$

$$= \frac{1}{\operatorname{tg}^2(\alpha)+1} \left(-\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right) + \right. \\ \left. + \sqrt{\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right)^2 - (\operatorname{tg}^2(\alpha)+1)R^2 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha)} \right) = \\ = \cos^2(\alpha) \left(-\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right) + \right. \\ \left. + \sqrt{\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right)^2 - \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\alpha)} R \right)^2} \right).$$

Воспользуемся следующей известной формулой:

$$\operatorname{tg}^2(\alpha)+1 = \frac{\sin^2(\alpha)}{\cos^2(\alpha)} + 1 = \frac{\sin^2(\alpha)+\cos^2(\alpha)}{\cos^2(\alpha)} = \frac{1}{\cos^2(\alpha)}.$$

Получим выражение для точного расчета волновой aberrации при дефокусировке при выполнении условия $\cos(\sigma) \neq 0$:

$$\Delta W(\Delta Z, \alpha) = \frac{Z_0 - Z_1}{\cos(\alpha)} n \left(\frac{R \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\alpha)} - \right. \\ \left. - \frac{\cos^2(\alpha) \left(-\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sqrt{\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right)^2 - \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\alpha)} R \right)^2} \right)}{\cos(\alpha)} \right) + \\ \left. + \frac{\sqrt{\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right)^2 - \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\alpha)} R \right)^2}}{\cos(\alpha)} \right) = \\ = n \left(R - \cos(\alpha) \left(-\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sqrt{\left(R(\operatorname{tg}^2(\alpha)-1) + \Delta Z \right)^2 - \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\alpha)} R \right)^2} \right) \right) = \\ = n \left(R - \left(R \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) - R + \Delta Z \right) \cos(\alpha) - \right. \\ \left. - \sqrt{\left(R \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) - R + \Delta Z \right)^2 \cdot \cos^2(\alpha) - \left(\operatorname{tg}(\alpha) R \right)^2} \right).$$

Приложение 2. Вывод формулы для расчета приближенного значения дифракционной составляющей ГРИП по критерию Марешала с использованием линейной аппроксимации волновой aberrации.

Сначала выполним расчет среднего значения волновой aberrации:

$$\bar{W}_A = \frac{\int_0^\sigma \Delta W_A(\Delta Z_{MA}, \alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{\int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha} =$$

$$= \frac{\int_0^\sigma \left(\frac{k_W}{\pi/2} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \alpha \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{1 - \cos(\sigma)} = \\ = \left(\frac{2k_W}{\pi} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \frac{\int_0^\sigma \alpha \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{1 - \cos(\sigma)} = \\ = \left(\frac{2k_W}{\pi} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} = \left(\frac{2k_W}{\pi} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \cdot f(\sigma).$$

Для упрощения вывода было введено обозначение:

$$f(\sigma) = \frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} = \text{const.}$$

Обратим внимание, что при вычислении среднеквадратического значения волновой aberrации мы используем не линейную аппроксимацию по минимуму среднеквадратического отклонения от волновой aberrации, а ее огибающую (рис. 3). Этим объясняется отсутствие в формулах коэффициента k_W , который в данном случае считался равным единице ($k_W \equiv 1$):

$$W_{MA} = \sqrt{\frac{\int_0^\sigma \left(\Delta W_A(\Delta Z_{MA}, \alpha) - \bar{W}_A \right)^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{\int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha}} = \\ = \sqrt{\frac{\int_0^\sigma \left(\left(\frac{k_W}{\pi/2} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \alpha - \left(\frac{k_W}{\pi/2} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \cdot f(\sigma) \right)^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{1 - \cos(\sigma)}} = \\ = \left(\frac{2}{\pi} k_W n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \cdot \sqrt{\frac{\int_0^\sigma (\alpha - f(\sigma))^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{1 - \cos(\sigma)}} = \\ = \left(\frac{2}{\pi} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \times \\ \times \sqrt{\frac{\int_0^\sigma \left(\alpha^2 \cdot \sin(\alpha) - 2\alpha \cdot f(\sigma) \cdot \sin(\alpha) + f(\sigma)^2 \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot d\alpha}{1 - \cos(\sigma)}} = \\ = \left(\frac{2}{\pi} k_W n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \times \\ \times \sqrt{\frac{\int_0^\sigma \alpha^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha - 2f(\sigma) \int_0^\sigma \alpha \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha + f(\sigma)^2 \int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha}{1 - \cos(\sigma)}}.$$

Интегралы в подкоренном выражении могут быть взяты аналитически [11, с. 59]:

$$\int_0^\sigma \alpha^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha = -\sigma^2 \cdot \cos(\sigma) + 2\sigma \cdot \sin(\sigma) +$$

$$+2\cos(\sigma) - 2;$$

$$2f(\sigma) \int_0^\sigma \alpha \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha = 2 \left(\frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} \right) \times$$

$$\times (\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)) = 2 \frac{(\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma))^2}{1 - \cos(\sigma)};$$

$$f^2(\sigma) \int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha = \left(\frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} \right)^2 \times$$

$$\times (1 - \cos(\sigma)) = \frac{(\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma))^2}{1 - \cos(\sigma)}.$$

Запишем формулу для расчета среднеквадратического значения волновой aberrации в аналитическом виде:

$$W_{MA} = \left(\frac{2}{\pi} k_w n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \times$$

$$\times \left[\frac{1}{(1 - \cos(\sigma))} \cdot \int_0^\sigma \alpha^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha - \right.$$

$$\left. - 2f(\sigma) \int_0^\sigma \alpha \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha + f^2(\sigma) \cdot \int_0^\sigma \sin(\alpha) \cdot d\alpha \right]^{0.5} =$$

$$= \left(\frac{2}{\pi} n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \times$$

$$\times \left[\frac{(-\sigma^2 \cdot \cos(\sigma) + 2\sigma \cdot \sin(\sigma) + 2 \cdot \cos(\sigma) - 2)}{1 - \cos(\sigma)} - \right.$$

$$\left. - 2 \left(\frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} \right)^2 + \left(\frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} \right)^2 \right]^{0.5} =$$

$$= \left(\frac{2}{\pi} k_w n \cdot \Delta Z_{MA} \right) \times$$

$$\times \left[\frac{(-\sigma^2 \cdot \cos(\sigma) + 2\sigma \cdot \sin(\sigma) + 2 \cdot \cos(\sigma) - 2)}{1 - \cos(\sigma)} - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} \right)^2 \right]^{0.5} = k_M \lambda.$$

Из приведенного выше равенства может быть получена формула для приближенного расчета величины дифракционной составляющей ГРИП по критерию Марешаля:

$$\Delta Z_{MA} =$$

$$= \frac{k_M \lambda}{\left(\frac{2nk_w}{\pi} \right)} \times \left[\frac{(-\sigma^2 \cdot \cos(\sigma) + 2\sigma \cdot \sin(\sigma) + 2\cos(\sigma) - 2)}{1 - \cos(\sigma)} - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} \right)^2 \right]^{0.5} =$$

$$= \frac{\pi k_M \lambda}{2nk_w} \left[\frac{(-\sigma^2 \cdot \cos(\sigma) + 2\sigma \cdot \sin(\sigma) + 2\cos(\sigma) - 2)}{1 - \cos(\sigma)} - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\sin(\sigma) - \sigma \cdot \cos(\sigma)}{1 - \cos(\sigma)} \right)^2 \right]^{0.5} =$$

$$= \frac{\pi k_M \lambda}{2nk_w} \left[\frac{((2 - \sigma^2) \cdot \cos(\sigma) + 2\sigma \cdot \sin(\sigma) - 2)}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}} - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\frac{NA}{n} - \arcsin\left(\frac{NA}{n}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}} \right)^2 \right]^{0.5} =$$

$$= \left(\frac{\pi k_M}{2k_w} \right) \frac{\lambda}{n} \times$$

$$\times \left[\frac{\left(\left(2 - \arcsin^2\left(\frac{NA}{n}\right) \right) \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2} + 2 \arcsin\left(\frac{NA}{n}\right) \frac{NA}{n} - 2 \right)}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}} - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\frac{NA}{n} - \arcsin\left(\frac{NA}{n}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2}} \right)^2 \right]^{0.5}.$$

Для того чтобы записать окончательное выражение, приведенное выше, апертурный угол и его тригонометрические функции выражены через числовую апертуру и показатель преломления:

$$\sigma = \arcsin\left(\frac{NA}{n}\right); \quad \sin(\sigma) = \frac{NA}{n}; \quad \cos(\sigma) = \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n}\right)^2}.$$

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

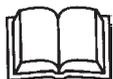
1. Leica Deep-UV Technology. High-resolution imaging & defect review.— Wetzlar: Leica-Microsystems Wetzlar GmbH, 2001.
2. Axio Imager. Microscopy from Carl Zeiss. Product description.— Gottingen: Carl Zeiss MicroImaging GmbH, 2006.
3. Innovative Products and Solutions: Microscopes. Catalogue of Leica-Microsystems products.— Wetzlar: Leica-Microsystems, 2005.
4. Olympus research system microscope AX70-Macro. Product description.— Tokyo: Olympus Optical Co. Ltd, 2004.
5. Nikon Industrial Microscopes Eclipse L150, L150A, ME600L. Product description.— Tokyo: Nikon Co, 2002.

6. Михель К. Основы теории микроскопа.— М.: Машиностроение, 1955.
 7. Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы.— Л.: Машиностроение, 1967.
 8. Панов В. А., Андреев Л. Н. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование.— Л.: Машиностроение, 1976.
 9. Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П. Теория оптических систем.— М.: Машиностроение, 1973.
 10. Бергер И., Гельбке К., Мелис Г. Практическая микрофотография.— М.: Мир, 1977.
 11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973.
 12. Боровицкий В. Н. Выбор цифровой камеры для оптического микроскопа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2004.— № 1.— С. 21—26.

13. Боровицкий В. Н. Оптимизация цифрового фильтра для оценивания фокусировки изображений в цифровой оптической микроскопии // Там же.— 2005.— № 2.— С. 32—40.
 14. Yong I. T., Zagers R., van Vliet L. J. et al. Depth-of-focus in microscopy // Proc. of the 8 Scandinavian Conference on Image Analysis.— Tromso, Norway.—1993.— С. 493—498.
 15. Goldsmith N. T. Deep focus: a digital image processing techniques to produce improved focal depth in light microscopy // Image Analysis and Stereology.— 2000.— N 19.— P. 163—167.
 16. Цыпкин А. Г., Цыпкин Г. Г. Математические формулы. Алгебра. Геометрия. Математический анализ: Справочник.— М.: Наука, 1985.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



С. И. Боридько, Н. В. Дементьев, Б. Н. Тихонов, И. А. Ходжаев. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. Учебное пособие / Под общей редакцией Б. Н. Тихонова.— М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 374 с.

Рассмотрены основы метрологии, методы и средства электрорадиоизмерений, вопросы квалиметрии, стандартизации и оценивания соответствия. Рассмотрены вопросы автоматизации измерений, а также оценивание и поддержание качества радиоэлектронных изделий в процессе эксплуатации. Материал соответствует требованиям действующих нормативных документов в области метрологии, стандартизации, сертификации и технического регулирования, а также современным тенденциям развития теории измерений и измерительной техники.
 Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», будет полезно студентам, обучающимся по направлениям «Телекоммуникации» и «Радиотехника», и специалистам.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Разработка первичных источников тока. (Украина, г. Одесса)
- Вольт-фарадный метод прогнозирования напряжения отсечки ионно-имплантированных полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs. (Украина, г. Днепропетровск)
- Измерение сопротивления силовых диодов под действием импульса ударного тока (Украина, г. Киев)
- Способ оптимизации профиля распределения концентрации носителей по толщине эпитаксиальных слоев (Узбекистан, г. Ташкент)
 - Новое поколение преобразователей ток-напряжение ППТН-02. (Украина, г. Черновцы)
 - Слоистый магнитный полупроводник $FeIn_2Se_4$ и гетеропереход на его основе. (Украина, г. Черновцы)
 - Метод компенсации температурного ухода частоты в резонаторных СВЧ-измерителях на основе ГУН. (Украина, г. Днепропетровск)



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

Д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ, д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН,
к. т. н. А. Ю. ИЛЮШЕЧКИН

Россия, г. Москва, ЦНИТИ “Техномаш”; Австралия, г. Брисбейн,
Квинслендский университет
E-mail: samoylovich@technomash.ru

Дата поступления в редакцию
16.03 2007 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. А. ФИНКЕЛЬ
(ХФТИ, г. Харьков)

СТРОЕНИЕ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ ПЛЕНОК $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$

Методами трафаретной печати и ВЧ-магнетронного распыления с дальнейшей термообработкой в области температур плавления получены пленки системы Bi-Sr-Ca-Cu-O , обладающие высокотемпературной сверхпроводимостью.

Развитие технологий получения пленок, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП), является одной из актуальных задач современной электронной промышленности, а наиболее распространенными ВТСП-материалами, сформированными в виде пленок, являются сложные оксиды систем Y-Ba-Cu-O , Tl-Ba-Cu-Ca-O и Bi-Sr-Ca-Cu-O . При этом система Bi-Sr-Ca-Cu-O обладает двумя ВТСП-фазами — $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Bi-2223) и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (Bi-2212) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние ($T_{\text{кр}}$) примерно 110 и 86—92 К, соответственно. Для пленок Bi-2212 было обнаружено [1], что плотность критического тока ($J_{\text{кр}}$) возрастает на порядок при низких температурах, если пленки сформированы методом термообработки в области температур плавления (partial melting method), в условиях твердофазного синтеза.

Целью работы было изучение строения, состава и сверхпроводящих свойств пленок, полученных методом термообработки в области температур плавления, в зависимости от параметров термообработки, толщины пленки и материала подложки.

Получение пленок

Пленки системы Bi-Sr-Ca-Cu-O формировали методами тонко- и толсто пленочной технологий [2—6]. При толсто пленочной технологии в качестве исходного материала использовался порошок состава Bi-2212, полученный осаждением оксалатов и нитратов Bi, Sr, Ca и Cu. Измельченный и просеянный порошок (средний размер частиц 6—7 мкм) смешивался с органическим растворителем (бутилацетат, терпинеол) и связующим веществом (этилцеллюлоза) до получения однородной гомогенной массы, наносимой через маску на подложку. При легировании к порошку Bi-2212 добавляли порошок Ag, при этом были приготовлены пасты с содержанием серебра (C_{Ag}) 2, 5, 10 и 20 мас.%. Нанесенные на подложки пленки высушивались на воздухе при температуре

110—130°C, нагревались до температуры 500°C и выдерживались в течение 1—2 ч для удаления органических соединений.

Для формирования пленок методом тонко пленочной технологии применяли установки ВЧ-магнетронного распыления, укомплектованные магнетронами, специально разработанными для использования порошковых мишеней [4—6]. Мишени изготавливали нанесением суспензии (порошок Bi-2212 в этиловом спирте) в углубление корпуса магнетрона и ее просушиванием на воздухе и в режиме распыления (Ar-плазма, давление 2,5 Па, мощность ВЧ-разряда 10—50 Вт). Использовались однофазные порошки Bi-2212, полученные из смеси Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO и обладающие ВТСП при 88 К. Условия осаждения пленок: давление газа (Ar или $\text{Ar}+(20\dots 100)$ об.% O_2) 0,9—1 Па; мощность ВЧ-разряда 70—150 Вт; электрическое смещение на подложкодержателе 10—20 В; температура подложки 120—500°C; расстояние между мишенью и подложкой 35 мм; скорость осаждения пленок в Ar составляла 0,3—0,8 мкм/ч, в смеси $\text{Ar}+\text{O}_2$ — <0,2 мкм/ч.

Для сверхпроводящих пленок Bi-2212 важным является формирование плотной слоистой структуры (аксиально текстурированной в плоскости (00*n*)), которая обладает наиболее высокими значениями $T_{\text{кр}}$ и $J_{\text{кр}}$. Указанная структура может быть получена методом термообработки в области температуры плавления (зависящей от состава пленки и материала подложки). Особенностью данного метода является термическая обработка сформированных пленок вблизи точки плавления с последующим медленным охлаждением для образования высокоориентированной в плоскости, перпендикулярной оси *C*, слоистой структуры. Применялись подложки: монокристаллические из оксида магния с ориентацией рабочей поверхности по {100} ($\text{MgO}\{100\}$), сапфира ($\text{Al}_2\text{O}_3(01\bar{1}2)$) и алюмината лантана ($\text{LaAlO}_3\{100\}$); поликристаллические из Al_2O_3 и Ag; слоистые структуры вида $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$. Поскольку слой Ag в слоистых подложках $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ должен быть достаточно толстым, чтобы предотвратить диффузию расплава в подложку, последний наносился методом трафаретной печати. Использовали пасту, содержащую Ag и бутилацетат в качестве растворителя. После просушки и отжига (900°C, 2 ч) пленка Ag (толщиной 40—

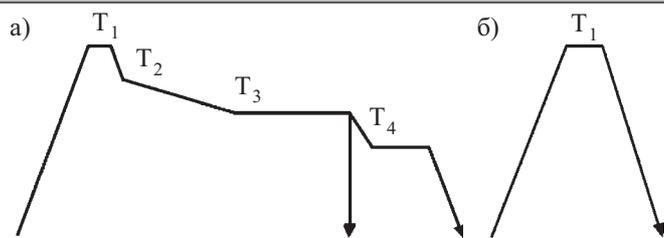


Рис. 1. Условия отжига пленок Bi-2212 на подложках из различных материалов:
 а — MgO, LaAlO₃ и Ag; б — Al₂O₃

50 мкм) полировалась с использованием алмазной суспензии (размер частиц 1 мкм).

При термообработке ВТСП-пленки нагревались до температуры плавления T_1 (рис. 1, а) и выдерживались при данной температуре в течение 5—30 мин. В последующем температура понижалась со скоростью 120 °С/ч до начала кристаллизации T_2 , после чего пленки медленно (2—5 °С/ч) охлаждались до температуры T_3 , соответствующей нижнему порогу кристаллизации. Пленки выдерживались при указанной температуре в течение 6—8 ч и, по окончании процесса, закачивались быстрым охлаждением до комнатной температуры (подложки из MgO), либо отжигались в инертной (Ar) атмосфере в течение 6—10 ч (подложки из LaAlO₃, Ag и Al₂O₃/Ag) при температуре $T_4=600...650^{\circ}\text{C}$. Значения температур T_1 , T_2 и T_3 варьировались в зависимости от материала подложки, состава паст и атмосферы отжига и составляли — для пленок на подложках из MgO и LaAlO₃: T_1 — 878...920°С, T_2 — 868 и 886°С, T_3 — 840 и 868°С (в зависимости от состава паст); для пленок на подложках из Ag и Al₂O₃/Ag: T_1 — 878...900°С, T_2 — 868 и 884°С, T_3 — 840 и 845°С (в зависимости от парциального давления кислорода). Для пленок на подложках из Al₂O₃ температура плавления изменялась в пределах 870—942°С, при этом химическая активность подложек из Al₂O₃ становилась существенной (отжиг проводился либо в воздухе, либо в O₂). Чтобы избежать химического взаимодействия пленки и подложки, последовательно проводили нагрев до температур плавления T_1 , изотермический отжиг в течение 10 мин, быстрое охлаждение (5 °С/мин) до комнатной температуры (рис. 1, б).

Строение, состав и сверхпроводящие свойства пленок Bi-2212 на подложках из MgO

Для паст с разным фазовым составом определены условия отжига, оптимальные для достижения максимальных значений $T_{кр}$ и $J_{кр}$. При исследовании влияния фазового состава исходных паст на условия термообработки в области температур плавления применялись различные по фазовому составу порошки Bi-Sr-Ca-Cu-O с исходной стехиометрией, близкой к Bi-2212. На основе одного из порошков Bi-2212 были приготовлены пасты с разным содержанием Ag (см. табл. 1; в табл. 2 — характеристики порошков, входящих в состав паст).

Синтезированные при температурах T_c 800, 820 и 860°С порошки Bi-2212 имели переменные средний размер частиц и фазовый состав и различались по

Таблица 1

Содержание Ag(C_{Ag}) в пастах из порошка Bi-2212

| | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|---|----|----|
| Температура синтеза порошка Bi-2212, T_c , °С | 800 | 820 | 860 | | | |
| C_{Ag} , мас. % | 0 | | 2 | 5 | 10 | 20 |

Таблица 2

Характеристики порошков

| Температура синтеза порошка Bi-2212, T_c , °С | Средний размер частиц, мкм | Соотношение фаз 2201:2212, мас. % | Соотношение компонентов Bi:Sr:Ca:Cu |
|---|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 800 | 3,8—4,1 | 80:20 | 2,00:1,90:0,91:2,05 |
| 820 | 5,9—6,1 | 40:60 | 2,00:1,97:0,91:2,04 |
| 860 | 6,9—7,0 | <10:>90 | 2,00:2,04:0,94:2,01 |

стехиометрии. Основными фазами порошков были Bi-2212 и Bi₂Sr₂CuO_y (Bi-2201), а концентрация остальных фаз составляла менее 2 мас. %.

Содержание фаз Bi-2212 и Bi-2201 ($V_{2212(2201)}/V$) оценивалось по средним интенсивностям дифракционных линий (113) и (115), нормированным к суммарным интенсивностям линий для обеих (Bi-2212 и Bi-2201) фаз (рентгеновский дифрактометр SIEMENS). Расчет проводился для фаз Bi-2212 и Bi-2201, соответственно, по формуле

$$V_{2212(2201)}/V = \{ [I^{2212(2201)}/I]_{(113)} + [I^{2212(2201)}/I]_{(115)} \} / 2,$$

где $I = I^{2212} + I^{2201}$; I^{2212} и I^{2201} — интенсивность пиков (113) (или (115)) для соответствующих фаз.

Строение и фазовый состав пленок не менялись при температурах отжига <885°С (для пленок, полученных из паст без Ag). Таким образом, пленки, полученные из паст на основе порошков, синтезированных при T_c 800 и 820°С, содержали Bi-2201-фазу, при отжиге указанных пленок при 860°С в течение 10 ч фаза Bi-2201 исчезала, но появлялись вторичные фазы CaCO₃, CuO и SrO. В результате термообработки в области температур плавления толщина пленок уменьшалась в 2—3 раза и составляла 10—50 мкм, при этом изменялось и строение пленок.

На рис. 2 приведены рентгенограммы исходных порошков и пленки Bi-2212, полученной после термообработки при 888°С. Рентгенограммы отожженных пленок, полученных из паст с разным фазовым составом, были идентичны, а именно, пленки состояли из ориентированной по (00n) фазы Bi-2212 с небольшим количеством вторичных фаз CaCO₃ и CuO.

Упорядочение кристаллитов Bi-2212 во многом зависит от скорости охлаждения пленок в интервале температур T_2 и T_3 , а именно, при быстром охлаждении (120 °С/ч) формируются разупорядоченные системы из кристаллитов Bi-2212 (рис. 3, а, растровый электронный микроскоп (РЭМ) JEOL 6400F), тогда как при медленном охлаждении (2—5 °С/ч) образуется высокоупорядоченная слоистая структура с ориентированием слоев параллельно плоскости подложки (рис. 3, б).

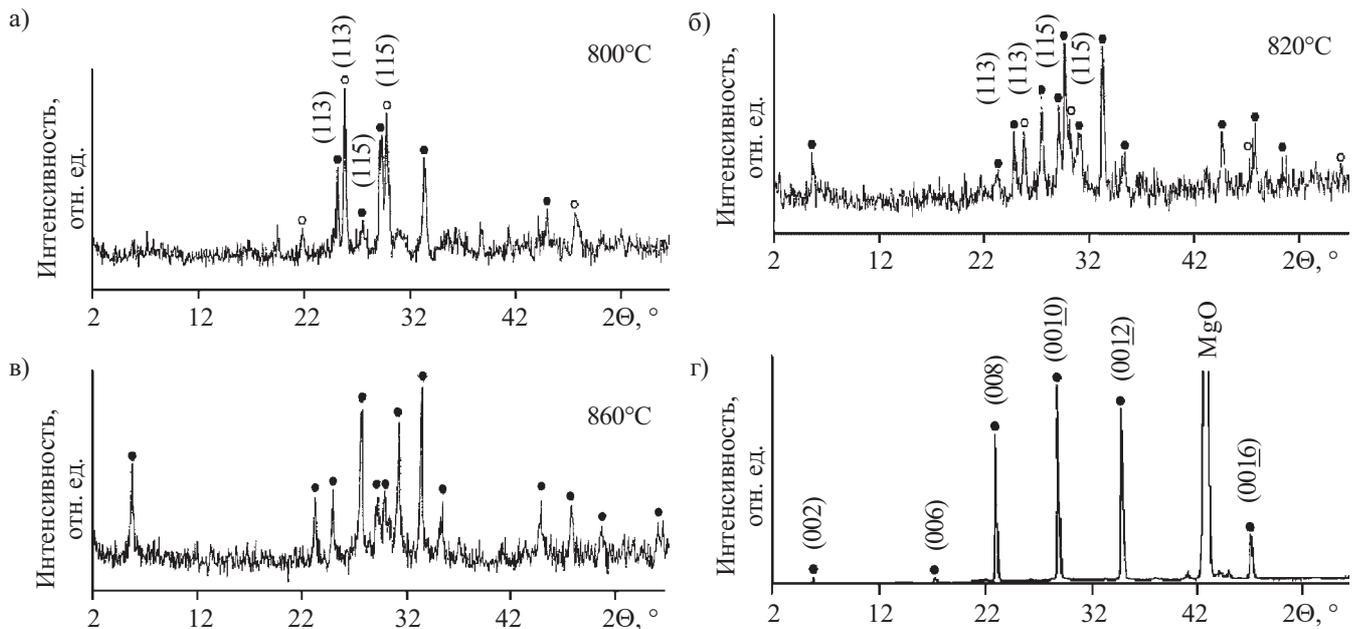


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы (Cu, k_{α} -излучение):

a—в — используемые в пастах порошки, синтезированные при температурах 800, 820 и 860°C (● — Bi-2212; ○ — Bi-2201); г — пленка Bi-2212, сформированная на подложке из MgO{100} с использованием пасты на основе порошка, синтезированного при 820°C, после отжига при 888°C

На $J_{кр}$ влияют условия отжига, фазовый состав паст и толщина пленок, но среди указанных факторов параметры отжига являются наиболее важными для достижения высоких значений $J_{кр}$. Для определения сопротивления в измерениях $T_{кр}$ и $J_{кр}$ применялся четырехзондовый метод. Измерения $T_{кр}$ проводились с использованием установки LAKE SHORE Mod. 7000 AC SUSCEPTOMETER в диапазоне температур 77—300 К, а измерения $J_{кр}$ — при погружении в жидкий азот (77 К). Плотность критического тока пленок, охлажденных в интервале температур 886—868°C ($T_1=888^\circ\text{C}$) со скоростью 2—5 °C/ч, в 2—4 раза выше, чем у пленок, охлажденных со скоростью 120 °C/ч (табл. 3).

Пленки, полученные из пасты с $T_c=860^\circ\text{C}$, имеют более широкий диапазон температур плавления для получения высоких $J_{кр}$ по сравнению с пленками, которые получены из многофазных паст (T_c 800 и 820°C). В табл. 4 приведены $J_{кр}$ пленок, полученных из пасты с $T_c=860^\circ\text{C}$ в интервале температур $T_1=900\dots 915^\circ\text{C}$ в течение 15—30 мин. Для пленок, в которых использовались пасты с T_c 800 и 820°C (полученных при таких же параметрах отжига), значения $J_{кр}$ были близки к нулю.

Строение пленок влияет на $T_{кр}$: пленки, состоящие из разупорядоченных кристаллитов, имеют $T_{кр}=86,8\dots 89,0$ К, тогда как для пленок со слоистым строением $T_{кр}=90,0\dots 92,2$ К. Фазовый состав исходной композиции имеет существенное влияние на условия, в которых начинается плавление пленок, в частности, у пленок, содержащих вторичные фазы (CaCO_3 , CuO и SrO), термообработка при температурах $>890^\circ\text{C}$ (в области температур плавления) не приводит к увеличению $J_{кр}$. Дегградация морфологии и

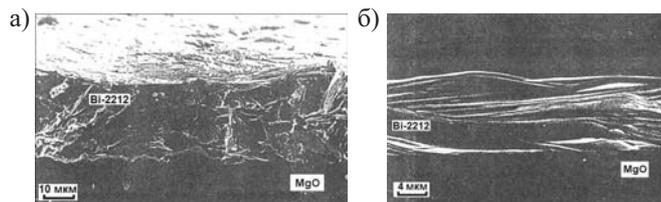


Рис. 3. Строение сколов пленок Bi-2212, сформированных с использованием паст на подложках из MgO{100}, после отжига (888°C) при скорости охлаждения в интервале T_2-T_3 : а — 120 °C/ч; б — 5 °C/ч

Таблица 3

Зависимость $J_{кр}$ пленок из различных паст и различной толщины от скорости охлаждения

| Паста | Параметры пленки | Скорость охлаждения, °C/ч | | |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------|------|
| | | 120 | 5 | 2 |
| $T_c=800^\circ\text{C}$ | Толщина, мкм | 30 | 30 | 15 |
| | $J_{кр}$, 10^3 А/см ² | 0,17 | 0,36 | 3,8 |
| $T_c=820^\circ\text{C}$ | Толщина, мкм | 40 | 20 | 12 |
| | $J_{кр}$, 10^3 А/см ² | 0,16 | 1,1 | 1,2 |
| $T_c=860^\circ\text{C}$ | Толщина, мкм | 30 | 30 | 20 |
| | $J_{кр}$, 10^3 А/см ² | 0,14 | 0,48 | 0,98 |

Таблица 4

Зависимость $J_{кр}$ пленок из пасты с $T_c=860^\circ\text{C}$ от режима отжига

| Параметры пленки | Режим отжига | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|-----|-----|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|
| | 900°C, 15 мин | | | | 905°C, 15 мин | | 910°C, 20 мин | | 915°C, 30 мин | |
| Толщина, мкм | 11 | 13 | 18 | 26 | 19 | 20 | 15 | 20 | 25 | 18 |
| $J_{кр}$, 10^3 А/см ² | 8,0 | 5,7 | 3,4 | 3,0 | 3,9 | 4,8 | 4,4 | 2,8 | 3,4 | 2,2 |

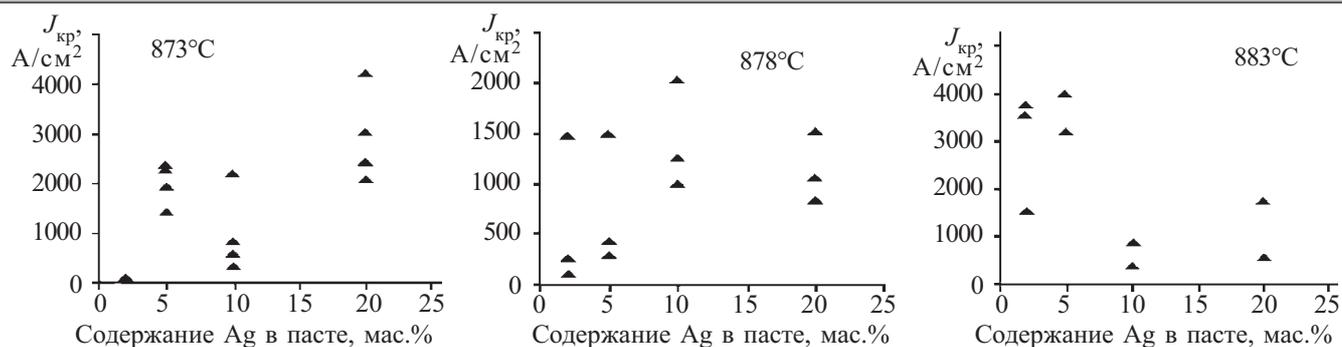


Рис. 4. Зависимость $J_{кр}$ пленок Bi-2212+Ag, сформированных с использованием паст на подложках из MgO{100}, от содержания Ag и температуры отжига (873, 878 и 883°C)

значений $J_{кр}$ указанных пленок при сравнительно высоких температурах плавления может быть связана с присутствием в пленках вторичных фаз. При низких температурах плавления (885—890°C) вторичные фазы начинают реагировать с Bi-2212 и образуют жидкую фазу с пониженной вязкостью, которая при более высоких температурах начинает стекать с поверхности подложки. Приведенные данные объясняют, почему пленки хорошего качества (в которых использованы пасты на основе порошков, синтезированных при T_c 800 и 820°C) могут быть получены в режиме плавления, когда присутствие вторичных фаз не меняет значительно вязкости жидкой фазы.

Несмотря на большой размер частиц пасты с $T_c=860^\circ\text{C}$, изученные пленки имели более высокие $J_{кр}$ и обладали упорядоченным строением, но (даже при оптимальных температурах синтеза) имели нерасплавленные включения, которые могут быть ликвидированы при повышении температуры плавления, что, в свою очередь, приводит к деградации сверхпроводящих свойств.

Добавка Ag в состав пленок приводит к снижению температуры плавления [7], и плавление пленок Bi-2212+Ag начиналось при температуре 866—868°C. Поэтому в качестве исследуемых температур были выбраны значения T_1 873, 878 и 883°C. Такие условия термообработки как продолжительность плавления (15 мин), скорость охлаждения (от T_2 до T_3) и охлаждение образцов путем закаливания были аналогичны условиям для пленок Bi-2212. Строение пленок Bi-2212+Ag зависит от условий отжига и C_{Ag} . В целом все пленки с различной C_{Ag} после термообработки в области температур плавления имели строение и морфологию поверхности, подобные пленкам без Ag, однако количество вторичной фазы (Sr, Ca)CuO_y на поверхности меньше (на поверхности пленок серебро не обнаружено).

На рис. 4 показаны значения $J_{кр}$ пленок в зависимости от C_{Ag} в диапазоне выбранных температур плавления (T_1) 873, 878 и 883°C. Температура $T_1=873^\circ\text{C}$ более благоприятна для получения пленок с высокой C_{Ag} . Пленки, содержащие 2 мас.% Ag, при данной температуре не имели слоистого строения, на их поверхности остаются поры, которые связаны с недостаточным содержанием жидкой фазы во время плавления. Поэтому в отсутствие вторичных фаз значения

$J_{кр}$ пленок были на порядок ниже, чем у отожженных в аналогичных условиях пленок с большим содержанием Ag.

Для пленок с высоким содержанием Ag оптимальный диапазон температур плавления сдвигается в сторону более низких температур (по сравнению с пленками с низкой C_{Ag}). Присутствие Ag в составе пленок меняет кинетику процесса плавления, а его количество определяет условия для фазового равновесия системы, находящейся в режиме термообработки в области температур плавления. Легирование пленок Ag не оказывает существенного влияния на максимально достижимые значения $J_{кр}$. Однако при комнатной температуре сопротивление пленок Bi-2212+Ag в 2—2,5 раза ниже, чем сопротивление нелегированных образцов ($\approx 0,01$ Ом·см).

Тонкие пленки, пригодные для последующей термообработки в области температур плавления, можно формировать магнетронным распылением. Несмотря на чувствительность пленок Bi-2212 толщиной 0,5—10 мкм к температуре и продолжительности отжига при температурах, близких к температуре

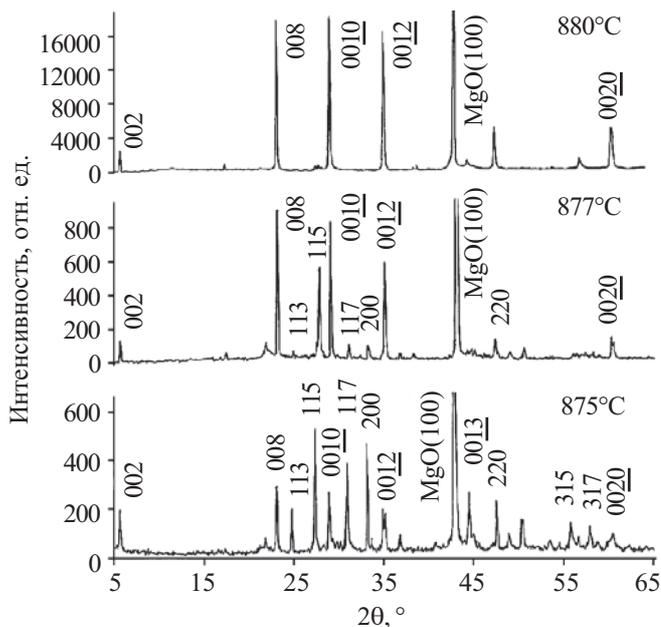


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы (Cu, k_α -излучение) пленок Bi-2212, полученных ВЧ-магнетронным распылением на подложках из MgO{100} и отожженных в течение 5 мин при температурах 875, 877 и 880°C

плавления, (вследствие их частичного испарения) были получены текстурированные по (00*n*) пленки, обладающие ВТСП. Сформированные ВЧ-магнетронным распылением порошковых мишеней пленки были рентгеноаморфными и в поликристаллическое состояние переводились отжигом. Толщина пленок в интервале температур 820—875°C возрастала в 3,5—3,7 раза. Дальнейшее увеличение температуры отжига от 875 до 890°C приводило к падению толщины примерно в 2 раза по сравнению с пленками, отожженными при более низких температурах. При 877°C начинается рекристаллизация с образованием текстуры по (00*n*) (рис. 5), при этом степень кристалличности пленок (содержание кристаллической фазы в объеме пленки), отожженных при 880°C, возрастает в 20 раз и более чем в 40 раз по сравнению с пленками, отожженными соответственно при 877 и 875°C. Рекристаллизация полностью заканчивается при температуре 880°C, при этом размер областей когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновских лучей составляет 19,5—45,2 нм. Полученная высокоориентированная по оси *C* структура (рис. 6, б) является результатом кристаллизации пленки при термообработке в области температуры плавления.

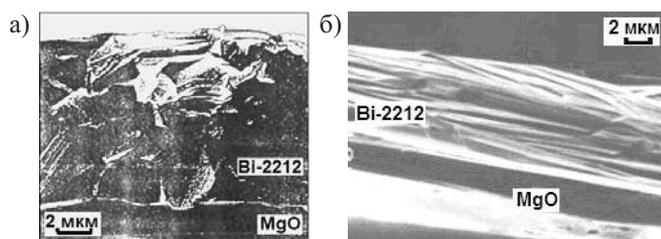


Рис. 6. Строение (РЭМ) сколов пленок Bi-2212, полученных ВЧ-магнетронным распылением на подложках из MgO{100} и отожженных в течение 5 мин при температурах:

а — 877°C; б — 880°C

Увеличение текстурированности пленок Bi-2212 при повышении температуры отжига в области 875—880°C приводило к возрастанию $T_{кр}$ (рис. 7). Температуры полного перехода в сверхпроводящее состояние для пленок, отожженных при 875, 877 и 880°C, составляли соответственно 54, 70 и 92 К. Имеются

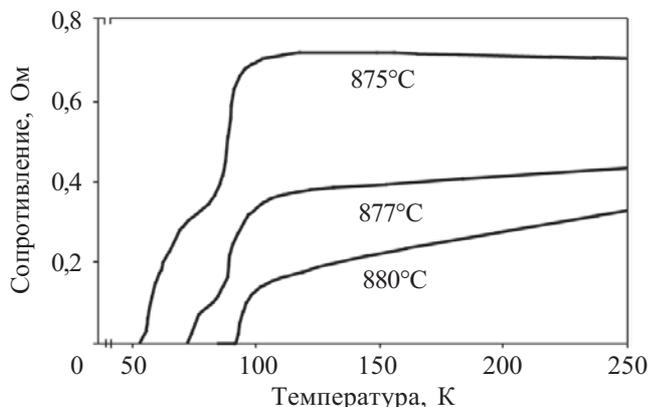


Рис. 7. Зависимость температуры перехода в сверхпроводящее состояние пленок Bi-2212, полученных ВЧ-магнетронным распылением на подложках из MgO{100}, от температуры отжига (875, 877 и 880°C)

два характерных падения сопротивления (*R*) на зависимости *R*(*T*) пленок, отожженных при 875 и 877°C. По-видимому, за двухступенчатость падения сопротивления отвечает разориентация кристаллитов Bi-2212, т. к. высокоориентированные пленки имеют резкий одноступенчатый переход.

Строение пленок Bi-2212, полученных на подложках из Al₂O₃

Были исследованы фазовый состав и строение пленок Bi-Sr-Ca-Cu-O на подложках из Al₂O₃ при различных температурах термообработки, а также продуктов реакции пленки и подложки. В качестве исходного материала использовались порошки состава Bi:Sr:Ca:Cu=2,0:2,1:0,9:2,0, а на их основе изготавливались пасты, состоящие либо из Bi-2212, либо из Bi-2212+10 мас.% Ag. При заданном времени термообработки в области температур плавления (10 мин) температурный интервал термообработки составлял: 885—915°C для пленок Bi-2212; 867—945°C для пленок Bi-2212+10 мас.% Ag. Полученные пленки имели толщину от 20 до 50 мкм, но при более высоких температурах пленки испарялись, и на поверхности подложки оставались лишь продукты реакции Bi-Sr-Ca-Cu-O с материалом подложки. При температурах отжига <885°C (Bi-2212) и <867°C (Bi-2212+10 мас.% Ag) формировались пористые пленки с невысокой адгезией (<0,2 кгс/мм²), которые воспроизводили фазовый состав использованных в пастах порошков.

Повышение температуры отжига приводит к изменению фазового состава пленок Bi-2212 (рис. 8), а при температуре отжига 880°C, когда плавление

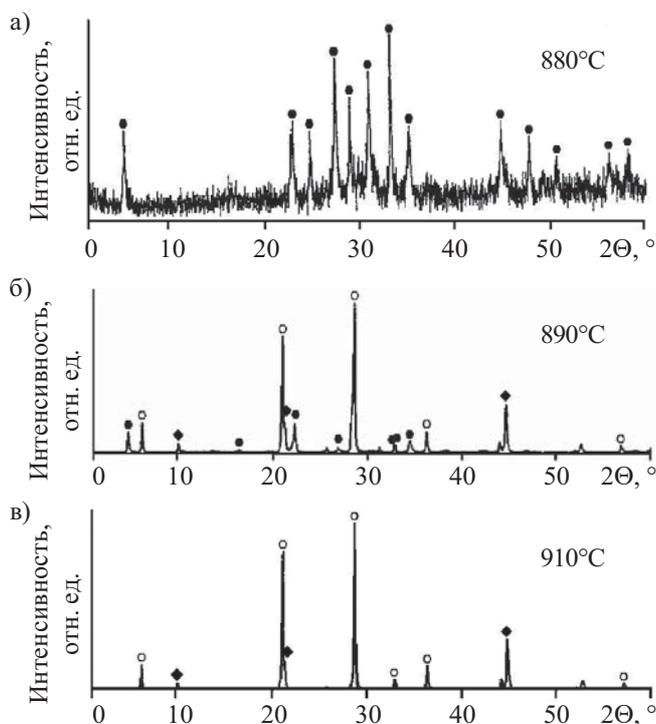


Рис. 8. Рентгеновские дифрактограммы (Cu, k_{α} -излучение) пленок Bi-2212, сформированных с использованием паст на подложках из Al₂O₃ при температурах отжига 880, 890 и 910°C:

● — Bi-2212; ○ — Bi-2201; ◆ — (Sr,Ca)CuO_y

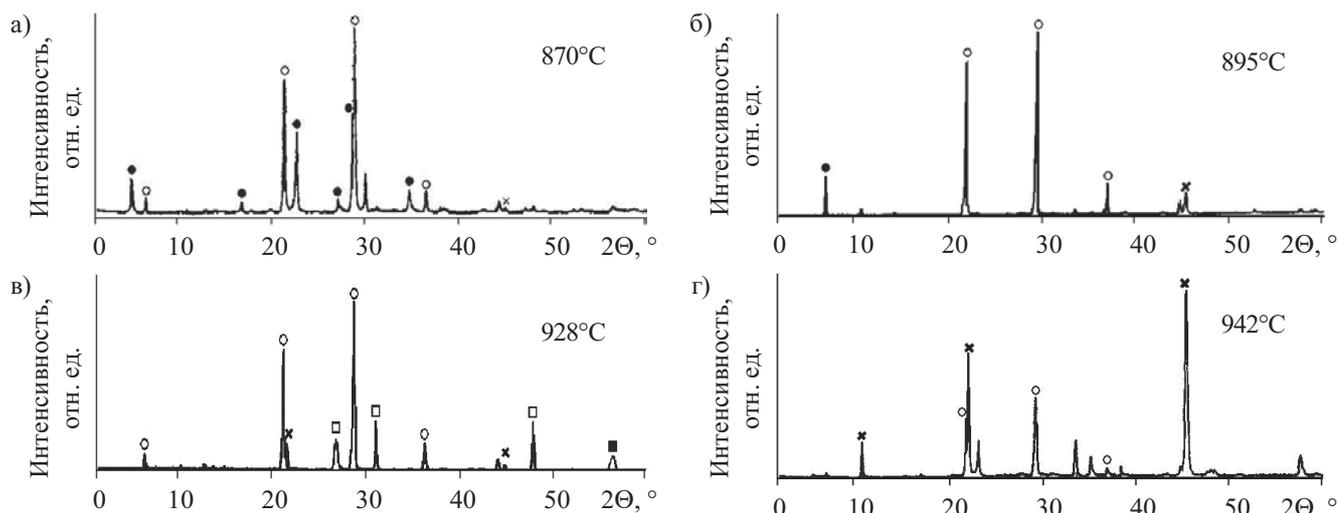


Рис. 9. Рентгеновские дифрактограммы (Cu, k_{α} -излучение) пленок Bi-2212+10 мас.% Ag, сформированных с использованием паст на подложках из Al_2O_3 при температурах отжига 870, 895, 928 и 942°C:

● — Bi-2212; ○ — Bi-2201; × — $(Sr,Ca)CuO_y$; □ — $Bi(SrCa)_2O_y$; ■ — Ca_2CuO_y

отсутствовало, пленки воспроизводили фазовый состав использованного порошка (рис. 8, а). Основной фазой пленок, отожженных при более высоких температурах, является Bi-2201, при этом содержание фазы Bi-2212 уменьшается с ростом температуры (рис. 8, б) вплоть до полного исчезновения при 910°C (рис. 8, в). Наличие примесной фазы $(Sr,Ca)CuO_y$ не менялось при изменении температуры, при этом степень кристалличности пленок резко возрастала при увеличении температуры отжига.

Пленки Bi-2212+10 мас.% Ag, отожженные при 870°C, содержат фазы Bi-2201 и Bi-2212 (рис. 9, а), тогда как при увеличении температуры отжига доминирующей фазой становится Bi-2201 (рис. 9, б—г). Фаза $(Sr,Ca)CuO_y$ содержится в небольших количествах во всех пленках, однако у пленки, отожженной при 942°C, становится преобладающей, что связано с началом испарения пленки и исчезновением других фаз, в то время как $(Sr,Ca)CuO_y$ разлагается при более высоких температурах. Степень кристалличности пленок достигает максимума при температурах 890—920°C, а затем начинает уменьшаться.

Продукты реакции пленок Bi–Sr–Ca–Cu–O с подложкой Al_2O_3 (рис. 10) анализировали с использованием энергетической дисперсионной спектроскопии (ЭДС-анализ, электронный микроскоп JEOL 6400F, оснащенный энергетическим дисперсионным рентгеновским спектрометром LINK). Исследовались пленки Bi-2212 и Bi-2212+10 мас.% Ag. Анализ показал, что Sr и Ca являются основными элементами, участвующими во взаимной диффузии с Al, однако Ca проникает значительно глубже в подложку. По ЭДС-анализу областей 2 и 3 на рис. 10, а в комбинации с электронной дифракцией, продуктом реакции пленки и подложки является соединение $Sr_4Al_6O_{12}SO_4$ (кубическая сингония, период решетки $a=1,85$ нм). Взаимодействие пленки с подложкой приводит к отклонению от стехиометрии жидкой фазы в процессе термообработки в области температур плавления и мо-

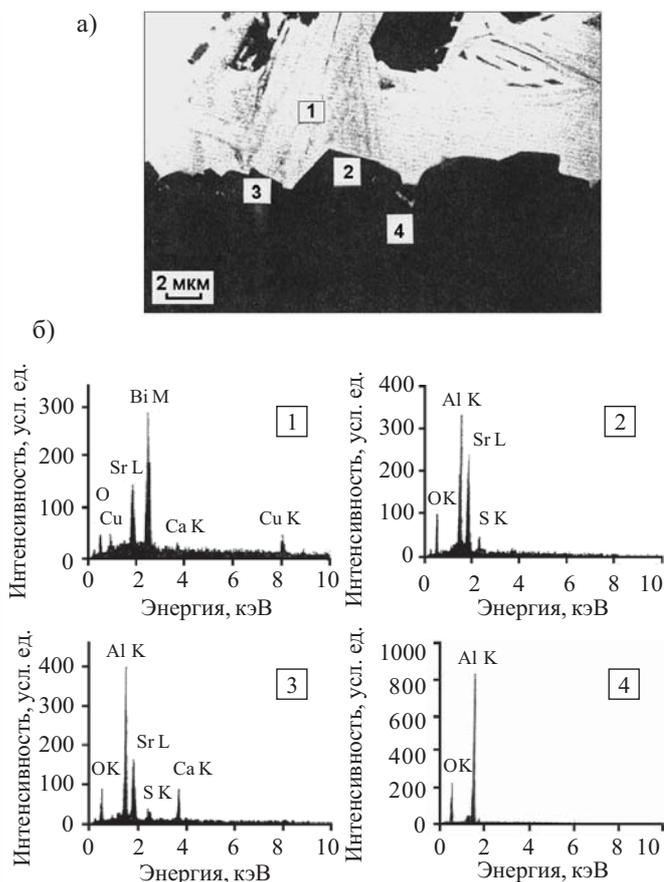


Рис. 10. Строение и состав области на границе подложки из Al_2O_3 и пленки Bi-2212, сформированной с использованием паст:

а — граница раздела "подложка—пленка" (РЭМ, обратное рассеяние); б — результаты ЭДС-анализа (цифрами обозначены анализируемые области)

жет увести систему за область гомогенной кристаллизации.

Элементный состав рентгеноаморфных пленок толщиной ≈ 6 мкм, осажденных ВЧ-магнетронным распылением при температуре 300°C на подложках

из $\text{Al}_2\text{O}_3(01\bar{1}2)$, определяли методом оже-электронной спектроскопии (рис. 11, установка LAS 2200). Перед снятием спектров проводили очистку исследуемой поверхности (ионы Ag, энергия 1 кэВ, 10 мин).

После термообработки в пленках происходит формирование и укрупнение кристаллитов, а также перераспределение компонентов, составляющих пленки. Размер ОКР отожженных пленок составляет 30—60 нм. Рекристаллизация, развитие пористости и другие физико-химические процессы, происходящие в пленках при отжиге, приводят к изменению толщины пленки и морфологии их поверхности. При отжиге Sr диффундирует к поверхности пленки, при этом вблизи поверхности образуется фаза SrCO_3 . При отжиге к поверхности диффундируют примесные атомы C и Cl. При температурах отжига 820—855°C в пленках преобладала фаза $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$, а при температурах выше 880°C пленка начинает испаряться. Длительность отжига варьировалась от толщины пленки, т. к. пленки толщиной 0,5—1 мкм наиболее чувствительны к температурному режиму обработки; в более толстых пленках в результате отжига увеличивается количество примесных фаз. Оптимальным для формирования фазы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ на подложках из $\text{Al}_2\text{O}_3(01\bar{1}2)$ является температурный интервал 860—875°C.

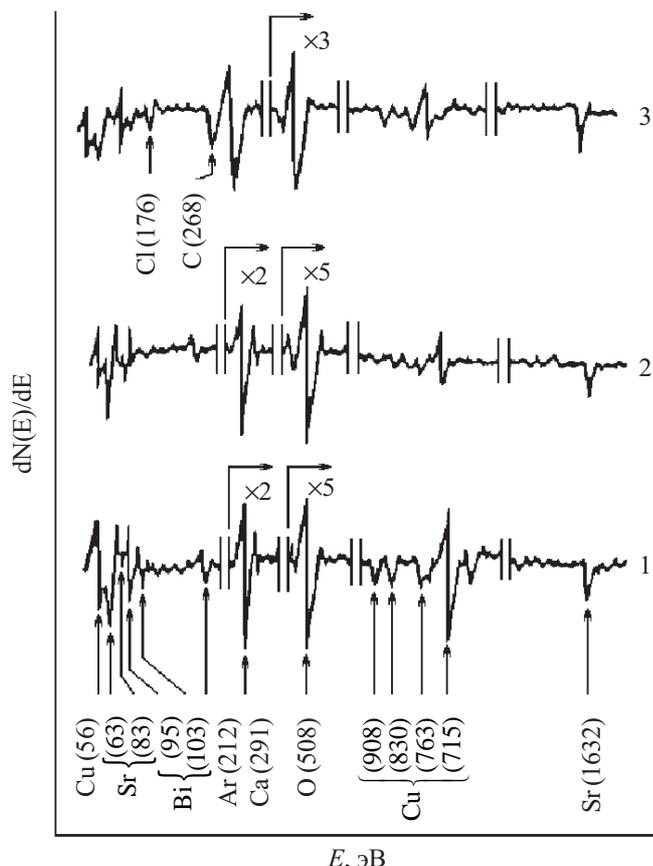


Рис. 11. Спектры оже-электронов поверхности мишени (1) и пленки Bi-2212, полученной ВЧ-магнетронным распылением на подложке из Al_2O_3 (2 — до отжига; 3 — после отжига)

Строение и сверхпроводящие свойства пленок Bi-2212 на подложках из Ag

Подложка из Ag снижает температуру плавления на 15—20°C, а плавление в кислороде начинается позже, чем плавление в воздухе. Полученные на подложке из Ag пленки Bi-2212 имели толщину 12—75 мкм и обладали ярко выраженной ориентированной перпендикулярно оси C вторичной структурой, аналогичной пленкам на подложках из MgO (рис. 12, а). Исследования поверхности и скола пленок показали отсутствие вторичных фаз и упорядоченное слоистое строение (рис. 12, б), подобное пленкам Bi-2212 на подложках из MgO.

Рентгеновские дифрактограммы отожженных пленок Bi-2212 на слоистых подложках $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ аналогичны рентгенограммам, полученным от пленок на подложках из Ag. Пленки имеют структуру с преимущественной ориентацией в плоскости (00n), однако степень кристалличности пленки ниже, чем у пленок на подложке из Ag, что связано прежде всего с тем, что пластинчатые кристаллиты, составляющие пленку, расположены хаотично (рис. 12, в). Полученные пленки имели $T_{\text{кр}}=86,3$ К и $J_{\text{кр}}=(1,2\dots1,6)\cdot 10^2$ А/см².

Граница раздела пленок Bi-2212 и подложек из Ag четко выражена, при этом отмечено проникновение удлиненных кристаллитов Bi-2212 в подложку на глубину до 10 мкм. Появление внедренных в Ag кристаллитов Bi-2212 является результатом избирательной диффузии или процесса плавления, тогда как распространенность внедренных кристаллитов может быть связана с присутствием дефектов на поверхности подложки, т. к. их количество снижается после отжига подложек и полирования поверхности. Свободная поверхность Ag подвижна при высоких температурах [8], поэтому при температурах отжига пленок, близких к температуре плавления Ag, возможна вы-

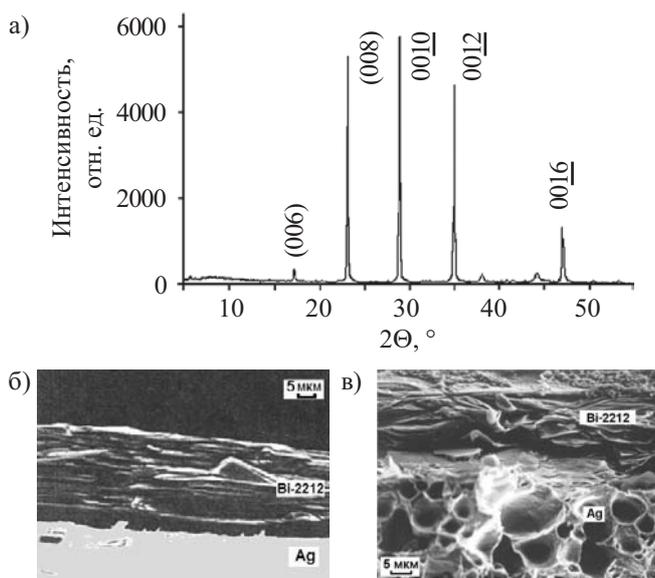


Рис. 12.

а — рентгеновская дифрактограмма (Cu, k_α -излучение); б, в — строение (РЭМ, обратное рассеяние) сколов пленок Bi-2212, сформированных с использованием паст на различных подложках: б — Ag, отжиг при 878°C; в — $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$, отжиг при 871°C

сокая подвижность свободной поверхности. В частности, было установлено, что Ag поглощает кислород, который снижает температуру плавления Ag [7, 9], а температуры плавления подложек из Ag в кислороде и в воздухе, определенные методом дифференциально-термического анализа, равны 932 и 948°C, соответственно, при скорости нагрева 10°C/мин. Последнее показывает, что поглощение O₂ происходит достаточно быстро, чтобы оказывать влияние на температуру плавления. Поэтому не исключено, что внедрение Bi-2212-кристаллитов в подложку связано с высокой концентрацией кислорода, который не только присутствует в подложке, но и поглощается материалом подложки в процессе отжига пленок.

Было обнаружено, что температурный интервал плавления зависит, при равных прочих условиях, от толщины обрабатываемых пленок. На рис. 13, а представлена зависимость $J_{кр}$ пленок Bi-2212, сформированных на подложке из Ag и отожженных в кислороде, от температуры плавления (данные соответствуют двум наборам по толщине пленок — порядка 20 и 40 мкм). Высокие значения $J_{кр}$ для более тонких пленок могут быть получены в широком температурном интервале — при температурах отжига 882—892°C. Значения $J_{кр}$ у таких пленок $\approx 1,2 \cdot 10^4$ А/см².

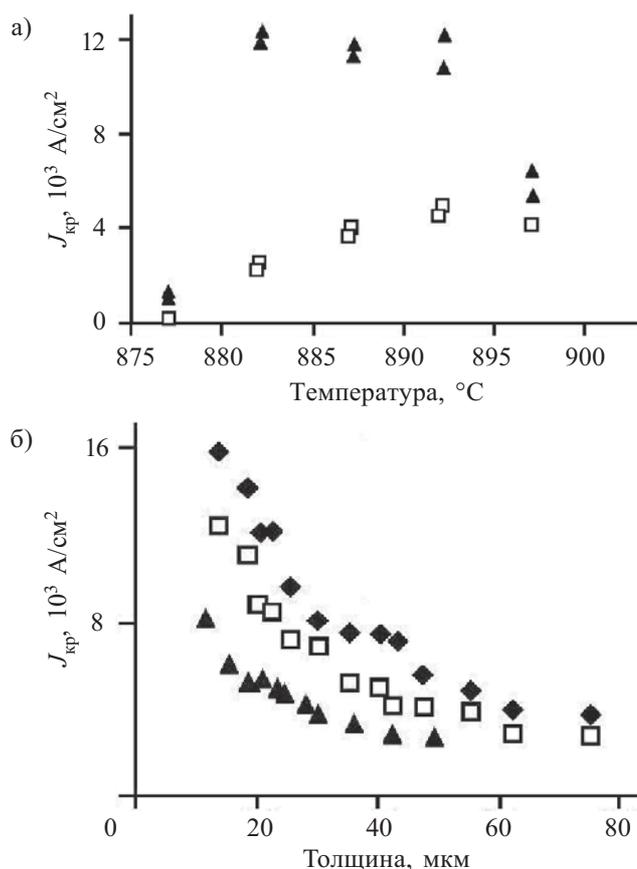


Рис. 13. Зависимость критического тока пленок Bi-2212, сформированных с использованием паст:

а — от температуры отжига (толщина пленок на подложках из Ag: ▲ — 20 мкм, □ — 40 мкм); б — от толщины пленок на подложках из различных материалов и отожженных в разных условиях (▲ — подложки из MgO, отжиг в воздухе; □ — подложки из Ag, отжиг в воздухе; ◆ — подложки из Ag, отжиг в O₂)

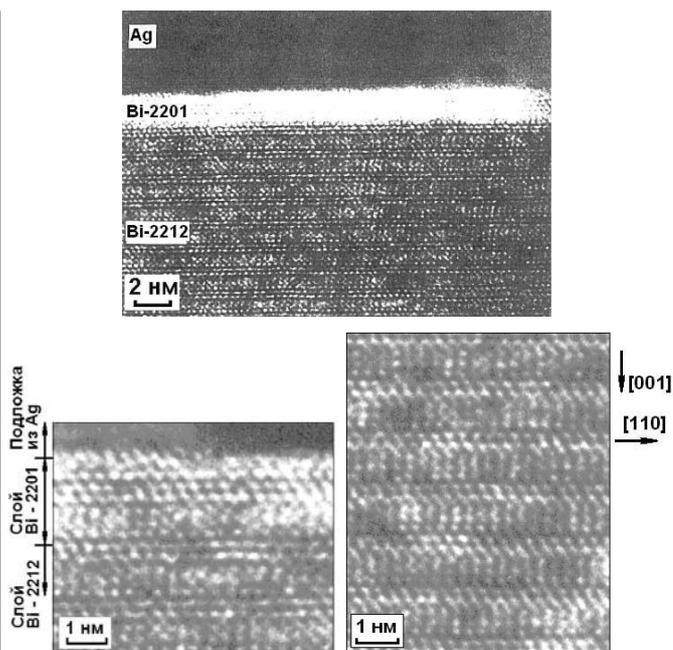


Рис. 14. Граница раздела пленки Bi-2212, сформированной с использованием паст, и подложки из Ag (просвечивающая электронная микроскопия, высокое разрешение)

С толщиной $J_{кр}$ пленок увеличивается с повышением температуры плавления и достигает максимума при 892°C. Дальнейшее увеличение температуры приводит к снижению $J_{кр}$ в пленках, но для более тонких пленок падение $J_{кр}$ значительнее. Падение $J_{кр}$ при температурах выше 892°C обусловлено изменением свойств расплава и увеличением вторичных фаз, что наглядно проявляется у тонких пленок по сравнению с толстыми.

Критический ток падает при увеличении толщины пленок (рис. 13, б), что связано с ограниченным влиянием подложки на строение пленок, но для пленок на подложках из Ag данное падение более существенно, т. к. основную токонесущую нагрузку в них несет тонкий слой вблизи поверхности подложки. Очевидно, последним объясняются значения $J_{кр}$ пленок Bi-2212 на подложках из Ag, которые в среднем в 1,5—3 раза выше, чем у пленок Bi-2212 на подложках из MgO. На рис. 14 показаны границы раздела "пленка—подложка", при этом кристаллиты Bi-2212 ориентированы вдоль направления [001], что было определено по дифракционной картине. Яркая контрастная полоса, непосредственно примыкающая к границе раздела, обусловлена краевым эффектом Фрешнеля из-за различий в толщине Bi-2212 и Ag (полученных при ионном травлении образца).

Степень кристалличности, оцененная по рентгеновским дифрактограммам, составляет 80—90 об.%. Рентгеноаморфная фаза, входящая в состав сформированных пленок, имеет упорядоченную некристаллическую структуру и располагается по границам кристаллитов.

Строение и сверхпроводящие свойства пленок Bi-2212 на подложках из LaAlO₃

При формировании пленок *in-situ* температуры синтеза относительно низкие, тогда как пленки, по-

лученные толсто пленочными методами, отжигаются при более высоких температурах (850—900°C), что вызывает диффузию материала подложки в сверхпроводник и деградацию сверхпроводящих свойств. С другой стороны, присутствие жидкой фазы во время синтеза пленок и определенная степень реакционной способности подложки и пленки являются необходимыми для достижения высокой адгезии. Поэтому основной задачей получения пленок на подложках из LaAlO_3 являлся контроль активности взаимодействия пленки с подложкой, обеспечивающий баланс между высокой адгезией и сверхпроводящими свойствами. Условия нанесения пленок на подложки из $\text{LaAlO}_3\{100\}$ и последующего отжига были идентичны условиям получения пленок на подложках из $\text{MgO}\{100\}$. Полученные после отжига в области температур плавления пленки Bi-2212 и Bi-2212+Ag имели ярко выраженную ориентацию перпендикулярно оси C , аналогичную пленкам, сформированным на подложках из MgO и Ag . Степень кристалличности таких пленок одинакова при равных толщинах.

Пленки Bi-2212 и Bi-2212+Ag имеют слоистую структуру в плоскости (001), при этом в пленках Bi-2212 разориентация кристаллитов больше, чем у пленок Bi-2212+Ag (рис. 15). Отметим, что в пленках Bi-2212 разориентация между отдельными блоками параллельных друг другу Bi-2212 -кристаллитов достигает десятков градусов. Плотность критического тока в пленках различна: в пленке Bi-2212 достигнуты максимальные значения $J_{\text{кр}} = (1 \dots 1,5) \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$, а в пленке Bi-2212+Ag — $(0,5 \dots 2) \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ в зависимости от толщины пленки. Как это наблюдается для

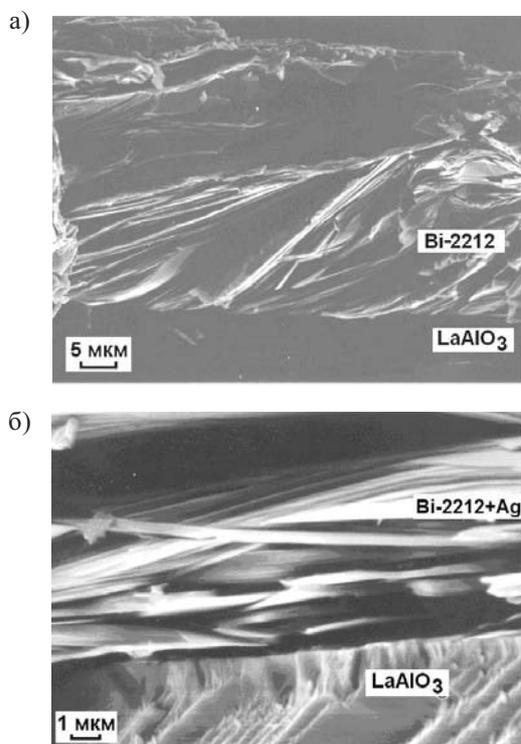


Рис. 15. Строение (РЭМ) сколов пленок Bi-2212 (а) и Bi-2212+Ag (б), сформированных с использованием паст на подложках из LaAlO_3

пленок на подложках из MgO и Ag , более высокие значения $J_{\text{кр}}$ имеют тонкие пленки.

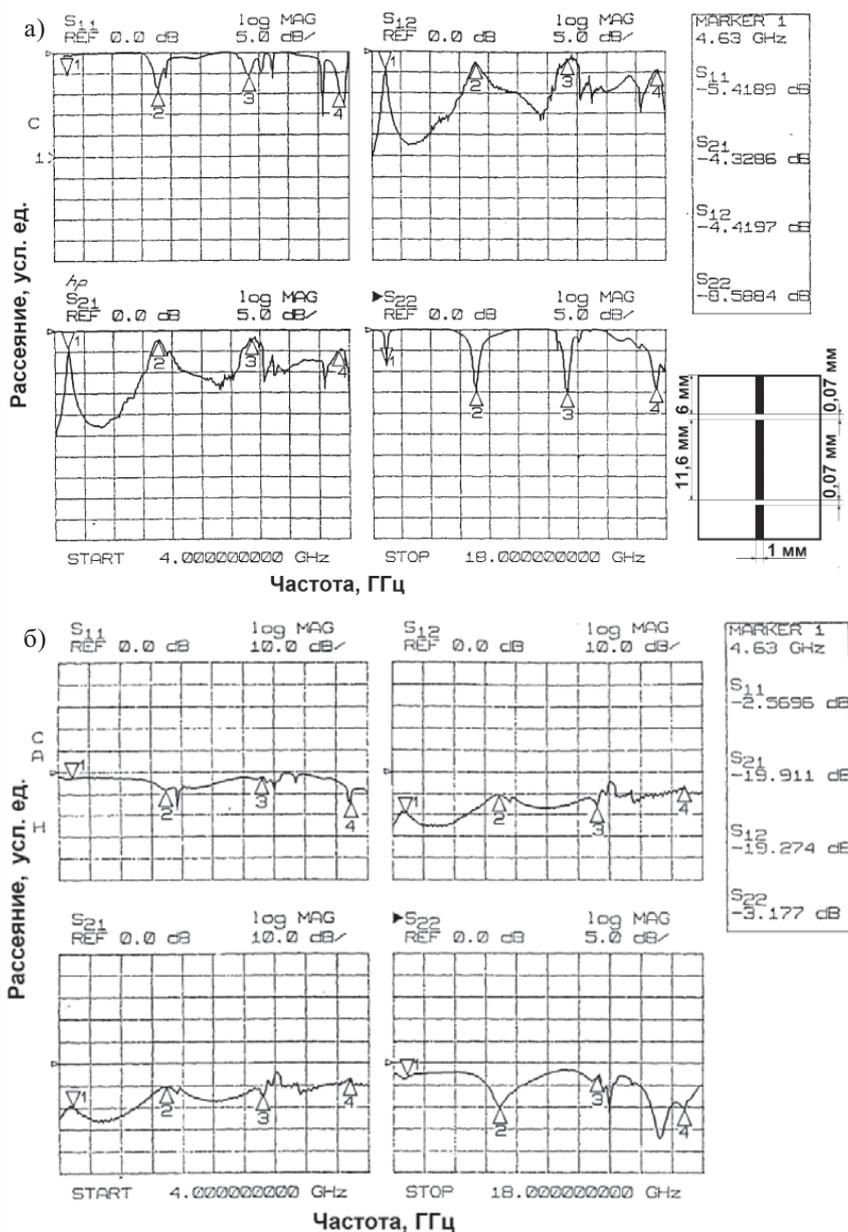
СВЧ-резонаторы на основе пленок Bi-2212

Микрополосковые СВЧ-резонаторы были изготовлены на подложках из $\text{MgO}\{100\}$ с использованием как тонко-, так и толсто пленочной технологии (топология резонатора представлена на рис. 16, а). При тонко пленочном методе применяли ВЧ-магнетронное распыление порошковой мишени Bi-2212 с использованием масок и фотолитографии. Толсто пленочный резонатор был получен методом трафаретной печати пасты Bi-2212+10\% Ag . При толсто пленочной технологии паста наносилась на подложку через металлическую маску (толщина маски 50 мкм, толщина пленки после просушки примерно 35 мкм). Отжиг состоял из нескольких ступеней с максимальной температурой 878°C. Полученная после отжига ВТСП-пленка толщиной 15 мкм (отклонение по толщине <10%) имела высокоупорядоченную Bi-2212 -структуру ($T_{\text{кр}} = 92 \text{ K}$; $J_{\text{кр}} = 5 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$). На обратную сторону подложки катодным распылением наносилась пленка Ag .

Сигнал поступал через жесткий коаксиальный подвод, а соединение с микрополосковыми линиями осуществлялось при помощи Ag -контактов, нанесенных на подслои Au ($\approx 50 \text{ nm}$). Контакты Ag были получены нанесением Ag -пасты с последующей термообработкой при 250°C. Подложка крепилась к корпусу резонатора также с использованием Ag -пасты.

Испытания проводились на приборе НР-8510С, при этом резонатор подключался коаксиальным (50 Ом) кабелем к анализатору через калибровочный кабель. При низкотемпературных измерениях коаксиальный кабель с резонатором погружался в контейнер с жидким азотом. Измерения проводились в диапазоне частот от 4 до 18 ГГц при мощности подаваемого сигнала 63 Вт. Исследуемыми характеристиками являлись комплексные S -параметры (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}), определяющие уровень прохождения сигнала и уровень потерь. Проведенные испытания показали уменьшение потерь сигнала обоих резонаторов при погружении систем в жидкий азот по сравнению с измерениями, проведенными при комнатной температуре. В случае тонко пленочного резонатора наблюдалось увеличение потерь при повторных измерениях.

Испытания толсто пленочных резонаторов показали (рис. 16), что при комнатной температуре потери на частоте первой гармоники 4,63 ГГц составляли более 19 дБ, что соответствует уровню проводимости самой системы данной конфигурации в отсутствие полоска (20—25 дБ). При погружении системы в жидкий азот потери падали до 4,42 дБ, что на 15 дБ меньше, чем уровень потерь при комнатной температуре. Таким образом, происходит резкое уменьшение импеданса при переходе системы к низким температурам. Как видно из рисунка, потери сигнала при прохождении системы составляли более 50%, что связано с взаимодействием сигнала с поверхностью пленки (рассеивание), а также с ее краями в области зазоров, что остается главной проблемой толсто пленочных резонаторов.



плотности (δ), но формально такие решения для твердотельных структур не существуют [10] (кроме случая $\delta = \text{const}$), поскольку в результате тепловых флуктуаций функция термодинамического потенциала должна «размываться» и при неограниченном возрастании площади (размеров) такой системы флуктуационные деформации стремятся к бесконечной величине (в отличие от трехмерного случая, когда они остаются конечными и для неограниченных систем). В реальных структурах, когда флуктуации не слишком велики, а толщины пленок незначительны, подобные системы могут иметь довольно большие размеры. Последнему способствуют как логарифмический закон (для двухмерного случая) возрастания флуктуаций, разрушающих порядок, так и механизмы формирования блочности, а в общем случае — появление морфологической иерархии в виде доменности, пластинчатости, волокнистости и других типов потери монокристалличности, поскольку в подобных случаях имеет место «перекачка» упругой объемной энергии в межфазную (пограничную или поверхностную) энергию.

В [10] отмечалось, что именно для планарных систем возможные элементы симметрии исчерпываются осями и проходящими через них плоскостями симметрии. Очевидно, в таких системах (сохраняющих элементы симметрии, присущие кристаллам) должны преобладать ориентации, при которых оси симметрии, как и проходящие через них плоскости симметрии, должны располагаться перпендикулярно поверхности пленки или близко к данному направлению (в зависимости от условий формирования). Известно [11], что нарушение когерентности твердотельной системы может осуществляться различными релаксационными механизмами, позволяющими снижать упругую и неупругую составляющие энергии за счет выбора внутренней структуры, взаимного расположения когерентных фаз и оптимизации их формы.

В отличие от механизмов нормального или тангенциального формирования, применимых к условиям поатомарного роста монокристаллов, ни для толстых пленок (полученных термообработкой в области температур плавления), ни для тонких (полученных с использованием ионно-плазменных или вакуумных технологий) указанные выше механизмы не реализуются. Особенности образования тонких пленок на примере алмазоподобных материалов были

Рис. 16. Частотные спектры полоскового резонатора, полученного на основе ВТСП-пленки, сформированной по толстопленочной технологии. Температура измерений:

а — 77 К (в нижнем углу показана схема резонатора); б — 300 К

ночных резонаторов вследствие трудности их точного изготовления. Уменьшение поверхностного сопротивления возможно за счет снижения шероховатости поверхности пленки, зависящей от размера частиц используемого в пастах порошка и условий отжига.

В целом, на примере изготовленных макетов микрополосковых резонаторов была показана работоспособность полученных по тонко- и толстопленочной технологиям пленок системы Bi-Sr-Ca-Cu-O при низких температурах и сверхвысоких частотах.

Обсуждение экспериментальных данных

Как выше отмечалось, основной целью настоящей работы являлось изучение особенностей строения ВТСП-пленок, полученных различными методами. Как известно, планарные системы, в частности тонкие пленки, характеризуются двухмерной функцией

рассмотрены в [12]. Было показано, что фактически такие процессы можно охарактеризовать как происходящие в условиях потери морфологической устойчивости гранных форм роста [13]. Анизотропия скоростей формирования по различным направлениям особенно велика при образовании тонких пленок, поскольку искривление поверхности формирования ведет к возрастанию кинетических коэффициентов и, следовательно, к дальнейшему увеличению неоднородностей условий формирования для различных участков пленок. В совокупности такие процессы обуславливают лавинообразную потерю морфологической устойчивости плоских поверхностей (граней) для образующейся твердотельной системы. Для кристаллов потеря устойчивости связана, как правило, с особенностями пересыщений в системе роста, когда при формировании пленок потеря морфологической устойчивости чаще всего имеет место на начальной стадии.

Действительно, экспериментально установлено, что осаждение кластеров, образующихся вблизи поверхности осаждения при использовании плазменно-ионных методов или вакуумного распыления, неизбежно приводит к существенной неоднородности поверхности. Как правило, на начальной стадии такого морфологически вырожденного образования углы разориентации отдельных участков пленки невелики, так что пленка не теряет сплошности. Дальнейшее ухудшение условий формирования (и, следовательно, продвижение на пути потери морфологической устойчивости) приводит к возрастанию разориентации отдельных участков пленки и, в последующем, к их пространственному (частичному или полному) разделению. Можно также предположить, что пластинчатая структура материала пленок, характерная для определенных условий формирования, обусловлена как особенностями упругих и неупругих полей, так и наличием, в ряде случаев, своеобразной текстуры.

Процессы наноструктурирования представляют значительно более широкие возможности для сохранения когерентности межфазных границ, поэтому объяснение фазовых состояний в наноструктурах невозможно без рассмотрения подструктур, обладающих, в общем случае, некристаллографической симметрией [14—16]. Появление экспериментальных данных о таких фазовых состояниях и структурах (главным образом по результатам применения методик высокоразрешающей электронной микроскопии) также свидетельствует о недостаточности кристаллографических групп для адекватного отображения симметрии таких систем. Для целого ряда материалов данное положение подтверждается экспериментально, в частности, были обнаружены структурно-неоднородные наночастицы ZrO_2 , состоящие из взаимопроникающих фрагментов с различной симметрией, при этом ориентационные соотношения были “несовместимыми” с точки зрения классической кристаллографии [15]. Границы фрагментов являются когерентными, поэтому такие образования можно определить и как наноструктуры с когерентными границами, часто называемые аперриодическими или (для ВТСП-материалов) слоистыми кристаллами.

Для наноструктур, представленных конечными решетками, условие трансляционной инвариантности может и не иметь места, поэтому чтобы не получить бесконечное множество элементов симметрии, требуется выполнение определенных условий. В частности, необходимо, чтобы элементы симметрии соответствовали особенностям решений для физических систем, в которых образуются наноструктуры. Решения должны быть калибровочно инвариантны, а физические свойства — описываться борелевыми алгебрами. Кроме того, решения должны быть применимы для гамильтоновых систем (к которым относится большинство твердотельных задач) и согласовываться с метрическими и топологическими свойствами физического пространства.

Впервые важность учета дискретности макросостояний упорядоченных систем было продемонстрировано в теории фазовых переходов 2-го рода (ФП2) (переходов из одного типа упорядочения или периодичности в другой [10]), в которой использовались преобразования коэффициентов разложения термодинамических функций по неприводимым представлениям (векторным) групп симметрии изучаемых систем. Напомним, что неприводимые представления пространственных групп кристаллографических систем строятся при этом по неприводимым представлениям конечных точечных групп, число которых, как известно, ограничено.

Сама по себе теория ФП2, как известно, относится к теории самосогласованного поля, в которой не учитывается вклад флуктуаций параметра η , что приводит к определенным ограничениям (в отличие от трехмерных структур) для ее применимости, например, для планарных (пленки) и линейных (тонкие “проволочки”) систем. Существенно, что в двухмерных структурах указанного типа сверхпроводимость может существовать, хотя дальний сверхпроводящий порядок в таком случае невозможен. Более того, само требование устойчивости кристаллической решетки закрывает возможность существования ВТСП, так что наиболее перспективными (по отношению к возрастанию температуры перехода) являются структуры, упорядоченные по некристаллографическим закономерностям. Как известно, эффект “спаривания” может быть обусловлен различными причинами, в частности, значительной анизотропией сверхпроводящей щели в ВТСП-пленках, вызванной их наноструктурированностью. Что касается роли флуктуаций, то следует учитывать особенности поведения термодинамических функций наноструктурированных систем в точках перехода ФП2 (в которых система становится нелинейной) и, в связи с этим, роль топологических (геометрических) инвариантов для такого рода упорядоченных систем.

Такой подход связан с тем, что симметрия (тип упорядочения) в точке перехода типа ФП2 меняется скачком, так что в случае конечных упорядоченных систем (например наноструктур) термодинамические функции становятся впрямую зависимы от координат точек (атомов, молекул), а значит, и векторнозначимыми величинами при использовании алгебраических конструкций. Математическую особость точек

перехода ФП2 отмечал Л. Д. Ландау [10], поскольку при непрерывности термодинамических функций (энергии, объема, энтропии) имеет место скачок их первых производных. В рамках алгебраического подхода можно говорить о нелиевости таких систем в точке перехода, а следовательно, о необходимости введения в рассмотрение топологических инвариантов как кохомологических (гомологических) характеристик дифференциальных форм, соотносящихся с упомянутыми векторнозначимыми термодинамическими функциями [17]. Более того, в случае фазовых превращений первого рода конденсированных систем (например, при образовании упорядоченной структуры) термодинамическая функция (химический потенциал) вблизи линии перехода не определена, и ее (как и другие подобные функции) нельзя рассматривать как аналитическое продолжение, отвечающее равновесному состоянию фаз [10].

Игнорирование указанных свойств при изучении и предсказании особенностей фазовых переходов для упорядоченных систем (при расчетах только по минимумам энергии) может приводить, в лучшем случае, к неоднозначности выводов, а зачастую — и к неправильным результатам. Проиллюстрируем сказанное на примере рассмотрения периодических, квази- или локально-периодических групп.

Действительно, все дискретные (необходимое условие при рассмотрении атомнопорожденных систем) подгруппы компактных групп конечны (таковы, например, точечные группы), так что простые расчеты термодинамических величин с учетом взаимодействий между атомами или молекулами (в частности, минимумов суммарной энергии указанных систем) без учета топологических параметров и дискретности свойств конечных или локально-конечных (локально-периодических) структур может приводить к неправильным выводам, например в части их стабильности и реализуемости. Дело в том, что инварианты, соответствующие заданному множеству представлений (алгебр) конечных или компактных групп Ли (в частности, всех классических групп), обладают конечным целым рациональным базисом. Таким образом, системы, относящиеся к лиевым (соответственно характеризующиеся дифференцируемыми функциями координат), являются дискретными не только в смысле атомнопорожденности, но и по своим свойствам (строению). Следовательно, конденсированные системы, как правило, не могут рассматриваться как непрерывные (по энергии), а только как изменяющие свое строение в соответствии с набором топологических инвариантов, характеризующих как особенности вложения в реальное физическое пространство, так и выбор граничных условий.

Заключение

Полученные результаты позволяют рассмотреть возможные дальнейшие направления развития технологий получения тонких и толстых пленок. В частности, для толсто пленочных покрытий представляется перспективным развитие работ по нанесению пленок системы Bi–Sr–Ca–Cu–O на подложках из Al_2O_3 с использованием буферного подслоя, содержащего

Ag, что расширит область использования ВТСП-пленок в микроэлектронике.

Несомненно важным для практического использования является применение метода термообработки в области температур плавления для пленок, полученных тонко пленочными методами. Такой подход позволит не только улучшить токонесущую способность пленок, но и интегрировать их в одном устройстве с толсто пленочными структурами.

Проведенные исследования одновременно показывают возможности использования серийного оборудования для получения пленок ВТСП-материалов, пригодных для применения в устройствах электронной техники. Например, на основе сформированных пленок $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ были изготовлены макеты микрополосковых СВЧ-резонаторов, на которых была показана работоспособность пленок системы Bi–Sr–Ca–Cu–O, сформированных методами тонко- и толсто пленочной технологий, при низких температурах и сверхвысоких частотах, что позволяет использовать указанные пленки при изготовлении элементов СВЧ-устройств.

Хорошо известна роль нобелевского лауреата академика РАН В. Л. Гинзбурга в создании ψ -теории сверхпроводимости, в значительной степени соотносящейся с теорией фазовых переходов 2-го рода Л. Д. Ландау, в которой важную роль играет параметр порядка η . Все ссылки имеются в обобщающей статье В. Л. Гинзбурга “Сверхпроводимость и сверхтекучесть (что удалось и чего не удалось сделать)”, опубликованной в журнале «Успехи физических наук» (т. 167, № 4) в 1997 году. В частности, В. Л. Гинзбург в 1974 году обобщил ψ -теорию на случай анизотропных сверхпроводников, что оказалось к месту при открытии высокотемпературной сверхпроводимости, где анизотропия значительна. Вызывает восхищение предсказательный характер его работ (не только в применении к пленочным структурам) о связи особенностей таких систем (например, для рассматриваемых ВТСП-пленок) с их реальной структурой или, как в настоящее время принято классифицировать, с их фактической наноструктурированностью.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Paul W., Baumann Th. Inductive measurements of intergranular critical currents in ceramic rings // *Physica C*.— 1991.— Vol. 175.— P. 102—105.
2. Илюшечкин А. Ю., Белянин А. Ф. Метод частичного плавления в получении пленок высокотемпературных сверхпроводящих материалов // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА)*.— 1997.— № 3.— С. 22—23.
3. Alarco J. A., Pyushechkin A. Y., Yamashita T. et al. Microstructural investigations of Bi–Sr–Ca–Cu-oxide thick films on alumina substrates // *Journal of Materials Science*.— 1997.— Vol. 32.— P. 3759—3764.
4. Белянин А. Ф., Семенов А. П., Илюшечкин А. Ю. и др. Применение плазменного ионного источника и планарного магнетрона для выращивания тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников // *Техника средств связи. Сер. ТПО*.— 1989.— Вып. 1.— С. 4—15.
5. Белянин А. Ф., Пашенко П. В., Житковский В. Д. Формирование методом магнетронного ВЧ-распыления пленок систе-

мы Bi-Sr-Ca-Cu-O, обладающих ВТСП // Техника средств связи. Сер. ТПО.— 1990.— Вып. 5.— С. 50—54.

6. Самойлович М. И., Белянин А. Ф. Особенности строения и сверхпроводящие свойства ВТСП-пленок // Наука и технологии в промышленности.— 2006.— № 4(II).— С. 104—118.

7. Hasegawa T., Kobayashi H., Kumakura H. et al. The effect of Ag on the formation of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ thick film // Physica C.— Vol. 222.— 1994.— P. 111—118.

8. Smithells Metall Reference Book. Chaoter 12 / Ed. by E. A. Brandes, G. B. Brook.— Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford, 1992.

9. Lindemer T. B., Washburn F. A., MacDougall C. S. Study of phase behaviour in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}-\text{BaCuO}_{2+y}-\text{CuO}-\text{Ag}$ system // Physica C.— 1992.— Vol. 196.— P. 390—393.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика.— М.: Наука, 1964.

11. Ройтбурд А. Л. Особенности развития фазовых превращений в кристаллах // В кн.: Проблемы современной кристаллографии.— М.: Наука, 1975.— С. 245—369.

12. Самойлович М. И., Белянин А. Ф. Формирование наноструктурированных пленок алмазоподобных материалов. Ч. 1, 2 //

Нано- и микросистемная техника.— 2006.— № 7.— С. 21—34; № 8.— С. 14—25.

13. Чернов А. А. Теория устойчивости гранных форм роста кристаллов // Кристаллография.— 1971.— Т. 16, вып. 4.— С. 842—863.

14. Самойлович М. И., Талис А. Л. Основы теории симметрии наноструктурных состояний. Наноматериалы.— М.: Техно-маш, 2006.

15. Шевченко В. Я., Самойлович М. И., Талис А. Л., Мадисон А. Е. Наноструктуры с когерентными границами и локальный подход // Физика и химия стекла.— 2004.— Т. 30, № 6.— С. 731—748.

16. Самойлович М. И., Талис А. Л. Геликоиды Госсета. I. 8-мерная кристаллографическая решетка E_8 и определяемые ею кристаллографические, квазикристаллографические и нецелочисленные винтовые оси геликоидов // Кристаллография.— 2007.— Т. 52, № 4.— С. 599—606.

17. Дубровин Б. Л., Новиков С. П., Фоменко А. Т. Современная геометрия. Т. 2.— М.: Изд-во Эдиториал УРСС, 2001.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Р. Корис, Х. Шмидт-Вальтер. Справочник инженера-схемотехника.— М.: Техносфера, 2006.— 608 с.

Удобный, компактный и достаточно полный источник информации по таким областям электротехники и электроники как:

- основы расчета цепей постоянного и переменного тока,
- закономерности электрических и магнитных полей,
- принципы измерения основных электрических величин,
- аналоговая и цифровая схемотехника,
- силовые электрические компоненты.

Большое количество примеров и иллюстраций (более 500 диаграмм и рисунков, 60 таблиц) упрощают поиск необходимой информации.

В приложении приведены полезные математические соотношения и ряд таблиц, часто требующихся в повседневной инженерной практике. Книга адресована студентам, инженерам, разработчикам разнообразной электронной аппаратуры и измерительных систем.

В Германии этот справочник переиздавался шесть раз. Он переведен на несколько языков. Без сомнения, он будет популярен и в России.



НОВЫЕ КНИГИ

Герасименко Н. Н., Пархоменко Ю. Н. Кремний — материал нанoeлектроники.— М.: Техносфера, 2006.— 352 с.

Монография посвящена рассмотрению проблем и возможностей использования кремния для создания приборов и устройств нанoeлектроники и нанофотоники. Даны представления о квантоворазмерных эффектах, возможности их проявления в кремниевых элементах и структурах, а также физических ограничениях. Рассмотрены наиболее перспективные технологические возможности формирования наноразмерных кремниевых структур.



К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, Л. П. ВАСИЛЬЕВА, О. Р. ТКАЧЕНКО

Украина, г. Одесса, Одесский нац. политехнический университет,
СКБ "Молния"
E-mail: tkea@optima.com.ua

Дата поступления в редакцию
26.02 2007 г.

Оппоненты д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН
("Прософт-Технолоджи", г. С.-Петербург),
к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО
(НПП "Сатурн", г. Киев)

ОФОРМЛЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Предложен подход к оформлению чертежей печатных плат, позволяющий значительно упростить документацию, а также упорядочить документооборот.

В современных условиях стремительного развития средств вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования (САПР) имеется объективная возможность сделать обращение конструкторской документации, в частности на печатные платы, в электронном виде. Это значительно повышает эффективность разработки и производства электронных средств. Однако возможности, которые сегодня существуют, используются не в полной мере — в электронном виде приходится формировать изображение, отвечающее требованиям устаревших стандартов, что проявляется в подготовке заведомо избыточной информации.

Вместе с тем при использовании САПР рсб-файл (PCAD) и файлы различных форматов других систем содержат информацию, позволяющую получать оснастку, соответствующие программы для работы автоматического технологического оборудования. И эту информацию совсем не обязательно представлять в чертежах печатных плат, требования на разработку которых изложены в стандартах прошлого века. Чертежи печатных плат (чертежи деталей для односторонних, двухсторонних и гибких печатных плат, а также сборочные чертежи многослойных печатных плат) должны представляться и использоваться в электронном виде и при этом могут быть существенно упрощены.

Однако опасна и другая тенденция, которая характерна для новообразованных предприятий, — не разрабатывать чертежи печатных плат вообще, а вместо них использовать данные в форматах САПР (рсб-файлы и другие) и текстовый файл с дополнительной информацией, которая у каждого своя и не всегда достаточна. Опасность заключается в том, что отсутствие достаточной информации, которая при этом должна полностью отвечать требованиям обращения — учета, хранения, дублирования и внесения изменений, влияет на качество и надежность выполняе-

мых разработок. В единичном производстве это не очень ощутимо, а в серийном, которое, по известным причинам, сейчас мало распространено, может приводить к большим издержкам.

Таким образом, имеются две крайности: выполнение требований устаревших стандартов, что является избыточным и затратным, и недооценка вопросов стандартизации, что во многих случаях сходит с рук. Причиной такой ситуации является отсутствие должных средств на поддержание стандартизации вследствие упадка промышленного производства.

Целью данной статьи является анализ содержания чертежей печатных плат, требований действующих стандартов и наработка технически обоснованных предложений по оформлению чертежей печатных плат в упрощенном виде с учетом широкомасштабного использования систем автоматизированного проектирования (CAD) и автоматизированной подготовки производства (CAM).

В **таблице** приведена информация, которая в общем случае имеется в чертежах печатных плат, выполняемых в соответствии с [1—3]. Предельные отклонения размеров элементов топологии, монтажных и переходных отверстий, позиционные допуски расположения печатных проводников, осей отверстий, центров контактных площадок (п. 10 таблицы) приведены в [3] и выбираются в зависимости от требуемого класса точности.

Анализируя представленные в таблице данные с учетом требований по полноте представления информации для подготовки производства, изготовления, контроля, испытаний и эксплуатации, можно утверждать, что чертеж печатной платы может, как правило, содержать технические требования, основную надпись, а также некоторую графическую информацию в виде контура платы с конструктивными элементами неавтоматизированной обработки и показателями точности. Остальная графическая информация представлена в файлах различных форматов САПР, что определяется ссылкой на конкретный файл (например, рсб-файл). При этом стандартом [4] допускается не выполнять изображение слоев. На **рисунке** представлен пример выполнения чертежа детали печатной платы при использовании предложенного подхода.

МЕТРОЛОГИЯ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Требуемая в соответствии с [1—3] информация для изготовления и контроля печатных плат

| № п/п | Информация | Наличие информации в rcb- и других файлах | Последующее использование информации |
|-------|---|---|---|
| 1. | Конфигурация платы, размеры контура и других конструктивных элементов | Да | Программы обработки |
| 2. | Номинальные размеры и предельные отклонения конструктивных элементов (пазов, отверстий), которые не изготавливаются на автоматическом оборудовании. Справочные размеры | Частично | Технологическая документация для ручной обработки |
| 3. | Ширина проводников | Да | Фотошаблоны |
| 4. | Ширина зазоров | Да | Фотошаблоны |
| 5. | Размеры контактных площадок, в т. ч. под монтаж на поверхность | Да | Фотошаблоны |
| 6. | Размеры печатных шин и экранов | Да | Фотошаблоны |
| 7. | Диаметры отверстий | Да | Программы сверловки |
| 8. | Зоны платы, которые не должны быть заняты проводниками | Да | Фотошаблоны |
| 9. | Координатная сетка и ее шаг в соответствии с ГОСТ 2.417—91 и ГОСТ 10317—79 | Нет | — |
| 10. | Предельные отклонения размеров: — контурных элементов; — элементов топологии; — отверстий; — межцентровых расстояний. Позиционные допуски расположения печатных проводников, осей отверстий, центров контактных площадок | Нет Нет Нет Нет Нет | Выбор оборудования, назначение режимов обработки, контроль качества |
| 11. | Топология | Да | Фотошаблоны |
| 12. | Количество отверстий | В неявном виде | Технологическая документация |
| 13. | Класс точности | В неявном виде | Фотошаблоны, технологическая документация |
| 14. | Группа жесткости | Нет | Конструирование электронных модулей |
| 15. | Маркировка: — местоположение, шрифт; — маркировочная краска | Да Нет | Фотошаблоны для изготовления матриц Ведомость материалов, изготовление |
| 16. | Материал основания | Нет | Ведомость материалов, изготовление |
| 17. | Конструктивные покрытия | Нет | Изготовление, технологическая документация |
| 18. | Шероховатость поверхностей | Нет | Изготовление, технологическая документация |
| 19. | Тип конструкции печатной платы и метод изготовления | Нет | Изготовление, технологическая документация |
| 20. | Масса | Нет | Ведомость материалов. Конструирование электронных модулей |
| 21. | Ссылки на нормативные документы в части конструктивных и производственных требований, в т. ч. и общих технических требований | Нет | Изготовление, конструирование электронных модулей |
| 22. | Обозначение и наименование | Нет | Конструкторская документация |

$\sqrt{Ra\ 6,3(\sqrt{V})}$

1. Печатную плату изготовить комбинированным позитивным методом.
2. Печатная плата должна соответствовать ГОСТ 23752—79, группа жесткости 3.
3. Класс точности печатной платы 4 по ГОСТ 23751—86.
4. Предельные отклонения расположения центров отверстий относительно координат из файла $\pm 0,05$ мм.
5. Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий — Н13; валов — h13; остальных $\pm \frac{IT12}{2}$.
6. *Размер для справок.
7. Покрытие проводящего рисунка: сплав Розе чистый ТУ 6-09-4065—88 толщиной 3 мкм.
8. Покрытие ламелей в зоне А: Срб.
9. Покрытие платы: защитная паяльная маска СПФ3-ВЦ ТУ 6-17.504—2004.
10. Маркировать краской ТНПФ-01, черная ТУ 29-02-889—88. УХЛ3.
11. Рсб-файл АБВГ.758XXX.XXX T5M.
12. Остальные технические требования по ОСТ4 ГО.070.014.

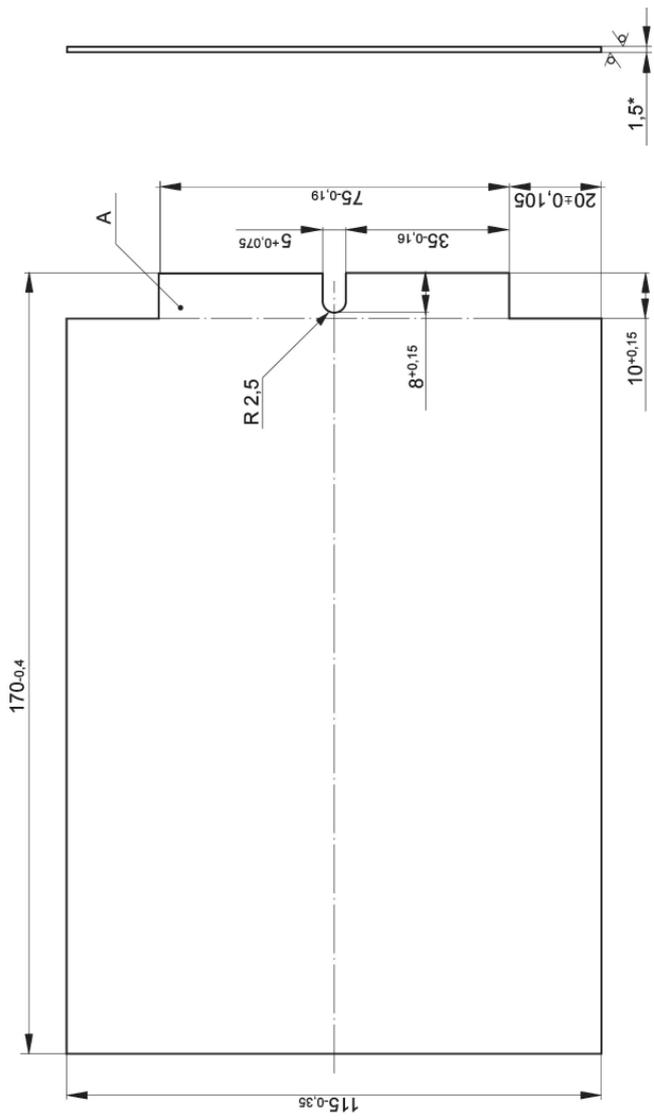


Таблица 1

| Диаметр отверстия, мм | Количество отверстий |
|-----------------------|----------------------|
| 0,7 | 150 |
| 0,9 | 120 |
| 1,1 | 65 |
| 2,7 | 4 |

| | | | | | | | | | |
|----------------|--|-----------|----------|-----------|------|--|------|----------|---------|
| Изм. | | Лист | № докум. | Подп. | Дата | Лит. | | Масса | Масштаб |
| | | | | | | 01 | 0,15 | 1:1 | |
| Разраб. | | Т. контр. | | Н. контр. | | Лист | | Листов 1 | |
| Плата печатная | | | | | | АБВГ.758XXX.XXX | | | |
| Утв. | | | | | | Стеклотекстолит СФ-2-35Г-1,5 кл ГОСТ10316-78 | | | |

При автоматизированной разработке печатных плат исчезла необходимость в контроле точности расположения проводников, контактных площадок, монтажных и переходных отверстий. Вопросы точности расположения решаются в процессе проектирования. При этом возможности современных САПР и оборудования таковы, что позволяют устанавливать шаг проектирования от 0,01 мм. Поэтому нет необходимости устанавливать в чертеже печатной платы шаг координатной сетки и вообще использовать координатную сетку.

Таким образом, полная информация о печатной плате может быть представлена в виде значительно упрощенного чертежа с необходимыми дополнениями, содержащимися в rcb-файле, ссылка на который приводится в технических требованиях чертежа.

Аналогично могут быть оформлены чертежи слоев многослойной печатной платы (наименование чертежа "Слой многослойной печатной платы"). Также этот подход может быть использован для оформления сборочного чертежа многослойной печатной платы.

Исходя из [4] rcb-файлу может быть присвоено обозначение, состоящее из обозначения чертежа детали или сборочной единицы (в случае если изображения слоев приведены на сборочном чертеже многослойной печатной платы) и кода документа (например Т5М). Следовательно, обозначение rcb-файла может выглядеть таким образом:

АБВГ.758XXX.XXX Т5М

или

АБВГ.6872XX.XXX Т5М.

Руководствуясь [1] при автоматизированном методе конструирования, в комплект конструкторской документации можно включать документы на носителях данных, определяющих конструкцию и метод изготовления печатных плат. При этом все документы на носителях данных записываются в спецификацию сборочной единицы. Если принять во внимание примеры оформления и требования к оформлению спецификаций согласно [5], то rcb-файл можно записать в раздел "Документация" с указанием в графе "Обозначение" — обозначения rcb-файла, в графе "Наименование" — наименования rcb-файла в соответствии с [4], в графе "Формат"... И вот тут возникает вопрос, как должно быть организовано создание и ведение архива технической документации предприятия и управление его документооборотом.

Ответ на этот вопрос, конечно же, есть. На предприятии должна существовать развитая локальная сеть, пакеты сквозного проектирования (в данном случае — печатных плат) и система для создания и ведения архива технической документации и управления документооборотом предприятия. В составе такой системы имеется сервер, который и является основным связующим звеном, обеспечивающим хранение и обращение документации [6].

Однако не все предприятия готовы или имеют возможность приобрести такую систему. Тогда на пере-

ходный период может быть организован документооборот в электронном виде с использованием съемных носителей данных, например компакт-дисков. В таком случае, возвращаясь к форме записи rcb-файла в раздел "Документация", в графе "Формат" ставится звездочка со скобкой (*), а в графе "Примечание" — *) и вид носителя данных, например ГМД (гибкий магнитный диск), CD (компакт-диск) или др. После rcb-файла в раздел "Документация" предлагается записывать информационно-удостоверяющий лист (код документа — УЛ) к rcb-файлу. При этом в графе "Примечание" напротив обозначения информационно-удостоверяющего листа делается запись "Размножить по особому указанию". Информационно-удостоверяющий лист оформляется и согласовывается в соответствии с [7], ему присваивается обозначение, которое соответствует обозначению rcb-файла с добавлением кода УЛ, например АБВГ.758XXX.XXX Т5М-УЛ или АБВГ.6872XX.XXX Т5М-УЛ.

В случае если на одном носителе данных расположены несколько rcb-файлов, рекомендуется выпускать один УЛ на все rcb-файлы, помещенные на этом носителе. Обозначение такого УЛ — в соответствии с [7]. Также рекомендуется оформлять ведомость электронных документов (ВДЭ) в соответствии с [8], если в разделе более трех rcb-файлов.

Подлинник rcb-файла на носителе данных должен храниться в архиве подлинников. Носитель данных с записью должен иметь этикетку, оформленную по [9].

Предложенный подход к оформлению чертежей печатных плат в условиях автоматизированного проектирования позволит значительно упростить документацию и упорядочить документооборот. При этом важным является то, что это не противоречит действующим стандартам и может быть использовано при разработке любых изделий, в том числе и спецтехники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 2.417—91. ЕСКД. Платы печатные. Правила выполнения чертежей.
2. ОСТ 4.010.022—85. Платы печатные. Методы конструирования и расчета.
3. ГОСТ 23751—86. Платы печатные. Основные параметры конструкции.
4. ГОСТ 2.123—83. ЕСКД. Комплектность конструкторских документов на печатные платы при автоматизированном проектировании.
5. ОСТ 4.000.030—85. Конструкторская документация. Выполнение спецификаций.
6. Голышева А. Система управления документооборотом при производстве электронных модулей //Chip News.— 2002.— № 5.— С. 58—61.
7. ГОСТ 2.051—2006. ЕСКД. Электронные документы. Общие положения.
8. ГОСТ 2.106—96. ЕСКД. Текстовые документы.
9. ГОСТ 27781—88. Система обработки информации. Магнитные носители данных с записью. Правила выполнения этикетки.