

# ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ



ОАО "ПРОЖЕКТОР"



Современные системы  
уплотнения  
каналов связи

**1 2003**

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учредитель АО "Нептун"

2003

Год издания 27-й

№ 1

Год регистрации 1992

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*К.т.н. Н. М. Вакив*  
*К.т.н. П. П. Воробийко*  
*Д.т.н. В. Н. Годованюк*  
*К.т.н. А. А. Дашковский*  
*Д.т.н. С. В. Ленков*  
*Д.т.н. В. П. Малахов*  
*В. А. Мингалёв*  
*К.т.н. В. Ф. Моисеев*  
*К.т.н. В. Б. Ткаченко*  
*Е. А. Тихонова*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Д.т.н. А. Л. Вайнер*  
*Д.т.н. В. Т. Дейнега*  
*Д.т.н. Ю. А. Долгов*  
*Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов*  
*К.т.н. И. Н. Еримичой,*  
*зам. гл. редактора*  
*К.т.н. А. А. Ефименко,*  
*Д.ф.-м.н. А. Н. Золотко*  
*Д.ф.-м.н. Ф. Д. Касимов*  
*Л. М. Лейдерман,*  
*отв. секретарь редакции*  
*Д.т.н. С. Ю. Лузин*  
*К.т.н. Ю. Е. Николаенко*  
*Д.ф.-м.н. В. В. Новиков*  
*К.т.н. В. И. Попов,*  
*гл. редактор*  
*К.т.н. В. В. Рюхтин*  
*Д.т.н. Д. А. Сеченов*  
*К.т.н. В. В. Сибиряков*  
*Д.ф.-м.н. О. И. Шпютюк*

АДРЕС РЕДАКЦИИ

Украина, 65005, Одесса-5,  
ул. Прохоровская, 45  
Тел. (+38-048) 733-72-83  
Тел./факс (+38-048) 733-67-91  
E-mail: tkea@odessa.net  
Web-сайт: tkea.wallst.ru

Международный стандартный  
серийный номер  
ISSN 0130-6243

Регистрационный номер  
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Регистрация в ВАК по разделам  
"Физико-математические науки",  
"Технические науки":  
Бюллетень ВАК Украины, 1999, № 4

СОДЕРЖАНИЕ

**Техническая политика**

Особенности построения бортовых телеметрических систем малых спутников. *Колесник К. В., Пискорж В. В.* 3

Поверхностный монтаж электронных компонентов: особенности использования. *Грачев А. А.* 5

Автоматические станции контроля загрязнения атмосферы в экологическом мониторинге Украины. *Дашковский А. А., Рыжков В. Ф.* 10

Нанометровые электронные приборы. Перспективные версии. *Дроздов В. А., Дроздов М. А., Ковальчук В. В.* 12

**Проектирование, конструирование**

Системный подход к синтезу базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств. *Кондрашов А. С., Шелест В. И.* 17

Учет механических напряжений в комбинированных диэлектриках для конденсаторов СБИС. *Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Петлицкая Т. В.* 19

**Качество, надежность**

Контролепригодная схема двоичного сумматора на основе 16-разрядной группы секций. *Тимошкин А. И.* 21

**Биомедицинская электроника**

Телевизионное устройство для исследования радужной оболочки глаза. *Рагимов А. Т.* 25

**Электроника и экология**

Автоматические газоанализаторы загрязнения атмосферного воздуха. *Михеева И. Л., Куринный В. К., Таякин В. Ю., Мазыра Л. Д.* 28

Устройство для регулирования водопотребления. *Скубилин М. Д., Стефаненко В. К., Спиридонов О. Б.* 32

**Технология производства**

Устройство управления импульсным режимом электролиза при создании контактных площадок. *Альбота Л. А., Раренко И. М., Швец А. Г., Альбота И. Л.* 34

Численное моделирование лазерных фотоионизационных технологий очистки вещества на атомном уровне. *Амбросов С. В.* 38

Получение кремния электродным восстановлением продуктов пиролиза рисовой лузги. *Марончук И. Е., Масенко Б. П., Повстяной М. В., Завадский В. А., Соловьев О. В.* 42

**Термоэлектрические устройства**

Тепловая модель и КПД анизотропного термоэлемента в режиме генерации электроэнергии. *Ащеулов А. А., Охрем В. Г., Охрем Е. А.* 44

**Термофотовольтаика**

Использование квантовых точек InSb в термофотовольтаических преобразователях на основе GaSb. *Андропова Е. В., Баганов Е. А., Далечин А. Ю., Карманний А. Ю.* 46

**Датчики**

Функциональные возможности фотоприемников на основе низкоомных полупроводниковых пленок. *Клюканов А. А., Сенокосов Э. А., Богинский Д. Е., Сорочан В. В., Феценко Л. В.* 49

**Материалы электроники**

Расчет частотной зависимости диэлектрических характеристик тонких пленок системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ . *Казаков А. И., Андриянов А. В., Миронов В. С., Поляруш О. В.* 52

Микронеоднородности поверхности ионнолегированного слоя кремния. *Викулин И. М., Храмов Е. Ф., Прохоров Г. В., Гнап А. К.* 55

**Библиография**  
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2002 г. 59

**Новые книги** 24, 27

**Выставки. Конференции. Симпозиумы.** 4, 16, 31, 51

Рекомендации авторам по подготовке рукописи 3-я стр. обложки

**Науково-технічний журнал**  
**ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ**  
**В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ**  
**(російською мовою)**

**ЗМІСТ**

**Технічна політика**

Особливості побудовання бортових телеметричних систем малих супутників. *К. В. Колесник, В. В. Пискорж* (3)

Поверхневий монтаж електронних компонентів: особливості використання. *А. О. Грачов* (5)

Автоматичні станції контролю забруднення атмосфери в екологічному моніторингу України. *О. А. Дашковський, В. Ф. Рижков* (10)

Нанометрові електронні прилади. Перспективні версії. *В. О. Дроздов, М. О. Дроздов, В. В. Ковальчук* (12)

**Проектування. Конструювання**

Системний підхід до синтезу базових несучих конструкцій радіоелектронних засобів. *А. С. Кондрашов, В. І. Шелест* (17)

Врахування механічних напружень в комбінованих діелектриках для конденсаторів НВІС. *В. О. Пилипенко, В. М. Пономар, Т. В. Петлицька* (19)

**Якість, надійність**

Контролепридатна схема двійкового суматора на основі 16-разрядної групи секцій. *А. І. Тимошкін* (21)

**Біомедицинська електроніка**

Телевізійний пристрій для дослідження райдужної оболонки ока. *А. Т. Рагімов* (25)

**Електроніка та екологія**

Автоматичні газоаналізатори забруднення атмосферного повітря. *І. Л. Михеева, В. К. Куриний, В. Ю. Таякін, Л. Д. Мазіра* (28)

Пристрій для регулювання водопостачання. *М. Д. Скубілін, В. К. Стефаненко, О. Б. Спиридонов* (32)

**Технологія виробництва**

Пристрій керування імпульсним режимом електролізу при створенні контактних площадок. *Л. А. Альбота, І. М. Раренко, А. Г. Швець, І. Л. Альбота* (34)

Чисельне моделювання лазерних фотоіонізаційних технологій очищення речовини на атомному рівні. *С. В. Амбросов* (38)

Отримання кремнію електродним відновленням продуктів піролізу рисової лузги. *І. Є. Марончук, Б. П. Масенко, М. В. Повстяний, В. А. Завадський, О. В. Соловійов* (42)

**Термоелектричні засоби**

Теплова модель та ККД анізотропного термоелементу в режимі генерації електроенергії. *А. А. Ащевулов, В. Г. Охрем, О. А. Охрем* (44)

**Термофотовольтаїка**

Використання квантових крапок InSb у термофотовольтаїчних перетворювачах на основі GaSb. *О. В. Андропова, Е. О. Баганов, О. Ю. Далечин, О. Ю. Карманний* (46)

**Датчики**

Функціональні можливості фотоприймачів на основі низькоомних напівпровідникових плівок. *О. О. Ключанов, Е. О. Сінокосов, Д. Є. Богінський, В. В. Сорочан, Л. В. Феценко* (49)

**Матеріали електроніки**

Розрахунок частотної залежності діелектричних характеристик тонких плівок системи HfO<sub>2</sub>—Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *А. І. Казаков, О. В. Андріянов, В. С. Миров, О. В. Полярюш* (52)

Мікронеоднорідності поверхні іоннолегованого шару кремнію. *І. М. Вікулін, Є. Ф. Храмов, Г. В. Прохоров, А. К. Гнап* (55)

**Бібліографія**

Перелік статей, що опубліковані в журналі у 2002 році (59)

Нові книги (24, 27)

**CONTENT**

**Technical polytic**

The construction features of the small satellites on-board telemetry systems. *Kolesnik K. V., Piscorg V. V.* (3)

Superficial installation of electronic components: features of use. *Grachov A. A.* (5)

Automatic stations of the control of atmosphere pollution in ecological monitoring of Ukraine. *Dashkovskiy A. A., Ryzhkov V. F.* (10)

Nanometer electronic devices. Perspective versions. *Drozhdov V. A., Drozdov M. A., Kovalchuk V. V.* (12)

**Designing. Construction**

Base electronic equipment case syntheses from point of system approach. *Kondrashov A. S., Shelest V. I.* (17)

Consideration of mechanical stresses in combined insulators for LSIC capacitors. *Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Petlitskaya T. V.* (19)

**Quality. Reliability**

Easily testable circuit of binary adder on the basis of sixteen-bit group of four-bit sections. *Timoshkin A. I.* (21)

**Biomedical electronics**

Television device for a research of iridescent envelope of an eye. *Ragimov A. T.* (25)

**Electronic and ecology**

Gas analyzers for automatic monitoring of ambient air pollution. *Mikheeva I., Kurinny V., Tayakin V., Mazyra L.* (28)

The device for regulation of water consumption. *Scubilin M. D., Stefanenko V. K., Spiridonov O. B.* (32)

**Production technology**

Control device by electrolysis pulse regime at contact pad creation. *Al'bota L. A., Rarenko I. M., Shvets A. G., Al'bota I. L.* (34)

Numeral modelling of laser photoionization technologies for refinement of substance on atomic level. *Ambrosov S. V.* (38)

Obtaining of silicium by electrode recovery of products of pyrolysis rice peel. *Maronchuck I., Massenko B., Povstyanoy M., Zavadsky V., Solovyev O.* (42)

**Thermoelectric devices**

Thermal model and efficiency of a thermoelement in the electrical power generation mode. *Ashcheulov A. A., Okhrem V. G., Okhrem Ye. A.* (44)

**Thermophotovoltaics**

Using of InSb quantum dots in GaSb thermophotovoltaic cells. *Andronova E. V., Baganov Ye. A., Dalachin A. Yu., Karmanny A. Yu.* (46)

**Sensors**

Functional possibilities of photocells on the basis of low resistance semiconductor films. *Klyukanov A. A., Senokosov E. A., Boginskiy D. E., Sorochan V. V., Feshchenko L. V.* (49)

**Materials of electronics**

The frequency dependence calculation of the HfO<sub>2</sub>—Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film dielectric parameters. *Kazakov A. I., Andriyanov A. V., Mironov V. S., Polyarush O. V.* (52)

Microheterogeneity of the ion-doped silicon surface layer. *Vikulin I. M., Khramov E. Ph., Prokhorov G. V., Gnap A. K.* (55)

**Bibliography**

The articles list that have been published in journal during 2002 (59)

The new books (24, 27)

**колонка редакції**

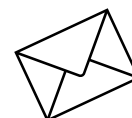
**Уважаемый читатель!**  
**Редакция предлагает Вашему вниманию первый номер года. И хотя торжественная минута начала года уже позади, с нами остались наши надежды. Пожелаем же друг другу, чтобы они сбывались.**

**В январе этого года Украина получила от Верховной Рады закон "О приоритетных направлениях инновационной деятельности в Украине". В числе стратегических приоритетных направлений на 2003 — 2013 гг., наряду с машино- и приборостроением как основной развития всех отраслей производства, названы также нанотехнологии, микроэлектроника, информационные технологии, телекоммуникации.**

**В рамках стратегических направлений обозначены и приоритеты общегосударственного уровня до 2007 года, в т. ч. функциональная и силовая электроника в энергетике, системы локализации в различных средах, оптоэлектронные системы, бытовая и коммунальная электронная техника и технологические процессы изготовления ее элементов, производство телевизоров. Здесь же названы информационные технологии контроля и управления объектами базовых технологий, лазерная техника и технология ее использования, электронная база систем связи, полупроводниковые материалы на основе сверхчистого кремния, германия, арсенида галлия и сложных соединений, другие направления.**

**Таким образом, можно считать начало нынешнего года более чем удачным для украинских специалистов радиоэлектроники и приборостроения, чьи многолетние устремления так объемно совпали с масштабными намерениями государства.**

**Редакция надеется на новый виток научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и на новые статьи по их результатам.**



**колонка редакції**

К. В. КОЛЕСНИК, д. т. н. В. В. ПИСКОРЖ

Украина, г. Харьков, НИИ радиотехнических измерений  
E-mail: kolesnik@soyuztele.com

Дата поступления в редакцию  
24.05 2002 г.

Оппонент д. т. н. В. М. ШКОЛЬНИКОВ  
(МАИ, г. Москва)

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАЛЫХ СПУТНИКОВ

*Рассмотренные особенности позволяют определить основные направления совершенствования бортовых телеметрических систем в современных космических аппаратах.*

В настоящее время все большее значение приобретает использование малых спутников — космических аппаратов весом в пределах 100 кг. Такие аппараты могут выводиться на орбиту Земли сразу по несколько штук как сопутствующий груз при запуске крупных изделий и при этом иметь достаточно широкий спектр решаемых задач — от дистанционного зондирования Земли до задач связи. При проектировании спутников данного класса, учитывая их сверхмалый вес, а также необходимость реализации многозадачной системы в малых объемах, особенно актуальным является уменьшение габаритных размеров и массы служебных систем, снижение их энергопотребления.

Бортовая телеметрическая система спутника предназначена для сбора, обработки и представления в бортовой центральный вычислительный комплекс спутника телеметрической информации о состоянии всех систем спутника, а также цифровых массивов от аппаратуры полезной нагрузки. (Аппаратурой полезной нагрузки считаются целевые системы спутника, не связанные напрямую с задачами обеспечения полета космического аппарата.) Полученная информация из бортового центрального вычислительного комплекса спутника передается по каналам связи в наземную станцию управления. При этом следует отметить возрастание в контуре управления космическим аппаратом роли бортового цифрового вычислительного комплекса. Все информационные потоки, в том числе и телеметрический, циркулируют через бортовой цифровой вычислительный комплекс, а системы космического аппарата, как служебные, так и целевые, являются его периферийным оборудованием.

Комплексный анализ полученной информации позволяет как проводить оценку тактико-технических характеристик служебных систем микроспутника, так и получать необходимую техническую и научную информацию от аппаратуры полезной нагрузки. При этом одной из особенностей построения бортовых телеметрических систем современных микроспутников

является возрастание доли информации полезной нагрузки в телеметрическом кадре информации.

Следующей особенностью таких систем является также возрастание требований к их массогабаритным показателям, что связано с тенденцией создания малых и сверхмалых спутников. Такие космические аппараты, как уже было сказано выше, могут выводиться на орбиту Земли группами или как сопутствующий груз, что значительно снижает стоимость получаемой информации.

Использование информации от бортовой телеметрической системы микроспутника в контуре его управления налагает повышенные требования к обеспечению надежности работы всех элементов бортовой телеметрической системы. Эта особенность также должна учитываться при проектировании современных бортовых телеметрических систем.

Учитывая возросший практический интерес к возможности получения разноплановой информации от одного микроспутника, актуальным является реализация многозадачных структур в малых объемах. Бортовая телеметрическая система должна обеспечивать возможность функционирования подобных структур и, в свою очередь, оптимально использовать их возможности, создавая через единый для спутника бортовой центральный вычислительный комплекс общую информационную сеть космического аппарата. Эта особенность требует от бортовой телеметрической системы спутника гибкости по отношению к разноплановым информационным потокам. При этом необходимо обеспечить как независимость и автономность работы целевых систем микроспутника, так и исключение нежелательного параллелизма и дублирования выполняемых задач.

Принимая во внимание тот факт, что время активного существования современных микроспутников возросло, а также учитывая динамику процессов, которые они регистрируют, современная бортовая телеметрическая система должна позволять работать с несколькими программами телеметрических измерений. При этом необходимо не только иметь широкий спектр статических программ телеметрических измерений, которые можно инициализировать путем передачи с наземной станции управления полетом соответствующей командой управления в бортовой центральный вычислительный комплекс микроспутника, но и иметь возможность регенерации и загрузки но-

вых программ телеметрических измерений, если в этом возникла необходимость уже после запуска микро-спутника.

Поскольку в настоящее время стоимость микро-спутника значительно ниже стоимости крупного аппарата, у многих ранее некосмических стран появилась реальная возможность иметь для решения своих хозяйственных задач собственный космический аппарат. Поэтому можно говорить о возрастании потребности в малых спутниках.

Одним из направлений снижения затрат на создание микро-спутников является использование модульного принципа построения бортовой телеметрической системы. Модульная конструкция предусматривает наличие базового модуля и модулей коммутаторов датчиков. Базовый модуль состоит из микроконтроллера с блоком управления и универсальным источником электропитания, а также необходимыми интерфейсами связи. Модули коммутаторов датчиков обеспечивают сбор информации от разных типов датчиков и могут комплектоваться в зависимости от особенностей космического аппарата. Такая конструкция позволяет путем изменения количества и типов модулей коммутаторов датчиков создавать телеметрические системы различного назначения и использовать их в различных космических аппаратах данного класса.

Современные микро-спутники должны обеспечивать возможность работы в комплексных интернациональных программах научных исследований. При этом они должны взаимодействовать с наземными

станциями космических исследовательских центров ведущих стран мирового сообщества. Это возможно только при использовании общепринятых стандартов CCSDS.

Стандарты CCSDS являются продуктом совместного анализа и исследований в области информационного взаимодействия в космической отрасли авторитетных представительств большинства ведущих мировых космических агентств, таких как NASA (США), NASDA (Япония), ESA (Европа), RSA (Россия), DFVLR (Германия), CNES (Франция), BNSC (Великобритания), DOC-CRC (Канада), CAST (Китай), INPE (Бразилия) и др. Для космической отрасли Украины с учетом задачи интеграции в мировое космическое сообщество и выхода на международный рынок космических услуг ориентация на использование международных стандартов чрезвычайно актуальна.

Таким образом, важным направлением совершенствования спутниковых телеметрических систем является обеспечение совместимости формируемой системой информационного потока с технологиями, оговариваемыми международными стандартами.

Рассмотренные особенности построения бортовых телеметрических систем малых спутников позволяют определить основные направления совершенствования бортовых телеметрических систем в космических аппаратах данного класса. Они также могут учитываться при формировании требований к разработке бортовых телеметрических систем других космических аппаратов.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ



**ВТОРОЙ  
МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ**  
the second moscow international  
industrial forum

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА-2003

ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

9—12 ИЮНЯ 2003 г. **МОСКВА** СК «ОЛИМПИЙСКИЙ»

- ⇒ Электронные компоненты
- ⇒ Комплектующие
- ⇒ Материалы
- ⇒ Радиоэлектронные модули
- ⇒ Исследования и технологии
- ⇒ Приборы и оборудование

**www.miif.ru**

Оргкомитет:  
129223, Россия, Москва, а/я 10  
Тел.: (095) 937-40-81,  
Факс: (095) 937-40-82  
E-mail: b95@online.ru

Д. т. н. А. А. ГРАЧЕВ

Украина, г. Киев, НПФ "VD MAIS"  
Email: grachov@vdmiais.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
25.10 2002 г.

Оппонент к. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ: ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

*Поэтапное внедрение технологии и оборудования для поверхностного монтажа электронных компонентов позволит создать производства, отвечающие современным требованиям.*

Преимущества перехода на технологию поверхностного монтажа по сравнению с выводным монтажом в отверстия очевидны. Известно, что в 1990-х годах вопросами разработки технологии, оборудования и материалов для поверхностного монтажа в Украине занимались ряд отраслевых институтов и предприятий, например, НИТИ «Темп» (г. Одесса), АО «ЭСМаш», ПО «Микропроцессор» (г. Киев), ПО «Электрон» (г. Львов) и др. Характерным для того периода являлись недостаточная номенклатура и количество электронных компонентов для поверхностного монтажа, т. к. отечественные предприятия только осваивали их производство. Кроме того, отсутствовал серийный выпуск оборудования для монтажа и пайки компонентов.

На сегодня обстановка с технологией поверхностного монтажа на действующих и возрождающихся производствах электронной аппаратуры резко изменилась. Сегодня для разработки и изготовления современной аппаратуры с использованием поверхностного монтажа есть любая элементная база известных зарубежных фирм, таких как IBM, Motorola, Analog Devices, Phillips, Murata и др. Кроме того, оснащение предприятий зарубежным современным технологическим оборудованием и материалами для поверхностного монтажа электронных компонентов способствует внедрению его при сборке электронной аппаратуры.

Следует отметить поэтапный характер внедрения технологии поверхностного монтажа.



Рис. 1. Ручная установка трафаретной печати фирмы ESSEMTEC

На первом этапе, при малых объемах производства (не более 3—5 тыс. печатных узлов в месяц и 100 компонентах на плате), а также в экспериментальном и опытном производстве, используется ручной монтаж электронных компонентов на поверхность печатных плат с применением паяльных станций, например, фирмы RACE (США). При этом использование паяльника с наконечником «мини-волна», термопинцета, термофена, термоотсоса и термоэкстрактора обеспечивает монтаж и демонтаж всех компонентов, включая микросхемы в корпусах SOT, SOI, SOIC, QFP, PLCC. Кроме того, применение паяльного устройства фирмы RACE серии TF-700 позволяет вести конвекционную поштучную пайку и демонтаж современных микросхем в корпусах типа BGA. При этом обработка технологического процесса пайки должна проводиться с обязательным учетом размера и местоположения микросхемы на плате, конструкции и количества слоев платы, количества и массы близрасположенных компонентов, а также общего нагрева всей платы снизу. Особенности монтажа и демонтажа микросхем в BGA- и CSP-корпусах рассмотрены в [1].

Следующим этапом при сборке электронной аппаратуры с объемом производства не более 15—20 тыс. печатных узлов в месяц и 100 компонентах на плате является переход предприятий на групповые технологические процессы подготовки печатных плат путем нанесения паяльной пасты трафаретной печатью и оплавления в печах паяных соединений установленных электронных компонентов. Для этого приобретаются:

- оборудование для нанесения паяльной пасты трафаретной печатью;
- оборудование, производящее установку компонентов на плату;
- оборудование для оплавления паяльной пасты.

Требованиям мелкосерийного производства аппаратуры в наибольшей степени отвечает относительно недорогое оборудование фирмы ESSEMTEC (Швейцария) для нанесения паяльной пасты и установки компонентов на поверхность плат.

Общий вид ручной установки трафаретной печати показан на рис. 1. Основные характеристики оборудования для ручной трафаретной печати фирмы ESSEMTEC приведены в табл. 1.

Совмещение трафарета с рисунком платы в представленных установках обеспечивается с точностью не хуже 0,02 мм. Диапазон смещения платы при совмещении с трафаретом по осям X и Y равен 5 мм, а по углу — 2,5°.

Таблица 1

Характеристики установок ручной трафаретной печати фирмы ESSEMTEC

Наименование	Размеры печатной платы, мм	Примечание
SP-002B	435×355	Плоский стол. Произвольное крепление
SP-002BL	510×510	Вакуумный прижим
SP-002t	435×355	Магнитный прижим на стойках
SP-002M	435×355	Магнитный прижим на стойках
SP-002V	435×355	Вакуумный прижим
SP-002VL	500×410	Вакуумный прижим
SP-002SL	500×410	Вакуумный прижим

Для установки компонентов на платы успешно используются ручные манипуляторы серии EXPERT фирмы ESSEMTEC (рис. 2) с производительностью от 300 до 600 компонентов в час. Обычно такие манипуляторы состоят из следующих основных узлов:

- базового устройства с пантографом;
- головки с автоматическим вакуумным захватом;
- встроенного или внешнего компрессора;
- набора вакуумных наконечников;
- карусельного питателя для подачи компонентов из россыпи.

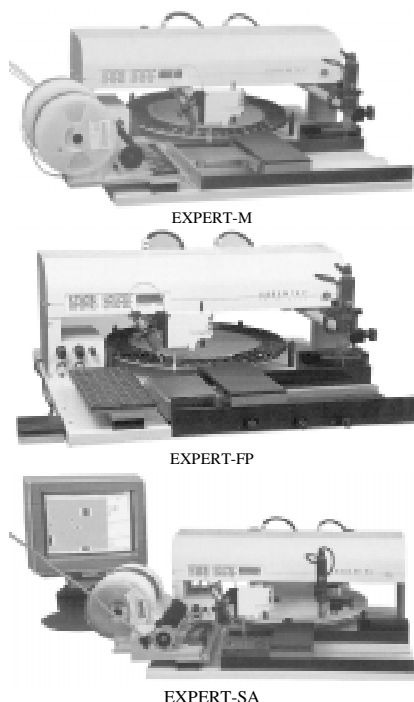


Рис. 2. Манипуляторы фирмы ESSEMTEC

Дополнительно поставляются питатели из ленты и пенала.

Ручные установщики компонентов EXPERT-M могут быть переоборудованы в полуавтоматические EXPERT-SA путем добавления персонального компьютера.

Производительность монтажа повышается до 1000 компонентов в час за счет исключения ошибки оператора при установке

компонентов. Компьютер в соответствии с программой указывает, какой компонент и из какого питателя необходимо захватить. После срабатывания вакуумного захвата он указывает, куда необходимо установить компонент, а в точке установки срабатывают пневматические тормоза. Оператору остается только развернуть компонент вокруг своей оси и опустить его на плату. Вакуумная головка автоматически отпускает компонент.

Система полуавтоматического монтажа EXPERT-FPSA для установки компонентов с малым шагом создана на базе модели EXPERT-FP и усилена функцией полуавтомата системы EXPERT-SA.

В табл. 2 представлены основные технические характеристики манипуляторов фирмы ESSEMTEC, которые могут быть доукомплектованы дозатором паяльной пасты, а также системой пайки горячим воздухом и системой визуального контроля.

Таблица 2

Характеристики манипуляторов EXPERT

Характеристика	Тип манипулятора			
	Expert-M	Expert-SA	Expert-FP	Expert-FPSA
Производительность, компонентов в час	600	1000	600	600
Стандартный фиксатор плат	+	+	—	—
Полуавтоматическая модель	—	+	—	+
Точность размещения компонентов	—	0,1	—	0,1
Типы корпусов устанавливаемых компонентов, мм	0805- 0.6		0201- 0.4	
Возможность установки дозатора	+	+	+	+
Расход сжатого воздуха, л/мин	10	10	10	10
Масса, кг	20	20	26	26
Габаритные размеры, мм: 750×1040×310				

Для пайки установленных на поверхность плат электронных компонентов используются печи, которые отличаются методом подогрева (инфракрасным, конвекционным, смешанным), количеством зон, мощностью, шириной транспортера.

Практика использования ИК-нагрева при пайке компонентов на поверхность плат показала, что он имеет ряд недостатков. Основные из них:

- «затенение» низких компонентов высокими с возможным образованием зон непроя;
- существенное (в ряде случаев) влияние отражающей способности корпуса компонента на процесс пайки;
- нестабильность распределения температуры внутри отдельных зон печи.

Кроме того, возможно влияние ИК-излучения на работоспособность сложных структур современных интегральных микросхем.

Поэтому в настоящее время предпочтение отдается печам с конвекционным нагревом. При их работе горячий воздух распределяется внутри рабочего объема печи таким образом, что в каждой точке создаются одинаковые условия пайки.

Относительно недорогой конвекционной конвейерной печью, хорошо знакомой на предприятиях Украины, является печь MISTRAL-360 фирмы TECHNOPRINT (Голландия), используемая в мелкосерийном и серийном производстве (см. рис. 3 и табл. 3).



Рис. 3. Конвейерная печь конвекционного оплавления Mistral-360

Таблица 3

Характеристики конвекционной печи MISTRAL-360

Количество температурных зон	4
Длина рабочих зон, мм	1400
Температурный диапазон пайки, °С	180—260
Максимальная ширина печатной платы, мм	365
Скорость конвейера, см/мин	10—120
Мощность печи, Вт	7800
Напряжение питания, В	220/380

Следующим этапом оснащения предприятий является приобретение оборудования, обеспечивающего объем в 20 тысяч и более печатных узлов в месяц.

В этом случае для нанесения паяльной пасты на платы может быть использован полуавтомат трафаретной печати SP-006 фирмы ESSEMTEC (рис. 4), конструкция которого и автоматическая магнитная фиксация высоты рамки в процессе печати позволяют достичь высокой точности и воспроизводимости.

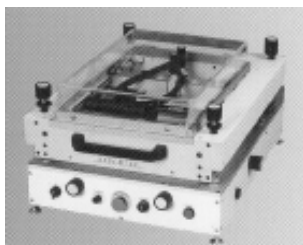


Рис. 4. Полуавтомат трафаретной печати SP-006 фирмы ESSEMTEC

Базовые характеристики полуавтомата SP-006:

- верхний стандартный стол;
- нижний стол, оборудованный вакуумным насосом и контролирующими приборами;
- ракель двойного действия, автоматически перемещающийся по направляющим, с необходимыми регулируемыми устройствами;
- одинарный или двойной процесс печати (печать, чистка/печать, печать/печать);
- точное базирование по трем координатам ( $X$ ,  $Y$ , угол поворота);
- суппорт для подачи инертного газа;
- магнитный замок, фиксирующий размещение рамки на время печати;
- различные виды запуска процесса печати: ручной старт, автоматический старт;
- набор адаптеров для более точной и качественной настройки рамок и трафаретов;
- прочная стальная конструкция.

Технические параметры SP-006:

- максимальный размер печатающей рамки (мм) – 500×400 (модель L – 600×500);

- производительность – 10÷120 мм/с;
- погрешность совмещения трафарета с платой— 0,025 мм;
- габаритные размеры 750×550×360 мм.

В случае необходимости увеличения производительности процесса трафаретной печати паяльной пасты (в условиях крупносерийного производства) может быть использован автомат трафаретной печати SP-100 (рис. 5) с повышенной скоростью перемещения ракеля.



Рис. 5. Автомат трафаретной печати SP-100 фирмы ESSEMTEC

Работа автомата управляется от встроенной микропроцессорной системы. Все контролируемые параметры отображаются на дисплее. Память объемом до 99 программ, учитывающих различные параметры и режимы работы автомата, позволяет вести технологический процесс без присутствия оператора.

Базовые характеристики автомата SP-100:

- исполнение настольное или напольное;
- автоматический контроль, в т. ч. подъема и скорости перемещения ракеля;
- программирование стартовой позиции и хода ракеля;
- электропривод для двойного ракеля (с полиуретановой или металлической рабочей частью);
- магнитная фиксация односторонних или двухсторонних плат;
- размеры плат до 583×583 мм;
- точное базирование по трем координатам ( $X$ ,  $Y$ , угол поворота);
- магнитный замок, фиксирующий размещение рамки на время печати;
- автоматическое включение или отключение процесса печати в зависимости от наличия плат;
- автоматическая загрузка и выгрузка печатных плат.

Технические характеристики SP-100:

- максимальный размер печатающей рамки (мм) — 583×583;
- максимальная высота над платой (мм) — 24;
- программируемое давление ракеля — 10—120 Н;
- производительность — 30÷100 мм/с;
- погрешность совмещения трафарета с платой — 0,025 мм;
- габаритные размеры 780×840×790 мм.

Установку электронных компонентов в серийном и крупносерийном производстве на жестко фиксированные или подвижные печатные платы осуществляют автоматы типа «pick and place». Их отличают повышенная универсальность, возможность монтажа любых компонентов [2].

Выбор автоматов-установщиков зависит, прежде всего, от программы выпуска изделий и сложности

конструкции монтируемого узла (размеры печатной платы, количество и номенклатура устанавливаемых корпусов, способ их установки и др.). Если, например, на плату устанавливается большое количество различных типоразмеров корпусов, то предпочтение следует отдавать гибким автоматам средней производительности, позволяющим устанавливать подавляющее количество компонентов. При большом количестве однотипных и несложных плат преимуществом будут обладать высокопроизводительные автоматы, у которых переход на другой типоразмер плат будет связан только с перезарядкой питателей компонентов.



Рис. 6. Автомат-установщик CP60L™ фирмы Samsung

Автоматы фирмы Samsung (рис. 6, табл. 4) построены по модульному принципу, имеют компьютерные системы управления, обеспечивают работу установочных головок и транспортных трактов, а также взаимодействие систем центрирования, коррекции и опознавания компонентов.

Необходимо отметить, что автоматы-установщики фирмы Samsung, по сравнению с автоматами других ведущих зарубежных фирм, имеют наиболее выгодный показатель «производительность/цена».

Для конвекционной пайки электронных компонентов в условиях крупносерийного производства могут использоваться конвейерные печи RF2062C, RF2082C (рис. 7) и RF20102C фирмы Samsung. Печи поставляются на станине с сетчатым или цепным конвейером. Параметры процесса пайки в печах контролируются встроенным микропроцессором и выводятся

на дисплей пульта управления. Печи имеют соответственно 6, 8 и 10 зон нагрева с отдельной конвекцией в каждой зоне. Технические характеристики печей приведены в табл. 5.



Рис. 7. Конвейерная конвекционная печь RF2082C

Таблица 5

Характеристики печей для групповой пайки

Параметры	Тип печи		
	RF2062C	RF2082C	RF20102C
Количество зон	6	8	10
Потребляемая мощность, кВт	35	43	51
Потребляемый ток, А	105	125	145
Скорость нагнетания воздуха, м/с: 0,5 — 4			
Скорость движения конвейера, м/мин: 0,3 — 1,6			
Габаритные размеры, мм	3530×1200×1420	4250×1200×1450	4970×1200×1420
Масса, кг	1400	1500	1600

В настоящее время успешное внедрение технологии поверхностного монтажа на предприятиях и фирмах Украины проведено при сборке охранных систем, медицинской аппаратуры, средств связи, автомобильной электроники, специальных изделий. Ряд предприятий и фирм, например, фирма «Алай» (г. Киев), завод «Орион» (г. Тернополь), фирма «Экран» (г. Чернигов), СП «Комета-ЭП» (г. Днепропетровск), НПП «ВТН» (г. Винница), компания «Крок-Ком» (г. Николаев) и др. оснащены современным зарубежным автоматизированным оборудованием фирм Philips (Нидерланды), Quad, Fuji (США), Djuki (Япония) и др.

В условиях массового производства электронной аппаратуры с использованием поверхностного мон-

Таблица 4

Характеристики автоматов фирмы Samsung для установки компонентов

Параметры		Тип автомата			
		CP20C/CV	CP45F™	CP45FV™	CP60L™
Размеры печатных плат, мм	макс.	460×400×4	460×400×4	460×400×4	500×400×4
	мин.	50×5×0,4	50×30×0,4	50×30×0,4	50×50×0,4
Типы устанавливаемых компонентов		SOP, QFP, chip	QFP, BGA, chip	QFP, CSP, chip	SOP, QFP, BGA, CSP, chip
Время установки чип-компонента, с		0,37	0,19	0,19	0,1
Ширина ленты питателей, мм		8, 12, 16, 24, 32, 44, 56			
Точность установки компонентов на плату, мм	chip	±0,1	±(0,08...0,1)	±(0,08...0,1)	±0,065
	QFP	±(0,05...0,08)	±0,065	±0,04	±0,065
Габаритные размеры, мм		1660×1540×1408	1660×1540×1408	1660×1540×1408	1700×1870×1470
Масса, кг		1100	1150	1150	2010

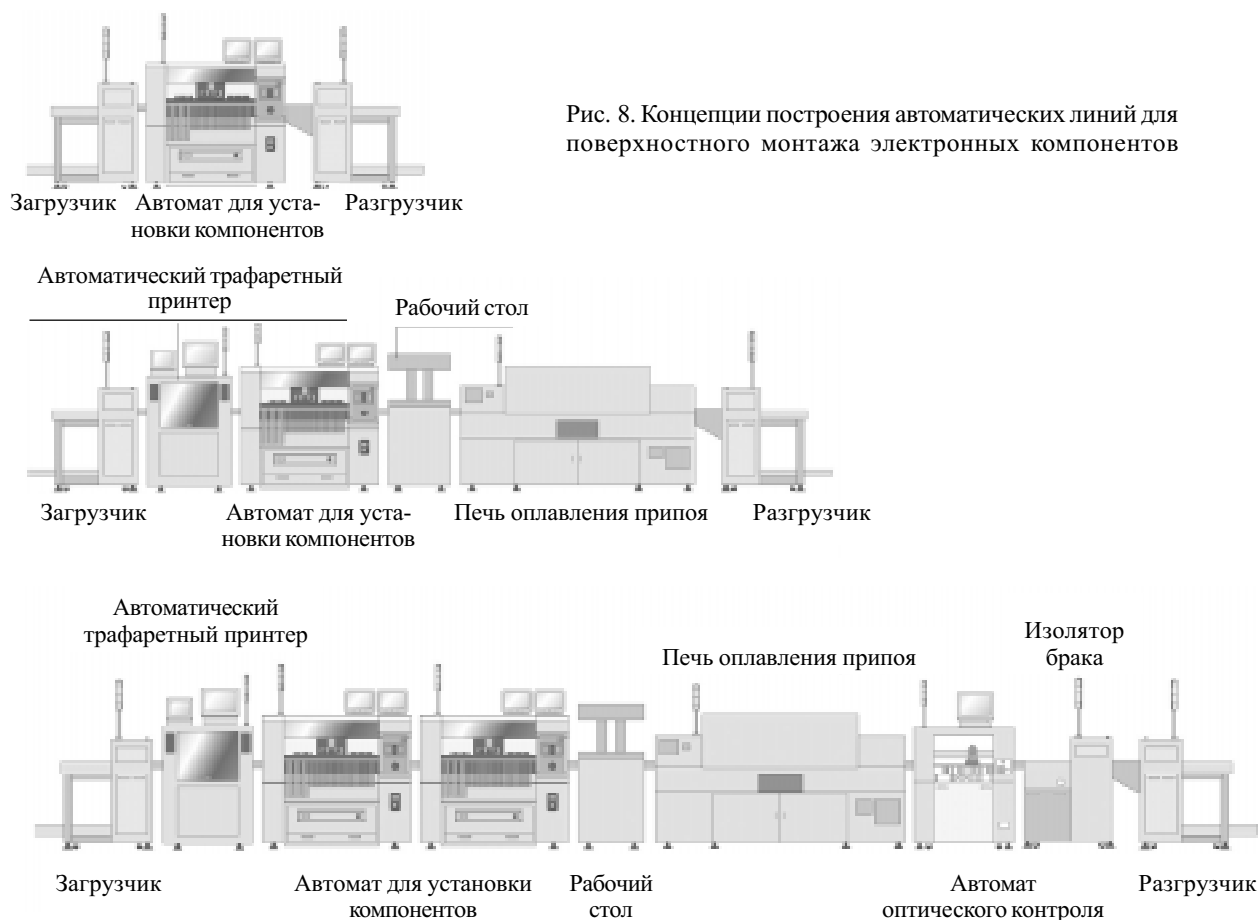


Рис. 8. Концепции построения автоматических линий для поверхностного монтажа электронных компонентов

тажа компонентов определилась тенденция использования не отдельных установок трафаретной печати, автоматов-установщиков и печей, а интегрированных монтажно-сборочных комплексов, которые строятся в виде технологических конвейерных линий. В состав таких линий в качестве связующих элементов между автоматизированными установками входят загрузчики, разгрузчики и конвейерные устройства, обеспечивающие стыковку оборудования в едином технологическом цикле. Конструкторские концепции построения таких технологических конвейерных линий приведены на **рис. 8**. Как видно из рисунка, в зависимости от исполнения в состав линии могут быть включены один или несколько автоматов-установщиков компонентов, различные по исполнению загрузочные, разгрузочные, а также тестирующие устройства.

Дальнейшее развитие технологии и оборудования для поверхностного монтажа связано с совершенствованием электронных компонентов, для которых характерным является:

- миниатюризация, уменьшение массы;
- повышение быстродействия, увеличение степени интеграции и функциональной емкости;
- повышение рабочих частот;
- увеличение количества выводов корпусов и уменьшение шага между ними;

— перевод нестандартных компонентов в конструктивы для монтажа на поверхность плат.

Поэтому дальнейшее расширение области использования поверхностного монтажа с применением автоматизированного оборудования будет характеризоваться увеличением номенклатуры компонентов, монтируемых на поверхность плат, и выполняемых технологических приемов.

\*\*\*

Таким образом, технология и оборудование для поверхностного монтажа электронных компонентов, пройдя поэтапное внедрение на предприятиях и фирмах, выпускающих электронную аппаратуру, позволит создать производства, отвечающие современным требованиям. При этом следует учесть, что только при гибкой структуре этого производства, легко и быстро адаптируемого к новым требованиям потребительского рынка, возможен выпуск конкурентоспособной аппаратуры.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Грачев А., Малиновский Н. Поверхностный монтаж и демонтаж микросхем в корпусах BGA и CSP // Электронные компоненты и системы. — 2002. — № 3. — С. 38—42.
2. Грачев А., Малиновский Н. Поверхностный монтаж электронных компонентов // Там же. — 2002. — № 1. — С. 28—47.

К. т. н. А. А. ДАШКОВСКИЙ, к. т. н. В. Ф. РЫЖКОВ

Украина, г. Киев, НИИ "Укрналит"  
E-mail: analyt@ukranalyt.com.ua

Дата поступления в редакцию  
11.11 2002 г.

Оппонент к. т. н. Г. П. ПРЕПЕЛИЦА  
(ОГЭУ, г. Одесса)

## АВТОМАТИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ УКРАИНЫ

*Приведен опыт создания автоматических станций контроля загрязнения атмосферы, состав, структура, характеристики, состояние и перспективы развития.*

В условиях ускоренного научно-технического развития и бурного роста промышленного производства все более усложняются взаимоотношения человека с окружающей его средой. Расширенное использование естественных ресурсов, с одной стороны, и увеличение промышленных и бытовых отходов, возвращаемых в окружающую среду, с другой, резко усиливают общее воздействие человека на природу.

Для оценки состояния, прогнозирования и регулирования качества окружающей среды необходимо проводить комплексные мероприятия, составной частью которых является экологический мониторинг атмосферного воздуха. В развитых странах такой мониторинг осуществляется инструментальными методами газового анализа, которые все больше вытесняют традиционные химические методы. На основе автоматических газоанализаторов созданы сети автоматических станций непрерывного наблюдения. Они покрывают целые регионы и передают информацию в центры, где производится ее обработка и принятие решений [1]. Например, в Германии только в Земле Баден-Вюртенберг непрерывное наблюдение за состоянием атмосферного воздуха осуществляется сетью из 50 станций, а измерительная сеть Баварии содержит 80 станций и станций-спутников [2].

Ведущими фирмами, выпускающими стационарные и передвижные станции контроля загрязнения атмосферного воздуха, являются HORIBA (Япония) [3], ENVIRONNEMENT (Франция), BECKMAN и LEAR SIEGLER (США) [4], DORNIER (Германия). Аппаратура станций позволяет вести наблюдение за метеопараметрами, основными газообразными загрязнителями атмосферы, радиационным фоном, запыленностью. Стоимость станций, в зависимости от комплектации, колеблется в пределах от 150 до 400 тыс. долларов США.

В Украинском НИИ аналитического приборостроения разработана стационарная автоматическая станция контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) «Воздух-1» (см. **рис. 1** и **таблицу**), предназначенная для осуществления непрерывного дли-

*Технические характеристики АСКЗА «Воздух-1»*

Измеряемые компоненты	Диапазоны измерения	Погрешность
Направление ветра, °	0...360	±10
Скорость ветра, м/с	1,5...60	0,5+0,05V
Относительная влажность воздуха, %	12...98	±3
Температура воздуха, °С	-40...+50	±0,5
Давление, кПа	86,6...106,7	±0,75
Двуокись серы, мг/м <sup>3</sup>	0—0,2—1,0—2,5	0,01+0,15C <sub>x</sub>
Оксиды азота, мг/м <sup>3</sup>	0—0,1—0,5—2,0—10,0	0,015+0,15C <sub>x</sub>
Углеводороды, мг/м <sup>3</sup>	0—5,0—15,0—50,0	±15%
Оксид углерода, мг/м <sup>3</sup>	0—5,0—50,0	±0,75; ±1,5
Озон, мг/м <sup>3</sup>	0—0,1—0,5—1,0	0,015+0,15C <sub>x</sub>
Аммиак, мг/м <sup>3</sup>	0—0,2—1,0—5,0	0,015+0,15C <sub>x</sub>
Сероводород, мг/м <sup>3</sup>	0—0,1—0,5	0,01+0,15C <sub>x</sub>
Пыль, мг/м <sup>3</sup>	0—3,0—10,0—30,0	±20%
Потребляемая мощность — не более 3 кВтА		
Габаритные размеры — не более 2200×2700×3000 мм		

тельного наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в населенных пунктах и санитарно-защитных зонах промышленных предприятий. (В таблице



Рис. 1

V — измеренное значение скорости ветра; C<sub>x</sub> — измеренное значение концентрации соответствующего компонента.)

АСКЗА представляет собой сложный инженерно-технический комплекс и состоит из системы жизнеобеспечения, комплекса метеодатчиков, газоаналитической

системы и устройства сбора, накопления, обработки и передачи информации (УСОИ).

Система жизнеобеспечения включает в себя:

- павильон с внешними установками;
- систему электроснабжения и искусственного освещения;
- систему отопления, кондиционирования и вентиляции;
- систему забора и сброса анализируемого воздуха;
- системы охранной и пожарной сигнализации.

Комплекс метеодатчиков включает в себя измерители направления и скорости ветра, температуры, давления, влажности атмосферного воздуха.

УСОИ состоит из центрального микропроцессорного устройства, устройств ввода сигналов датчиков, аппаратуры передачи данных и выполняет следующие функции:

- непрерывно (с усреднением за 1 мин) опрашивает газоанализаторы и метеодатчики и формирует исходное информационное слово для хранения в базе данных;
- усредняет полученную информацию за 20 мин и хранит ее в энергонезависимой памяти;
- осуществляет прием управляющей информации и передачу данных по стандартным телефонным линиям связи;
- следит за сигналами охранной и пожарной сигнализации и передает сообщение в диспетчерский пункт в случае превышения температуры в станции или в случае несанкционированного открытия входной двери.

Основу станции составляет *газоаналитическая система*, состоящая из автоматических газоанализаторов с унифицированными выходными сигналами. Набор газоанализаторов определяет конфигурацию аналитической системы и зависит от перечня анализируемых компонентов.

Структурная схема станции, соединенной городской телефонной линией связи с диспетчерским пунктом, показана на **рис. 2**.

Газоанализаторы, входящие в систему, должны обладать чувствительностью на уровне долей предельно допустимых концентраций измеряемого компонен-

та, обеспечивать избирательность на фоне неизмеряемых компонентов, обеспечивать стабильность при работе в автоматическом режиме без обслуживания в течение длительного времени.

Чтобы удовлетворить совокупности таких требований, разработанные в институте автоматические газоанализаторы используют такие современные методы газового анализа как хемилюминесцентный, флуоресцентный, фотоабсорбционный, пламенно-ионизационный и другие.

Одним из направлений работ НИИ «Укрналит» является унификация методов анализа и элементов газоаналитической системы. Разработан проект газоаналитической системы на основе комбинированного пламенно-ионизационного и пламенно-фотометрического детектора (ПИД—ПФД) и хемилюминесцентного преобразователя. При помощи хроматографического разделения выделяются измеряемые компоненты ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ). Далее метан и суммарные углеводороды измеряются ПИ-детектором. Оксид углерода после его конвертирования в метан в потоке водорода на никелевом катализаторе также измеряется ПИ-детектором. Диоксид серы и сероводород измеряются ПФ-детектором. Оксид и диоксид азота измеряются хемилюминесцентным преобразователем. Газоаналитическая система имеет единые элементы пробоподготовки, унифицированные системы газового и электрического питания, один системный микропроцессорный контроллер, обеспечивающий управление процессом измерения, обработку измерительной информации и передачу информации потребителю. Вся газоаналитическая система размещена в корпусе настольного прибора, имеет массу 14 кг и потребляет мощность не более 100 Вт.

Другим перспективным направлением является создание многокомпонентных газоанализаторов для измерения микроконцентраций вредных веществ в атмосферном воздухе на основе новых видов ионизационных детекторов, в которых используется эффект различной подвижности ионизованных газов в несимметричном высокочастотном электрическом поле при атмосферном давлении. Применение таких детекторов позволит существенно упростить схему прибора, уменьшить габариты и массу, снизить энергопотребление и стоимость.

Важным направлением улучшения эксплуатационных характеристик газоаналитических систем является использование современных достижений микропроцессорной техники. Архитектура построения современных больших интегральных схем (БИС) позволяет создавать на их основе встроенные многофункциональные микропроцессорные устройства, сочетающие в себе измерительные, вычислительные, управляющие функции, а также поддерживающие встроенные интерфейсы для передачи информации и связи с персональным компьютером. Применение таких БИС позволяет отказаться от внешних устройств сбора, обработки и передачи информации, а также осуществлять модификацию программного обеспечения приборов дистанционно, без их демонтажа и разборки.

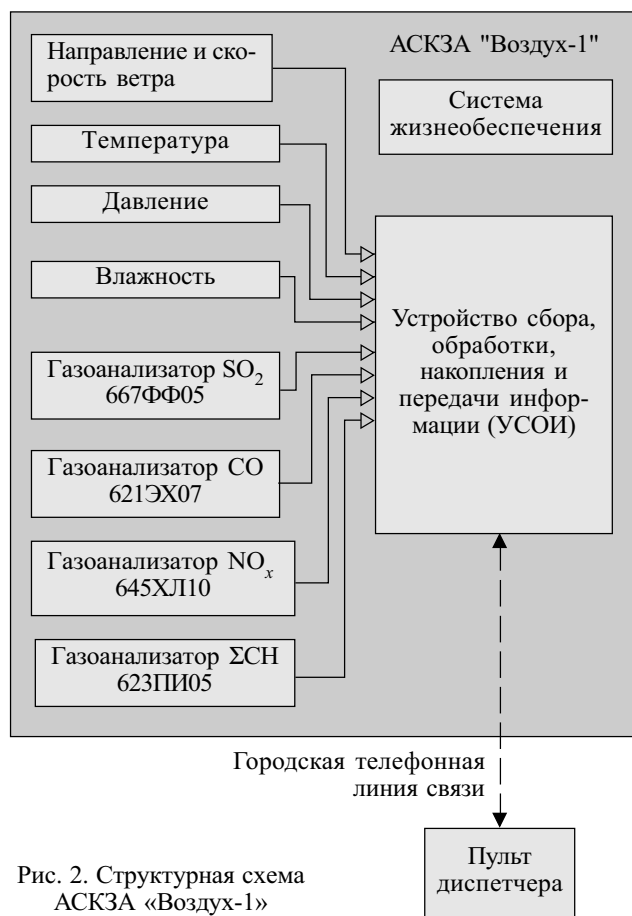


Рис. 2. Структурная схема АСКЗА «Воздух-1»

Большое значение имеет климатическое исполнение приборов. Если обеспечить верхнюю границу диапазона рабочих температур измерительных приборов на уровне максимальной температуры окружающего воздуха, то можно отказаться от применения системы кондиционирования станции. В отключенном состоянии приборы должны выдерживать условия хранения, соответствующие граничным климатическим параметрам окружающего воздуха.

При реализации вышеизложенных положений появляется возможность вообще отказаться от системы жизнеобеспечения газоаналитического измерительного комплекса. Все необходимые для этого функции могут выполняться им самим. Резко снижаются габариты, масса, энергопотребление. Автоматическая стационарная станция становится малогабаритным измерительным прибором, который можно размещать непосредственно «на столбе». Стоимость малогабаритной АСКЗА приближается к стоимости стационарного многокомпонентного прибора для измерения микроконцентраций вредных веществ. Это позволит существенно расширить сеть постов непрерывного атмосферного мониторинга и получать более достоверную информацию о концентрациях и ме-

сте локализации вредных веществ в воздухе населенных пунктов.

На основе АСКЗА как первичного датчика возможно создание информационно-измерительных систем (ИИС) различного уровня — начиная от локальных систем крупных промышленных предприятий, ИИС городов и населенных пунктов и до ИИС экологического мониторинга регионов и страны в целом.

В настоящее время разворачивается ИИС экологического мониторинга в г. Киеве. После завершения работ по определению представительных точек в городе планируется развернуть сеть из шестнадцати станций АСКЗА, информация от которых будет поступать в Управление экологии и природных ресурсов города.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кашин А. В., Сидоров В. А., Ильин А. И., Катин С. В. Информационная система для контроля за загрязнением воздуха // Газовая промышленность. — 1999. — № 12. — С. 66 — 67.
2. Автоматические измерительные сети для охраны окружающей среды / Проспект ф. DORNIER, Германия.
3. Mobile Air Pollution Monitoring Laboratory / Проспект ф. HORIBA, Япония.
4. Система контроля загрязнения атмосферного воздуха SYSTEM 7000 / Проспект. ф. LEAR SIEGLER, США.

*Д. ф.-м. н. В. А. ДРОЗДОВ, к. ф.-м. н. М. А. ДРОЗДОВ,  
к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК*

Украина, Одесский институт Сухопутных войск, Южноукраинский гос. педагогический университет им. К. Д. Ушинского, г. Одесса  
E-mail: wladi@tekom.odessa.ua

Дата поступления в редакцию  
01.11 2002 г.

Оппонент *д. ф.-м. н. В. В. ГОЛОВАНОВ*  
(Южноукр. пед. ун-т им. К. Д. Ушинского,  
г. Одесса)

## НАНОМЕТРОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЕРСИИ

*Рассмотрены основные подходы и закономерности формирования и управления системой нанометровых атомарных кластеров как основной составляющей наноприборов.*

Анализ тенденции развития современной физики нанометрового дипазона приводит к закономерному вопросу о возможности создания электронного прибора (ЭП) с геометрическими размерами в несколько атомов либо отдельной квазимолекулы. Кроме того, некоторые технологические процессы, например электронно-лучевая литография, позволяют создавать полупроводниковые наноструктуры размером менее 10 нм, т. е. уже сегодня появляются новые приборы, где «эксплуатируются» квантовые свойства электронов [1—5].

Весьма перспективна идея создания электронного прибора, где бы использовался одноэлектронный транспорт носителей заряда. При ее практической реализации возникает несколько основных проблем, решение которых, возможно, и определит успех. Прежде всего, это:

а) возможность управления свойствами наноструктур путем вариации геометрии и структурного состава нанометрового ЭП;

б) разрешение механических задач в нм-области (т. е. возможность создания мезомеханики);

в) развитие технологических методов производства нанометрового ЭП [3—5].

В настоящей статье проанализированы возможности создания и функционирования электронного прибора, размеры которого лежат в нм-области.

**Т**ехнологические ограничения, которые свойственны сегодняшним реалиям при переходе к атомному масштабу, вынуждают исследователей скрупулезнее и как можно точнее проводить изучение наноструктур [1, 2, 6—8]. В нм-приборах квантовые свойства электронов и атомов играют решающую роль, а волновая природа электронов определяет характер движения носителей через канал. Если ширина канала соизмерима с длиной волны электронов, то локализация электронов зависит от атомной структуры материала, его морфологии, что, собственно, и определяет доминирующее значение геометрии нм-прибора.

Недавний успех, достигнутый специалистами компании Lucent Technologies в исследовательском центре Bell Laboratories, выводит процесс миниатюризации электронной техники на грань физических возможностей материального мира. С помощью метода т. н. «химической автосборки» ученые покрыли пару крошечных золотых электродов слоем вещества на углеродной основе толщиной в одну-единственную молекулу. Расстояние между электродами составляло 1—2 нм, т. е. было примерно в 20 раз меньше достигнутого ранее предела. Особо важным является и то, что устройство снабжено и третьим электродом, позволяющим ему работать в качестве усилителя или переключателя. Успех американских ученых подтвердил принципиальную возможность создания нанотранзисторов. Вместе с тем сами специалисты предупреждают, что потребуются еще с десяток лет, чтобы такие устройства пришли на смену нынешним кремниевым транзисторам в электронных микропроцессорах [2].

В отличие от полевых транзисторов, в нанотранзисторах туннельный эффект наблюдается в том случае, когда два металлических электрода разделены геометрическим барьером в единицы нанометров, т. е. барьером в десятки атомов. В такой ситуации электроны, обладающие энергией Ферми, способны туннелировать через диэлектрический слой. Электрические свойства туннельного перехода зависят от прозрачности этого слоя для электронных волн. В наноприборах используется тот факт, что если переход обладает достаточно большим сопротивлением, то передача «информации» через барьер квантуется.

Процесс квантования можно проиллюстрировать на примере модели (рис. 1), которую целесообразно назвать одноэлектронным гетерослоем.

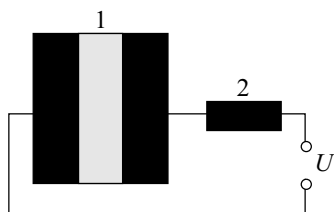


Рис. 1. Модель одноэлектронного гетерослоя

Если источник напряжения заряжает конденсатор  $I$  через обычный резистор  $2$ , то потенциальная нагрузка на конденсаторе строго пропорциональна напряжению и не проявляет никаких признаков квантования. Но если одна из сторон перехода формирует «островок», окруженный изоляционными материалами, то в случае замены диэлектрика в конденсаторе туннельным переходом (на рис. 1 это промежуток между пластинами конденсатора) передача нагрузки на этот «островок» будет проходить дискретно (квантовано), что приводит к увеличению напряжения (возникновению т. н. «кулоновской лестницы»). Такой эффект наблюдался экспериментально [5, с. 160—161].

В одноэлектронном гетерослое потенциальная нагрузка на переходе управляется прикладываемым напряжением. При увеличении температуры или проводимости барьер увеличивается, «ступеньки» уменьшаются и, в конечном счете, сливаются в прямую линию, типичную для обычного резистора.

Эффект «кулоновской лестницы» проявляется при определенных условиях. Во-первых, энергия электронов из-за тепловых колебаний должна быть значительно меньше, чем кулоновская энергия, которая необходима для перемещения отдельного электрона на «островок», когда приложенное напряжение равно нулю.

Эта энергия равна  $e^2/2C$ , где  $e$  — заряд электрона,  $C$  — полная емкость конденсатора («ворот») и туннельных переходов. Во-вторых, сам туннельный эффект должен быть достаточно слабым, чтобы предотвратить нарастание концентрации туннелирующих электронов на электродах перехода, поскольку возможно возникновение химического разделения зарядов в диэлектрике. Согласно теоретическим оценкам [9], это означает, что проводимость туннельного перехода должна быть гораздо меньше, чем квант проводимости ( $2e^2/h$ , где  $h$  — постоянная Планка). Когда выполняются оба эти условия, процессы, происходящие в системе, аналогичны проявлению кратности заряда на масляных каплях, которое наблюдал Роберт Милликен [10].

Рассмотрим подробнее принцип работы наноприбора, в котором использован одноэлектронный транспорт. В конструкции прибора предусматриваются два изолированных перехода — для входа и выхода отдельных носителей тока, например, электронов (рис. 2). Такой прибор можно рассматривать как полевой транзистор, в котором канал заменен двумя туннельными переходами  $I$ , формирующими металлический «островок»\*  $2$ . Напряжение, прикладываемое к электроду перехода, варьирует плотность энергии, необходимую для изменения концентрации носителей на «островке».

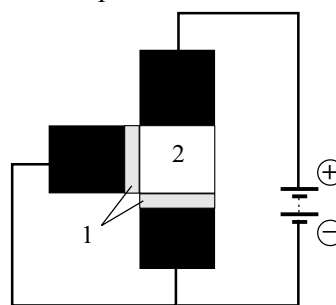


Рис. 2. Модель наноприбора с одноэлектронным транспортом

Из физических соображений понятно, что одноэлектронные транзисторы могут быть двух типов — «металлические» и «полупроводниковые», в зависимости от принципа пространственного разделения туннельных барьеров. Первоначальным вариантом одноэлектронного транзистора была «металлическая» модель, предложенная Фултоном и Доланом [12]. Эти исследователи использовали тонкую алюминиевую фольгу, служащую также материалом для изготовления электродов. Через теньевую маску металл испарялся для формирования эмиттера, базы и коллектора. Туннельные переходы формировались за счет естественного окисления металла. Второй слой металла, измененный по отношению к первому путем вращения образца, испарялся таким образом, чтобы сформировать «островок».

В полупроводниковой модели нм-прибора эмиттер, база и коллектор могут быть созданы за счет уменьшения области локализации двумерного электронного газа, возникающего в интерфейсе между двумя слоями полупроводника, например, типа AlGaAs и GaAs [2]. В этом случае область проводимости определяется металлическими электродами, созданными над слоем полупроводника. Отрицательный потенциал, прикладываемый к этим электродам, уменьшает концентрацию электронного газа вблизи

\* Собственно «островковые» структуры исследовались различными авторами, см., например, [11].

них. Такие области с малой концентрацией электронов могут быть достаточно узкими, что способствует туннелированию носителей между источником, электродом («островком») и стоком. Другими словами, электрод, который формирует «островок», может использоваться как электрод перехода. В такой модели «островок» можно рассматривать как квантовую точку, поскольку электроны здесь «блокированы» во всех трех направлениях. Примером квантовой точки могут быть атомарные кластерные системы, наноструктуры [6].

За последние несколько лет исследователи из Технологического университета Дельфи (Нидерланды) и Токийского института твердого тела (Япония) показали, что квантовые точки ведут себя подобно искусственным квазимолекулам [13,14].

Наиболее перспективным представляется изучение процессов в нанотрубках, нанопроволоках и сфероподобных кластерах [4], где проявляется кулоновская блокада единственного носителя тока на моноатомном «островке».

Для решения задач, связанных с исследованием атомной, электронной и фононной структур кластерных систем, зачастую используют схему молекулярно-динамического моделирования [8, 9]. Такой модельный подход позволяет проследить не только за структурными перестройками кластеров, но также проанализировать их электрофизические характеристики.

В качестве примера использования кластеров в наноприборах рассмотрим следующую систему: металлический кластер (для определенности имеющий сферическую форму радиусом  $R$ ), который помещен в диэлектрическую матрицу с проницаемостью  $\epsilon$ . Очевидно, что потенциал такого кластера  $U=q/C$ , где  $q$  — электрический заряд,  $C=\epsilon R$  — емкость кластера. Для кластера размером в несколько нанометров  $C \approx 10^{-18}$  Ф. Поэтому один электрон, помещенный в такой кластер, создает потенциал, соответствующий величине 0,1 В. Такое значение потенциала вполне достаточно для кулоновской блокады транспорта других электронов, что открывает совершенно невероятные иные возможности для создания нового класса электронных приборов, т. н. одноэлектронных приборов. Уже разработано несколько типов таких приборов: полевые транзисторы, управляемые одиночным электроном на затворе, одноэлектронный аналог биполярного транзистора, «одноэлектронный насос» и др. Принципиальная схема одноэлектронного элемента памяти изображена на **рис. 3**.

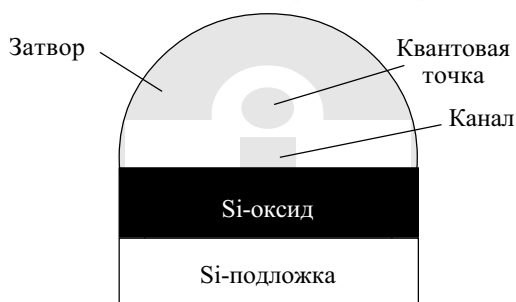


Рис. 3. Структурная схема устройства памяти с наноразмерным кластером в качестве плавающего затвора на основе одноэлектронного транспорта

В настоящее время практическая реализация таких структур, как правило, основана на использовании прецизионной литографии тонких металлических пленок или полупроводниковых слоев с двухмерным газом. Пространственное разрешение, характерное для этого подхода, как правило, не позволяет создать объекты достаточно малого размера, что ограничивает рабочую температуру таких устройств на уровне температуры жидкого гелия и ниже. Следует, однако, отметить значительный прогресс этой технологии, который достигнут в последнее время. Так, в [2—5] сообщается о создании одноэлектронной памяти, работающей при комнатной температуре, на основе полевого транзистора с очень узким каналом и плавающим затвором нанометрового размера. Информация об исследовании атомарных кластеров, представленная в обзоре [6], также позволяет надеяться на скорую технологическую реализацию проекта получения кластеров размером в единицы нанометров, что является чрезвычайно перспективным для создания одноэлектронных приборов, работающих при комнатных температурах.

Заметим, что хотя кластеры в полупроводниках начали привлекать пристальное внимание исследователей относительно недавно (последние 25 лет), в технологии кластероформирования уже имеется значительный прогресс. В ряде практически важных случаев удается контролировать химический состав, размер, концентрацию и пространственное расположение кластеров в полупроводнике. Прогресс в технологии получения кластеров позволяет уже сегодня использовать их в приборах полупроводниковой электроники.

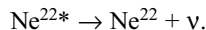
Весьма перспективны исследования состояний позитрония (Ps) в твердотельных матрицах и, в частности, в высокодисперсных материалах, содержащих квантовую точку с развитой внутренней поверхностью. Образовавшиеся в объеме вещества атомы Ps могут диффундировать в полости-поры и накапливаться там в больших количествах.

Одноквантовая аннигиляция свободной пары ( $e^+e^-$ ) невозможна в силу законов сохранения энергии и импульса. Число квантов, в зависимости от ориентации спинов частиц, обычно равно 2 или 3. Здесь действует специфический квантовый закон сохранения зарядовой четности, согласно которому, например, аннигиляция с излучением четного числа  $\gamma$ -квантов возможна лишь из синглетного состояния, когда спины частиц антипараллельны и полный спин равен нулю. В противоположность этому, из триплетного состояния, в котором спины частиц параллельны и полный спин атома равен единице, возможна аннигиляция лишь в нечетное число квантов. Регистрация даже единичных  $\gamma$ -квантов труда не составляет, и это позволяет фактически проследить за возникновением единичных атомов Ps.

В обычных условиях эксперимента концентрация Ps в веществе не превышает одного атома на кубический сантиметр.

Приемы «слежки» за Ps разнообразны и по возможностям дополняют друг друга. В лабораторных условиях источником позитронов обычно служит ка-

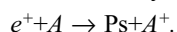
кой-либо  $\beta^+$ -активный элемент, чаще всего искусственный изотоп меди  $\text{Si}^{64}$  или натрия  $\text{Na}^{22}$ . Особенно удобен натрий. Его распад, сопровождающийся испусканием нейтрино ( $\nu$ ), приводит к образованию возбужденного ядра неона  $\text{Ne}^{22*}$ , которое быстро, почти мгновенно, спустя менее чем  $10^{-11}$  с, испускает гамма-квант с энергией 1,28 МэВ и переходит в основное состояние:



Регистрация  $\gamma$ -кванта такой энергии — это одновременно и регистрация момента рождения позитрона, вся жизнь которого до акта аннигиляции оказывается в поле зрения экспериментатора. В момент рождения позитрон имеет скорость, соизмеримую со скоростью света. Но попадая в вещество, он быстро тормозится, расходуя большую часть первоначальной энергии на ионизацию среды. Теория ионизационных потерь очень надежна и позволяет с хорошей точностью рассчитать время, необходимое для торможения [15].

Определяя вероятность трехчастичной  $\gamma$ -аннигиляции, измеряя время жизни позитрона и угловую корреляцию, т. е. пространственное распределение аннигилирующих квантов, удастся довольно точно восстановить последовательность и характер взаимодействий позитрона и Ps с атомами вещества, что представляет исключительно большой интерес и для теоретической химии, и для ряда важных практических приложений.

В газах релятивистский позитрон тормозится до скоростей валентных электронов атомов среды ( $\sim 10^7$  см/с) за  $10^{-9}$  с. В жидкостях это время почти в 1000 раз меньше. Позитрон, имея скорость, близкую к скорости валентных электронов, способен подхватить какой-нибудь из них, образовав атом Ps:



Сразу же после образования новый атом Ps еще очень «горяч», его энергии (порядка 10 эВ) соответствует температура  $\sim 130000^\circ\text{C}$ . Но после нескольких соударений с атомами среды он «остывает», его энергия становится примерно равной энергии атомов окружения ( $\sim 0,1$  эВ).

Естественное время жизни Ps, т. е. время жизни в вакууме, зависит от его полного спина. Трехквантовая аннигиляция менее вероятна, чем двухквантовая. Поэтому время жизни триплетного Ps в вакууме примерно в 1000 раз больше, чем синглетного, который аннигилирует спустя  $1,25 \cdot 10^{-10}$  с после образования. В веществе время жизни триплетного Ps значительно меньше, чем в вакууме. Причина — различные гасящие процессы взаимодействия Ps с атомами среды. Возможна, например, аннигиляция позитрона триплетного Ps не на своем электроне (она заторможена законом сохранения зарядовой четности), а на «чужом» электроне атома среды. Поскольку спин электрона среды может иметь ориентацию, противоположную спину электрона Ps, этот процесс сопровождается излучением двух  $\gamma$ -квантов.

Кроме того, возможен и прямой обмен двух электронов с противоположными спинами, переводящий

орто-Ps в пара-Ps, который быстро аннигилирует (это т. н. орто-пара-конверсия). Конверсионное тушение особенно эффективно при наличии парамагнитных центров, имеющих неспаренные и потому легко обмениваемые электроны. Даже в ничтожных концентрациях (до 0,001%) такие примеси могут заметно изменять эффективное время жизни Ps в среде. На этом принципе основан очень интересный метод конверсионного детектирования свободных радикалов, которые играют важнейшую роль в кинетике многих практически важных химических процессов.

Создание новых систем требует определенной инженерно-исследовательской сноровки, поскольку нужно проявить интуицию, чтобы расположить атомы в квазимолекуле по заранее обдуманной схеме и тем самым получить новые свойства. Некоторые из получаемых при этом кластеров проявляют необыкновенные свойства.

Учитывая опыт, накопленный химиками в исследовании полиэдрических систем, имеющих внутри «закапсулированные» атомы другого сорта и получивших название — «клатраты» (clathrate), можно выдвинуть модель нанометрового электронного прибора, «построенного» на кластерной основе. Внутри полиэдрической кластерной конфигурации (молекулярно динамическое изучение полиэдрических

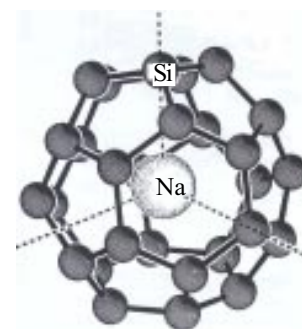


Рис. 4. Локализация атома натрия в центре полиэдрического кластера кремния, обладающего симметрией  $T_d$

структуры приводит к увеличению удельного объема кластера (по сравнению с алмазоподобной структурой). Такое «распухание» становится причиной увеличения ширины запрещенной зоны  $\Delta E_g$  из-

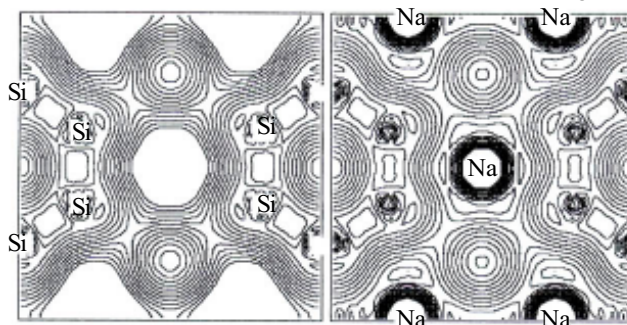


Рис. 5. Распределение электронной плотности в полиэдрических кластерах кремния (46 атомов), не содержащих (слева) и содержащих атом натрия

за изменения углов между химическими связями в кластере (для 46-атомного кремниевого полиэдра расширение зоны составляет 0,65 эВ, т. е.  $\Delta E_g \approx 1,75$  эВ).

Работа с полупроводниковыми клатратами – это, по сути дела, альтернативная методика, которая может быть использована инженерами для изменения значения ширины запрещенной зоны и связанных с ней электрофизических параметров за счет изменения геометрии структуры без нагнетания кислорода в материал.

В настоящее время исследователи пытаются создать новые кластерные системы, заставляя реагировать между собой те, которые уже существуют (заметим, что полиэдр из 46 атомов кремния представляет собой систему соединенных полиэдров меньшего размера: 20- и 26-атомного кластеров, описанных в [8, 16–18]).

\*\*\*

Таким образом, рассмотрены основные подходы и закономерности формирования и управления системой нанометровых атомарных кластеров как основной составляющей наноприборов. Это позволяет рассчитывать на то, что уже в недалеком будущем станет возможным создание эффективных светоизлучательных приборов на основе кластерного кремния и реализацию одноэлектронных приборов, работающих при комнатной температуре.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хайрутдинов Р. Ф. Химия полупроводниковых наночастиц // Успехи химии.— 1998.— Т. 67.— С. 125—139.
2. Мильвидский М. Г., Чалдышев В. В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках — новый подход к формированию свойств материалов // ФТП.— 1998.— Т. 32, № 5.— С. 513—522.
3. Devoret M. H., Esteve D., Urbina C. Single-electron transfer in metallic nanostructures // Nature.— 1992.— Vol. 360.— P. 547—553.

4. Shirakashi J. Single-electron charging effects in Nb/Nb oxide-based single-electron transistors at room temperature // Appl. Phys. Lett.— 1998.— Vol. 72.— P. 1893—1899.

5. Sohn L. L., Kouwenhoven L. P., Schoen G. Mesoscopic electron transport.— Dordrecht: Kluwer (Nato series), 1997.

6. Ковальчук В. В. Ультрадисперсные субфазы в молекулярной электронике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 3.— С. 6—14.

7. Tanaka K. Nanotechnology towards the 21st century // Thin Sol. Films.— 1999.— Vol. 341.— P. 120—125.

8. Ковальчук В. В. Теоретичне обґрунтування штучного синтезування кластерних сполук на основі кремнію // Фізика конденсованих високомолекулярних систем.— 2002.— № 9.— С. 27—31.

9. Халдеев Г. В., Петров С. Н. Компьютерное моделирование электрохимических процессов на межфазной границе // Успехи химии.— 1998.— № 2.— С. 107—124.

10. Храмов Ю. А. Биография физики. Хронологический справочник.— К.: Техника, 1982.— С. 160—161.

11. Трусов Л. И., Холмянский В. А. Островковые металлические пленки.— М.: Металлургия, 1973.

12. Zhuang L., Guo L., Chou S. Y. Silicon single-electron quantum-dot transistor switch operating at room temperature // Appl. Phys. Lett.— 1998.— Vol. 72.— P. 1205—1211.

13. Saito S., Oshiyama A. Electronic structure of  $Si_{46}$  and  $Na_2Ba_6Si_{46}$  // Phys. Rev. B.— 1995.— Vol. 51.— P. 2628—2631.

14. Moriguchi K., Yonemura M., Shintani A., Yamanaka S. Electronic structures of  $Na_8Si_{46}$  and  $Ba_8Si_{46}$  // Ibid.— 2000.— Vol. 61.— P. 9859—9862.

15. Luschnik A., Feldbach E., Kink R., Luschnik Ch. Secondary excitons in alkali halide crystals // Ibid.— Vol. 53.— P. 5379—5387.

16. Дроздов В. А., Ковальчук В. В. Теоретичний аналіз структурних та оптичних характеристик ультрадисперсних фаз кремнію // Фотоелектроніка.— 2002.— № 11.— С. 34—39.

17. Kovalchuk V. V. Real nanodimensional silicon particles: cluster approximation // Photoelectronics.— 2001.— N 10.— P. 12—17.

18. Nagase S. Polyhedral compounds of the heavier group-14 elements – silicon, germanium, tin, and lead // Account of Chem. Research.— 1995.— Vol. 28 (11)— P. 469—476.

#### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИЙ. СИМПОЗИУМЫ

### «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА—2003»

*10-я Всероссийская  
межвузовская научно-техническая  
конференция студентов и аспирантов  
23—24 апреля 2003 г.  
Россия Москва*

*Ученый секретарь Фролова*

*Галина Владимировна.*

*Ответственный секретарь Харач*

*Валентина Павловна.*

**Почтовый адрес Оргкомитета:**

124498, Москва, К-498, Московский  
государственный институт электронной техники  
(МИЭТ), ОНТИ, на конференцию "МЭИ-2003".

#### *Научные направления работы конференции*

- Физика и технология микро- и нанoeлектроники.
- Материалы и компоненты электронной техники.
- Проектирование электронных компонентов и систем.
- Микросистемы и микромеханика.
- Биомедицинская электроника.
- Опто- и акустоэлектроника.
- Математические модели и алгоритмы в информатике.
- Управляющие и вычислительные системы и приборы.
- Автоматизированные информационные системы.
- Телекоммуникационные системы и связь.
- Технологическое оборудование микроэлектроники.
- Экологические аспекты микро- и нанoeлектроники.
- Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.
- Гуманитарные проблемы информатизации.

К. т. н. А. С. КОНДРАШОВ, к. т. н. В. И. ШЕЛЕСТ

Россия, г. С.-Петербург, Центр прикладной математики  
и механики СПб.О РАН  
E-mail: kast68@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
22.07—11.11 2002 г.

Оппонент А. Л. КРАВЦОВ  
(НИИРИ, г. Харьков)

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ БАЗОВЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Становится возможной постановка задачи синтеза перспективных БНК, учитывающей как внешние факторы, так и их внутреннюю структуру.*

Современным базовым несущим конструкциям (БНК) в полной мере присущи свойства сложных систем. Это иерархичность структуры, тенденция к унификации, дискретность большинства параметров, возможность разделения БНК как сложной системы на подсистемы по функциональному признаку, интегративные свойства упомянутых подсистем, взаимодействие с окружающей средой. В связи с этим особую актуальность приобретает приложение теории системного подхода к проектированию БНК.

Следует отметить, что на современном этапе развития системного подхода к проектированию БНК радиоэлектронных средств (РЭС) преобладает методика [1], представляющая разрабатываемую БНК в виде черного ящика (рис. 1), внутренняя структура которого может иметь самую различную организацию (конструктивное исполнение). При этом задается множество изменяемых  $\{X_i\}$  и неизменяемых  $\{Y_j\}$  факторов (ограничений) и множество показателей качества  $\{Z_k\}$ , связанных между собой системой уравнений связи  $F$ . Подобное применение системного подхода позволяет выполнить комплексный анализ принимаемого технического решения, а синтез этого решения осуществляется эвристическим или, в лучшем случае, полуавтоматическим способом.

Для автоматизированного многокритериального синтеза перспективных БНК необходима разработка методов системного подхода с учетом внутренней структуры БНК. Рассмотрению такой возможности и посвящена настоящая работа.

Для разработки методов системного синтеза необходимо представить БНК как комплекс взаимодействующих подсистем, описать структуру взаимосвязей, определить входные, выходные параметры и ограничивающие факторы для каждой выявленной связи между подсистемами. После этого можно разрабатывать базы данных по возможным вариантам построения подсистем БНК, выбирать известные или применять оригинальные математические модели для количественного описания этих взаимосвязей. Это со-

здает основу для алгоритмизации задачи системного синтеза БНК.

Учитывая вышеизложенное, руководствуясь определением внутренней структуры БНК и связями между подсистемами, регламентированными государственными (ГОСТ 26.765.20, ГОСТ 26.765.21) и другими отечественными и международными стандартами, выполним разделение БНК на подсистемы по признаку их функционального назначения (см. рис. 2).

На каждом уровне структурной иерархии БНК можно выделить следующие основные подсистемы: 1 — подсистема размещения и компоновки РЭС (отвечающая за определение габаритных, координационных, установочных и присоединительных размеров); 2 — подсистема обеспечения механической прочности; 3 — подсистема обеспечения нормального теплового режима размещаемых РЭС; 4 — подсистема размещения и крепления электромонтажа; 5 — подсистема обеспечения электромагнитной совместимости размещаемых РЭС; 6 — подсистема внешней и межуровневой коммутации (включая применяемые интерфейсы).

Как видно из рис. 2, в составе БНК как сложной системы присутствуют горизонтальные внутриуровневые и вертикальные межуровневые связи, обусловленные наличием взаимного влияния подсистем модулей БНК различного уровня иерархии. Обоснуем факт существования выявленных взаимосвязей между подсистемами и раскроем их качественный характер.

Важной особенностью внутриуровневых связей подсистем БНК является то, что связи между подсистемами осуществляются не непосредственно, а че-

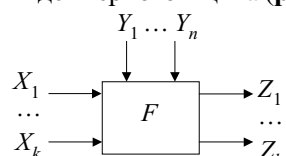


Рис. 1. Графическое представление системной модели БНК без учета ее внутренней структуры

которого может иметь самую различную организацию (конструктивное исполнение). При этом задается множество изменяемых  $\{X_i\}$  и неизменяемых  $\{Y_j\}$  факторов (ограничений) и множество показателей качества  $\{Z_k\}$ , связанных между собой системой уравнений связи  $F$ . Подобное применение системного подхода позволяет выполнить комплексный анализ принимаемого технического решения, а синтез этого решения осуществляется эвристическим или, в лучшем случае, полуавтоматическим способом.

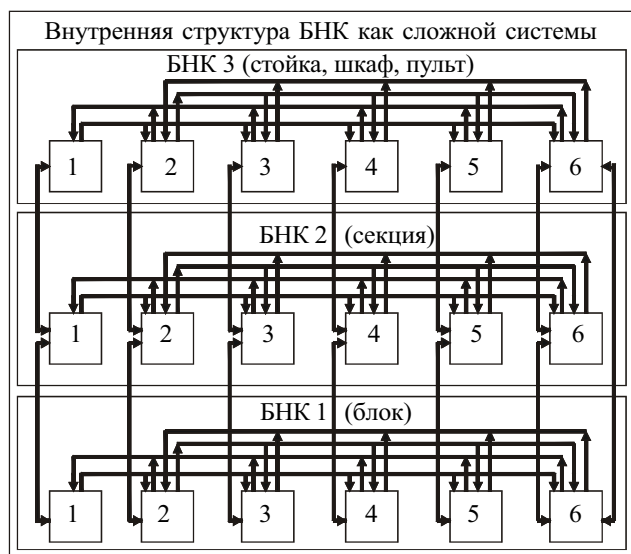


Рис. 2. Внутренняя структура БНК как сложной системы, состав и взаимосвязь ее подсистем

рез структуры и параметры подсистемы размещения и компоновки РЭС, причем эта связь носит двухсторонний характер. Этот факт объясняется тем, что для физического воплощения указанных подсистем требуется определить местоположение и выделить объем в конструктивном модуле соответствующего уровня. При этом расположение и форма выделяемого объема влияют на эффективность работы размещаемых подсистем. И наоборот, от реализации размещаемых подсистем будет зависеть место их расположения и выделяемый под размещение объем.

Между подсистемами обеспечения механической прочности, нормального теплового режима и электромагнитной совместимости, межмодульной коммутации и внутримодульного электромонтажа также имеют место двухсторонние горизонтальные внутриуровневые связи. Они обусловлены тем, что эти подсистемы должны размещаться на элементах системы обеспечения механической прочности НК или интегрироваться с этими элементами.

Наличие вертикальных межуровневых связей между подсистемами компоновки и размещения РЭС обусловлено иерархичностью конструкции базовых перспективных НК, когда модуль НК  $i$ -го уровня иерархии служит для размещения в нем  $n$ -го числа модулей НК  $i-1$ -го уровня иерархии, а сам, в свою очередь, входит как элемент для размещения в модуле НК  $i+1$ -го уровня иерархии. При этом должно быть обеспечено размерно-геометрическое соответствие между наружными габаритами модулей  $i$ -го уровня иерархии с соответствующими геометрическими параметрами подсистемы компоновки и размещения модуля  $i+1$ -го уровня иерархии.

Межуровневые связи между подсистемами обеспечения механической прочности носят двухсторонний характер. Это обусловлено необходимостью фиксации модулей нижнего уровня иерархии в модуле вышестоящего уровня иерархии. За выбор точек крепления, способов фиксации, обеспечение жесткости конструкции отвечает подсистема механической прочности. И эти параметры должны быть согласованы между уровнями конструктивной иерархии.

Межуровневые связи между подсистемами обеспечения нормального теплового режима отражают комплексный характер задачи обеспечения нормального теплового режима РЭС внутри БНК, т. к. невозможно провести адекватный расчет теплового режима модулей верхних уровней иерархии без информации о тепловом режиме модулей нижних уровней иерархии, входящих в их состав, и наоборот. Это полностью согласуется с методикой поэтапного расчета теплового режима РЭС, размещаемых в стоечных конструкциях.

Вертикальные межуровневые связи между подсистемами межмодульной коммутации и межмодульного и внутримодульного электромонтажа обусловлены необходимостью согласованного расположения зон коммутации и электромонтажа на смежных уровнях конструктивной иерархии, иначе осуществление электрических соединений станет конструктивно невыполнимым.

Межуровневые связи между подсистемами обеспечения электромагнитной совместимости обусловлены, в первую очередь, необходимостью осуществления и согласованного расположения гальваничес-

ких связей между экранирующими элементами и шинами заземления. При этом подобные связи могут существовать, в отличие от других межуровневых связей, не только между смежными уровнями.

Следует подчеркнуть, что в предлагаемой работе разделение БНК РЭС на подсистемы выполнялось именно по функциональному принципу с точки зрения того, какие основные задачи решают БНК как подсистемы более сложных систем, каковыми являются РЭС. Поэтому ряд иных подсистем, оказывающих существенное влияние на БНК проектируемых РЭС (в частности, подсистема применяемых интерфейсов, подсистема координационных, установочных и присоединительных размеров, подсистема обеспечения надежности при различных заданных условиях эксплуатации, подсистема применяемой элементной базы), учтены через параметры, ограничения и уравнения связи перечисленных подсистем. Так, на параметры надежности функционирования РЭС, размещенных в проектируемых БНК, оказывают влияние практически все перечисленные подсистемы БНК. Влияние выбора элементной базы также учитывается через параметры и ограничения приведенных подсистем.

Для компактного описания и исследования БНК как сложной иерархической системы с позиций системного подхода обозначим каждую подсистему через  $M_j^i$ , где  $i$  — номер уровня структурной иерархии модуля БНК, к которому принадлежит подсистема, а  $j$  — номер этой подсистемы внутри уровня. Тогда для количественного описания БНК как сложной системы необходимо определить вектор входных параметров  $\{X_j^i\}$ , вектор неизменяемых  $\{Y_j^i\}$  факторов (ограничений), вектор выходных параметров  $\{Z_j^i\}$  и связей между этими векторами в виде системы уравнений связи  $F_j^i$ . Указанные связи можно описать используя базы данных по реализации соответствующих подсистем и при помощи известных и оригинальных математических моделей или методик расчета [2, 3]. При этом отправной точкой при системном синтезе БНК по-прежнему остаются внешние входные параметры и ограничения, накладываемые на БНК как на целевую систему.

\*\*\*

Таким образом, анализ внутренней структуры БНК как сложных технических объектов с учетом связей между подсистемами БНК дает возможность описать математически указанные связи и осуществить автоматизированный многокритериальный синтез внутренней структуры и параметров перспективных БНК. При этом становится возможным построить комплексную математическую постановку задачи синтеза перспективных БНК, учитывающую как внешние факторы и ограничения для БНК, так и их внутреннюю структуру.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств. — М.: Высш. шк., 1990.
2. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1991.
3. Кондрашов А. С. Алгоритм выбора оптимальных типоразмеров коммутационных плат при разработке несущих конструкций для аппаратуры связи // В сб.: Синтез и анализ алгоритмов оптимальной обработки сигналов.— СПб.: ГУТ, 1993.— № 158.— С. 94—99.

Д. т. н. В. А. ПИЛИПЕНКО, к. ф.-м. н. В. Н. ПОНОМАРЬ,  
Т. В. ПЕТЛИЦКАЯ

Беларусь, г. Минск, НПО "Интеграл"  
E-mail: belms@ belms.belpak.minsk.by

Дата поступления в редакцию  
15.07 2002 г. — 16.01 2003 г.

Оппоненты к. т. н. Г. Г. ЧИГИРЬ  
(НПО "Интеграл", г. Минск), к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК  
(Южноукр. пед. ун-т им. К. Д. Ушинского, г. Одесса)

## УЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ СБИС

*Построена модель упругих напряжений в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Найдено оптимальное сочетание слоев, обеспечивающее ненапряженное состояние системы.*

Диэлектрики являются основным элементом конденсаторов интегральных схем, определяющим их параметры и свойства. Материал диэлектрика должен обладать высокой электрической прочностью, малыми диэлектрическими потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость [1].

Многослойные диэлектрики, благодаря возможности усиления преимуществ одного диэлектрика в комбинации с другим и многовариантности таких комбинаций, становятся предпочтительными в конструировании и технологии производства быстродействующих элементов памяти [2]. Особого внимания заслуживают пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в комбинации с другими диэлектриками. Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> имеет диэлектрическую проницаемость 21—27, достаточно большую ширину запрещенной зоны (4,2 эВ), электрическую прочность 6·10<sup>6</sup> В/см. Кроме того, установлена хорошая воспроизводимость процессов формирования Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и сочетаемость с SiO<sub>2</sub> [3]. Такие характеристики пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> привлекают разработчиков интегральных схем. Вместе с тем успешное применение комбинированного диэлектрика Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> требует дополнительного изучения ряда вопросов, в числе которых особого внимания заслуживают остаточные механические напряжения в многослойных тонкопленочных системах.

В работе были исследованы механические напряжения в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Для этого на образцах с различным набором толщин пленок SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> методом рентгеновской дифракции измерялся радиус кривизны пластин (рис. 1). Из графиков видно, что с ростом толщины Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при постоянном значении SiO<sub>2</sub> кривизна системы меняется.

Температурный коэффициент расширения (ТКР) кремния равен 4,8·10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>, ТКР SiO<sub>2</sub> составляет 0,5·10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>, а ТКР Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — больше и равен 7,2·10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>. Поэтому знаки возникающих напряжений в системах Si—SiO<sub>2</sub> и Si—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> имеют противоположные значения. В связи с этим можно предположить, что имеется некоторое оптимальное соотношение толщин слоев SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, при которых радиус кривизны системы Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> стремится

к бесконечности, а кривизна системы становится равной нулю, т. е. система будет находиться в ненапряженном состоянии.

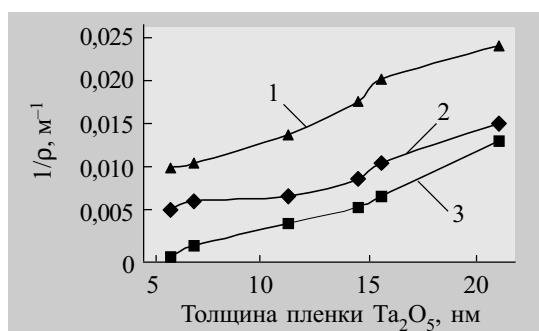


Рис. 1. Экспериментальная зависимость изменения кривизны системы Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от толщины пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при различных значениях толщины пленки SiO<sub>2</sub>:  
1 — 100 нм; 2 — 40 нм; 3 — 80 нм

Перейдем к построению модели упругих напряжений в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

При выводе уравнения изгиба системы будем считать, что основной вклад в изгиб вносят процессы осаждения SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, что позволяет применять к кремниевым структурам теорию изгиба трехслойных структур. При этом сделаны следующие предположения:

- каждый слой хорошо связан с другими слоями системы;
- толщины слоев и всей трехслойной системы гораздо меньше линейных размеров образца;
- каждый слой находится в состоянии плоского напряжения, и модули Юнга слоев не стремятся к нулю;
- пластина деформируется по сфере, сечения остаются плоскими;
- деформации в монокристаллическом кремнии, двуокиси кремния и оксиде тантала, в основном, определяются термическими напряжениями;
- деформация каждого слоя является упругой, т. е. релаксация напряжений отсутствует.

Существуют два условия равновесия для всех внутренних сил, действующих на поперечное сечение трехслойной системы:

- 1) сумма всех нормальных сил к сечению пластины равна нулю;
- 2) сумма моментов всех нормальных сил относительно граничного слоя равна нулю [4]:

$$\frac{E_1}{1-\nu_1} \int_0^{h_1} (\epsilon_0 - \Delta_1 + \frac{y}{\rho}) dy + \frac{E_2}{1-\nu_2} \int_0^{-h_2} (\epsilon_0 - \Delta_2 + \frac{y}{\rho}) dy + \frac{E_3}{1-\nu_3} \int_{-h_2}^{-(h_2+h_3)} (\epsilon_0 - \Delta_3 + \frac{y}{\rho}) dy = 0; \quad (1)$$

$$\frac{E_1}{1-\nu_1} \int_0^{h_1} (\epsilon_0 - \Delta_1 + \frac{y}{\rho}) y dy + \frac{E_2}{1-\nu_2} \int_0^{-h_2} (\epsilon_0 - \Delta_2 + \frac{y}{\rho}) y dy + \frac{E_3}{1-\nu_3} \int_{-h_2}^{-(h_2+h_3)} (\epsilon_0 - \Delta_3 + \frac{y}{\rho}) y dy = 0, \quad (2)$$

где  $E_1, E_2, E_3$  — модуль Юнга для Si, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, соответственно;  
 $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  — коэффициент Пуассона для Si, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, соответственно;

- $h_1$  — толщина кремниевой подложки;
- $\epsilon_0$  — деформация граничного слоя;
- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  — температурная усадка слоя,  $\Delta_i = \alpha_i T_i$ ;
- $\alpha_i$  — коэффициент линейного расширения  $i$ -го слоя;
- $T_i$  — температура формирования  $i$ -го слоя;
- $y$  — параметр интегрирования толщины пленки;
- $\rho$  — радиус кривизны всей системы;
- $h_2$  — толщина пленки SiO<sub>2</sub>;
- $h_3$  — толщина пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

После интегрирования и с учетом, что  $h_2$  и  $h_3$  значительно меньше  $h_1$ , получаем упрощенную формулу для расчета радиуса кривизны подложки:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6}{h_1} \left[ \frac{E_2 h_2 (1 - \nu_1) (\Delta_1 - \Delta_2)}{E_1 h_1 (1 - \nu_2)} + \frac{E_3 h_3 (1 - \nu_1) (\Delta_1 - \Delta_3)}{E_1 h_1 (1 - \nu_3)} \right]. \quad (3)$$

Представлял интерес расчет упругих постоянных пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Для расчета коэффициентов  $E_3/(1-\nu_3)$  было использовано выражение (3) и полученные выше экспериментальные данные. Подставляя в формулу (3) поочередно значения  $\rho, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, h_2, h_3$ , для всех исследованных сочетаний толщин слоев получили среднее значение  $E_3/(1-\nu_3)$ , которое составляет  $5,9 \cdot 10^{11}$  Па.

На рис. 2 представлен график зависимости кривизны системы Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от толщины пленок SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Для установления оптимального соотношения толщин пленок SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, при которых кривизна пластины становится минимальной, воспользуемся ранее построенной моделью, описывающей зависимость

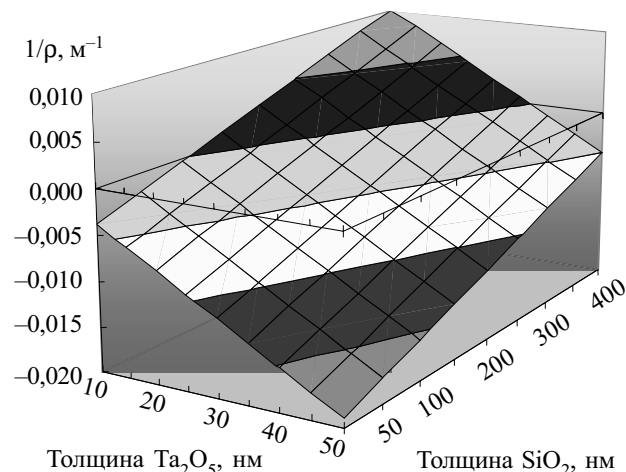


Рис. 2. Зависимость изменения кривизны системы Si — SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от толщины диэлектриков

радиуса кривизны от толщины пленок, т. е. выражением (3), но теперь левую часть выражения приравняем нулю. В результате преобразований и расчетов получаем, что при соотношении толщин пленок  $h_2/h_3=9,78$  система Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> находится в ненапряженном состоянии.

\*\*\*

Таким образом, как показали исследования, при использовании многослойных диэлектриков для изготовления конденсаторов СБИС могут учитываться (и регулироваться) остаточные механические напряжения в многослойных системах. Так, в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> радиус кривизны пластины со сформированными диэлектриками будет стремиться к бесконечности, а сама кривизна — к нулю, если заложить в системе соотношение толщин пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и SiO<sub>2</sub> как 1:10.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Горелик С. С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков.— М.: Металлургия, 1988.
2. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в микроэлектронике.— М.: Радио и связь, 1989.
3. Shunji Seki, Takashi Unagami, Bunjiro Tsujiyama. Electrical characteristics of the RF magnetron-sputtered tantalum pentoxide-silicon interface // J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and technology.— 1987.— Vol. 131, N 11.— P. 2621 — 2625.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости.— М.: Физмат, 1966.

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДПИСЧИКОВ В РОССИИ

Редакция журнала  
 "Технология и конструирование в электронной аппаратуре"  
 сообщает, что на второе полугодие 2003 г.  
 подписка будет производиться по Объединенному каталогу  
 "Пресса России"  
 (подписной индекс 71141)

К. ф.-м. н. А. И. ТИМОШКИН

Россия, г. Ростов-на-Дону, Ростовский гос. университет  
пути сообщения  
Email: rek@rgups.ru

Дата поступления в редакцию  
05. 08 2002 г.

Оппонент к. т. н. А. А. ЧЕРЕВКО  
("Электронмаш", г. Киев)

## КОНТРОЛЕПРИГОДНАЯ СХЕМА ДВОИЧНОГО СУММАТОРА НА ОСНОВЕ 16-РАЗРЯДНОЙ ГРУППЫ СЕКЦИЙ

*Предложена контролепригодная функционально-логическая схема двоичного сумматора на основе 16-разрядной группы 4-разрядных секций с двухуровневым одновременным переносом.*

Известно, что надежность цифровых систем является комплексным понятием, которое, в зависимости от назначения и условий применения данных систем, может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, или определенные сочетания этих свойств.

Надежность сложных цифровых систем, требующих проведения периодических профилактических технических испытаний и ремонтов, особенно резервированных восстанавливаемых систем, в значительной степени определяется их ремонтпригодностью. Ремонтпригодность цифровых систем, в свою очередь, зависит от контролепригодности их компонентов, т. е. цифровых печатных узлов и интегральных микросхем. Таким образом, повышение надежности ряда цифровых систем непосредственно связано с улучшением показателей контролепригодности их компонентов.

Наиболее радикально задача обеспечения ремонтпригодности цифровых систем решается при достижении составляющими этих систем максимального уровня контролепригодности, что применительно к цифровым интегральным микросхемам обеспечивается известной концепцией «константного» контролепригодного проектирования [1—5].

В [6] предложена разработанная в рамках упомянутой концепции контролепригодная функционально-логическая схема двоичного сумматора на основе 4-разрядной секции с одновременным (параллельным) переносом [7, с. 125] внутри секций и последовательным переносом между секциями. Эта схема обладает проверяющим тестом из одиннадцати входных векторов относительно всех ее одиночных константных неисправностей, независимо от числа секций в ней. Однако необходимо отметить, что такая (как в этой схеме) организация переносов для повышения быстродействия приемлема, в основном, для схем сумматоров с числом разрядов  $n$ , удовлетворяющим неравенству  $4 \leq n \leq 16$ . Для  $n > 16$  необходимо дальнейшее повышение быстродействия. Увеличивать при этом количество разрядов в секции с одновремен-

ным переносом нецелесообразно, т. к. при этом требуются логические элементы с большим числом входов и большой нагрузочной способностью [8, с. 213; 9, с. 69].

Следующим шагом в направлении повышения быстродействия сумматоров является организация в них двухуровневого одновременного переноса [7, 9]. Именно такая организация переноса для контролепригодной функционально-логической схемы двоичного сумматора на основе 16-разрядной группы 4-разрядных секций и рассматривается в настоящей работе.

Двухуровневый одновременный перенос в двоичных сумматорах предполагает одновременный перенос внутри каждой секции и группы секций и последовательный перенос между группами. Упомянутый способ организации переноса позволяет строить сумматоры с достаточно высокой величиной быстродействия и приемлемым объемом аппаратных средств [7].

Построение предлагаемой контролепригодной функционально-логической схемы двоичного сумматора, как и в [6], базируется на известном из [10, 11] простом представлении функций суммы  $S_j$  и переноса  $C_j$   $j$ -го разряда многоразрядного сумматора в форме полиномов Жегалкина (полиномов по mod 2):

$$\begin{aligned} S_j &= a_j \oplus b_j \oplus c_{j-1}; \\ C_j &= a_j b_j \oplus a_j c_{j-1} \oplus b_j c_{j-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_j$  и  $b_j$  — значения исходных одноразрядных операндов  $j$ -го разряда;

$c_{j-1}$  — входной сигнал переноса в  $j$ -й разряд.

Вынесем в выражении для выходного сигнала переноса  $C_j$   $j$ -го разряда множитель  $c_{j-1}$  за скобки —

$$C_j = a_j b_j \oplus c_{j-1} (a_j \oplus b_j)$$

и введем далее, как и в [7], две вспомогательные функции генерирования  $g_j$  и передачи  $p_j$  переноса в  $j$ -м разряде:

$$g_j = a_j b_j; \quad p_j = a_j \oplus b_j. \quad (2)$$

С учетом введенных функций выражение для  $C_j$  примет вид

$$C_j = g_j \oplus p_j c_{j-1}. \quad (3)$$

Согласно представлениям (1), (2) и (3), для функций сумм  $S_{4i-3}$ ,  $S_{4i-2}$ ,  $S_{4i-1}$ ,  $S_{4i}$   $i$ -й 4-разрядной секции ( $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ ) с одновременным переносом в 16-разрядной группе секций можно получить следующие формулы:

$$\begin{aligned}
 S_{4i-3} &= a_{4i-3} \oplus b_{4i-3} \oplus u_1 \oplus C_{i-1}; \\
 S_{4i-2} &= a_{4i-2} \oplus b_{4i-2} \oplus u_2 \oplus g_{4i-3} \oplus (p_{4i-3} \oplus u_1) C_{i-1}; \\
 S_{4i-1} &= a_{4i-1} \oplus b_{4i-1} \oplus u_3 \oplus g_{4i-2} \oplus (p_{4i-2} \oplus u_2) g_{4i-3} \oplus \\
 &\oplus (p_{4i-2} \oplus u_2)(p_{4i-3} \oplus u_1) C_{i-1}; \\
 S_{4i} &= a_{4i} \oplus b_{4i} \oplus u_4 \oplus g_{4i-1} \oplus (p_{4i-1} \oplus u_3) g_{4i-2} \oplus \\
 &\oplus (p_{4i-1} \oplus u_3)(p_{4i-2} \oplus u_2) g_{4i-3} \oplus \\
 &\oplus (p_{4i-1} \oplus u_3)(p_{4i-2} \oplus u_2)(p_{4i-3} \oplus u_1) C_{i-1}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $a_{4i}, b_{4i}, a_{4i-1}, b_{4i-1}, a_{4i-2}, b_{4i-2}, a_{4i-3}, b_{4i-3}$  — разряды исходных четырехразрядных операндов  $i$ -й секции;  $g_{4i-3}, g_{4i-2}, g_{4i-1}, p_{4i-3}, p_{4i-2}, p_{4i-1}$  — вспомогательные функции генерирования и передачи переноса для  $4i-3, 4i-2, 4i-1$  разрядов  $i$ -й секции;  $C_{i-1}$  — входной сигнал переноса в  $i$ -ю секцию;  $u_1, u_2, u_3, u_4$  — дополнительные управляющие входные переменные.

Формулы для входных сигналов переноса  $C_1, C_2, C_3$  во вторую, третью и, соответственно, четвертую 4-разрядные секции 16-разрядной группы секций имеют вид:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= G_1 \oplus P_1(C_0 \oplus t) \oplus d_1; \\
 C_2 &= G_2 \oplus P_2 G_1 \oplus P_2 P_1(C_0 \oplus t) \oplus d_2; \\
 C_3 &= G_3 \oplus P_3 G_2 \oplus P_3 P_2 G_1 \oplus P_3 P_2 P_1(C_0 \oplus t) \oplus d_3, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где  $G_i (i \in \{1, 2, 3\})$  — функция генерирования сигнала переноса в  $i$ -й секции;  $P_i$  — функция передачи переноса через  $i$ -ю секцию;  $C_0$  — входной сигнал пе-

реноса в группу секций;  $d_1, d_2, d_3$  и  $t$  — дополнительные управляющие входные переменные.

Функции  $G_i$  и  $P_i$  для  $i$ -й секции ( $i \in \{1, 2, 3\}$ ) выражаются через функции  $g_{4i}, g_{4i-1}, g_{4i-2}, g_{4i-3}, p_{4i}, p_{4i-1}, p_{4i-2}, p_{4i-3}$  и дополнительные управляющие входные переменные  $e_{2i}$  и  $e_{2i-1}$  этой же секции следующим образом:

$$\begin{aligned}
 G_i &= g_{4i} \oplus (p_{4i} \oplus u_4) g_{4i-1} \oplus (p_{4i} \oplus u_4)(p_{4i-1} \oplus u_3) g_{4i-2} \oplus \\
 &\oplus (p_{4i} \oplus u_4)(p_{4i-1} \oplus u_3)(p_{4i-2} \oplus u_2) g_{4i-3} \oplus e_{2i-1}; \\
 P_i &= (p_{4i} \oplus u_4)(p_{4i-1} \oplus u_3)(p_{4i-2} \oplus u_2)(p_{4i-3} \oplus u_1) \oplus e_{2i}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

При этом выходной сигнал переноса из 16-разрядной группы секций описывается формулой

$$\begin{aligned}
 C_4 &= g_{16} \oplus (p_{16} \oplus u_4) g_{15} \oplus (p_{16} \oplus u_4)(p_{15} \oplus u_3) g_{14} \oplus \\
 &\oplus (p_{16} \oplus u_4)(p_{15} \oplus u_3)(p_{14} \oplus u_2) g_{13} \oplus \\
 &\oplus (p_{16} \oplus u_4)(p_{15} \oplus u_3)(p_{14} \oplus u_2)(p_{13} \oplus u_1) C_3 \oplus u_5, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где  $g_{16}, g_{15}, g_{14}, g_{13}, p_{16}, p_{15}, p_{14}, p_{13}$  — вспомогательные функции генерирования и передачи переноса для 16-, 15-, 14- и 13-го разрядов 4-й секции;  $C_3$  — входной сигнал переноса в 4-ю секцию;  $u_5$  — дополнительная управляющая входная переменная.

Обобщенная контролепригодная логическая схема  $Q_1$  для первой, второй и третьей 4-разрядных секций 16-разрядной группы секций, реализованная по формулам (4) и (6), приведена на рис. 1, схема  $Q_2$  для четвертой (старшей) 4-разрядной секции, реализованная по формулам (4) и (7), приведена на рис. 2.

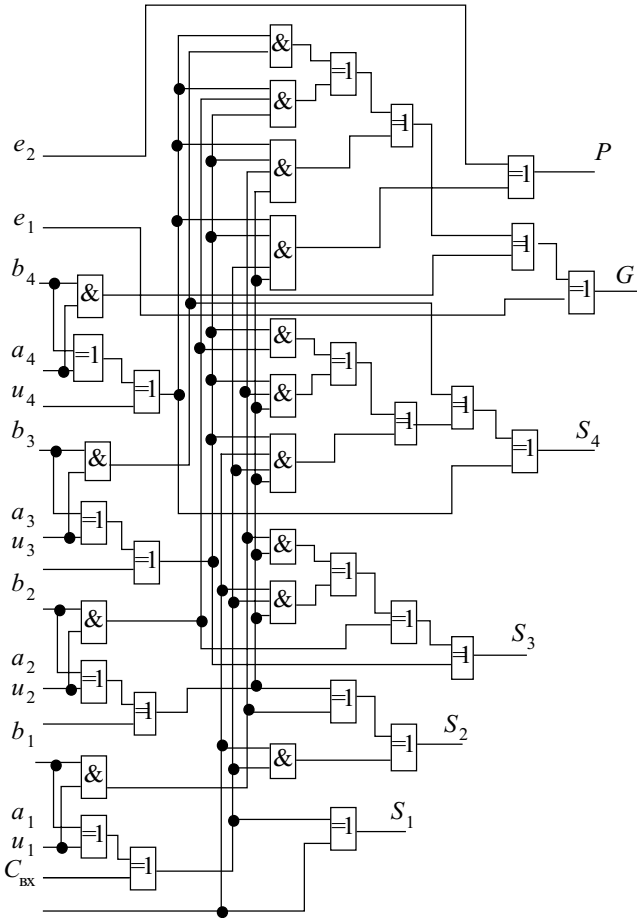


Рис. 1. Контролепригодная логическая схема  $Q_1$

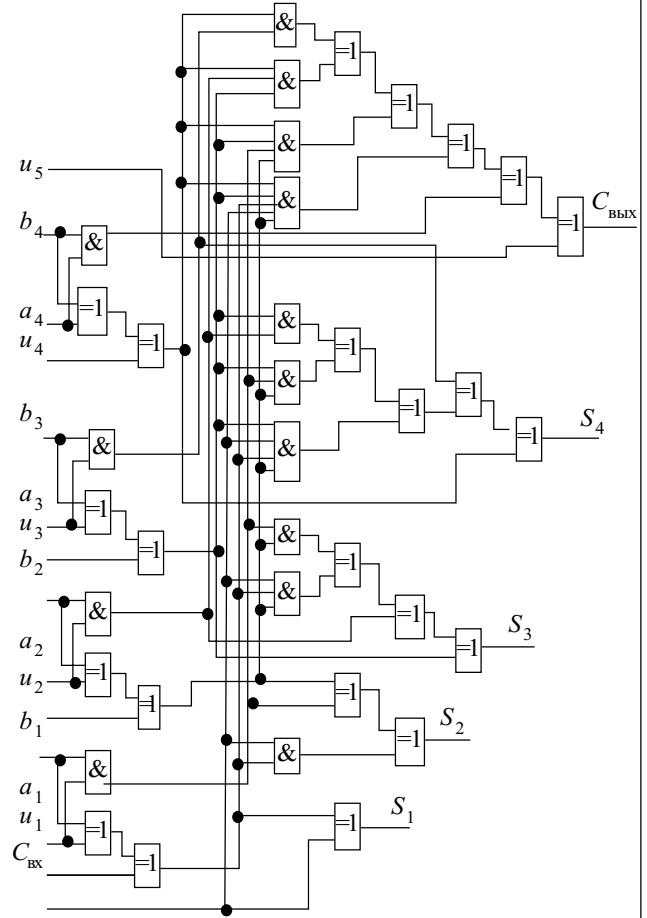


Рис. 2. Контролепригодная логическая схема  $Q_2$

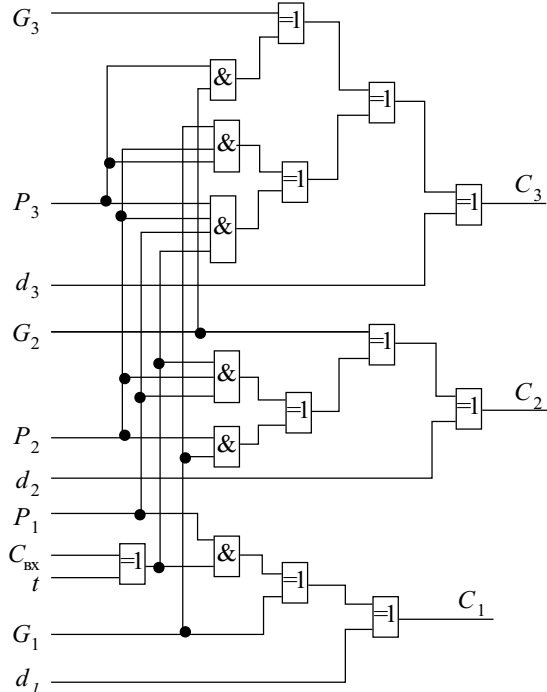
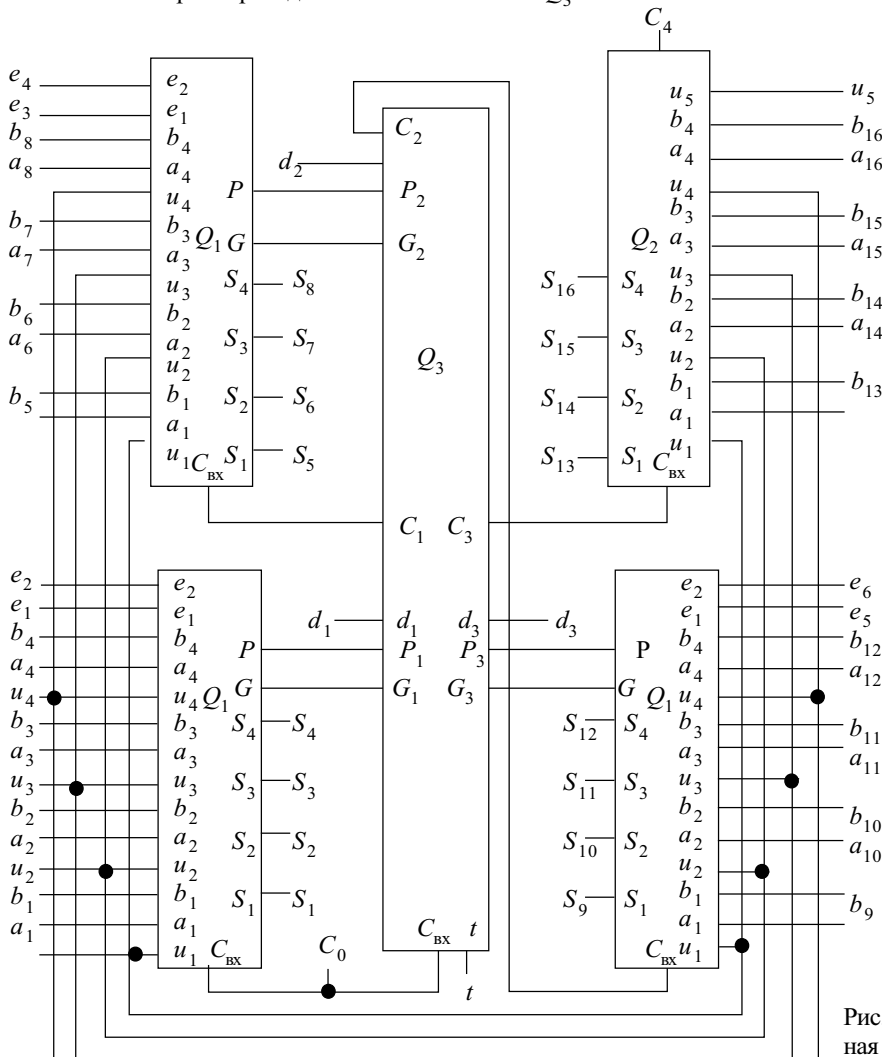


Рис. 3. Контролепригодная логическая схема  $Q_3$

Логическая схема  $Q_3$  ускоренного переноса для 16-разрядной группы секций, реализованная по формулам (5), показана на рис. 3.

На рис. 4 приведена контролепригодная функциональная схема для 16-разрядной группы секций  $n$ -разрядного двоичного сумматора, где  $n=16m$ ,  $m$  — натуральное число.

Схема с последовательным переносом между группами секций образуется из  $m$  схем 16-разрядной группы секций путем соединения выхода переноса  $C_4$  ( $j-1$ )-й группы со входом переноса  $C_0$   $j$ -й группы, где  $2 \leq j \leq m$ . Дополнительный управляющий вход  $u_k$  каждой группы соединяется с внешним входом  $U_k$   $n$ -разрядного двоичного сумматора для  $\forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , дополнительный управляющий вход  $e_r$  — с внешним входом  $E_r$  для  $\forall r \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , дополнительный управляющий вход  $d_v$  — с внешним входом  $D_v$  для  $\forall v \in \{1, 2, 3\}$ . Кроме этого, дополнительный управляющий вход  $t$  каждой группы соединяется с внешним входом  $T$ . При этом в рабочем режиме на управляющие входы  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, d_1, d_2, d_3, t$  и вход переноса в младшую группу секций  $C_0$  подаются сигналы логического «0».



Проверяющий тест для каждой  $j$ -й 16-разрядной группы секций ( $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ) один и тот же и содержит 11 векторов. Состав этого теста описывается таблицей. Следует отметить, что подвекторы тестовых векторов, поступающие на входы  $a_{4i-3}, b_{4i-3}, a_{4i-2}, b_{4i-2}, a_{4i-1}, b_{4i-1}, a_{4i}, b_{4i}$  идентичны для каждой  $i$ -й ( $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ ) 4-разрядной секции 16-разрядной группы секций.

Проверяющий тест для контролепригодной схемы  $n$ -разрядного двоичного сумматора, состоящего из  $m$  групп секций, образуется из  $m$  групп простой итерации теста из таблицы. Данный тест обнаруживает все одиночные константные неисправности и значительную часть константных неисправностей кратности 2 сигнальных линий рассматриваемой схемы (в т. ч. во внутренней структуре элементов «Исключающее ИЛИ»), при этом длина этого теста не зависит от числа групп секций в сумматоре.

Рис. 4. Контролепригодная функциональная схема для 16-разрядной группы секций многоразрядного сумматора

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$t$	$C_0$	$a_{4i-3}$	$b_{4i-3}$	$a_{4i-2}$	$b_{4i-2}$	$a_{4i-1}$	$b_{4i-1}$	$a_{4i}$	$b_{4i}$	$S_{4i-3}$	$S_{4i-2}$	$S_{4i-1}$	$S_{4i}$	$C_4$
1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1

Таким образом, удалось построить контролепригодную функционально-логическую схему двоичного сумматора с двухуровневым одновременным переносом, которая обладает проверяющим тестом той же длины, что и контролепригодная схема двоичного сумматора в работе [6].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Friedman A. D. Easily testable iterative systems // IEEE Trans. on computers.— 1973.— N 12.— P. 1061—1064.
2. Saluja K. K., Reddy S. M. On minimally testable logic networks // Ibid.— 1974.— N 5.— P. 552 —554.
3. Elhuni H., Vergis A., Kinney L. C-testability of two-dimensional iterative arrays // IEEE Trans. on comput. aided design.— 1986.— Vol. CAD-5, N 4.— P. 573—581.
4. Lombardi F., Huang W. K. Fault detection and design complexity in C-testable VLSI arrays // IEEE Trans. on computers.— 1990.— Vol. 39, N 12.— P. 1477—1481.

5. Qiao T., Jha N. K. Design of C-testable DCVS binary array dividers // IEEE J. of Solid-state circuits.— 1991.— Vol. 26, N 2.— P. 134—141.
6. Тимошкин А. И. Контролепригодная схема двоичного сумматора с повышенным быстродействием // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 1.— С. 10—13.
7. Мик Дж., Брик Дж. Проектирование микропроцессорных устройств с разрядно-модульной организацией. Кн. 1.— М.: Мир, 1984.
8. Карцев М. А. Арифметика цифровых машин.— М.: Наука, 1969.
9. Киносита К., Асада К., Карацу О. Логическое проектирование СБИС.— М.: Мир, 1988.
10. Тимошкин А. И. Контролепригодная функционально-логическая схема двоичного сумматора // Приборы и системы управления.— 1997.— № 1.— С. 42—43.
11. Тимошкин А. И. Контролепригодная схема двоичного сумматора // Автоматика и вычислительная техника.— 2000.— № 3.— С. 82—84.

ВЫШЛА В СВЕТ

**Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем.— К.: Логос, 2002.— 486 с.**

Авторы, известные специалисты в области надежности интегральных микросхем и изделий электронной техники, в своей монографии подробно рассмотрели методы расчета и оценки надежности электронных элементов и систем по результатам сокращенных, безотказных и ускоренных испытаний. В книге представлены методики прогнозирования остаточного ресурса сложных технических объектов на любой стадии эксплуатации как на основе первичных параметров надежности комплектующих изделий, так и на основе статистических данных, полученных в процессе эксплуатации. Монография содержит большое количество примеров и задач по оценке и расчету надежности изделий электронной техники и предназначена для разработчиков вычислительных и измерительных систем, устройств связи, контроля и управления.

ВЫШЛА В СВЕТ

**Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике. Монография.— К.: «МП Леся», 2002.— 376 с.**

В книге дан подробный анализ физико-технологических основ формирования нанослоев для СБИС, описаны методы ионной модификации вещества в нанослоях, методы получения заданных характеристик и параметров нанозементов, детально рассмотрены фундаментальные теоретические представления о взаимодействии ионов с гетероструктурами и поверхностями, освещены новейшие достижения нанотехнологий и их применение в электронике.

Книга полезна для специалистов, работающих в этой области, и может использоваться как учебное пособие.

НОВЫЕ КНИГИ



К. т. н. А. Т. РАГИМОВ

Азербайджан, г. Баку, Азербайджанский технический университет  
E-mail: jamaljav@yahoo.com

Дата поступления в редакцию  
01.02 — 11.12 2002 г.

Оппоненты  
к. т. н. Э. М. АЛЕСКЕРОВ (АзТУ, г. Баку),  
д. м. н. В. А. КОЛОМИЕЦ (ИГБ и ТТ им. В. П. Филатова, г. Одесса)

## ТЕЛЕВИЗИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДУЖНОЙ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗА

*Предложенная телевизионная система с круглой формой развертки в виде спирали Архимеда расширяет функциональные возможности систем иридодиагностики.*

В последние годы ранняя диагностика заболеваний человека приобрела особую значимость. В связи с этим исключительно актуальными становятся проблемы экспресс-методов диагностики.

К числу универсальных методов раннего выявления заболеваний относится иридодиагностика, которая сопровождается совершенствованием видов диагностической аппаратуры, а также методов объективного анализа для более правильной оценки выявляемой информации.

Дешифровка непонятных сторон новообразований, выявленных методами иридодиагностики, немислима без применения современных технических средств — телевидеотехники и компьютера. Только с их помощью возможно дальнейшее развитие этой оригинальной диагностической методики [1, с. 35], в которой следует выделить иридографию: изучая цветные слайды с изображением радужки, можно анализировать возрастные изменения, динамику болезни и эффективность лечения, повторять анализ без повторного осмотра пациента и т. д.

Предполагалось, что иридография займет достойное место при проведении диспансеризации различных групп больных, позволяя создавать цветные слайдотексты. Однако при внедрении иридографии обнаруживаются существенные трудности и недостатки, а именно:

- необходимость обработки фото пленки;
- обработка информации производится не в реальном масштабе времени;
- неоднозначность цветных фотоизображений, которая определяется условиями проявления;
- нестабильность положения глаза относительно оптической системы устройства, вызванная процессом моргания, неустойчивостью головы пациента;
- недостаточные контрастность, четкость вызванных заболеваниями новообразований на радужной оболочке, что может привести к ошибочному анализу-диагнозу [2].

Указанных недостатков лишена биомикроскопия с использованием телевидеотехники. Ее применение

исключает риск светового поражения глаза при осмотре с использованием щелевых ламп, позволяет сократить время диагностики, при этом нет необходимости в обработке фото пленки, поскольку оценка информации осуществляется в реальном масштабе времени.

На основе обильной информации об иридознаках и их симптомах разработаны компьютерные системы диагностики. В этих системах при использовании щелевой лампы компьютерная диагностика производится в диалоговом режиме, а при использовании видеокамеры имеется возможность ввода изображения в компьютер для автоматической диагностики, что резко повышает точность диагноза.

Достоверность полученной информации зависит от первичного процесса формирования изображения ТВ-камерой. Поэтому к ней предъявляются такие требования как высокая разрешающая способность, большая точность передачи полутонов и цветовых оттенков, минимальные геометрические искажения при сканировании радужной оболочки.

В прикладных телевизионных устройствах широкое применение находит круглая форма развертки, которая выделяет центральную часть поля зрения и хорошо соответствует возможностям оптики. Проведенные нами теоретические исследования [3, с. 128] показали, что рациональным типом развертки является спиральная с постоянной линейной скоростью сканирования, позволяющая упростить алгоритм обработки ТВ-сигнала и обеспечивающая постоянство отношения сигнал/шум по полю изображения. При этом очевидным преимуществом спиральной развертки является значительное уменьшение потерь времени на обратный ход в конце каждого кадра (всего 3—8% против 28% для вещательного ТВ-стандарта с прямоугольной разверткой). Кроме того, круглая форма раstra идеально соответствует форме радужной оболочки глаза, что обеспечивает оптимальные условия для посегментного анализа радужки с помощью ЭВМ [4].

На рис. 1 представлена структурная схема предложенной телевизионной системы для иридодиагностики с круглой формой развертки в виде спирали Архимеда. Система работает следующим образом.

Изображение радужки 1 с помощью телевизионной камеры 3 преобразуется в видеосигнал, который поступает на вход аналого-цифрового преобразова-

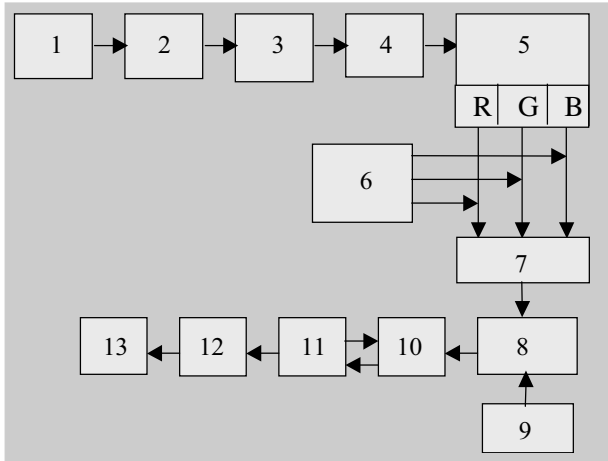


Рис 1. Структурная схема телевизионной системы для иридодиагностики:

1 — объект исследования (человеческий глаз); 2 — оптическая система; 3 — ТВ-камера; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — блок памяти и цветного кодирования с каналами цветоделения; 6 — корректоры контраста; 7 — формирователь изображения; 8 — устройство обработки и отображения изображения; 9 — банк данных; 10 — монитор компьютера; 11 — интерфейсный блок; 12 — видеопроектор; 13 — большой экран

теля 4. Далее информация поступает на устройство памяти кадров (ОЗУ), блок цветового кодирования с каналами цветоделения и элементами маркирования секторов радужной оболочки глаза 5. Затем сигнал поступает на формирователь изображения 7. Одновременно на каждый из каналов цветоделения формирователя изображения поступает сигнал из нелинейных корректоров 6, которые обеспечивают контрастность с выбором порога и регулируемым коэффициентом гамма, который отвечает за контрастность изображения и для цветного изображения имеет оптимальное значение порядка 2,2. Устройство обработки 8 производит обработку полученных изображений, после чего изображение отображается на цветном мониторе компьютера 10. Для сравнения с данными из истории болезни возможен ввод дополнительной информации из банка данных 9.

Специальное программное обеспечение устройства обработки позволяет производить предварительную обработку полученных изображений (либо в реальном времени, либо с видеокамеры), определение азимутальных зависимостей размеров зрачка и радужки, вычисление информативных признаков (тон, цвет и пространственная структура локальных знаков), вычисление статистических величин информативных иридологических признаков, определение их координат и отождествление с проекционными знаками на иридодиагностических схемах.

Сравнительный анализ созданной аппаратуры позволил выделить следующие направления по применению ЭВМ в иридодиагностике.

Во-первых, рекомендуется разделять программное обеспечение для научных исследований и прикладные пакеты, которые могут использоваться практическими врачами.

Во-вторых, следует различать создаваемые системы по степени автоматизации процесса диагностики: автоматические, полуавтоматические или диалоговые. Если для первых двух типов используется поисковый характер исследований, то для диалогового режима созданы и функционируют несколько программ и подпрограмм.

Алгоритм предложенного процесса автоматизированной иридодиагностики показан на рис. 2. Основной блок диагностического алгоритма включает следующие дифференцированные оценки результатов биомикроскопии радужки: цвет, тип, плотность, рельеф, состояние зрачка, форма зрачка, децентрация



Рис. 2. Алгоритм процесса автоматизированной иридодиагностики

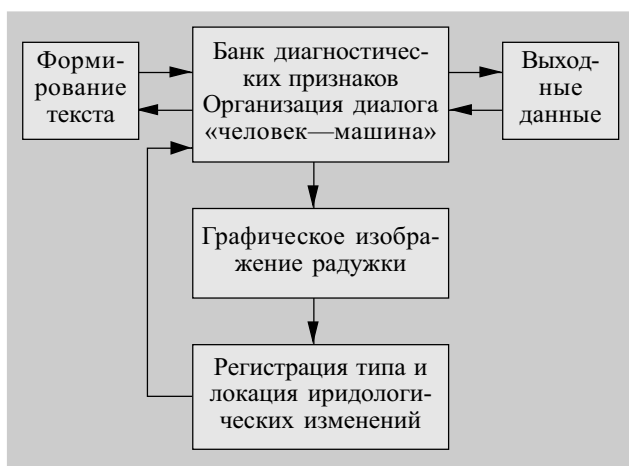


Рис. 3. Упрощенная блок-схема логической структуры программы иридологических измерений

зрачка, деформация зрачка, зрачковая кайма, автономное кольцо, зашлакованность автономного кольца, адаптационные кольца, лимфатический розарий, дистрофический ободок, лакуны, токсические и пигментные пятна.

Программа для дифференцированной диагностики иридодиагностических изменений состоит из следующих блоков:

- "банк" диагностических признаков;
- организация диалога "человек—машина";
- графическое изображение схемы радужки;
- регистрация типа и локализации иридологических изменений;
- формирование текста;
- формирование выходных данных, протокол, заключение врача, рекомендации.

Логическая структура программы показана на рис. 3. Программное обеспечение диалоговой автоматизированной информационно-диагностической системы составлено для работы совместно с ЭВМ на языке Turbo Pascal. Для удобства она разбита на две части, одна из которых (Evgica) позволяет рассчитывать коэффициенты полинома аппроксимирующей функции, другая (Graduent) — градиенты функции по  $X$ ,  $Y$  и полный градиент.

Предложенный алгоритм и разработанная программа исследования радужной оболочки глаза расширяют функциональные возможности и увеличивают набор измеряемых параметров по сравнению с известной компьютерной системой "Офорт-ИД".

\*\*\*

Таким образом, предложено ТВ-устройство с использованием компьютера для автоматической диагностики радужной оболочки глаза. Применение спиральной развертки с постоянной линейной скоростью сканирующего луча позволило упростить алгоритм обработки ТВ-сигнала считывания информации, повысить отношение сигнал/шум системы и увеличить скорость считывания информации.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вельхвер Е. С., Алиева З. А. Иридодиагностика // М.: Медицина, 1988.
2. Рагимов А. Т. Технические средства, применяемые в иридодиагностике // Труды Юбилейн. науч. конф. связистов СПбГУТ "Телекоммуникации XXI века".— Санкт-Петербург, 2000.— С. 112—114.
3. Рагимов А. Т. Основы теории и проектирования иридодиагностических телевизионных систем // Санкт-Петербург: Ин-форматизация образования, 2001.
4. Raqimov A. T. The comparative analysis of means used in iridology // Baku: Technics.— 2000.— № 3.— P. 42—47.

#### ВЫШЛА В СВЕТ

**Годлевский Л. С., Кресюн В. И., Садлий А. В. и др. Медицинская аппаратура. Принципы действия и применения.— Одесса: Нептун-Технология, 2002.— 392 с.**

В книге изложены принципы функционирования и применения современной медицинской техники, ее воздействие на организм человека. Рассмотрена наиболее распространенная медицинская электронная аппаратура диагностического, терапевтического, хирургического и исследовательского назначения с применением современных медицинских технологий — таких как электро-, магнито-, рентгеновская, ультразвуковая, компьютерная томография, эндоскопическая и др.

Излагаются основы метрологического обеспечения медицинской техники и безопасности ее применения.

Книга рекомендуется студентам медицинских вузов III—IV уровней аккредитации, широкому кругу врачей и научным работникам.

Справки по вопросам приобретения:  
тел. +38 (048) 71-55-55-1  
e-mail: leon@odessa.net



К. т. н. И. Л. МИХЕЕВА, В. К. КУРИННЫЙ, В. Ю. ТАЯКИН,  
Л. Д. МАЗЫРА

Украина, г. Киев, УкрНИИ аналитического приборостроения  
E-mail: mil@faust.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
19.11 2002 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ  
(СКБ КП, г. Баку)

## АВТОМАТИЧЕСКИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

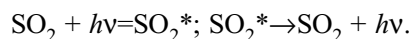
*Описаны принцип действия, особенности работы и технические характеристики флуоресцентного газоанализатора диоксида серы и хемиллюминесцентного газоанализатора оксидов азота.*

Для непрерывного круглосуточного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха создаются автоматические станции контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА), которые объединяются в систему передачи контрольно-измерительной экологической информации. АСКЗА комплектуются автоматическими газоанализаторами, задачей которых являются:

- автоматический отбор, подготовка к анализу и удаление после анализа газовой пробы;
- анализ концентрации измеряемого компонента и преобразование в электрический сигнал;
- обработка результатов измерений по заданному алгоритму;
- формирование унифицированных выходных сигналов (аналоговых или цифровых), используемых в дальнейшем в системах передачи информации;
- поддержание метрологических характеристик в заданных пределах.

В НИИ “Укрналит” освоены самые современные методы газового анализа, на основе которых создана серия автоматических газоанализаторов для контроля загрязнения атмосферного воздуха [1].

Для измерения содержания диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) используется метод ультрафиолетовой (УФ) молекулярной флуоресценции. Он основан на возбуждении молекул  $\text{SO}_2$  УФ-излучением с последующей регистрацией интенсивности флуоресцентного испускания, возникающего при переходе молекул из возбужденного состояния в основное:



Интенсивность флуоресцентного испускания ( $\Phi_{\text{фл}}$ ) зависит от количества поглощенного возбуждающего излучения ( $\Phi_{\text{в}}$ ) и для микроконцентраций описывается формулой [2, с. 42]

$$\Phi_{\text{фл}} = \left( 2,3\Phi_{\text{в}}B_{\text{к}}kl \frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{фл}}} \right) x, \quad (1)$$

где  $B_{\text{к}}$  — квантовый выход флуоресценции анализируемого компонента;

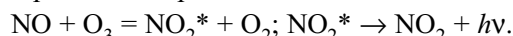
$k$  — коэффициент поглощения анализируемого компонента;

- $l$  — толщина поглощающего слоя;
- $\lambda_{\text{п}}$  — среднее эффективное значение длины волны возбуждающего излучения;
- $\lambda_{\text{фл}}$  — среднее эффективное значение длины волны флуоресцентного испускания;
- $x$  — концентрация анализируемого компонента.

Так как все члены выражения (1), кроме  $x$ , в условиях проведения анализа остаются постоянными, то величина  $\Phi_{\text{фл}}$  будет зависеть только от концентрации анализируемого компонента в анализируемой смеси. Именно эта зависимость используется во флуоресцентных газоанализаторах.

На базе этого метода разработана новая модель (667ФФ 05) автоматического газоанализатора диоксида серы в атмосферном воздухе.

Для измерения содержания оксида (NO) и диоксида ( $\text{NO}_2$ ) азота используется хемиллюминесцентный метод анализа. Он основан на зависимости интенсивности хемиллюминесцентного испускания от концентрации в анализируемой смеси измеряемого компонента. В газоанализаторах оксидов азота используется химическая реакция между озоном ( $\text{O}_3$ ) и оксидом азота (NO), в результате которой образуются возбужденные молекулы ( $\text{NO}_2^*$ ). Переход молекул  $\text{NO}_2^*$  в основное состояние сопровождается хемиллюминесцентным испусканием в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне, интенсивность которого является мерой концентрации оксидов азота:



На базе этого метода разработана новая модель (645ХЛ 10) автоматического газоанализатора оксидов азота в атмосферном воздухе.

На рис. 1 представлена блок-схема газоанализатора 667ФФ 05.

Анализируемый атмосферный воздух засасывается в газоанализатор через пневмовыход “Проба” с помощью побудителя расхода 11. Воздух очищается от аэрозольных частиц диаметром более 20 мк в пылевом фильтре 5, затем через электромагнитный клапан 8 и осушитель 9 поступает во флуоресцентную камеру 14.

Излучение от УФ-источника 2 с помощью объектива 3 фокусируется во флуоресцентной камере. Выделение спектральной области возбуждения флуоресценции молекул  $\text{SO}_2$  осуществляется с помощью первичного интерференционного светофильтра 4. Для возбуждения флуоресценции  $\text{SO}_2$  в этом газоанализаторе

заторе применена импульсная ксеноновая лампа типа СШ20-1, работающая с частотой 2 Гц. Возбуждение флуоресценции осуществляется в диапазоне 215—235 нм с  $\lambda_{\max} = 225 \pm 2$  нм.

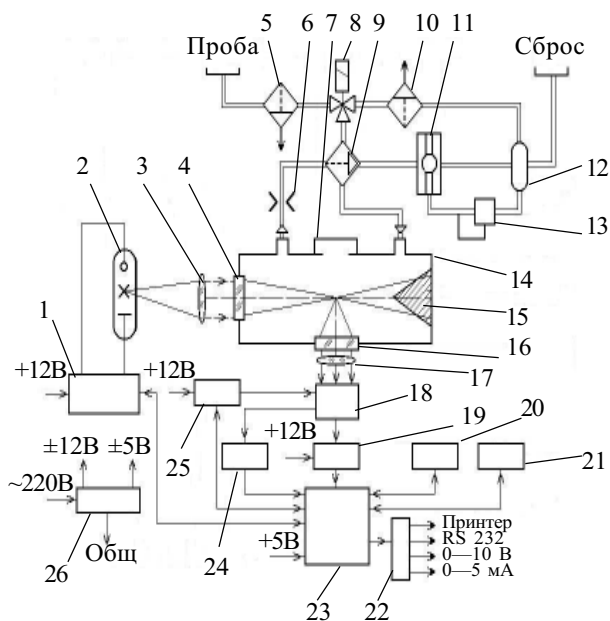


Рис. 1. Блок-схема газоанализатора 667ФФ 05:

1 — плата питания источника излучения; 2 — источник УФ-излучения; 3, 17 — объективы; 4, 16 — оптические светофильтры; 5 — фильтр пылевой; 6 — дроссель пневматический; 7, 15 — светоловушки; 8 — клапан электромагнитный; 9 — осушитель пробы; 10 — фильтр объемный; 11 — побудитель расхода; 12 — ресивер; 13 — стабилизатор давления газа; 14 — камера флуоресцентная; 18 — фотоэлектронный умножитель; 19 — плата делителя напряжения и формирования сигналов; 20 — клавиатура; 21 — алфавитно-цифровой индикатор; 22 — плата выходных сигналов; 23 — микропроцессорное устройство; 24 — датчик температуры; 25 — плата питания ФЭУ; 26 — блок питания

В камере происходит взаимодействие молекул  $\text{SO}_2$  с УФ-излучением. Возникающее при этом флуоресцентное испускание передается с помощью объектива 17 на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 18. Спектральная область регистрации флуоресцентного испускания выделяется из спектра флуоресценции диоксида серы с помощью вторичного интерференционного светофильтра 16. Светоловушки 7, 15 служат для уменьшения величины фонового сигнала, поступающего на ФЭУ.

Регистрация интенсивности флуоресцентного испускания осуществляется с помощью ФЭУ-85 в спектральном диапазоне 260—360 нм.

Импульсный информационный сигнал с ФЭУ поступает на плату формирователя сигнала 19 и, далее, на микропроцессорное устройство (МПУ) 23.

Анализируемый воздух, пройдя через флуоресцентную камеру, пневматический дроссель 6, внешнюю камеру осушителя, стабилизатор давления газа 13, с помощью побудителя расхода через ресивер 12 и пневмовыход «Сброс» выбрасывается в атмосферу.

Стабилизированное питание источника излучения обеспечивается с помощью платы питания лампы 1, конструктивно расположенной в осветителе, стабилизированное питание ФЭУ — с помощью платы питания ФЭУ 25, конструктивно расположенной в блоке ФЭУ.

Датчик температуры 24 служит для контроля температуры ФЭУ и передачи информации о ней в МПУ.

Автоподстройка нуля и чувствительности осуществляется при прохождении через флуоресцентную камеру нулевого газа, получаемого путем очистки атмосферного воздуха от  $\text{SO}_2$  с помощью объемного фильтра 10, заполненного специальным активированным углем.

На рис. 2 представлена блок-схема газоанализатора 645ХЛ 10, который работает в циклическом режиме измерения длительностью 40 с каждый.

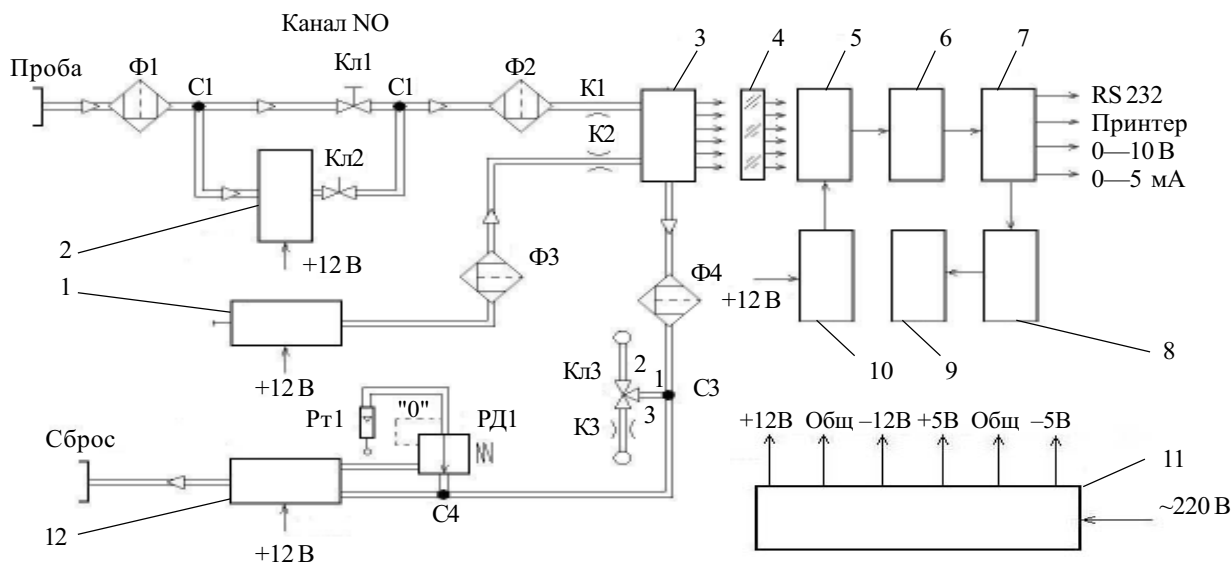


Рис. 2. Блок-схема газоанализатора 645ХЛ 10:

1 — генератор озона; 2 — конвертор каталитический; 3 — реакционная камера; 4 — оптический светофильтр; 5 — ФЭУ; 6 — формирователь сигнала; 7 — МПУ; 8 — клавиатура; 9 — алфавитно-цифровой индикатор; 10 — плата питания ФЭУ; 11 — блок питания; 12 — побудитель расхода; Ф1, Ф2, Ф3 — фильтры пылевые; Ф4 — фильтр объемный; С1, С2, С3, С4 — соединители; Кл1, Кл2, Кл3 — клапаны электромагнитные; К1, К2, К3 — капилляры ограничения потока; Рт1 — ротаметр; РД1 — регулятор давления газа

В первом цикле происходит измерение темнового тока ФЭУ. При этом клапаны Кл1 и Кл2 закрыты и побудитель расхода 12 прокачивает атмосферный воздух через открытый клапан Кл3 по линии 1—3 и капилляр К3, т. е. через реакционную камеру 3 атмосферный воздух не проходит.

Во втором цикле анализируемый воздух по газовому тракту Проба—Ф1—С1—Кл1—Ф2—К1 поступает в реакционную камеру 3. В это же время озон, образованный с помощью генератора 1, через газовый тракт Ф3—К2 также поступает в реакционную камеру, где происходит термокаталитическая реакция озона с оксидом азота. Возникшее при этом хемилюминесцентное испускание через оптический светофильтр 4 поступает на ФЭУ 5. Электрический сигнал, несущий информацию о суммарном значении концентрации NO и темнового тока, с ФЭУ поступает в электронный тракт 6—9.

Регистрация интенсивности хемилюминесцентного испускания осуществляется с помощью ФЭУ-84-3 в спектральном диапазоне 700—1000 нм.

Озоно-воздушная смесь поступает в реакционную камеру во всех циклах непрерывно.

В третьем цикле анализируемый воздух поступает по газовому тракту Проба—Ф1—С1—конвертор 2—Кл2—Ф2—К1 в реакционную камеру. В каталитическом конверторе происходит преобразование NO<sub>2</sub> в NO при температуре 200°С.

Электрический сигнал, несущий информацию о суммарном значении концентрации NO, NO<sub>2</sub> и темнового тока, с ФЭУ поступает в электронный тракт газоанализатора.

ФЭУ работает в режиме счета фотонов. Импульсы, снимаемые с нагрузочного резистора ФЭУ, формируются с длительностью 2 мкс и поступают в МПУ 7, где происходит обработка полученной информации.

Стабилизация потока и разрежения в реакционной камере обеспечивается регулятором давления РД1 и капиллярами ограничения потока К1 и К2, конструктивно расположенными в реакционной камере.

Фильтры Ф1, Ф2 и Ф3 предназначены для очистки анализируемого воздуха от аэрозольных частиц, а фильтр Ф4 — для очистки от примеси озона в воздухе после реакционной камеры.

Контроль расхода осуществляется ротаметром Рт1.

Капилляр К3 предназначен для выравнивания потока через реакционную камеру при закрытых клапанах Кл1 и Кл2.

В таблице приведены технические характеристики газоанализаторов (ГА).

Газоанализаторы выполнены на базе микропроцессорной техники, имеют аналоговые выходные сигналы 0—5 мА, 0—10 В, а также последовательный интерфейс RS-232 для связи с персональным компьютером (ПК).

Специализированное МПУ обеспечивает:

- реализацию заданной программы (алгоритма) обработки информационного сигнала;
- поддержание параметров метрологических характеристик в требуемых пределах;
- обработку измерительной информации в двух режимах — мгновенном и с усреднением;
- хранение в памяти информации о результатах измерения с усреднением за 20 мин в течение предыдущих 8 суток ( 72 значения в сутки);
- хранение в памяти информации о результатах измерения четыре раза в сутки за период предыдущих 128 суток;
- представление измерительной информации в единицах массовой концентрации (mg/m<sup>3</sup>) и в единицах объемной доли (ppm);
- непрерывное тестирование узлов и блоков газоанализатора, самоконтроль и выдачу сигнала о неисправности;
- автоматическую подстройку нуля и чувствительности;
- возможность передачи измерительной информации в ПК;
- возможность распечатки протокола измерений в трех форматах (текущие, суточные и месячные результаты измерений).

Ядром МПУ является однокристалльный микроконтроллер ATmega103. Программа работы ГА полностью размещена во внутреннем flash-ППЗУ, а стек и переменные состояния системы — во внутреннем ОЗУ микроконтроллера. При этом МПУ менее всего подвержен сбоям в результате воздействия электромагнитных полей и различного рода помех. Задействован встроенный в микроконтроллер сторожевой таймер (watch dog), что обеспечивает автоматический перезапуск системы после сбоя. Для обеспечения привязки результатов измерений к астрономическому времени в системе применена ИМС часов реального времени DS1307, электропитание которой резервировано литиевым элементом, обеспечивающим пятнадцатилетний срок хода часов при выключенном основном источнике электропитания.

Особый подход к разработке программного обеспечения, т. н. "программирование, управляемое событиями", сделал программу нечувствительной к перезапуску процессора в любой момент времени. Кроме этого, надежность и безотказность работы электронного модуля в целом достигается за счет применения элементов с низким энергопотреблением и, соответственно, малонагруженных. Импульсные преобразователи напряжения (источник питания ФЭУ, импульсного осветителя, электроразрядных генераторов газов) выполнены по обратнойходовой схеме с ключевым МОП-транзистором и ШИМ-стабилизацией, что позволило как обеспечить точность ста-

Тип ГА	Диапазон измерений, мг/м <sup>3</sup>	Инструментальная погрешность измерения, %	Порог обнаружения, мг/м <sup>3</sup>	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
667ФФ 05 (SO <sub>2</sub> )	0—5,0	±3	0,003	10,0	200×400×330
645ХЛ 10 (NO, NO <sub>2</sub> )	0—10,0	±3	0,003	12,0	200×400×330

билизации, так и минимизировать потребляемую мощность и наводки на другие цепи ГА. Элементы силовой электроники имеют большой "запас прочности", например, нагрузку, потребляющую 7 А, коммутирует стоамперный МОП-транзистор. Минимизировано число разъемов и проводного монтажа в приборах.

Улучшение метрологических характеристик ГА достигнуто также за счет оптимизации конструкции электронных модулей. Первичные преобразователи сигналов максимально приближены к источникам этих сигналов. Например, усилитель-формирователь сигнала с ФЭУ расположен на плате делителя напряжения непосредственно на цоколе ФЭУ, в термостатах по возможности используются датчики температуры со встроенным АЦП (DS1621). Источники стабилизированных напряжений приближены, а где это возможно, конструктивно объединены с потребителями этих напряжений.

Максимально, насколько это возможно, использованы цифровые методы обработки сигнала. Там, где без аналоговых схем нельзя обойтись, применена

современная элементная база ведущих мировых производителей. Схемотехника проста, но тщательно прорасчитана. Особо следует подчеркнуть применение АЦП интегрирующего типа (дельта-сигма) для преобразования медленно изменяющихся сигналов (температура), что позволяет достичь высокой точности даже в условиях сильных помех.

Конструктивно ГА выполнены в унифицированных металлических корпусах. Электропитание ГА осуществляется от компьютерного источника вторичного электропитания (АТ или АТХ, отличающихся высокой надежностью при длительной непрерывной работе, а также низкой стоимостью).

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <http://www.ukranalyt.com.ua>.

2. Михеева И. Л., Стефаняк В. В., Маергойз М. Д. Построение математической модели и оценка погрешности флуоресцентного газоанализатора двуокиси серы в атмосферном воздухе / В кн.: Методы и средства обеспечения газоаналитических измерений. — Киев: УкрНИИАП, 1983. — С. 42—52.

#### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ



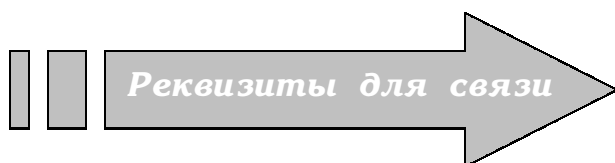
г. Ижевск  
29—30 мая 2003 г.  
**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
“ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИННОВАЦИОННЫХ  
ПРОЕКТАХ”**

В целях обмена опытом и накопленной научной информацией между учеными вузов России, Германии, Словакии, Венгрии, Сирии, Египта Ижевский государственный технический университет Министерства образования Российской Федерации при содействии промышленных предприятий и Министерства промышленности и транспорта Удмуртской республики проводит научно-техническую конференцию с международным участием “ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ”.

На конференции планируется рассмотреть доклады по следующим основным направлениям:

- информационные технологии жизненного цикла продукции;
- математическое, компьютерное моделирование технических и социально-экономических систем;
- инновационные технологии в машиностроении;
- инновационные технологии в рекламе и дизайне;
- инновационные технологии в радиоэлектронике и связи.

К началу работы НТК будет издан сборник материалов конференции.



Россия, Удмуртская республика  
426069, Ижевск, Студенческая, 7, ИжГТУ,  
отдел инновационного маркетинга  
Тел./факс (3412) 58-03-99.  
E-mail: [market@istu.udm.ru](mailto:market@istu.udm.ru)

К. т. н. М. Д. СКУБИЛИН, д. ф. н. В. К. СТЕФАНЕНКО,  
к. т. н. О. Б. СПИРИДОНОВ

Дата поступления в редакцию  
08.02 2002 г.

Россия, Таганрогский гос. радиотехнический ун-т  
E-mail: scubilin@hotmail.ru

Оппоненты  
д. т. н. Д. А. СЕЧЕНОВ (ТГРТУ, г. Таганрог),  
к. т. н. В. И. ЛАРЧЕНКО (НИИ "Украналит", г. Киев)

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

*Предлагается подход к регулированию водопотребления за счет автоматизированного учета совокупности критериев в реальном масштабе времени.*

Водоснабжение населенных пунктов предусматривает выполнение целого ряда требований со стороны органов санитарного надзора по качественным характеристикам воды, поступающей потребителям. В частности, питьевая вода для достижения необходимых характеристик подвергается осветлению и обесцвечиванию, обеззараживанию, умягчению и обезжелезиванию, дегазации, дезодорации [1]. Вместе с тем контроль качества воды традиционными методами весьма затруднителен, особенно в масштабе времени, близком к реальному.

Для оперативного, в масштабе реального времени, контроля качества воды целесообразно использование инструментальных средств, автоматически учитывающих содержание в воде хлора (вредного для организма человека и животных), ее кислотность ( $pH \geq 7$  при  $22^\circ C$ ), прозрачность (осветленность). Так же целесообразно учитывать и давление в водопроводе и расход в каждую единицу времени. Тогда по

результатам контроля параметров воды и с учетом ее потребления становится возможным осуществление оптимальных взаиморасчетов между поставщиком и потребителем воды.

Кроме того, что при этом исключается вольный или невольный субъективизм в результатах контроля качества и количества потребленной питьевой воды, следует ожидать и повышения точности этого контроля, а это создает предпосылки к обеспечению потребителей питьевой водой надлежащего качества, к объективной оценке взаимоотношений между поставщиком и потребителем, а также — к автоматизированному регулированию содержания водопроводных сетей, качества воды и ее расхода.

Желаемой цели в первом приближении можно достичь, воспользовавшись уже известным устройством ([2] или [3]) для регулирования водопотребления (см. **рис. 1**), содержащим генератор эталонных импульсов (ГИ), датчик давления (ДД) в водопроводе, датчик скорости расхода (ДР) воды, датчик солености воды (ДС), датчик прозрачности (ДП), датчик концентрации хлора (ДХ) в воде, суммирующий счетчик импульсов (СИ), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), кольцевой регистр сдвига (РС), дешифраторы (ДШ), элемент ИЛИ, группы элементов И (ИИ), элемент задержки (ЭЗ), блок умножения (БМ), регистр оперативной памяти (РОП), формирователь заднего фронта импульса (ФИ), блок суммирования (БС) и индикатор (И).

Это устройство позволяет определить коэффициенты  $K1=f(t)$  — спроса на воду в течение суток (всегда положительный);  $K2=f(P(t))$ , зависящий от текущих значений давления  $P$  в водопроводе;  $K3=f(C(t))$ , зависящий от текущих значений солености  $C$  воды;  $K4=f(L(t))$ , зависящий от текущих значений прозрачности  $L$ ;  $K5=f(X(t))$ , зависящий от текущих значений концентрации хлора  $X$ . Коэффициенты  $K2—K5$  положительны при удовлетворительных значениях параметров  $P(t)$ ,  $C(t)$ ,  $L(t)$  и  $X(t)$  и отрицательны при выходе этих параметров за поле допуска, при превышении ПДК.

Далее, если, например, коэффициенты  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  и  $K4$  принимают значения, как показано на **рис. 2**, параметры  $P(t)$ ,  $C(t)$  и  $L(t)$  — как показано на **рис. 3**, и как показано на **рис. 4**, мгновенные значения потребности в воде  $V$  (пунктир) и фактического ее потребления (штрих-пунктир), то интегральные мгно-

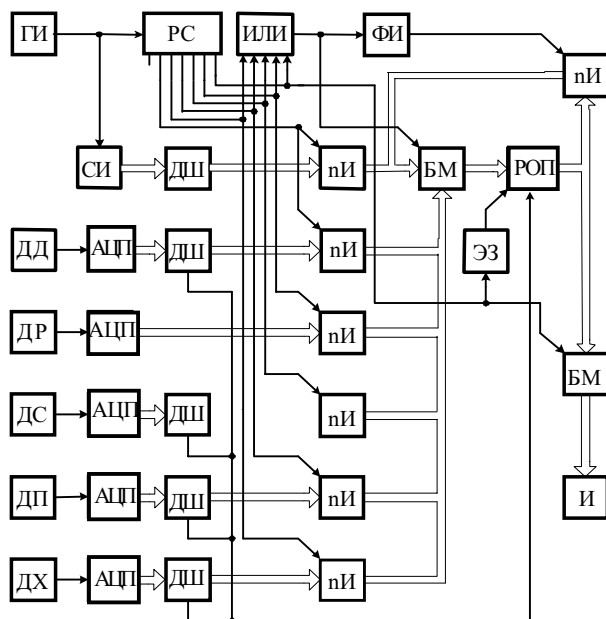


Рис. 1

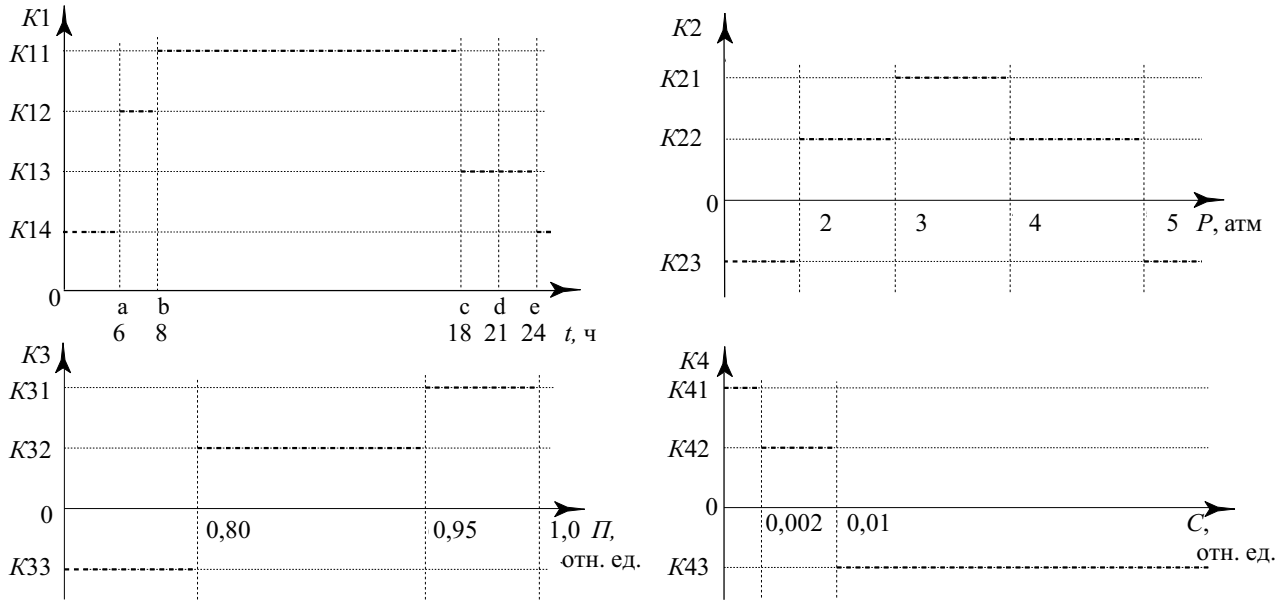


Рис. 2

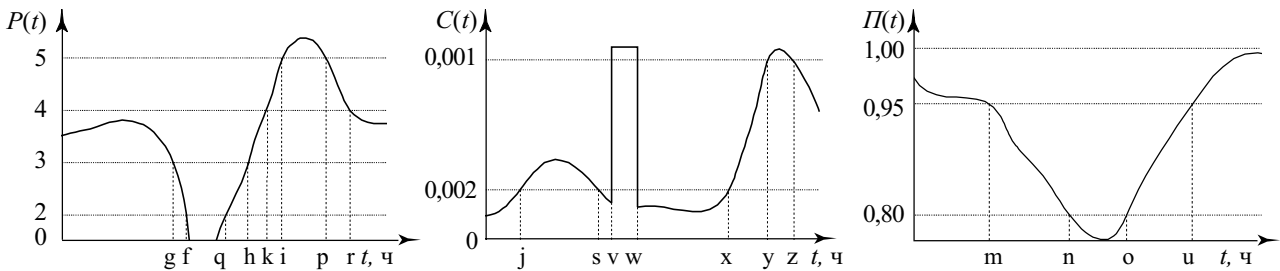


Рис. 3

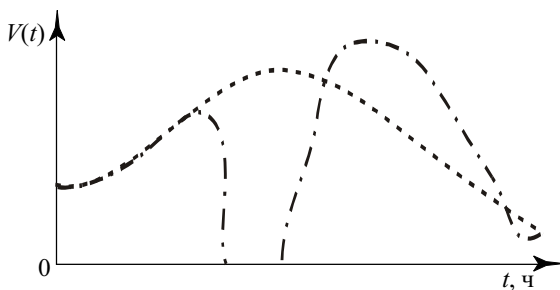


Рис. 4

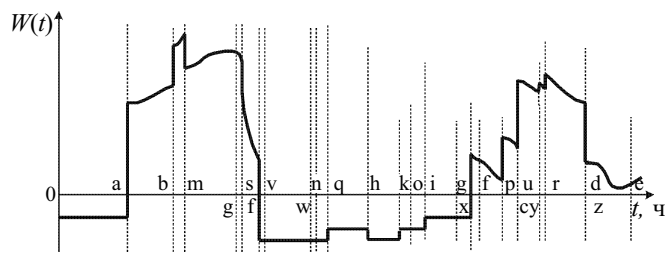


Рис. 5

венные зачетные значения потребления воды  $W(t)$  оцениваются как

$$W(t) = V(t) \cdot K1(t) \cdot K2(t) \cdot K3(t) \cdot K4(t) \cdot K5(t)$$

и принимают вид, представленный на рис. 5.

Тогда за определенный период времени (с  $t_1$  по  $t_2$ ) зачетное значение расхода-потребления воды определяется из выражения

$$W = \int V(t) \cdot K1(t) \cdot K2(t) \cdot K3(t) \cdot K4(t) \cdot K5(t) dt.$$

Описанный подход к анализу и учету водоснабжения позволяет автоматизировать (с помощью инструментальных средств) варьирование зачетных (по совокупности критериев в каждую единицу времени) значений расхода воды.

Автоматическая сертификация качества воды по экологическим показателям, т. е. по концентрации в воде солей и хлора, взвешенных частиц и красящих

веществ, и ее учет по совокупности критериев на отводе к каждому потребителю стимулируют поставщика к заботе о качестве воды, качестве состояния водопроводных сетей и о поддержании нормального давления в них. С другой стороны, применение такого устройства стимулирует потребителя к бережному, особенно в периоды повышенного спроса, расходову воды.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Скубилин М. Д., Стефаненко В. В. О регулировании качества питьевой воды // Природа и человек: взаимодействие и безопасность жизнедеятельности.— Таганрог: ТРТУ, 1996.
2. Заявка 93008722 RU. Устройство для учета водопотребления / М. Д. Скубилин.— 1996.— Бюл. № 34.
3. Заявка 2000031726 UA. Пристрій для диференційного обліку питної води / М. Д. Скубілін, В. К. Стефаненко.—2001.— Бюл. № 8.

К. х. н. Л. А. АЛЬБОТА, д. ф.-м. н. И. М. РАРЕНКО,  
А. Г. ШВЕЦ, И. Л. АЛЬБОТА

Украина, Черновицкий национальный университет  
им. Ю. Федьковича  
E-mail: mikroel@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
06.08 2002 г.  
Оппонент д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ РЕЖИМОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА ПРИ СОЗДАНИИ КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК

*Устройство позволяет в условиях импульсного потенциостатического и гальваностатического режимов электролиза управлять соотношением компонентов в осаждаемых металлических композициях.*

Важной задачей современной технологии производства электронных полупроводниковых приборов является создание надежных электрических контактов, способных выдерживать многократные коммутационные нагрузки и термоциклы. Формирование таких контактов для мощных диодов, транзисторов, тиристоров, печатных плат, фотоэлектронных приборов чаще всего осуществляется напылением металла. Надежные контактные площадки изготавливаются также электролитическим выделением металла постоянным током. Метод позволяет получать структурно совершенные, с высокими электрическими параметрами контакты.

Возникает также необходимость создания контактных слоев из эвтектики — смеси двух или более металлов заданного состава. Это связано с недопустимостью перегрева контактных и, соответственно, приконтактных областей полупроводниковых деталей при создании паяных электрических соединений для широко используемых в ИК-технике фотоприемных элементов, линеек, матриц из ртутных соединений типа  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ,  $Hg_{1-x}Mn_xTe$  или из пересыщенных твердых растворов  $InSb_xBi_{1-x}$ . В процессе присоединения к таким контактным площадкам интегральных преусилителей, мультиплексоров или электрических выводов неприменимы общепринятые термокомпрессионная, ультразвуковая или диффузионная сварка, т. к. их воздействие на полупроводниковые элементы ухудшает фотоэлектрические параметры последних. При получении сплавов двух—трех металлов требуется систематический контроль и коррекция состава электролита [1], потому что изменение концентрации ионов металла в растворе и, особенно, величины рН электролита приводит к существенному изменению состава полученного сплава, а значит, и механических, а также электрических свойств контактов.

Электролиз с применением тока, периодически меняющего свое направление (что обуславливает соответственно и периодическое изменение процессов восстановления и окисления на электродах), имеет

существенное преимущество перед электролизом на постоянном токе [2, 3]. При подаче знакопеременного напряжения возможно увеличение плотности тока на электроде, что равноценно ускорению выделения металла с одновременным избежанием получения неплотного осадка металла и пассивации анода. Электролиз же с применением импульсного режима подачи напряжения на ячейку позволяет изменением амплитуды импульсов напряжения и тока, варьированием длительности импульсов и временных интервалов между ними управлять соотношением компонентов в осаждаемой смеси металлов. Еще в [4] было доказано, что периодическое изменение направления тока ускоряет электроосаждение металлов с учетом их электродных потенциалов. При этом получаются гладкие покрытия с лучшей микроструктурой, адгезией, внешним видом, с меньшей пористостью. К сожалению, этот метод не часто применяется на практике, особенно для получения сплавов металлов.

Нами проводятся систематические исследования по применению электроосаждения в импульсном режиме как отдельных металлов, так и низкотемпературных эвтектических составов In с Bi, In с Sn и др. В этих целях сконструировано, испытано и применяется усовершенствованное устройство, схема и описание функционирования которого представлены в данной статье.

В разработанных ранее устройствах [5, 6] для знакопеременного электролиза используются импульсы напряжения с заданными продолжительностью, полярностью и амплитудой от установленного уровня начального напряжения на электролитической ячейке. Полученные результаты показали необходимость повышения стабильности параметров прямоугольных импульсов напряжения, приложенных к электролитической ячейке, поскольку состав и свойства получаемых металлических осадков в значительной мере зависят от стабильности начального уровня напряжения на ячейке, амплитуды и продолжительности импульсов, а также от величины интервалов между ними (рис. 1). При этом сохраняются все преимущества метода электролиза, в котором направление тока изменяется периодически.

Для стабилизации указанных величин было сконструировано приспособление (рис. 2), в генераторе которого используется интегральная схема DD1 типа K155AG3, содержащая два независимых одновибратора

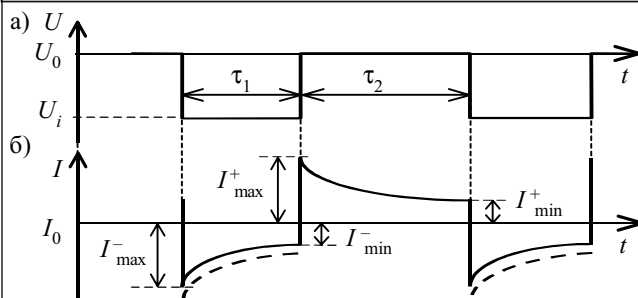


Рис. 1. Диаграмма изменения напряжения  $U$  (а) на электролитической ячейке и тока  $I$  (б), проходящего через нее:  $U_0$  — постоянная составляющая напряжения на ячейке;  $U_i$  — импульсная составляющая;  $\tau_1, \tau_2$  — промежутки времени  $t$

ра. Длительность времени нахождения каждого из одновибраторов в режиме ожидания зависит от параметров их внешних RC-цепей согласно формуле

$$\tau = kRC (1 + 0,7R),$$

где  $0,28 < k < 0,32$ ;  $R = 5 \dots 50$  кОм;  $C$  — не ограничена.

Подключение конденсаторов  $C1—C4$  к одному одновибратору и, соответственно,  $C7—C10$  к другому осуществляется при помощи переключателей  $T1—T4$  и спаренных с ними переключателей  $T5—T8$ , что позволяет ступенчато и независимо изменять промежутки времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , на протяжении которых одновибраторы находятся в режиме ожидания. Эти величины можно плавно изменять при помощи линейных сопротивлений потенциометров  $R1$  и  $R2$ . Описанное схематехническое решение позволяет изменять величины  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в пределах от 0,05 мс до 20 с.

Прямоугольные импульсы напряжения с выхода интегральной схемы  $DD1$  подаются на делитель  $R3$ , а потом — на вход усилителя  $DA1$ . Там же эти колебания суммируются с постоянным напряжением, снимаемым с делителя  $R5$ . Амплитуду колебаний на вхо-

де усилителя, построенного на довольно мощных транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ , можно плавно изменять в пределах  $+1,5 \div -3,5$  В. Необходимость использования таких транзисторов обусловлена тем, что в некоторых экспериментальных условиях создания конкретных приборов через электролитическую ячейку комбинированного переключателя устройства (Ком, рис. 3) иногда могут проходить токи силой до 5 А.

Стабилизацию амплитуды прямоугольных импульсов на электролитической ячейке осуществляет компенсатор, в состав которого входят усилитель  $DA1$  (рис. 2), электролитическая ячейка Ком, сопротивление нагрузки которой  $R_{ст}$ , и комбинированный переключатель  $P1—P6$  (рис. 3). Последний осуществляет полную обратную связь компенсатора с инверсным входом  $DA1$  (рис. 2). При переводе переключателя  $P1—P6$  в положение 2 двухканальный осциллограф  $C1-93$  и цифровой вольтметр  $V$  (B7-21A) позволяют измерять и определять характер напряжений, приложенных к ячейке, их временные и амплитудные характеристики во время импульсов, а также величину и изменения величины проходящих через электролитическую ячейку импульсов тока. Когда переключатель  $P1—P6$  находится в положениях 2 и 3, электролиз растворов проводится в условиях потенциостатического [7, с. 17—21] режима. В этом случае компенсатор компенсирует уменьшение напряжения на ячейке Ком на величину падения напряжения на сопротивлении нагрузки  $R_{ст}$  ячейки, роль которого исполняет магазин сопротивлений  $P3$ .

При переводе переключателя в положения 4 и 5 изменяется последовательность соединения ячейки и сопротивления  $R_{ст}$ . В этом случае компенсатор стабилизирует величину тока, проходящего через ячейку во время импульса. В этом положении электрохимический процесс проводится в условиях импульс-

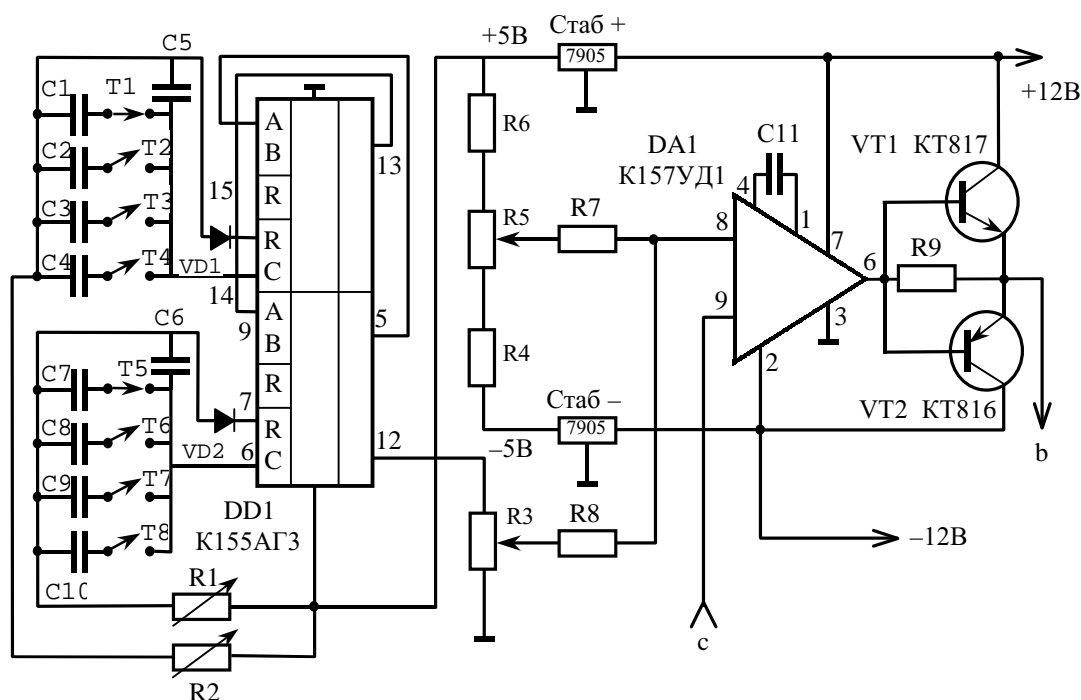


Рис. 2. Принципиальная схема генератора и компенсатора устройства

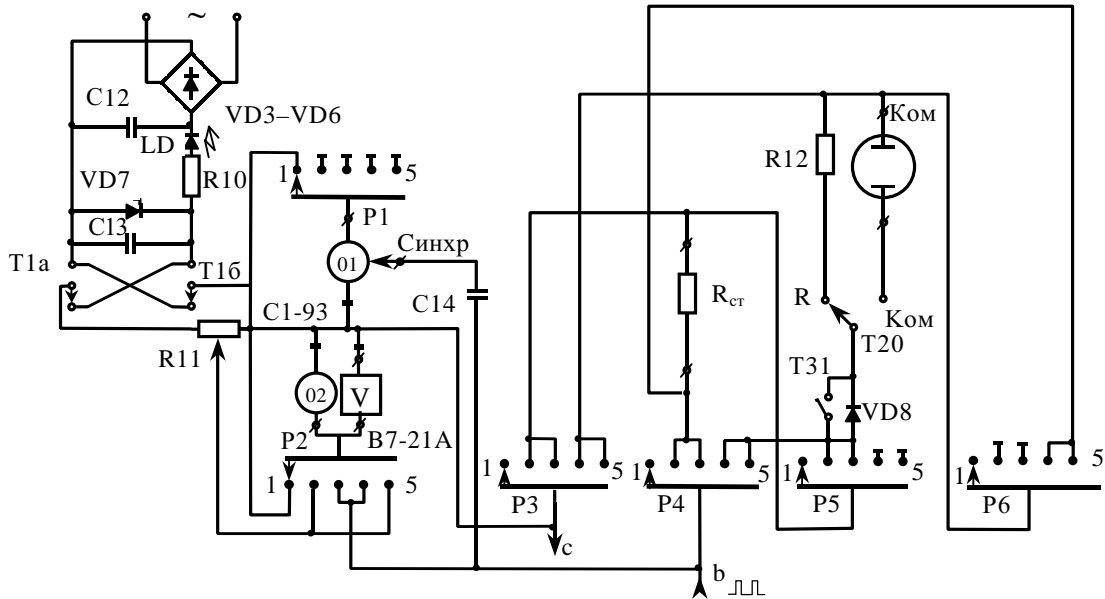


Рис. 3. Комбинированный переключатель устройства

ного гальваностатического [7, с. 17—21] режима. (Хорошо известно, что потенциостатический и гальваностатический импульсные режимы отличаются условиями проведения электрохимического процесса. Потенциостатический режим позволяет избирательно выделить один металл из раствора, а гальваностатический — ускорить процесс электролиза.)

При нахождении переключателя в положении 1 на экране осциллографа появляются горизонтальные (нулевые) линии обоих его каналов (1 и 2), которые перед измерением совмещают с “нулевой” горизонтальной линией на калибровочной сетке электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). При переводе переключателя P1—P6 в положение 2 прибор переходит в потенциостатический импульсный режим и на экране осциллографа появляется зависимость изменения во времени напряжения на ячейке (канал 2), а на канале 1 — горизонтальная линия на расстоянии от “нулевой” линии на величину, пропорциональную калибровочному напряжению, снятому с делителя R11 (рис. 3) и измеренному цифровым вольтметром V. Это дает возможность определить величину напряжения, приложенного к электролитической ячейке. Полярность калибровочного напряжения на экране ЭЛТ изменяется при помощи переключателя T1a—T16. Светодиод LD исполняет роль сопротивления нагрузки стабилизатора VD7 и индикатора включения прибора. В положении 3 переключателя канал 1 осциллографа регистрирует зависимость изменения во времени напряжения на ячейке, а канал 2 — величину тока, проходящего через ячейку во время импульса.

При переводе переключателя P1—P6 в положение 4 и 5 прибор переходит в гальваностатический импульсный режим электролиза. Тогда канал 2 отображает изменение во времени напряжения на ячейке, а канал 1 — зависимость величины тока, проходящего через нее во время импульса.

Для проведения тестовых исследований во всех случаях, кроме растворов, использованных

для построения зависимости рис. 4, использовался электролит следующего состава:  $\text{NiSO}_4$  —  $200 \text{ г}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  —  $30 \text{ г}^{-1}$ ,  $\text{NaCl}$  —  $10 \text{ г}^{-1}$ . Для построения зависимости рис. 4 использовались растворы с возрастающей концентраций  $\text{NiSO}_4$  в электролите.

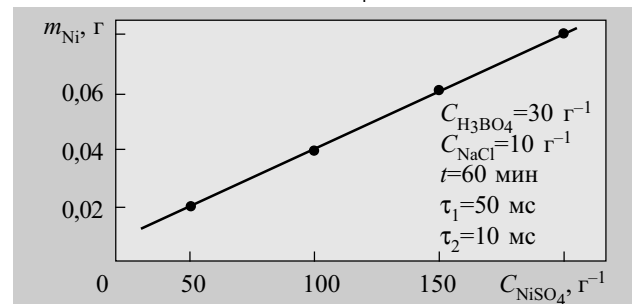


Рис. 4. Зависимость массы ( $m$ ) выделенного никеля во время электролиза от концентрации ( $C$ ) сульфата никеля в электролите

Необходимо отметить, что во всех тестовых экспериментах анодом служила никелевая пластина площадью  $18,4 \text{ см}^2$ . Никель во всех случаях выделялся на платиновом, предварительно очищенном в растворе азотной кислоты (1:1), электроде площадью  $2 \text{ см}^2$ . Исследования проведены при комнатной температуре. Постоянная составляющая напряжения на ячейке равнялась  $0 \text{ В}$ , а импульсная —  $-1,8 \text{ В}$ .

Из рис. 4 следует, что при постоянных интервалах  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и времени  $t$  проведения электролиза масса выделенного никеля на электроде линейно растет с увеличением концентрации ионов никеля в электролите. Эта зависимость подтверждает правильность работы прибора (отвечает закону электролиза Фарадея). Значительная разница площадей поверхностей электродов анода и катода указывает на незначительную поляризацию анода.

Как и следовало ожидать, с увеличением времени электролиза прямо пропорционально возрастает и масса выделенного металла (рис. 5), что также отве-

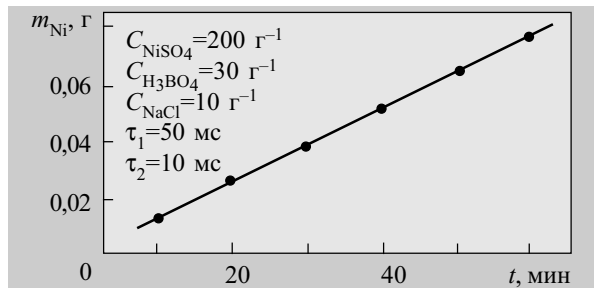


Рис. 5. Зависимость массы выделенного никеля от продолжительности электролиза

чает закону Фарадея и подтверждает правильность работы устройства.

При увеличении катодного промежутка времени ( $\tau_1$ ) электрода и неизменном анодном интервале времени ( $\tau_2$ ), как это видно из рис. 6, увеличивается масса выделенного никеля. Нарушение линейности в графической зависимости при малых величинах  $\tau_1$  можно объяснить значительным количеством растворяю-

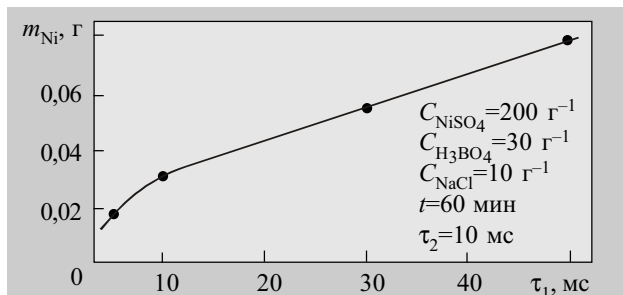


Рис. 6. Зависимость массы выделенного никеля во время электролиза от величины протяженности катодного импульса тока  $\tau_1$  при постоянной величине  $\tau_2$

щегося никеля во время промежутков  $\tau_2$ . Это подтверждается уменьшением массы выделенного электролизом никеля, когда увеличивается анодный интервал ( $\tau_2$ ) напряжения на ячейке при постоянном катодном промежутке времени ( $\tau_1$ ) (рис. 7). Если  $\tau_1 = \tau_2$ , масса выделенного никеля оказывается равной нулю.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что процесс восстановления никеля на электроде протекает обратимо, и его скорость мало отличается от скорости процесса его растворения во время анодных импульсов тока. Проведенные исследования процессов электрохимического восстановления некоторых металлов (никеля, меди и др.) с помощью им-

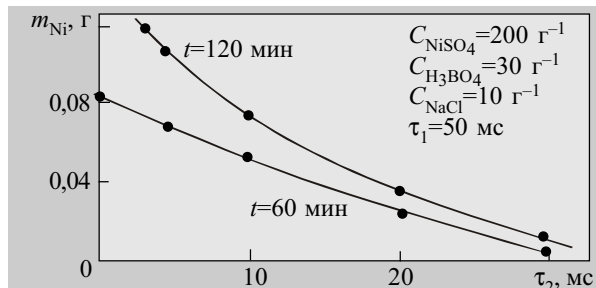


Рис. 7. Зависимость массы выделенного никеля во время электролиза от величины протяженности катодного импульса тока  $\tau_2$  при постоянной величине  $\tau_1$

пульсных токов показали, что масса полученных металлических осадков зависит не только от концентрации ионов этих металлов в растворах, потенциала электрода, полярности и амплитуды наложенных импульсов напряжения, но и от величины промежутков времени, когда электрод исполняет катодную ( $\tau_1$ ), а также анодную ( $\tau_2$ ) функции.

\*\*\*

Предлагаемое устройство может использоваться при проведении управляемого электроосаждения различных металлов и их смесей, а также для исследования закономерностей импульсного электролиза в разнообразных условиях.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вячеслав П. М. Покрытия сплавами.— М.—Л.: ГНТИ машиностр. лит-ры, 1961.
2. Бибииков Н. Н. Гальванические покрытия на токе переменной полярности.— Там же, 1958.
3. Костин Н. А., Кублановский С. С., Заблудовский В. А. Импульсный электролиз.— К.: Наук. думка, 1989.
4. Бороздина М. С., Лукашова П. С., Дубровин В. В. Ускоренное электроосаждение меди, цинка, латуни из цианистых электролитов при периодическом изменении направления постоянного тока.— М.—Л.: ИТЭИН, 1954.
5. Альбота Л. О., Деревенко В. В., Раренко І. М., Швець О. Г. Пристрій для створення стійких металічних контактів в напівпровідникових приладах за допомогою електролізу // Наук. вісн. Чернівецького ун-ту.— 1999.— Вип. 50. Фізика.— С. 94—96.
6. Швець О. Г., Альбота Л. О., Альбота І. Л., Раренко І. М. Електронний пристрій для створення стійких металічних контактів в напівпровідникових приладах за допомогою електролізу // Там же.— 2001.— Вип. 102. Фізика.— С. 47—50.
7. Скуг Д., Уэст Д. Основы аналитической химии. Т. 2.— М.: Мир, 1979.

К. т. н. С. В. АМБРОСОВ

Украина, Одесский гос. экологический университет  
E-mail: glushkov@paco.net

Дата поступления в редакцию  
26.11 2001 г. — 29.05. 2002 г.

Оппоненты д. т. н. И. И. ШУМЛЯНСКИЙ  
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса),  
д. ф.-м. н. Н. Н. БЕРЧЕНКО  
(НУ "Львовская политехника", г. Львов)

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ФОТОИОНИЗАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ВЕЩЕСТВА НА АТОМНОМ УРОВНЕ

*Предложена методика компьютерного моделирования параметров оптимальных технологических схем контроля и очистки вещества на атомном уровне на примере полупроводниковых материалов.*

К числу актуальных задач современной технологии полупроводниковых (и других) материалов относится разработка эффективных методов получения особо чистых веществ или контроля и очистки вещества от примесей. Речь, в частности, идет о методах контроля в германии примесей алюминия, бора и других акцепторных элементов третьей группы на уровне  $10^{-8}$ — $10^{-10}$  %. В некоторых случаях такую чувствительность анализа могут обеспечить традиционные аналитические методы [1] или их модификации (атомно-флуоресцентная спектрометрия, нейтронно-активационный анализ, искровая масс-спектрометрия, др.). Однако в большинстве случаев их чувствительность ограничена уровнем  $10^{-7}$  %.

Методы селективной фотофизики (см., напр., [2—7]), первоначально разрабатываемые для решения задач разделения изотопов, газов и т. д., дают возможность развить новый подход к технологии получения чистых материалов на атомном уровне. С помощью лазерного излучения имеется возможность непосредственного манипулирования атомами данного сорта, в т. ч. можно собирать макроколичества вещества по одному атому. В последние годы исследованию лазерных фотоионизационных технологий уделяется значительное внимание (напр. [5—7]). Важным результатом использования искомой лазерной технологии является принципиальная возможность получения особо чистых веществ в атомном состоянии, сплавов, пленок [2—11]. Основой успешной ее реализации являются, во-первых, разработка оптимальных схем многоступенчатой фотоионизации (ФИ) различных элементов, во-вторых, разработка достаточно эффективных лазеров УФ- и видимого диапазонов с перестраиваемой частотой, высокой средней мощностью, большим ресурсом. Как первая, так и вторая задачи в настоящее время еще далеки от своего удовлетворительного решения.

Автор выражает глубокую благодарность В. М. Белоусу и А. В. Глушкову за полезное обсуждение проблемы и ценные консультации.

Данная работа посвящена поиску и компьютерному моделированию оптимальных схем лазерных ФИ-технологий контроля и очистки вещества на примере рассмотрения ФИ-анализа примесей Al в Ge. Такая постановка задачи экспериментально рассмотрена в [3, 4].

К важнейшим критериям оптимальности и эффективности схем многоступенчатой селективной ФИ атомов относятся минимальность требуемых плотностей энергии лазерных импульсов, максимальность выхода и селективности ионизации. Оптимальной является схема, когда при умеренных требованиях к параметрам лазерного импульса путем соответствующего подбора длительностей, формы импульсов и характеристик квантовых переходов удается добиться максимального (вплоть до 100%) выхода ионизации. Задача построения оптимальных схем сводится к поиску оптимизированных значений всех указанных характеристик схемы. Трудности расчета оптимальных схем ФИ связаны как с известными экспериментальными сложностями, так и с существенными проблемами теоретического описания процессов в искомым схемах (оптимизационные ФИ-модели на основе формализма матрицы плотности или скоростных уравнений, автоионизации в атомах, штарковские и ридберговские резонансы в электрическом поле и т. д.) (см. [1—17]).

В классическом варианте схемы лазерное возбуждение атомов примесей реализуется в несколько этапов: на первом этапе атомы возбуждаются посредством резонансного лазерного излучения, затем проводится ФИ возбужденных атомов (см. [2—10]). Искомая нерезонансная ФИ (рис. 1, I) характеризуется относительно низким сечением  $\sigma_{\text{ион}}$  ( $10^{-17}$ ... $10^{-18}$  см<sup>2</sup>) и требует применения мощного лазерного излучения на этапе ионизации. Другой механизм — перевод атомов в ридберговские состояния и ионизация электрическим полем (рис. 1, II,  $\sigma_{\text{ион}} = 10^{-14}$  см<sup>2</sup>). Этот метод позволяет снизить требование к энергетике ионизирующего импульса на несколько порядков. Третья возможность (рис. 1, III,

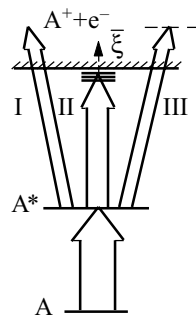


Рис. 1. Схема ступенчатой лазерной фотоионизации атомов

$\sigma_{\text{ион}} = 10^{-15} \dots 10^{-16} \text{ см}^2$ ) связана с использованием автоионизационных уровней атомов, которые, однако, имеются в спектрах лишь тяжелых элементов. Хотя многие из указанных процессов ФИ качественно достаточно адекватно описываются упрощенными моделями, полная, количественная теория этих процессов отсутствует до сих пор (см. [2, 7—11]). Ниже рассмотрен второй метод как наиболее универсальный для применения в технологии очистки материалов.

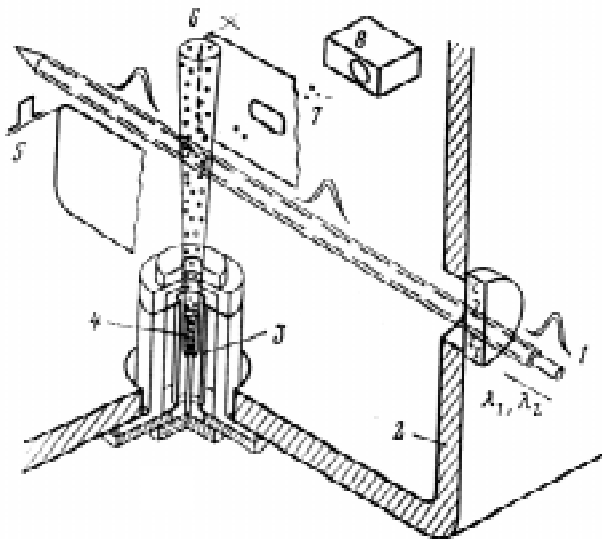


Рис. 2. Схема эксперимента:

1 – лазерные лучи; 2 – вакуумная камера; 3 – танталовый или графитовый нагреватель; 4 – тигель с образцом; 5 – импульс электрического поля; 6 – атомный пучок; 7 – ионы; 8 – умножитель

В экспериментах [2, 4] для определения примесей Al использовались образцы высококочистого Ge массой 3—30 мг. Лазерная часть установки включает лазер накачки ( $N_2$ -лазер, АИГ:Nd-лазер) и три одновременно возбуждаемых лазера на красителях с перестраиваемой частотой. Такая система позволяет получать плавно перестраиваемую гармонику в диапазоне 350—750 нм с энергией в импульсе до 100 мкДж и 2-ю гармонику в области 230—350 нм с энергией, достаточной для насыщения УФ-переходов атомов. В процессе анализа исследуемый образец помещается в тигель внутри графитовой трубки, разогреваемой электрическим током до температуры около 3000°C. Испаряющееся вещество формируется цилиндрическим каналом тигля в атомно-молекулярный пучок, который облучается лазерными импульсами в области между электродами (рис. 2). После возбуждения атомов в ридберговское состояние на электроде с задержкой 20—30 нс подавался ионизирующий импульс электрического поля прямоугольной формы длительностью 10 нс, амплитудой до 15 кВ. Образующиеся ионы выталкивались тем же ионизирующим импульсом через щель в электроде и регистрировались электронным умножителем.

Моделирование оптимальной схемы искомой технологии контроля и очистки вещества проводилось на основе методов теории оптимального управления и физических моделей нелинейных селек-

тивных ФИ-процессов в поле лазерного излучения [2, 3, 7—11, 17]. Этап оптимизации модели выделения примеси в веществе состоит в поиске оптимальной формы электромагнитного импульса резонансного излучения, обеспечивающую максимум ионизованных частиц в схеме (одна из возможных формулировок). Процесс разделения описывается следующей системой уравнений ([8—11]):

$$\begin{aligned} d\rho_0/dt &= -W_1(\rho_0 - \rho_1) + \rho_1 T_1 + K_1 \rho_0' \rho_1; \\ d\rho_1/dt &= -W_1(\rho_0 - \rho_1) - \rho_1 T_1 - R\rho_1 - K_1(\rho_0' \rho_1 - \rho_1' \rho_0); \\ d\rho_0'/dt &= -W_1(\rho_0' - \rho_1') + \rho_1' T_1 + K_1 \rho_0 \rho_1'; \\ d\rho_1'/dt &= -W_1(\rho_0' - \rho_1') - \rho_1' T_1 - R\rho_1' - K_1(\rho_0 \rho_1' - \rho_1 \rho_0'); \\ dn/dt &= R\rho_1 - n_1(K_2^{(0)} \rho_0' - K_2^{(1)} \rho_1') + n'(K_2^{(0)} \rho_0 - K_2^{(1)} \rho_1) - n/\tau; \\ dn'/dt &= R\rho_1' - n_1'(K_2^{(0)} \rho_0 - K_2^{(1)} \rho_1) + n'(K_2^{(0)} \rho_0' - K_2^{(1)} \rho_1') - n'/\tau, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho_0, \rho_0'$  — концентрации атомов вещества и примеси в основном состоянии;

$\rho_1, \rho_1'$  — в возбужденном состоянии;

$t$  — время;

$T$  — время продольной релаксации;

$K_1, K_2$  — коэффициенты, определяют соответственно скорости процесса резонансной передачи энергии возбуждения ( $K_1 = \sigma_w v$ ;  $\sigma_w$  — сечение Вайскопфа,  $v$  — скорость атомов) и скорость процесса перезарядки ( $K_2 = \sigma_{ch}(v_i) v_i$ ;  $\sigma_{ch}(v_i)$  — сечение резонансной перезарядки,  $v_i$  — скорость ионов относительно нейтральных атомов);

$R$  — вероятность ионизации полем;

$\tau = \gamma t$  — безразмерное время ( $\gamma$  — вероятность спонтанного распада в единицу времени);

$n, n'$  — концентрации ионов атомов в основном и в возбужденном состоянии, соответственно;

$W_1, W_2$  — вероятности радиационных переходов, которые определяются следующими выражениями (2) —

$$W_1 = I_1 \sigma_1(\omega) \hbar \omega_1 = I_1 (16\pi/cT_2) (\mu_{01}/2\hbar)^2 [(1/T_2)^2 + (\omega - \omega_{01})^2]^{-1};$$

$$W_2 = I_2 \sigma_2'(\omega) \hbar \omega_2 = I_2 (16\pi/cT_2) (\mu_{01}/2\hbar)^2 [(1/T_2)^2 + (\omega - \omega_{01}')^2]^{-1},$$

где  $I_1$  — интенсивность поля резонансного излучения;

$T_2$  — время поперечной релаксации, остальные обозначения стандартные.

Аналитическое решение системы (1) найти не удастся, поэтому задача решается численно (используется численный атомный код "Superatom" [12—17, 8—11]). Система (1) может быть сведена к линейной при условии, что лазерное излучение воздействует на наиболее редкий из двух изотопов и концентрация этого изотопа мала. Кроме того, предполагается выполнение условий, при которых вероятность резонансного обмена меньше скорости ионизации, т. е.  $W_2 > \sigma_w v_f N$ , где  $N$  — концентрация сталкивающихся атомов, и время вывода ионов из облака нейтральных атомов меньше времени перезарядки, т. е.  $N \sigma_{ch} d < 1$ . В этом случае решение системы (1) существенно упрощается.

Все необходимые для решения значения физических параметров взяты из работ [2—4, 16, 17] и соответствуют значениям параметров эксперимента [4]. Детали численной процедуры приведены в [12—17].

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования оптимальной формы лазерного импульса в задаче ФИ-выделения примесей Al в Ge ( $\tilde{u}$  — оптимальное управление;  $\delta$ +пунктир — оптимальная форма лазерного импульса;  $\tau$  — безразмерное время). Схема селективной ФИ включала на первом эта-

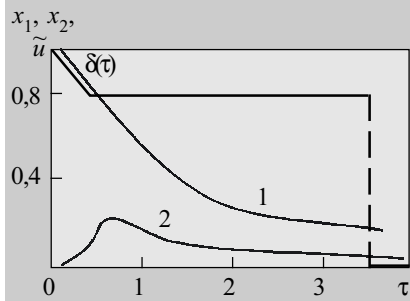


Рис. 3. Результаты моделирования процесса выделения примесей Al в образце Ge

пе возбуждение лазерным излучением атома с его переводом в ридберговское состояние и, далее, ионизацией электрическим полем в соответствии с экспериментом [2, 4] (схема переходов:  ${}^2P_{3/2} \rightarrow (\lambda_1=396,3 \text{ нм}) \rightarrow {}^4S_{1/2} \rightarrow (\lambda_1=446,4 \text{ нм}) \rightarrow {}^2P_{3/2}$ ). На рисунке приведены численно рассчитанные зависимости нормированных заселенностей основного  $x_1$  (кривая 1) и возбужденного  $x_2$  (кривая 2:  $x_2=r_1'/r_0'$ ) состояний. Интересно отметить, что искомые результаты качественно аналогичны данным, соответствующим схеме селективной ФИ со столкновительно-ионизационным сценарием ([10, 11]). Для искомой схемы опторазрядного разделения  $\delta$ -импульс обеспечивает максимально возможный уровень возбуждения верхнего состояния (см. рис. 3: через интервал времени  $\tau=0,6$  степень возбуждения достигает  $\sim 0,2$ ; в эксперименте с чисто прямоугольным импульсом искомая степень  $\sim 0,1$ ).

Паразитные процессы типа спонтанной релаксации, резонансной передачи возбуждения и резонансной перезарядки не могут за малое время заметно изменить степень достигнутого возбуждения. В результате оптимальность всей схемы увеличивается (выше, чем при использовании прямоугольного импульса в эксперименте [4]). В случае невыполнения вышеуказанных условий оптимальный режим лазерного воздействия будет содержать в конце пассивный участок управления, впервые предсказанный для схемы классической фотоионизации в модели [3]. Его появление связано с конечной скоростью ионизации и следующей отсюда неэффективностью вклада энергии в резонансный канал в конце процесса.

Последняя стадия процесса — ионизация возбужденных атомов ионизирующим импульсом однородного электрического поля (в эксперименте [4] напряженность поля составляла 15 кВ/см). Для достижения оптимальности процесса электрическое поле следует включать за время, малое в сравнении с временем радиационного распада возбужденного состояния.

На рис. 4 приведены результаты нашего расчета зависимости скорости ионизации высоковозбужденного атома Al от напряженности электрического поля  $\epsilon$  (состояния с квантовыми числами  $n=10—16$ ;  $m=0$ ), выполненного на основе релятивистской операторной теории возмущений для атома в однородном электрическом поле [17, 14]. Пунктирная линия показы-

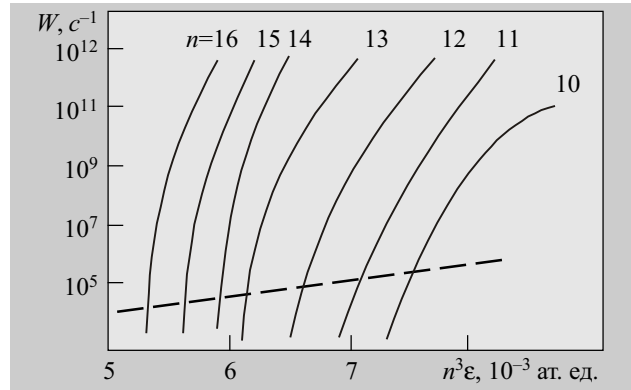


Рис. 4. Теоретически рассчитанная зависимость скорости ионизации ( $W$ ) высоковозбужденного атома Al от напряженности электрического поля для состояний с  $n=10—16$ ,  $m=0$ ,  $n_2=n-1$

вает скорость радиационного распада. Отметим, что для Al ситуация оказывается качественно аналогичной ситуации с атомами щелочных элементов [17] (см. также [2]), что вполне естественно, поскольку в указанных ридберговских состояниях атомы проявляют качественно свойства водородоподобного поведения (количественные отличия, разумеется, есть). Для состояний с  $n>14$  скорость ионизации превышает скорость радиационного распада при  $\epsilon$ , меньшей чем 15 кВ/см. Отметим, что и в случае выбора импульса электрического поля аналогично предыдущей стадии использование  $\delta$ -импульсного приближения может обеспечить быструю ионизацию, однако вследствие застревания на промежуточных уровнях выход ионизации атомов будет  $< 100\%$ .

Во всяком случае, изложенная нами ФИ-схема с оптимальным набором основных энергетических и радиационных параметров (форма, длительность, энергетика для импульсов лазерного или электрического полей; выбор соответствующих возбужденных состояний атомов с необходимыми оптимальными значениями радиационного или автоионизационного в поле распада и т. д.) может обеспечить значительно более высокий выход и, в результате, эффективность всего процесса, чем, например, примененная в эксперименте [4] ФИ-схема.

\* \* \*

Таким образом, в данной работе нами впервые предложена и численно реализована методика поиска и численного моделирования оптимальных схем лазерных ФИ-технологий контроля и очистки вещества на атомном уровне (на примере анализа примесей Al в Ge), позволяющая выбирать как оптимизированные значения ключевых физических параметров фотоионизационной схемы (характеристики атомных переходов, параметры импульсов лазерного, однородного электрического полей и т. д.), так и наиболее оптимальный вариант схемы в целом, что в результате может обеспечить и эффективность технологии.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вайнфорднер Дж. Спектроскопические методы определения следов элементов.— М.: Мир, 1979.
2. Летохов В. С. Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах.— М.: Наука, 1998.

3. Краснов И. В., Шапарев Н. Я., Шкедов И. Оптимальные лазерные воздействия.— Новосибирск: Наука, 1993.

4. Беков Г. И., Радаев В. Н. Лазерный фотоионизационный метод определения следов элементов в веществе // Изв. АН СССР. Сер. Физ. — 1984.— Т. 48, № 4.— С. 571—578.

5. Stoll W. Present status of industrial isotope separation by laser technology // Atomic and Molecular Pulsed Lasers.— Tomsk: SO RAN, 2001.— P. 71.

6. Buchanov V. V., Kazaryan M. A., Kalugin M. M., Prokhorov A. M. Laser separation of silicon isotopes by the AVLIS technology // Ibid. — P. 70.

7. Glushkov A. V., Ambrosov S. V., Shpinareva I. M. Non-linear selective photoprocesses in atoms and molecules and their optimal governing. Optimized isotope separation schemes // Ibid. — P. 70

8. Ambrosov S. V. Selective ionization of atoms and molecules by electric and laser field. Autoionizing Rydberg resonances in heavy atoms // Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Сер. Фіз.— 2000.— Т. 8, ч. 2.— С. 308—316.

9. Ambrosov S. V. Selective photoionization of atoms by laser field: optimal scheme. Autoionization Rydberg resonances in heavy atoms // Photoelectronics.— 2001.— Vol. 10.—P. 112—115.

10. Амбросов С. В. Селективная фотоионизация атомов: резонансная перезарядка в парах щелочных элементов и урана // Фотозлектроника.— 2002.— Т. 11.— С. 40—42.

11. Амбросов С. В. Оптимальные схемы опторазрядного разделения газов // Физика аэродисперсных систем.— 2001.— Т. 11.— С. 113—116.

12. Ivanov L. N., Letokhov V. S. Spectroscopy of autoionization resonances in heavy elements atoms // Com. Mod. Phys. D.: At. Mol. Phys.— 1985.— Vol. 4.— P. 169—184.

13. Glushkov A. V., Ivanov L. N. Radiation decay of atomic states: atomic residue and gauge noninvariant contributions // Phys. Lett. A.— 1992.— Vol. 170, N 1.— P. 33—37.

14. Glushkov A. V., Ivanov L. N. DC strong-field Stark-effect: consistent quantum-mechanical approach // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.— 1993.— Vol. 26, N 16.— P. L379—L386.

15. Ivanov L. N., Ivanova E. P., Knight L. Energy approach to consistent QED theory for calculation of electron-collision strengths // Phys. Rev. A.— 1993.— Vol. 48, N 6.— P. 4365—4374.

16. Глушков А. В., Малиновская С. В., Филатов В. В. Расчет спектроскопических характеристик Al-подобных ионов методом модельного потенциала // Оптика и спектроскопия.— 1987.— Т. 62, № 6.— С. 1212—1215.

17. Ambrosov S. V., Glushkov A. V. Atom in a DC electric field: relativistic operator perturbation theory method // Proc. European Science Foundation REHE School and Workshop on "Spin-Orbit Coupling in Chemical Reactions".— Torun, Poland.— 1998.— P. 23.



**ЧИТАЙТЕ,  
ПУБЛИКУЙТЕСЬ,  
ВЫПИСЫВАЙТЕ!**

**ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ**

**ISSN 0234-6206**

**Международный научно-технический журнал, периодичность — 4 номера в год.**

**Начало издания — 1982 г. Журнал зарегистрирован в ВАК РФ.**

**Главный редактор академик РАН К. В. Фролов**

**Ответственный секретарь канд. техн. наук А. М. Костин**

*Журнал публикует результаты научных исследований и практических разработок в России и за рубежом по актуальным проблемам машиностроения, а также материалы (обзоры, статьи, сообщения) о передовом опыте, новых материалах и прогрессивных технологиях, включая проблемы управления и автоматизации.*

*Язык публикаций — русский или английский.*

*Для научных, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов.*

**Заказы на журнал в России принимаются непосредственно редакцией:**

**Россия, 101990, Москва,**

**Лубянский проезд, 5, к. 502,**

**Московский городской центр**

**научно-технической информации**

**Тел.: (095) 921 24 40**

**Факс: (095) 928 60 39**

**E-mail: [MOSCNTI.RIR@g23.relcom.ru](mailto:MOSCNTI.RIR@g23.relcom.ru)**

**<http://www.rosinf.ru/editions/pmea/issues/>**

**Адрес для заказов от зарубежных подписчиков:**

**Россия, 129110, Москва**

**ул. Гиляровского, 39**

**ЗАО “МК -Периодика”**

**Тел.: (095) 284 50 08**

**Факс: (095) 281 37 98**

**E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)**

**<http://www.periodicals.ru>**

Д. т. н. И. Е. МАРОНЧУК, к. т. н. Б. П. МАСЕНКО,  
д. х. н. М. В. ПОВСТЯНОЙ, к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ,  
О. В. СОЛОВЬЕВ

Украина, Херсонский гос. технический университет, Одесская  
нац. морская академия  
E-mail: alexb@selen.kherson.ua

Дата поступления в редакцию  
27.08 2002 г.

Оппонент д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА РИСОВОЙ ЛУЗГИ

*Предложена технологическая схема получения кремния "солнечного" класса из рисовой лузги для производства полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей.*

Последние годы характеризуются широким внедрением в энергетику развитых стран мира нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ).

Программа развития НВИЭ в Украине предусматривает достижение к 2010 году около 1000 МВт энергии, получаемой за счет использования устройств и установок тепловой гелиоэнергетики и фотоэлектрических станций прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

Темпы развития мирового производства полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) за последние 10 лет составили более 40%. Вместе с тем мировой рынок фотоэнергетики испытывает острый дефицит металлургического кремния. Это относится и к Украине, где нет разведанных и освоенных месторождений кварцитов (кремнеземов) с содержанием диоксида кремния, достаточным для производства металлургического кремния.

Этим обстоятельством объясняется резкое снижение объемов производства в Украине кремния электронных марок и "солнечного" класса (СК) для ФЭП на ранее передовых в отрасли предприятиях страны — Запорожском титано-магниевом комбинате и ОАО "Чистые металлы" (г. Светловодск). Как следствие, производство ФЭП на основе полупроводникового кремния в Украине находится на весьма низком уровне.

Кроме того, рынок сбыта фотоэлектрических модулей в значительной мере лимитируется их высокой стоимостью ( $\geq 3$  \$/Вт), при этом около 50% ее приходится на материал — кремний электронных марок. Для получения такого кремния в настоящее время в основном используется технология, включающая последовательно процессы карботермического восстановления высокочистых кварцитов, хлорирования полученного металлургического кремния, ректификацию и водородное восстановление трихлорсилана, изготовление слитков моно- или поликристаллического кремния. Себестоимость кремния электронных марок для производства ФЭП составляет 30—40 \$/кг. Все это вызывает необходимость проведения иссле-

дований по использованию нетрадиционных источников сырья.

Одним из таких источников сырья для получения кремния является рисовая лузга (1/5 массы риса), которая содержит 15—20% диоксида кремния. Уровень содержания примесей, в том числе электрически активных (В, Р, Сu, Fe, Ti и др.), в таком диоксиде кремния значительно ниже, чем в природных кварцитах. Привлекательность использования рисовой лузги для получения кремния заключается также в том, что она является бросовым отходом переработки риса, причем утилизация этих отходов проблематична с экологической точки зрения [1].

Предложенная специалистами США [2] схема получения кремния СК из рисовой лузги включает процессы отмывки, выщелачивания, коксования в процессе пиролиза с целью получения композитного материала из углерода и SiO<sub>2</sub> (2:1) и восстановления кремния. Следует отметить, что для двух последних процессов не требуется углеродный восстановитель, т. к. в исходной лузге содержание углерода к SiO<sub>2</sub> соотносится как 4:1. Полученный таким образом кремний имеет чистоту 99,993 мас.% и после дополнительной кристаллизационной очистки удовлетворяет требованиям Si (СК), пригодного для ФЭП. В работе [4] производство Si (СК) из рисовой лузги включает процессы отмывки лузги, окислительного обжига, выщелачивания „белой золы”, восстановления кремния кальцием или магнием и двукратной кристаллизационной очистки полученного кремния.

Себестоимость получаемого кремния составляет 15 — 20 \$/кг, а изготовленные на его основе ФЭП имеют КПД  $\geq 12\%$  (АМ 1,5). Замечательно и то, что образующиеся в процессе получения Si (СК) промежуточные продукты "черная сажа" и "белая зола" имеют спрос на рынке. В частности, "черная сажа" используется в качестве сорбента при утечках нефтепродуктов, для очистки сточных и природных вод, в качестве наполнителей в резинотехнической промышленности, а "белая зола" находит применение в производстве косметики.

В настоящей работе с помощью спектрографа ДФС-8 проведен анализ проб лузги риса, выращиваемого в Украине (Херсонская обл.). Как следует из **таблицы**, составленной по данным работ [3—5], в исследованной нами лузге содержание основных примесей, влияющих на эффективность ФЭП, в значительной мере ниже по сравнению с зарубежным сырьем.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

*Примесное содержание элементов в рисовой лузге различных регионов, мас.%*

Элементы	США, Арканзас	США, Луизиана	Япония	Малайзия	Индия	Россия, Кубань	Украина, Херсонская обл.
Al	0,002	0,02	0,01	0,001	—	0,02	0,0009
B	0,002	0,0002	0,0001	0,0001	—	0,001	0,0004
Ca	0,01	0,1	0,1	0,1	0,704	0,04	—
Fe	0,002	0,006	0,002	0,002	0,946	0,09	0,02
K	0,4	0,2	0,8	0,12	1,175	—	—
Mg	0,09	0,02	0,02	0,03	0,256	0,3	0,0001
Mn	0,05	0,05	0,02	0,02	0,119	0,15	0,01
Na	0,02	0,001	0,05	0,002	0,51	0,02	0,002
P	0,1	—	0,02	0,005	—	Следы	0,0008
S	0,05	—	0,1	0,002	—	—	—
Ti	0,0002	0,01	0,00005	0,0001	—	0,002	0,00001
Cu	—	—	—	—	0,0031	0,002	0,0005
Zn	—	—	—	—	0,0179	—	0,00001

Предложенная и разработанная авторами на основе анализа литературных данных технологическая схема получения кремния показана на **рисунке**.



Отмывка исходного сырья осуществляется проточной водой. Пиролиз проводится при температуре 320—400°C до полного разрушения органических соединений. Соотношение C:SiO<sub>2</sub> на определенных этапах пиролиза обеспечивается регулируемой подачей аргона. Продукты пиролиза (в зависимости от температурных условий — “белая зола” или “черная сажа”) выщелачиваются кипящим 15—20%-ным раствором HCl:H<sub>2</sub>O. Полученная шихта C:SiO<sub>2</sub> прессуется в виде электродов с добавлением крахмала для придания необходимой прочности при последующем обжиге при температуре 1300—1500°C в инертной атмосфере. Процесс восстановления диоксида кремния осуществляется в дуговом реакторе с использованием этих электродов.

Как показали результаты спектрального анализа полученных промежуточных продуктов, содержание окиси кремния в “черной саже” составило около 46,9 — 48 мас.%, в то время как в “белой золе” — до 98 мас.%. Получены пробы кремния при восстановлении в дуговом реакторе электродов SiO<sub>2</sub>:C, SiO<sub>2</sub>:Me.

В настоящее время авторами проводятся исследования по оптимизации предложенной технологии: — установление общего отношения необратимого (сырьевого) материала, максимально близкого к стехиометрической величине, и количества восстановителя, необходимого для устойчивой работы электрода;

— выбор восстановителя, при котором достигаются лучшие количественно-качественные показатели; — определение отношений геометрических размеров электродов в зависимости от мощности электродуговой установки.

\*\*\*

В СНГ производство риса составляет 1—1,2 млн. т/год, в том числе в Украине до 100 тыс. тонн. Предварительные расчеты показывают, что разработка технологии получения кремния из рисовой лузги при указанных объемах возделывания риса позволит получать только в Украине до 1000 т/год кремния, что равнозначно выпуску фотоэлектрических модулей мощностью до 100 МВт/год.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Сапрыкин Л. В., Темердашев З. А., Васильев А. М. и др. Исследование процесса термолитиза рисовой шелухи и ее гидролизного лигнина // Химия древесины.— 1988.— № 6.— С. 87—90.
- Amick J. A., Dismukes J. P., Francis R. W., Hunt L. P. Improved high-purity arc-furnace silicon for solar cells // J. Electrochem. Soc.— 1985.— N 2.— P. 339—345.
- Hunt L. P., Dismukes J. P., Amick J. A. Rice hulls as a raw material for producing silicon // J. Electrochem. Soc. — 1984.— Vol. 131, N 7.— P. 1683—1686.
- Mishra P., Chakraverty A., Banerjee H. D. Production and purification of silicon by calcium reduction of rice huck white ash // J. Mater. Sci.— 1985.— Vol. 20, N 12.— P. 4387—4391.
- Масенко Б. П., Крапивко Г. И., Цыбуленко В. В. Получение и перспективы промышленного производства объемного солнечного кремния // Вестник ХГТУ (Херсон).— 2000.— № 3.— С. 85—91.

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, к. ф.-м. н. В. Г. ОХРЕМ,  
к. ф.-м. н. Е. А. ОХРЕМ

Украина, Черновицкий нац. университет им. Ю. Федьковича  
E-mail: oe-dpt@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
03.10 2002 г.

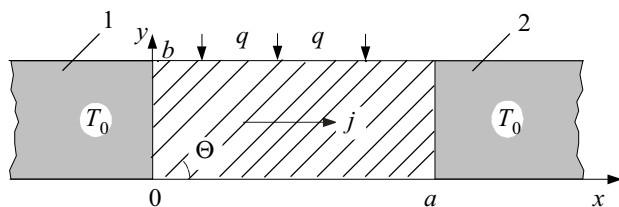
Оппонент д. ф.-м. н. И. В. ГУЦУЛ  
(ЧНУ им. Ю. Федьковича, г. Черновцы)

## ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ И КПД АНИЗОТРОПНОГО ТЕРМОЭЛЕМЕНТА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*В нагруженном анизотропном термоэлементе проанализированы двухмерное распределение температуры и КПД в случае постоянной плотности электрического тока.*

Анизотропный термоэлемент (АТ) может использоваться в качестве преобразователя теплового излучения в различных режимах [1, с. 88—93]. Термоэлектрические процессы в АТ изучались в большинстве случаев при условии одномерности температурного поля [2—5]. Однако одномерность температуры имеет место только в средней части термоэлемента при условии, что он достаточно длинный. В реальности же одномерность нарушается, особенно когда токоподводы к АТ массивны. Температурная модель для описания термоэлектрических процессов в АТ при этом имеет более сложный характер.

В настоящей статье рассматривается нагруженный АТ, в котором электрический ток плотностью  $j = \text{Const}$  направлен вдоль оси  $x$  (см. рисунок). (Допущение о постоянстве плотности тока использовалось, например, в [6] для АТ, работающего в режиме холодильника.) Вычисляются распределение температуры при заданных граничных условиях и соответствующий ему коэффициент полезного действия (КПД). Предложенная схема расчета КПД при двухмерном распределении температуры является оригинальной и, по нашему мнению, более точно соответствует действительному положению вещей.



Принципиальная схема АТ в режиме генерации электроэнергии:

1 — кристалл; 2 — термостаты; 3 — падающий тепловой поток (штриховкой показано направление кристаллографической оси)

Будем считать, что материал АТ термоэлектрически анизотропный, кристаллографическая ось наклонена под углом  $\Theta$  к оси  $x$ . Кинетические коэффициенты ( $\kappa$  — удельная теплопроводность,  $\rho$  — удельное

электросопротивление,  $\alpha_{12}$  — поперечная термоэдс) не зависят от температуры и координат. Тогда обобщенное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \gamma = 0, \quad (1)$$

где  $T$  — температура,  $\gamma = \rho j^2 / \kappa$ .

Граничные условия:

$$T(0, y) = T(a, y) = T_0; \quad (2)$$

$$-\kappa \frac{\partial T(x, b)}{\partial y} + \alpha_{12} j T(x, b) = -q; \quad (3)$$

$$-\kappa \frac{\partial T(x, 0)}{\partial y} + \alpha_{12} j T(x, 0) = 0, \quad (4)$$

где  $q$  — плотность падающего на верхнюю грань АТ теплового потока.

Условия (2) означают, что торцы АТ термостатированы. Термостат выполнен из металла с высокими электро- и теплопроводностью и поэтому его части 1 и 2, являющиеся одновременно и токоподводами, обеспечивают одномерность тока, что, в свою очередь, приводит к его постоянству. Условие (3) — падающий тепловой поток плотностью  $q$  поглощается верхней ( $y=b$ ) гранью АТ; (4) — адиабатическая изоляция нижней ( $y=0$ ) грани АТ.

Решение уравнения (1) представим в виде

$$T(x, y) = T_0 - \frac{1}{2} \gamma x(x-a) + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \exp(\delta_n y) + B_n \exp(-\delta_n y)) \sin(\delta_n x), \quad (5)$$

где  $\delta_n = n\pi/a$ ,  $A_n$  и  $B_n$  — постоянные интегрирования.

Выражение (5) удовлетворяет уравнению (1) и условиям (2). Из уравнений (3), (4) с учетом выражения (5) получим систему двух уравнений относительно  $A_n$  и  $B_n$ :

$$\begin{aligned} (\kappa \delta_n - \alpha_{12} j) A_n - (\kappa \delta_n - \alpha_{12} j) B_n &= \alpha_{12} j \left( T_0 E_n - \frac{1}{2} \gamma C_n \right) \\ (\kappa \delta_n - \alpha_{12} j) A_n \exp(\delta_n b) - (\kappa \delta_n - \alpha_{12} j) B_n \exp(-\delta_n b) &= \\ &= \alpha_{12} j \left( T_0 E_n - \frac{1}{2} \gamma C_n \right) + E_n q, \end{aligned}$$

где  $E_n = 2(1 - (-1)^n) / (n\pi)$ ,  $C_n = -4a^2(1 - (-1)^n) / (n\pi)$  — коэффициенты разложения единицы и функции  $x(x-a)$  в ряды Фурье по косинусам.

Из приведенных уравнений находим:

$$A_n = -\frac{\alpha_{12}j \left( T_0 E_n - \frac{1}{2} \gamma C_n \right) \left( \exp(-\delta_n b) - 1 \right) + E_n q}{2(\kappa \delta_n - \alpha_{12}j) \operatorname{sh} \delta_n b},$$

$$B_n = -\frac{\alpha_{12}j \left( T_0 E_n - \frac{1}{2} \gamma C_n \right) \left( \exp(\delta_n b) - 1 \right) + E_n q}{2(\kappa \delta_n + \alpha_{12}j) \operatorname{sh} \delta_n b}.$$

Таким образом, распределение температуры на нагруженного АТ является двухмерным.

Вычислим коэффициент полезного действия  $\eta$ . По определению,

$$\eta = \frac{Q_n - Q_0}{Q_n},$$

где  $Q_n$  — тепло, поступающее на верхнюю грань АТ —

$$Q_n = qac;$$

$c$  — размер АТ вдоль оси  $z$ ;

$Q_0$  — тепло, стекающее в термостат через блоки-токоподводы 1 и 2.

$$Q_0 = c \int_0^b q_1(x, y)|_{x=0} dy + c \int_0^b q_1(x, y)|_{x=a} dy,$$

где  $q_1(x, y)$  — компонента плотности потока тепла вдоль оси  $x$  —

$$q_1(x, y) = -\kappa \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} + \alpha_{11} j T(x, y);$$

$\alpha_{11}$  — продольная (вдоль оси  $x$ ) термоэдс.

Легко находим

$$Q_0 = \kappa c \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 - (-1)^n \right] \left[ A_n \left( \exp(\delta_n b) - 1 \right) - B_n \left( \exp(-\delta_n b) - 1 \right) \right].$$

Окончательно получим:

$$\eta = 1 + \frac{\kappa}{qa} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left( \alpha_{12} j \right)^2 \left( T_0 E_n - \frac{1}{2} \gamma C_n \right) \left( e^{\delta_n b} - 1 \right) \left( e^{-\delta_n b} - 1 \right)}{\left( \kappa \delta_n \right)^2 - \left( \alpha_{12} j \right)^2 \operatorname{sh} \delta_n b} + \frac{E_n q}{\operatorname{sh} \delta_n b} \frac{\kappa \delta_n \operatorname{sh} \delta_n b + \alpha_{12} j \left( \operatorname{ch} \delta_n b - 1 \right)}{\left( \kappa \delta_n \right)^2 - \left( \alpha_{12} j \right)^2} \left[ 1 - (-1)^n \right] - \frac{\rho b}{q} j^2. \quad (6)$$

Определим оптимальную плотность тока, при которой  $\eta$  максимально. Для этого положим

$$\frac{\partial \eta}{\partial j} = 0.$$

Последнее уравнение при условии  $\alpha_{11} j \ll \kappa \delta_n$  приводит к следующему выражению для оптимальной плотности тока:

$$j_{\text{opt}} = \frac{4q\alpha_{12}a}{\pi^3 \rho \kappa b} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(n\pi b/a) - 1}{n^3 \operatorname{sh}(n\pi b/a)}. \quad (7)$$

При этом максимальный КПД представляется следующим выражением:

$$\eta_{\text{max}} = 48 \frac{q}{\rho b} \left( \frac{\alpha_{12} a}{\kappa \pi^3} \right)^2 \left( \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(n\pi b/a) - 1}{n^3 \operatorname{sh}(n\pi b/a)} \right)^2. \quad (8)$$

Внешнее сопротивление  $R_e$  цепи термоэлемента определим из равенства

$$j_{\text{opt}}^2 (bc)^2 R_e = \eta_{\text{max}} qac,$$

откуда

$$R_e = \frac{\eta_{\text{max}} q a}{j_{\text{opt}}^2 b^2 c}. \quad (9)$$

Таким образом, оптимальная плотность тока, а также КПД, определяются плотностью теплового потока  $q$ , величина которого, в свою очередь, ограничена условием  $\alpha_{12} j_{\text{opt}} \ll \kappa \pi a$ . Подставив значение  $j_{\text{opt}}$ , получим для  $q$ :

$$q \ll \frac{\pi^4 \rho \kappa^2 b}{4 \alpha_{12}^2 a^2} \left( \frac{\operatorname{ch}(n\pi b/a) - 1}{n^3 \operatorname{sh}(n\pi b/a)} \right)^{-1}. \quad (10)$$

При  $\alpha_{12} = 10^{-4}$  В/К,  $\rho = 10^{-3}$  Ом·см,  $\kappa = 10^{-2}$  Вт/(см·К),  $a = 1$  см,  $b = c = 0,1$  см  $q \ll 30$  Вт/см<sup>2</sup>.

Возьмем  $q = 3$  Вт/см<sup>2</sup>, тогда  $\eta_{\text{max}} \approx 0,8\%$ . Подсчет  $j_{\text{opt}}$  по формуле (7) дает  $7$  А/см<sup>2</sup>,  $R_e = 0,49$  Ом. Если условие  $\alpha_{12} j \ll \kappa \delta_n$  не выполняется, то для вычисления КПД необходимо использовать выражение (6).

Найденное числовое значение КПД АТ свидетельствует о его малости. Поэтому описанный АТ предлагается использовать, например, в качестве измерителя теплового потока или датчика радиационной температуры.

Если плотность тока  $j$  обусловлена внешним источником электроэнергии, то рассматриваемый АТ представляет собой холодильник, а величина  $qac$  является его холодопроизводительностью. Случай нулевой холодопроизводительности такого АТ исследовался в [7].

\*\*\*

Проведенное исследование процессов, протекающих в нагруженном анизотропном термоэлементе, т. е. в условиях реальной неоднородности температурного поля, позволило получить выражения для расчета оптимальной плотности тока и КПД в таких АТ.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Л. И. Анагычук. — К.: Наук. думка, 1979.
2. Самойлович А. Г., Слипченко В. Н. Теория анизотропного термоэлемента с не зависящими от температуры кинетическими коэффициентами // ФТП. — 1981. — Т. 15, № 5. — С. 965—967.
3. Самойлович А. Г., Шевчук О. Ю. Распределение температуры в анизотропном термоэлементе // ФТП. — 1982. — Т. 15, № 11. — С. 1951—1954.
4. Слипченко В. М. До питання про ККД анізотропного термоелемента // УФЖ. — 1976. — Т. 21, № 1. — С. 124—129.
5. Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А. Анизотропные термоэлементы // ФТП. — 1997. — Т. 31, № 11. — С. 1281—1298.
6. Охрем В. Г., Охрем Е. А. Стационарный эффект охлаждения анизотропного термоэлектрического холодильника // ИФЖ. — 2000. — Т. 73, № 3. — С. 650—653.
7. Охрем В. Г. Некоторые модели стационарных термоэлектрических холодильников // ИФЖ. — 2001. — Т. 74, № 5. — С. 127—130.

Е. В. АНДРОНОВА, Е. А. БАГАНОВ, А. Ю. ДАЛЕЧИН,  
А. Ю. КАРМАННЫЙ

Украина, Херсонский гос. технический университет  
E-mail: vk\_74@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
24.05 — 06.09 2002 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК  
(Южноукраинский пед. ун-т  
им. К. Д. Ушинского, г. Одесса)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InSb В ТЕРМОФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ GaSb

*Формирование массива квантовых точек InSb позволяет значительно расширить спектральный диапазон фоточувствительности ТФВ-элементов на основе GaSb.*

В последнее время термофотовольтаика (ТФВ) — технология непосредственного преобразования энергии инфракрасного излучения в электричество — получила интенсивное развитие в связи с совершенствованием технологии полупроводниковых материалов соединений  $A^3B^5$ , в частности, GaSb и твердых растворов на ее основе.

С точки зрения достижения максимальной эффективности ТФВ-систем идеальная ширина запрещенной зоны полупроводникового материала должна составлять 0,5—0,55 эВ при температуре излучателя порядка 1500°С [1]. Однако создание качественных структур на основе объемных материалов с такой шириной запрещенной зоны сопряжено со значительными трудностями, такими как высокие температуры выращивания, большие рекомбинационные потери, широкие области несмешиваемости твердых растворов и т. п.

Один из возможных подходов к повышению эффективности ТФВ-элементов состоит в использовании низкоразмерных структур, поскольку, к примеру, формирование массива самосогласованных квантовых точек узкозонных материалов в широкозонной матрице дает возможность существенного расширения спектра фоточувствительности в длинноволновую область по сравнению с краем поглощения материала матрицы [2].

Целью данной работы является изучение влияния поглощения излучения в квантовых точках InSb на эффективность ТФВ-элементов на основе GaSb и выбор оптимальных размеров квантовых точек для достижения максимальной эффективности.

### Обоснование модели

Система InSb—GaSb характеризуется большим рассогласованием по постоянной решетки (6,1%), что обуславливает рост по механизму Странски—Красанова и, следовательно, при соответствующих технологических режимах приводит к формированию квантовых точек (КТ) InSb на подложке GaSb. Фор-

Исследования выполнены при финансовой поддержке Фонда гражданских исследований и развития США для независимых государств бывшего Советского Союза (CRDF) по гранту UE2-2225/6561.

ма, размеры и плотность самосогласованных КТ зависит от материалов системы и условий роста [3—5].

Несмотря на то, что в литературе указываются КТ в форме пирамид, конусов дисков или куполов, реальная их форма пока еще полностью не выяснена. Для простоты предположим, что КТ имеют сферическую форму и характеризуются диаметром  $D$ . Такое допущение обосновано тем, что реальные формы КТ могут быть выражены через эквивалентную сферическую форму [6].

Как было сказано выше, движущими силами для спонтанного образования КТ являются механические напряжения, которые изменяют величину разрывов зон и эффективную массу электрона внутри КТ [3, 4, 7]. Хотя для детального рассмотрения напряжения обычно производится его разбиение на изотропную (гидростатическую) и анизотропную составляющие, в данном случае, благодаря сферической форме, важна только изотропная составляющая.

### Методика расчета

Изотропная деформация точки описывается выражением [6, 8]

$$I = 2f \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu}, \quad (1)$$

где  $f$  — относительная деформация, связанная с рассогласованием постоянных решеток материалов КТ и матрицы;

$\mu$  — коэффициент Пуассона, приближенно равный 1/3 для материалов  $A^3B^5$ .

В этой связи выражение (1) можно переписать в виде

$$I = f \equiv \frac{a_T - a_M}{a_M}, \quad (2)$$

где  $a_T$  и  $a_M$  — постоянные решетки материалов точки и матрицы, соответственно.

Изменение разрывов в зоне проводимости и валентной зоне под действием деформации происходит на величину

$$\Delta E_C^{\text{напряж}} = a_C I; \quad \Delta E_V^{\text{напряж}} = a_V I, \quad (3)$$

где  $a_C$  и  $a_V$  — деформационные потенциалы зоны проводимости и валентной зоны, соответственно.

Поэтому реальная величина потенциальных барьеров в гетеросистеме с КТ для электронов и дырок соответственно будет составлять:

$$V_e = \Delta E_C + \Delta E_C^{\text{напряж}}; \quad V_h = \Delta E_V + \Delta E_V^{\text{напряж}}, \quad (4)$$

где  $\Delta E_C$  и  $\Delta E_V$  — разрывы в зоне проводимости и валентной зоне в ненапряженной гетероструктуре, соответственно.

Расчет уровней квантования производился из решения стационарного уравнения Шредингера для сферической потенциальной ямы с прямоугольными конечными стенками [6]:

$$k \operatorname{tg} \left( \frac{kD}{2} - \frac{n\pi}{2} \right) = q, \quad (5)$$

где  $k$  — квазиволновой вектор носителя заряда в квантовой точке,  $k = \sqrt{2m_{1e,h}E(k)/\hbar^2}$ ;  
 $m_{1e,h}$ ,  $m_{2e,h}$  — эффективные массы носителей заряда в квантовой точке и матрице, соответственно;  
 $E(k)$  — энергия носителя заряда, зависящая от квазиволнового вектора  $k$ ;  
 $\hbar$  — постоянная Планка;  
 $D$  — диаметр квантовой точки;  
 $n = 2m - 1$ ;  
 $m$  — номер квантового уровня;  
 $q$  — параметр спада волновой функции за пределами квантовой точки,  $q = [2m_{2e,h}/\hbar^2][V_{e,h} - E(k)]$ .

Предельная термодинамическая эффективность ТФВ-элементов на основе гетерокомпозиций с КТ оценивалась с учетом следующих допущений:

1) массив КТ создает дополнительную зону (ДЗ), расположенную в запрещенной зоне материала матрицы (рис. 1) [8];

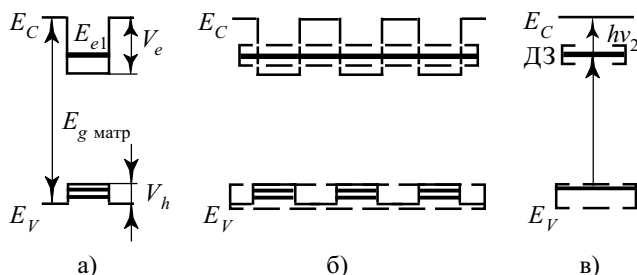


Рис. 1. Схема образования дополнительной зоны (ДЗ) в запрещенной зоне материала матрицы ( $E_{g \text{ матр}}$ ): а — зонная диаграмма отдельной КТ в матрице; б — зонная диаграмма массива КТ; в — результирующая зонная диаграмма гетеросистемы с КТ

2) в результате поглощения фотона образуется только одна электронно-дырочная пара;

3) имеет место только излучательная рекомбинация;

4) все фотоны с энергией, большей ширины запрещенной зоны материала матрицы, поглощаются матрицей;

5) фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны матрицы, могут вызывать оптические переходы как с валентной зоны на ДЗ, так и с ДЗ в зону проводимости материала матрицы.

Предполагалось, что распределение интенсивности излучения источника, имеющего температуру  $T$ , по частоте  $\nu$  определяется распределением Планка:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_0T}\right) - 1}, \quad (6)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  
 $h = 2\pi\hbar$ ;  
 $k_0$  — постоянная Больцмана.

При этом поток фотонов определяется выражением

$$\dot{N}(\varepsilon) = \frac{\varepsilon(\nu, T)}{h\nu}, \quad (7)$$

а вероятность поглощения фотона в приближении прямых переходов —

$$p \sim \frac{\sqrt{(h\nu - \Delta E)}}{h\nu}, \quad (8)$$

где  $\Delta E$  — энергия возбуждения оптического перехода.

Поглощение излучения в массиве КТ приводит к выделению на выходе ТФВ-элемента дополнительной мощности:

$$\Delta P_{\text{вых}} = JU_{\text{xx}}, \quad (9)$$

где  $J$  — плотность тока носителей, генерируемых в результате фотоактивного поглощения излучения массивом КТ;  
 $U_{\text{xx}}$  — напряжение холостого хода.

Тогда прирост эффективности ТФВ-элемента определяется соотношением

$$\Delta \eta = \Delta P_{\text{вых}} / \sigma T^4, \quad (10)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана.

Из выражений (6)—(10) получаем:

$$\Delta \eta \sim \int \frac{\Delta E_{i+1}}{\Delta E_i} \frac{E\sqrt{E - \Delta E}}{\exp\left(\frac{E}{k_0T}\right) - 1} dE, \quad (11)$$

где  $\Delta E_i$ ,  $\Delta E_{i+1}$  — соответственно энергия возбуждения рассматриваемого и следующего по  $\Delta E$  оптического перехода, определяемая диаметром КТ;

$E = h\nu$  — энергия фотона.

### Результаты и обсуждение

Учет механических напряжений для гетеросистемы InSb—GaSb с КТ InSb показал, что в случае помещения КТ в матрицу GaSb, легированную донорной примесью, потенциальные барьеры в квантовой яме обеспечивают только локализацию дырок (рис. 2, а,  $F$  — энергия уровня Ферми). Если же матрица GaSb легирована акцепторной примесью, то в потенциальной яме возможна локализация только электронов (рис. 2, б).

В табл. 1 представлены результаты расчетов энергии оптических переходов в зависимости от диаметра КТ InSb при различных уровнях легирования матрицы  $n$ -GaSb, а в табл. 2 — для КТ InSb, сформированных в матрице  $p$ -GaSb.

Анализ таблиц показывает, что энергия оптического перехода с первого квантового уровня дырок на уровень, соответствующий дну зоны проводимости матрицы,  $(1h - E_C)$  слабо зависит от уровня легирования матрицы  $n$ -GaSb. Что же касается перехода с участием второго квантового уровня  $2h - E_C$ , то его энергия практически не зависит от концентрации легирующей примеси в матрице. При изменении типа проводимости материала матрицы на дырочный спектр состояний для дырок в КТ становится квазинепрерывным. В этом случае возможными являются переходы с энергетических уровней, расположенных вблизи потолка валентной зоны, на квантовые уровни электронов ( $E_V - 1e$ ,  $E_V - 2e$ ). При этом наблюдает-

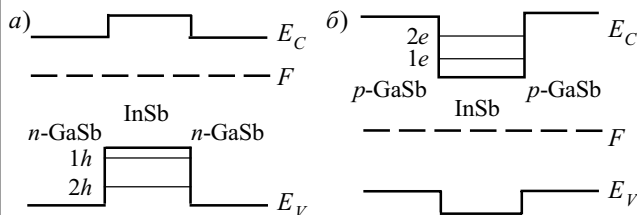


Рис. 2. Зонные диаграммы гетеросистем с квантовыми точками InSb в матрице n-GaSb (а) и p-GaSb (б)

Таблица 1

Энергии возможных оптических переходов в КТ InSb в матрице n-GaSb

D, нм	Энергия оптических переходов, эВ					
	$1h-E_C$		$2h-E_C$		$1h-E_C$	
	$n=10^{15} \text{см}^{-3}$	$n=10^{16} \text{см}^{-3}$	$n=10^{16} \text{см}^{-3}$	$n=10^{17} \text{см}^{-3}$	$n=10^{17} \text{см}^{-3}$	$n=10^{17} \text{см}^{-3}$
5	0,500	0,548	0,501	0,548	0,502	0,548
7	0,463	0,482	0,464	0,482	0,465	0,482
10	0,440	0,447	0,440	0,447	0,441	0,447
15	0,427	0,429	0,427	0,429	0,427	0,429
20	0,421	0,422	0,421	0,422	0,421	0,422

Таблица 2

Энергии возможных оптических переходов в КТ InSb в матрице p-GaSb

D, нм	Энергия оптических переходов, эВ					
	$E_V-1e$		$E_V-2e$		$E_V-1e$	
	$p=10^{15} \text{см}^{-3}$	$p=10^{16} \text{см}^{-3}$	$p=10^{16} \text{см}^{-3}$	$p=10^{17} \text{см}^{-3}$	$p=10^{17} \text{см}^{-3}$	$p=10^{17} \text{см}^{-3}$
7	0,405	—	0,424	—	0,439	—
10	0,351	—	0,359	—	0,365	—
15	0,276	0,345	0,279	0,345	0,281	0,345
20	0,237	0,267	0,238	0,267	0,239	0,267

ся сильная зависимость энергии оптического перехода  $E_V-1e$  от концентрации акцепторов в матрице GaSb.

На рис. 3 представлены зависимости прироста эффективности ТФВ-элементов от диаметра КТ InSb в матрице n-GaSb и p-GaSb для наиболее распространенного уровня легирования базовой области  $1 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$  при температуре источника излучения  $1500^\circ\text{C}$  (за единицу по оси ординат принят максимальный прирост эффективности для КТ в матрице n-GaSb).

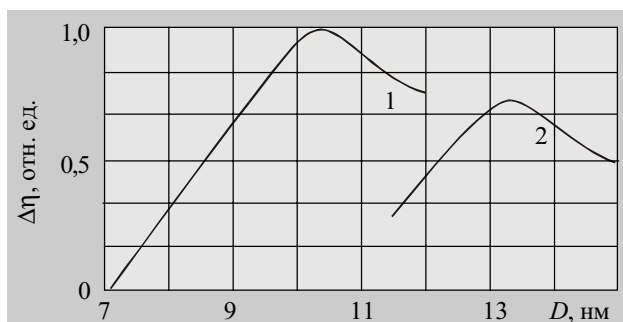


Рис. 3. Зависимость прироста эффективности ТФВ-элементов от диаметра квантовых точек InSb в матрице GaSb: 1 — матрица n-GaSb; 2 — матрица p-GaSb

Из рисунка следует, что оптимальный диаметр КТ, при котором эффективность ТФВ-элемента достигает максимума, составляет порядка 10 нм для матрицы электронного типа проводимости и 13 нм для матри-

цы p-GaSb. Кроме того, при равных прочих условиях формирование массива КТ в матрице n-GaSb позволяет достичь большей эффективности преобразования по сравнению с матрицей дырочного типа проводимости. Это связано с тем, что использование гетеросистем с КТ InSb в матрице n-GaSb обеспечивает оптимальные для ТФВ-элементов энергии оптических переходов в диапазоне 0,5—0,55 эВ (см. табл. 1).

Следует также отметить, что рассчитанные оптимальные размеры КТ являются реально достижимыми как для стандартных технологий получения квантоворазмерных структур (молекулярно-лучевая эпитаксия, осаждение из паров металлоорганических соединений), так и для методов жидкофазной эпитаксии, например, метода импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава [9].

### Выводы

Таким образом, формирование массива квантовых точек InSb позволяет значительно расширить спектральный диапазон fotocувствительности ТФВ-элементов на основе GaSb, что приводит к увеличению их эффективности. С точки зрения достижения оптимального для ТФВ-элементов диапазона энергий оптических переходов (0,5—0,55 эВ) предпочтительным является создание системы КТ в базовой области структуры, легированной донорной примесью, на расстоянии порядка диффузионной длины неосновных носителей заряда.

Расчет термодинамической эффективности ТФВ-элемента с КТ показал, что при уровне легирования материала матрицы  $n=1 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$  и температуре источника излучения  $1500^\circ\text{C}$  оптимальный диаметр КТ составляет порядка 10 нм.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Coutts T. J., Wanlass M. W., Ward J. S., Johnson S. A review of recent advances in thermophotovoltaics / Proc. of 25th PVSC, Washington, May 13—17, 1996.— P. 25—30.
2. Rohr C., Connolly J. P., Barnham K. W. J. et al. InGaAsP quantum well cells for thermophotovoltaics / Pre-print copy of Proc. of 2nd Word Conf. and Exhibition on PV Solar Energy Conversion.— Vienna, July 6—10, 1998.
3. Bimberg D., Grundmann M., Ledenstov N. N. Quantum dot heterostructures.— London: John Wiley & Sons, 1999.
4. Sugawara M. Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots.— London: Academic Press, 1999.
5. Bimberg D., Ledenstov N. N., Grundmann M. et al. InAs—GaAs quantum pyramide lasers: in situ growth, radiative lifetimes and polarizations properties // Jpn. J. Appl. Phys.— 1996.— Vol. 35, part 1, N 2B.— P. 1311—1319.
6. Евтихийев В. П., Константинов О. В., Матвеевцев А. В., Романов А. Е. Излучение света полупроводниковой структурой с квантовой ямой и массивом квантовых точек // ФТП.— 2002.— Т. 36, вып. 1.— С. 79—86.
7. Grundmann M., Stier O., Bimberg D. InAs/GaAs pyramidal quantum dots: strain distribution, optical phonons and electronic structure // Physical Review B.— 1995.— Vol. 52, N 16.— P. 11969—11981.
8. Cuadra L., Marti A., Luque A. et al. Strain considerations for the design of the quantum dot intermediate band solar cell in the  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  material system / Pre-print copy of Proc. of 17th European PV Solar Energy Conf. and Exhibition.— Munich, October 22—26, 2001.
9. Кулоткина Ф., Марончук И. Е., Шорохов А. В. Выращивание субмикронных слоев при импульсном охлаждении насыщенного раствора-расплава // Письма в ЖТФ.— 1995.— Т. 21, вып. 20.— С. 1—5.

Д. ф.-м. н. А. А. КЛЮКАНОВ, д. ф.-м. н. Э. А. СЕНОКОСОВ,  
Д. Е. БОГИНСКИЙ, В. В. СОРОЧАН, Л. В. ФЕЩЕНКО

Молдова, г. Кишинев, Молдавский гос. ун-т; г. Тирасполь,  
Приднестровский гос. ун-т им. Т. Г. Шевченко  
E-mail: pgulib@tirastel.md

Дата поступления в редакцию  
03.01—02.10 2002 г.

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

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА ОСНОВЕ НИЗКООМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК

*Подтверждена возможность разработки на основе низкоомных фотопроводников нового класса позиционно-чувствительных фотоприемников.*

Среди позиционно-чувствительных фотоприемников одними из первых практическое применение получили датчики световых сигналов на основе  $p-n$  переходов [1, 2]. Следующим этапом использования такого рода оптоэлектронных приборов явилась разработка сенсорных элементов [3], основанных на координатной зависимости внутреннего сопротивления фотоприемников.

В работах [4, 5] впервые предложены и разработаны позиционно-чувствительные датчики световых сигналов на основе однородных низкоомных фотопроводящих полупроводников, технология изготовления которых менее сложна и трудоемка. Такие фотоприемники чувствительны как к собственному, так и к примесному излучению. Нетрадиционная схема расположения и коммутации электрических контактов позволяет изменять пороговую чувствительность и функциональные возможности фотоприемников.

В данной работе исследуется функциональная связь выходного напряжения фотоприемников, имеющих четыре квадратно расположенных электрических контакта.

**Х**арактер координатной зависимости чувствительности к свету исследуемых фотоприемников определяется особенностью распределения потенциала по поверхности полупроводника при протекании вдоль него электрического тока. В связи с этим нами проведены расчеты функции распределения темнового ( $\varphi_0$ ) и светового ( $\varphi_1$ ) потенциалов для фотоприемника, изготовленного из однородного проводящего полупроводникового диска (пленки) толщиной  $d$  и радиусом  $R$ , по краям которого нанесены четыре линейных омических контакта  $A, B, C, D$  (рис. 1), расположенных в вершинах квадрата. К одной паре контактов, размещенных на концах его диагонали  $AC$ , подключается источник входного напряжения  $U_1$  и через фотоэлемент пропускается ток  $I$ . К двум другим контактам ( $B$  и  $D$ ) подключается резистор нагрузки, с которого снимается выходное напряжение  $U_2$ .

Очевидно, что в темноте или при равномерном освещении всей фронтальной поверхности диска выходное напряжение  $U_2=0$ , т. к. контакты  $B$  и  $D$  распо-

лагаются на эквипотенциальной линии. При локальном же освещении поверхности диска эквипотенциальность линии  $BD$  может быть нарушена, и тогда  $U_2 \neq 0$ .

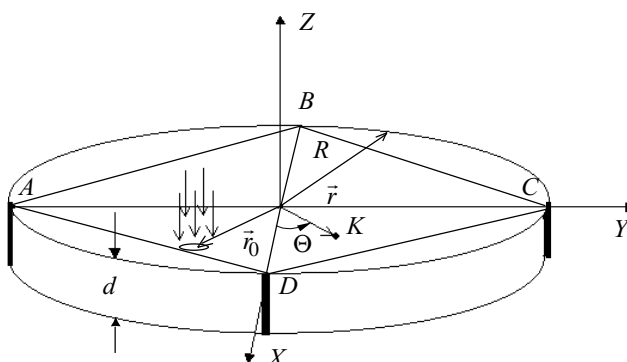


Рис. 1. Схема квадратного расположения контактов с "привязкой" координат исследуемых точек и пятна засветки

Для определения функций темнового и светового потенциалов введем систему декартовых  $(x, y, z)$  и сферических  $(r, \Theta, \psi)$  координат, начало которых свяжем с центром  $O$  фронтальной поверхности диска (рис. 1). Оси  $X$  и  $Y$  направим вдоль линий  $BD$  и  $AC$ , соответственно.

Координата  $r$  точки  $K$ , лежащей на свободной поверхности диска, представляет собой величину модуля ее радиуса-вектора  $\vec{r}(r = |\vec{r}|)$ , а  $\Theta$  — угол между вектором  $\vec{r}$  и положительным направлением оси  $X$ . В силу однородности диска по толщине потенциалы не зависят от  $Z$  (или от  $\psi$ ):

$$\varphi_0 = \varphi_0(x, y) = \varphi_0(\vec{r}) = \varphi_0(r, \Theta);$$

$$\varphi_1 = \varphi_1(x, y) = \varphi_1(\vec{r}) = \varphi_1(r, \Theta).$$

При расчете функции темнового потенциала  $\varphi_0(r, \Theta)$  нами использовалось уравнение Лапласа

$$\Delta \varphi_0 = 0 \quad (1)$$

и уравнения, связывающие между собой напряженность внешнего электрического поля  $\vec{E}$  и  $\varphi_0$ , плотность тока  $\vec{j}$  и темновую удельную электропроводность  $\sigma_0$ :

$$\vec{E} = -\nabla \varphi_0; \quad \vec{j} = \sigma_0 \vec{E}. \quad (2)$$

При этом учитывались граничные условия

$$j_n = 0; \quad E_n = -[(\partial \varphi_0) / (\partial r)]_{r=R} = 0, \quad (3)$$

где  $\vec{n}$  — нормаль к поверхности диска.

С учетом результатов работы [1, с. 422] получено следующее выражение для темнового потенциала в виде явной функции координат:

$$\Phi_0 = \frac{I}{\sigma_0 \pi d} \ln \left| \frac{\vec{r} - \vec{R}_y}{\vec{r} + \vec{R}_y} \right|, \quad (4)$$

где  $\vec{R}_y = R\vec{e}_y$ ;  $\vec{e}_y$  — единичный вектор вдоль оси  $Y$ .

Теперь предположим, что фронтальная поверхность полупроводникового диска на каком-нибудь ее участке освещается узким пучком оптически активного света. В низкоомных полупроводниках, в особенности в слабых электрических полях, можно пренебречь размытием границы в распределении избыточных носителей заряда между освещенной и темной областями, вызванным их диффузией и дрейфом [6, с. 313, 318]. Поэтому можно считать, что распределение неравновесных носителей заряда в области оптического возбуждения будет повторять распределение освещенности  $L$  в плоскости поперечного сечения пучка.

Обозначим через  $\delta\sigma$  величину изменения удельной электропроводности полупроводника в центре пятна засветки, соответствующей координате  $\vec{r}_0 = (r_0, \Theta_0)$ . Если принять, что распределение освещенности в зондирующем пучке описывается функцией Гаусса, то выражение для удельной электропроводности в любой точке  $\vec{r} = (r, \Theta)$  диска можно представить в виде соотношения

$$\sigma(\vec{r}) = \sigma_0 + \delta\sigma \exp \left[ -\frac{(\vec{r} - \vec{r}_0)^2}{a^2} \right], \quad (5)$$

где  $a$  — радиус пятна засветки.

Соотношение (5) правильно описывает предельные значения  $\sigma(\vec{r})$ . В точке  $\vec{r} = \vec{r}_0$  электропроводность  $\sigma(\vec{r}_0) = \sigma_0 + \delta\sigma$ , а при  $|\vec{r} - \vec{r}_0| > a$   $\sigma(\vec{r}) = \sigma_0$ .

Для низкоомного фотопроводника  $(\delta\sigma)/\sigma \ll 1$ , поэтому функцию потенциала  $\phi(\vec{r})$  освещенного полупроводника можно выразить в виде ряда по степеням  $(\delta\sigma)/\sigma$ , а  $\phi_1$  при этом рассматривать как поправку первого порядка малости к  $\phi_0$ :

$$\phi(\vec{r}) = \phi_0(\vec{r}) + \phi_1(\vec{r}). \quad (6)$$

В стационарном случае  $\phi(\vec{r})$  должна удовлетворять уравнениям

$$\vec{j} = -\sigma \nabla \phi; \quad \text{div } \vec{j} = 0. \quad (7)$$

Учитывая, что произведение  $\nabla \sigma \nabla \phi_1 = \nabla \delta\sigma \nabla \phi_1$  пропорционально  $[(\delta\sigma)/\sigma]^2$  — величине второго порядка малости, которой можно пренебречь, из равенств (1) и (6) получено соотношение, связывающее между собой световой и темновой потенциалы:

$$\sigma \nabla \phi_1 \approx -\nabla \sigma \nabla \phi_0. \quad (8)$$

Подставляя в (8) значения для  $\phi_0$  (4) и  $\sigma \approx \sigma_0$ , находим, что

$$\Delta \phi_1 \approx 2 \frac{\delta\sigma}{\sigma} \frac{1}{a^2} \frac{I}{\pi \sigma d} \left[ \frac{(\vec{r} - \vec{R}_y)(\vec{r} - \vec{r}_0)}{(\vec{r} - \vec{R}_y)^2} - \frac{(\vec{r} + \vec{R}_y)(\vec{r} - \vec{r}_0)}{(\vec{r} + \vec{R}_y)^2} \right] \times \exp \left[ -\frac{(\vec{r} - \vec{r}_0)^2}{a^2} \right]. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) представляет собой функцию  $\phi_1$ , зависящую не только от координат  $\vec{r} = (r, \Theta)$  рассматриваемой точки, но и от координат  $\vec{r}_0 = (r_0, \Theta_0)$  локальной засветки. Практический же интерес представляет разность потенциалов между характерными точками  $\vec{r}_1 (r_1=R, \Theta_1=\pi)$  и  $\vec{r}_2 (r_2=R, \Theta_2=0)$  фотопроводника. В частности, если размеры светового пятна малы и выполняются неравенства  $a/R \ll 1$  и  $a/r_0 \ll 1$ , то разность потенциалов между точками  $B(\vec{r}_1)$  и  $D(\vec{r}_2)$ , определяющая выходное напряжение фотоприемника, будет равна

$$U_2 = \phi_{BD} = \frac{\delta\sigma}{\sigma} \frac{a^2}{R^2} \frac{I}{\pi \sigma d} \frac{8r_{00}^2 \sin 2\Theta_0}{(1-r_{00}^4)^2 + 4r_{00}^4 \sin^2 2\Theta_0}, \quad (10)$$

где  $r_{00} = r_0/R$  — безразмерная координата светового пятна.

Из (10) следует, что разность потенциалов  $\phi_{BD}$  зависит от координат и площади засветки. Кроме того, она линейно возрастает с током  $I$  и освещенностью  $L$  (в низкоомных полупроводниках  $\delta\sigma \sim L$ ).

На рис. 2 приведены полярные диаграммы безразмерной разности потенциалов

$$V_{BD} = \frac{\phi_{BD}}{\frac{\delta\sigma}{\sigma} \frac{a^2}{R^2} \frac{I}{\pi \sigma d}} = \frac{8r_{00}^2 \sin 2\Theta_0}{(1-r_{00}^4)^2 + 4r_{00}^4 \sin^2 2\Theta_0}, \quad (11)$$

построенные согласно соотношению (10) для четырех различных значений  $r_{00} = r_0/R$ . Значения  $V_{BD}$  по модулю откладывались в выбранном масштабе на соответствующих радиусах-векторах  $\vec{r}(\Theta_0)$ . Функция  $V_{BD}$ , как видно, имеет экстремумы в точках

$$\Theta_{01} = \pm(\pi/2)k; \quad \Theta_{02} = (\pi/4) \pm (\pi/2)k; \quad \Theta_{03} = (1/2) \arcsin \sqrt{[(1-2r_{00}^4+r_{00}^2)/(4r_{00}^4)]} \pm (\pi/2)k, \quad (12)$$

где  $k=0, 1, 2, \dots$

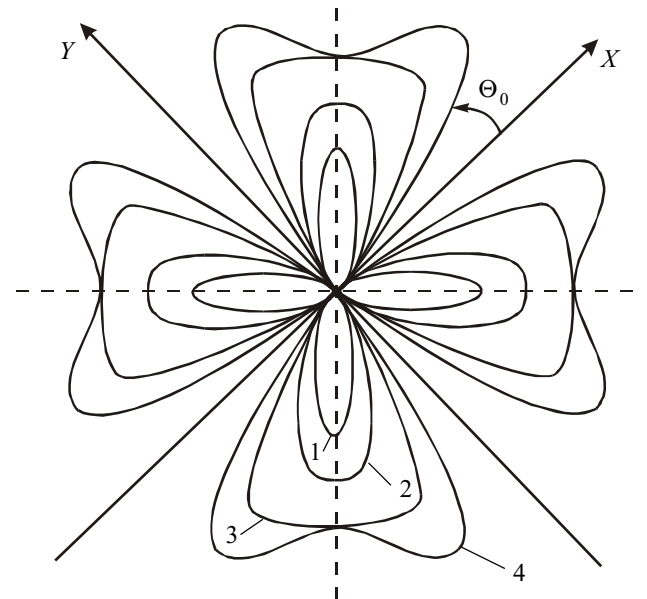


Рис. 2. Полярные диаграммы разности потенциалов  $V_{BD}$  для различных значений координаты пятна засветки  $r_{00} = r_0/R$ : 1 — 0,3; 2 — 0,5; 3 — 0,7; 4 — 0,8

## ДАТЧИКИ

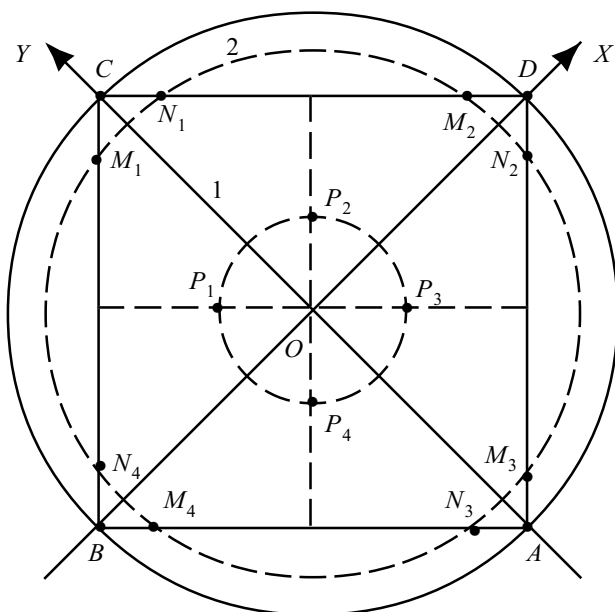


Рис. 3. Схема положения точек максимальной фоточувствительности для  $r_{00} < 0,7$  (1) и  $r_{00} > 0,7$  (2)

Для всех значений  $r_{00}$  углам  $\Theta_{01} = \pm(\pi/20)k$  соответствуют минимумы функций:  $V_{BD}(r_{00}, \Theta_{01}) = 0$ .

Если световой луч перемещается по окружности радиусом  $r_0 < 0,7R$ , то высокочувствительному режиму соответствует засветка областей, лежащих на биссектрисах прямых углов между диагоналями квадрата (точки  $P_1—P_4$  на рис. 3). Если же световой луч перемещается по окружности радиусом  $r_0 > 0,7R$ , то наибольшая чувствительность будет соответствовать

засветке областей, расположенных в точках пересечения окружностей радиусом  $r_0$  со сторонами квадрата (точки  $M_1, N_1, \dots, M_4, N_4$  на рис. 3). Квадратная симметрия полярных диаграмм разности потенциалов является следствием цилиндрической симметрии приемного элемента и квадратного расположения его контактов.

\*\*\*

Линейная зависимость выходного напряжения от величины протекающего через фотоприемник тока  $I$  и от освещенности  $L$ , а также его зависимость от координат светового пятна открывают возможность разработки на основе низкоомных фотопроводников нового класса позиционно-чувствительных приборов.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Полупроводниковые фотоприемники и преобразователи излучения // Под ред. А. И. Фримера, И. И. Таубкина.— М.: Мир, 1965.
2. Рюхтін В. В., Годованюк В. М., Рюхтін В. В. Кремнієвий діод на повздовжньому фотоэффекті (Lateral FD) // Наук. вісник ЧДУ (Чернівці).— 1998.— № 29.— С. 193 — 200.
3. Марченко А. Н., Свечников С. В., Смовж А. К. Полупроводниковые сенсорные потенциометрические элементы.— М.: Радио и связь, 1988.
4. А. с. 1436796 СССР. Устройство для регистрации слабых световых сигналов / Э. А. Сенокосов, А. А. Ключанов, А. Н. Усатый и др.— 12.08.86.
5. А. с. 1499119 СССР. Устройство для определения координаты светового пятна / А. А. Ключанов, Э. А. Сенокосов, А. Н. Усатый, В. М. Федоров.— Оpubл. в Б. И., 1989.— № 29.
6. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.— М.: Физматгиз, 1963.
7. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Электродинамика сплошных сред.— М.: Наука, 1982.

## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

Ukraine 2003

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА

Киев

Экспоцентр Украины

15-18 апреля

Выставка лидеров  
промышленных технологий

[www.euroindex.ua/elcom](http://www.euroindex.ua/elcom)  
 Тел./факс: (044) 461-93-01  
 E-mail: sales@eindex.kiev.ua

- ⇒ Производство, преобразование и аккумуляция электроэнергии
- ⇒ Передача и распределение электроэнергии
- ⇒ Измерительная, регулировочная и управляющая техника
- ⇒ Электротехника
- ⇒ Осветительная аппаратура и арматура
- ⇒ Энергосбережение
- ⇒ Гидравлика/пневматика

Спецэкспозиция  
 ⇒ **Электронные компоненты**

Д. т. н. А. И. КАЗАКОВ, к. ф.-м. н. А. В. АНДРИЯНОВ,  
В. С. МИРОНОВ, к. т. н. О. В. ПОЛЯРУШ

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: elin@rtf.ospu.odessa.ua

Дата поступления в редакцию  
05.04—18.10 2002 г.  
Оппоненты к. т. н. А. Ф. АНДРЕЕВА,  
к. х. н. А. В. ШЕВЧЕНКО  
(ИПМ НАНУ, г. Киев)

## РАСЧЕТ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК СИСТЕМЫ $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$

*На примере системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  показана применимость предложенной методики для оптимизации свойств получаемых диэлектрических пленок.*

На современном этапе развития микроэлектронной техники все более жесткие требования предъявляются к качеству диэлектрических пленок, особенно к воспроизводимости их характеристик и параметров. Для тонкопленочных электролюминесцентных структур (ТПЭЛС) оптимальным набором свойств обладают пленки системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ , которые имеют хорошие диэлектрические и оптические характеристики, высокую электрическую прочность и термодинамическую стабильность [1]. Однако применение пленок системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  в пленочной микроэлектронике во многом ограничивается отсутствием данных об их свойствах. В то же время методы математического моделирования позволяют прогнозировать электрофизические характеристики получаемых пленок.

Для улучшения характеристик ТПЭЛС необходимо оптимизировать параметры используемых диэлектрических пленок ТПЭЛС таким образом, чтобы в области применяемых рабочих частот устройства (обычно 50 Гц — 10 кГц) они обладали максимальным значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и минимальным значением тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ .

Целью данной работы является разработка методики расчета частотной зависимости таких диэлектрических характеристик как  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  тонких пленок системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ , полученных электронно-лучевым испарением. Одним из основных преимуществ этих оксидных систем является возможность образования квазибинарных твердых растворов, что позволяет синтезировать новые материалы с заданным изменением свойств.

С термодинамической точки зрения, в многокомпонентных оксидных системах на основе редкоземельных и переходных металлов можно ожидать значительные энергетические эффекты смешения, что должно приводить к нелинейной зависимости свойств таких фаз от состава.

При испарении в вакууме смесей оксидов редкоземельных элементов наблюдается заметное отклонение состава получаемой пленки от состава испаряемого материала. Установлено, что при испарении смеси оксидов гафния и лантана происходит обедне-

ние растущей пленки гафнием, а поверхностный слой пленки обогащается  $\text{HfO}_2$  [2]. При получении тонких пленок в системе  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  распределение концентраций компонентов по толщине пленки носит нелинейный характер и может быть достаточно резким [1]. Это можно объяснить тем, что растворимость  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  в моноклинной и тетрагональной окиси гафния незначительна [3, с. 176].

Однако установлено, что кубическая высокотемпературная модификация  $\text{HfO}_2$  может быть стабилизирована путем добавления редкоземельных оксидов в концентрациях более чем 5 мас.%. При этом образуются протяженные гетерогенные области существования кубических твердых растворов на основе высокотемпературных полиморфных модификаций  $\text{HfO}_2$  и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  типа флюорита и пироклора. Эти фазы могут быть метастабильными при низких температурах вследствие неравновесных условий осаждения и стабилизирующего влияния размерных эффектов в тонких пленках.

Описание диэлектрических свойств подобных неоднородных по толщине тонких пленок возможно на основе теории многослойного конденсатора Максвелла [4, с. 106]. Для изучаемого случая в качестве первого приближения можно представить получаемые тонкие пленки  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  как двухслойные, в которых приповерхностный слой обогащен  $\text{HfO}_2$ , а внутренний слой имеет состав, близкий к составу испаряемого источника. Тогда расчет частотной зависимости диэлектрических характеристик возможен на основе модели двухслойного конденсатора. Структура исследуемых образцов и соответствующая эквивалентная схема представлены на рис. 1.

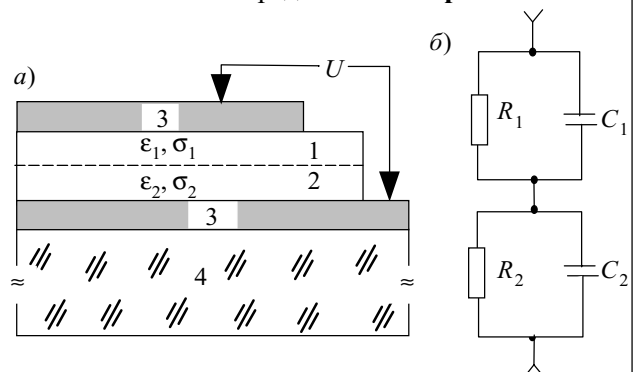


Рис. 1. Структурная (а) и эквивалентная (б) схемы МДМ-структуры на основе диэлектрических пленок  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ :

1 — поверхностный слой, обогащенный  $\text{HfO}_2$ ; 2 — слой  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ , близкий к составу испаряемого материала; 3 — пленка  $\text{Al}$ ; 4 — стеклянная подложка

Составляющие результирующей комплексной диэлектрической проницаемости пленки  $\epsilon = \epsilon_r - i\epsilon'$  для используемой модели могут быть записаны как [4]:

$$\epsilon_r = \frac{(\tau_1 + \tau_2) - \tau(1 - \omega^2\tau_1\tau_2)}{C_0(R_1 + R_2)(1 + \omega^2\tau^2)}; \quad (1)$$

$$\epsilon' = \frac{1 - \omega^2\tau_1\tau_2 + \omega^2\tau(\tau_1 + \tau_2)}{\omega C_0(R_1 + R_2)(1 + \omega^2\tau^2)}, \quad (2)$$

где  $\tau_1 = R_1 C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0}{\sigma_1}$ ;  $\tau_2 = R_2 C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0}{\sigma_2}$ ;

$R_1, R_2$  — сопротивление;

$\sigma_1, \sigma_2$  — проводимость;

$C_1, C_2$  — емкость;

$\epsilon_1, \epsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость соответствующих слоев;

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная;

$$\tau = \frac{R_1\tau_2 + R_2\tau_1}{R_1 + R_2} = \frac{(d_1\epsilon_2 + d_2\epsilon_1)\epsilon_0}{d_1\sigma_2 + d_2\sigma_1};$$

$d_1$  — толщина поверхностного слоя, обогащенного  $\text{HfO}_2$ ;

$d_2$  — толщина слоя с составом, соответствующим составу испаряемого материала;

$\omega$  — циклическая частота;

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{(d_1 + d_2)};$$

$S$  — площадь МДМ-структуры.

Тангенс угла диэлектрических потерь для двухслойной модели можно записать как

$$\text{tg}\delta = \frac{\epsilon'}{\epsilon_r} = \frac{1 - \omega^2\tau_1\tau_2 + \omega^2\tau(\tau_1 + \tau_2)}{\omega[(\tau_1 + \tau_2) - \tau(1 - \omega^2\tau_1\tau_2)]}. \quad (3)$$

Для проверки применимости модели двухслойного конденсатора была разработана экспериментальная методика получения пленок с составами, соответствующими начальной и конечной стадии процесса напыления. Исследования проводились на МДМ-структурах с тонкой диэлектрической пленкой системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ , которую наносили электронно-лучевым испарением из таблетированных мишеней на стеклянные подложки в вакууме  $3 \cdot 10^{-3}$  Па. Технологические режимы осаждения были аналогичны приведенным в [1, 5].

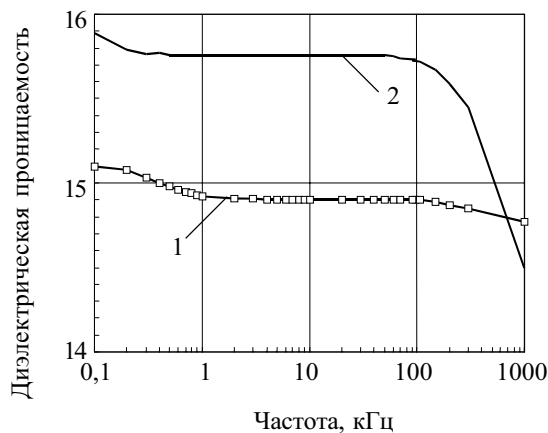


Рис. 2. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости пленок системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  (25%):

1 — эксперимент; 2 — модель

Осаждение пленки диэлектрика на подложки с предварительно напыленной проводящей пленкой проводилось с пошаговым перемещением заслонки одновременно в режимах "открывающаяся заслонка" и "закрывающаяся заслонка". При этом получалась ступенчатая конфигурация структуры с различным составом пленки. В случае режима "открывающаяся заслонка" ступенчато уменьшается толщина слоя пленки с составом, близким к составу испаряемого материала, вплоть до слоя, обогащенного  $\text{HfO}_2$ . Эти образцы позволяют оценить состав пленки, получаемой на конечной стадии. И наоборот, в случае режима "закрывающаяся заслонка" ступенчато увеличивается толщина слоя пленки с составом, близким к составу испаряемого материала, вплоть до толщины пленки, содержащей поверхностный слой, обогащенный  $\text{HfO}_2$ , что позволяет оценить состав пленок, получаемых на начальной стадии процесса.

В качестве электродов использовались алюминиевые пленки, получаемые резистивным испарением через маску в вакууме  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. На подложке размером  $60 \times 48$  мм формировались 400 МДМ-структур размером  $1 \times 1$  мм. Исследования проводились на участках с равной толщиной пленки диэлектрика.

Измерения диэлектрических параметров проводились на соответствующих МДМ-структурах. Значения  $\epsilon_1, \sigma_1$  измерялись на МДМ-структуре толщиной  $d_1$  с диэлектрическими параметрами, близкими к  $\text{HfO}_2, \epsilon_2, \sigma_2$  — на структуре толщиной  $d_2 = d - d_1$  ( $d$  — общая толщина слоя) и составом пленки, близким к составу испаряемого материала.

В процессе роста толщина пленок контролировалась по методике, основанной на интерференции лазерных лучей. Скорость осаждения пленки диэлектрика была постоянной и стабильной и составляла 5 нм/мин, а толщина варьировалась в интервале 60...400 нм. Итоговый контроль толщины пленок проводился с помощью интерферометра МИИ-4. Значение  $d_1$  в среднем составляло порядка 40 нм, а  $d_2$  — 260 нм. Измерения емкости и диэлектрических потерь на разных частотах проводились мостом полных проводимостей типа МПП-300 и измерителями Е7-8, Е7-11, Е7-12.

Экспериментальная зависимость получена усреднением результатов измерений на 5 подложках, каждая из которых содержала 400 МДМ-структур. На

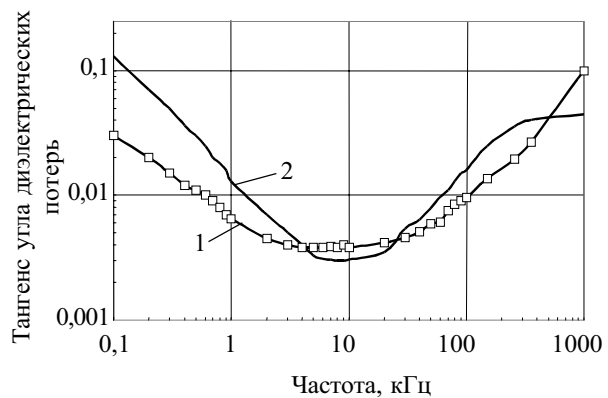


Рис. 3. Частотная зависимость  $\text{tg}\delta$  пленок системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  (25%):

1 — эксперимент; 2 — модель

**рис. 2 и 3** показаны частотные зависимости соответственно диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  (25 мас. %), измеренных и построенных в соответствии с результатами расчета по формулам (1) — (3) на основе данных, полученных на ступенчатых структурах.

Оценка адекватности используемой математической модели проводилась на основе критерия Фишера  $F$ , который определялся как отношение дисперсии адекватности модели к дисперсии воспроизводимости технологического процесса. Для модели, описывающей диэлектрическую проницаемость, величина  $F$  составляла 5,54 и для модели, описывающей тангенс угла диэлектрических потерь, — 5,67. Критическое значение критерия Фишера  $F_{\text{кр}}$  для уровня значимости 0,05 составляет 5,8 [6, с. 166]. Поскольку и в том, и в другом случае выполняется соотношение  $F < F_{\text{кр}}$ , можно сделать вывод о том, что модель двухслойного конденсатора достаточно хорошо описывает частотную зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  для исследуемого материала.

С физической точки зрения наблюдаемые расхождения между моделью и экспериментальными данными для  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  на высоких частотах можно объяснить тем, что для исследуемого материала ионно-релаксационный тип поляризации, который предполагается основным в теории многослойного конденсатора Максвелла, на высоких частотах уже не является доминирующим, и сказывается заметное влияние других видов поляризации, в результате чего наблюдается более медленное снижение величины диэлектрической проницаемости при повышении частоты.

Данные расчета были использованы для оптимизации параметров ТПЭЛС с диэлектрической пленкой системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ . Это позволило повысить электрофизические и оптические характеристики тонкопленочных излучателей.

\*\*\*

Предложенная методика расчета диэлектрических параметров пленок системы  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$  позволяет с достаточной достоверностью прогнозировать их характеристики в широком частотном диапазоне. Использование описанной методики позволяет существенно сократить масштабы технологического эксперимента при оптимизации параметров диэлектрических пленок многокомпонентных систем в соответствии с практическими требованиями.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сухарев Ю. Г., Акулюшин И. Л., Миронов В. С. и др. Электрофизические свойства пленок систем  $\text{ZrO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2\text{—Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2\text{—Y}_2\text{O}_3$  // Неорган. матер.— 1994.— Т. 30, № 4.— С. 556—558.
2. Ходос М. Я., Тетерин Г. А., Журавлев Ю. Ф. и др. Вакуумные конденсаты систем  $\text{HfO}_2\text{—Ln}_2\text{O}_3$  // Там же.— 1990.— Т. 26, № 11.— С. 2332—2334.
3. Глушкова В. Б., Кравчинская М. В., Кузнецов А. К., Тихонов П. А. Диоксид гафния и его соединения с оксидами редкоземельных элементов.— Л.: Наука, 1984.
4. Окадзаки К. Пособие по электротехническим материалам.— М.: Энергия, 1979.
5. Сухарев Ю. Г., Бойко В. А., Цацко В. И. и др. Получение и диэлектрические свойства пленок оксидов редкоземельных элементов // Электронная техника. Сер. Материалы.— 1987.— Вып. 4.— С. 62—65.
6. Чарыков А. К. Математическая обработка результатов химического анализа.— Л.: Химия, 1984.

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

- Оценка технологического процесса изготовления СБИС по стабильности элементов ее структуры. *А. М. Вантеев, А. И. Коробов (Россия, г. Москва)*
- Радиационное легирование сульфида кадмия и арсенида галлия. *В. А. Мокрицкий, А. С. Гаркавенко, В. В. Зубарев, С. В. Ленков (Украина, гг. Одесса, Львов, Киев)*
- Оптико-электронный дальномер малых дистанций для динамических систем. *Ю. Ф. Ваксман, В. И. Сатоний, В. В. Янко, И. А. Иванченко, Л. М. Будиянская (Украина, г. Одесса)*
- Приборы определения солености воды на основе индуктивных балансных сенсоров. *О. Н. Негоденко, С. А. Черевко (Россия, г. Таганрог)*
- Определение информативных параметров импульсных сигналов при контроле качества композиционных материалов. *В. С. Еременко, С. И. Еременко (Украина, г. Киев)*
- Люминесцентные и фотоэлектрические характеристики структур на основе гетероперехода "кремний — арсенид галлия". *Л. Л. Терлецкая, Л. Ф. Калиниченко, В. В. Голубцов (Украина, г. Одесса)*
- Исследование закономерностей и моделирование процессов бесконтактного химико-механического изготовления полупроводников. *Н. Н. Григорьев, М. Ю. Кравецкий, Г. А. Пащенко, С. О. Сытко, А. В. Фомин (Украина, г. Киев)*
- Влияние кремниевой подложки на пробивное напряжение разветвленного  $n^{++} - p^+$ -перехода. *В. П. Сидоренко, А. Ю. Кизяк, Ю. Е. Николаенко (Украина, г. Киев)*
- Определение диаметра луча с помощью фотоприемника. *Л. Ф. Викулина, В. А. Мингалев (Украина, г. Одесса)*

редакция в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле

ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2002 г.

**Конструирование и технология**

Контролепригодная схема двоичного сумматора с повышенным быстродействием. *А. И. Тимошкин* 1  
 Система автоматизированного выбора покрытий. *А. А. Ефименко, В. В. Симонов, О. В. Николаенко, А. Н. Дончило* 1  
 Автоматизация структурных преобразований схемы цифрового фильтра. *В. С. Ситников, П. В. Ступень, И. Л. Куцак* 1  
 Опыт совершенствования толстопленочной технологии. *Л. И. Панов, Р. Г. Сидорец* 1  
 Математическое и программное обеспечение исследования электропроводности толстопленочных резисторов. *А. В. Стерхова, В. Е. Лялин* 1  
 Статистическая оценка трудозатрат изготовления коммутационных плат радиоэлектронных средств. *А. А. Ефименко, А. В. Голубев, А. С. Кондрашов* 2  
 Генераторы с электромеханическими преобразователями на аналогах негatronов. *О. Н. Негоденко, В. А. Воронин, Д. В. Заруба* 2  
 Методика разработки и характеристики автогенератора класса Е. *В. Г. Крыжановский, А. Н. Рудякова, Д. В. Чернов* 2  
 Особенности разработки цифровых волоконно-оптических модулей. *А. А. Мерзвинский, В. И. Осинский, А. В. Палагин, В. Г. Вербицкий, А. А. Воронько, П. А. Мерзвинский, П. В. Белаш, Ю. И. Сибрин, С. П. Остапчук* 2  
 Многокристалльные модули на анодированной алюминиевой подложке. *В. А. Сокол, А. И. Воробьева* 2  
 Энергонезависимая память на элементах FLOTOX для БИС электронных карт. *В. П. Сидоренко, В. Н. Сидорчук, О. Н. Забродина, Ю. Е. Николаенко* 2  
 Оптимизация уровня безотказности в сложных устройствах микроэлектроники. *Б. П. Креденцер, С. В. Ленков, Р. А. Салимов, Д. А. Перегудов, С. А. Шомин* 3  
 Приборное обеспечение моделирования работы сложных радиоэлектронных устройств. *В. А. Емельянов, В. Н. Пономарь, А. А. Солонинко, Г. Г. Чигирь, Б. Н. Лисенков* 4—5  
 Контролепригодные двухканальные логические схемы цифровых компараторов. *А. И. Тимошкин* 4—5  
 Получение структуры цифрового фильтра из описания в пространстве состояний. *В. С. Ситников, П. В. Ступень, И. В. Бадерко* 4—5  
 Методика автоматизированного проектирования технологических процессов. *И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Макаренко* 4—5  
 Технологические средства изготовления микрополосковых линий для ГИС КВЧ-диапазона. *А. Е. Кренделев* 4—5  
 Косвенный лазерный нагрев поликристаллического кремния для получения активных элементов микросхем. *З. А. Искендер-заде, Ф. Д. Касимов, С. А. Исмаилова* 4—5  
 Регенерируемый цитратный раствор химического никелирования. *Р. Тарозайте, О. Гилене* 4—5  
 Использование керамики на основе твердых растворов (Ni, Co, Mn, Cu)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> для толстопленочных терморезисторов. *О. И. Шпотюк, И. В. Гадзаман, Р. В. Охримович, Н. М. Вакив, С. И. Осечкин, В. М. Цмоць, И. М. Брунец* 4—5

Технологический аспект повышения эффективности полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. *В. В. Курак, В. В. Цыбуленко, В. Л. Агбомассу* 6  
 Конструктивно-технологические ограничения при проектировании высоковольтных КМОП БИС. *В. Г. Вербицкий, В. И. Золотаревский, Ю. Е. Николаенко, Л. И. Самотовка, Е. С. Товмач* 6  
 Плазменная технология формирования субмикронных структур БИС. *С. П. Новосядлый* 6  
 Силовая микросхема для блоков управления газоразрядными источниками света. *Г. И. Гаврилюк, В. В. Севастьянов, Л. М. Бондарчук, В. В. Чечель* 6

**Специальное технологическое оборудование**

Диодные реакторные системы микротравления. *В. И. Фареник* 3  
 Модернизация установки фотонного отжига полупроводниковых пластин "Оникс". *Г. В. Савицкий, А. Ю. Бончик, И. И. Ижнин, С. Г. Кляк, И. А. Могиляк, И. П. Тростинский* 6

**Контроль в разработках и производстве**

Диагностика полупроводниковых структур при разработке и производстве изделий микроэлектроники. *Л. Д. Буйко, В. Н. Пономарь, А. А. Солонинко* 1  
 Информационно-измерительный комплекс для оптоемкостной спектроскопии полупроводников. *В. А. Васильев* 2  
 Оборудование для зондовой диагностики и контроля плазменных технологических процессов. *С. В. Дудин, А. П. Яцков, В. И. Фареник* 3  
 Упрощенный метод измерений при исследовании суперконденсаторов. *З. Стевич, М. Райчич-Вуясинович, З. Стоилькович* 4—5

**Материалы электроники**

Негатронные элементы на основе локальных пленок поликристаллического кремния. *Ф. Д. Касимов, М. Р. Рагимов* 1  
 Расчет упругих механических напряжений в неоднородных полупроводниковых структурах. *Ф. Д. Касимов, А. Э. Лютфалибекова* 2  
 Размерно-геометрические параметры моделей структуры толстых резистивных пленок. *А. В. Стерхова* 2  
 Исследование контакта «металл—полупроводник на основе HgMnTe». *Л. А. Косяченко, А. В. Марков, С. Э. Остапов, И. М. Раренко* 3  
 Ультрадисперсные субфазы в молекулярной электронике. *В. В. Ковальчук* 3  
 Датчики Холла на основе структур GaAs, полученных низкотемпературной ЖФЭ из расплавов Bi. *Н. М. Вакив, С. И. Круковский, И. Р. Завербный, И. А. Мрыхин* 3  
 Производство оптоволоконных материалов и полупроводниковых соединений на Украине. *Ю. В. Трубицын, Д. И. Левинзон* 4—5  
 Влияние  $\gamma$ -излучения на токоперенос в арсенидгаллиевом полевом транзисторе. *Ф. Д. Касимов, А. Э. Лютфалибекова* 4—5

Степенная связь параметров композиционного материала и его компонентов. *М. В. Дмитриев*

4—5

Комплексный подход к получению высокочистых материалов для микроэлектроники. *В. М. Ажажа, Г. П. Ковтун, И. М. Неклюдов*

6

Влияние облучения быстрыми нейтронами на эпитаксиальный арсенид галлия. *В. А. Завадский, С. В. Ленков, Д. В. Лукомский, В. А. Мокрицкий*

6

Математическое моделирование деградации керамических терморезисторов с отрицательным ТКС. *В. А. Балицкая, Н. М. Вакив, О. И. Шпотюк*

6

Комплексное легирование слоев GaAs, InGaAs при жидкофазной эпитаксии. *С. И. Круковский*

6

Контактообразующие пленки боридов и нитридов титана в арсенидгаллиевых СВЧ-приборах. *В. Н. Иванов, Р. В. Конакова, В. В. Миленин, М. А. Стовповой*

6

**Акусто- и оптоэлектронные устройства**

Акустооптическое устройство спектрального разуплотнения данных для оптических вычислительных средств. *В. В. Данилов*

1

Акустооптическое управление потоком данных оптических запоминающих устройств с побитовым представлением информации. *В. В. Данилов*

2

Получение тандемных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs для фотопреобразователей солнечной энергии. *Ю. Е. Николаенко, С. И. Круковский, И. Р. Завербный, О. В. Рыбак, И. А. Мрыхин*

3

Физико-технические параметры монокристаллов для светозвукопроводов акустооптических устройств. *В. В. Данилов*

4—5

Методика определения динамического диапазона полупроводниковых фотоприемников. *И. В. Докторович, В. К. Бутенко, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев*

6

Спектральная фоточувствительность Ni—Si:Au поверхностно-барьерных структур с инжекционным усилением. *Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин, С. В. Ленков, Р. Г. Сидорец*

6

Условия получения полых кремниевых призм для фотоэлектрических преобразователей. *Б. П. Масенко*

6

**Термоэлектрические устройства**

Влияние теплопереходов на температурный перепад многокаскадной термоэлектрической батареи. *Ю. Е. Николаенко, Л. Н. Вихор*

4—5

Анизотропный термоэлектрический компаратор. *А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул*

6

**Датчики неэлектрических величин**

Микроэлектронные индуктивные балансные сенсоры с катушками квадратной и треугольной формы. *О. Н. Негоденко, С. Г. Кошелев, В. И. Семенов, Ю. П. Мардамшин*

1

Имитатор сигналов роторного машинного оборудования. *Э. А. Дмитриев, С. В. Емельянов, Я. В. Деревягин*

1

Один из механизмов деградации микроэлектромеханических структур датчиков давления. *С. А. Адарчин, А. С. Кужженков, Л. В. Кожитов, В. Г. Косушкин*

2

Особенности разработки датчиков давления на ПАВ для АЭС. *Я. И. Лепих, В. К. Лопушенко, Н. Г. Черняк, Ю. Е. Николаенко*

2

Методика проектирования элементов прецизионного датчика давления с пневмомеханическим резонатором. *Н. Г. Черняк, А. Н. Бондаренко, С. И. Петровский*

3

Планарные взаимоиנדуктивные сенсоры для датчиков положения и приближения. *О. Н. Негоденко, С. А. Черевко*

4—5

Методы уменьшения температурной погрешности датчиков давления. *В. А. Васильев*

4—5

Использование низкоразмерных гетероструктур соединений A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> в датчиках давления. *И. Е. Марончук, А. Д. Кучерук, С. Ю. Ерохин, И. В. Чорный*

6

Электротепловой элемент сенсоров газа. *Я. И. Лепих*

6

**Вычислительная техника**

Исследование методов построения вычислительных устройств на основе FPGA. *В. И. Жабин, Н. А. Ковалев*

2

Однокристалльная микро-ЭВМ для систем с высокоразвитыми локальными сетями. *В. Г. Вербицкий, Г. П. Липовецкий, Л. В. Проценко, П. В. Сивобород*

3

**Электронные средства локации и навигации**

Бортовые радиотехнические средства ближней навигации и инструментальной посадки летательных аппаратов. *В. И. Кондрашов, В. И. Федоренко*

1

Реализация алгоритмов первичной обработки сигналов в системах пассивной звуковой локации. *В. А. Тарасов, Д. А. Кропачев*

1

Корреляционная пассивная звуковая локация. *В. А. Тарасов, Д. А. Кропачев*

2

**Лазерная техника**

Технология изготовления лазерных красителей для диапазона 472—600 нм. *В. П. Кругленко, И. Е. Марончук, М. В. Повстаной*

2

Микрочиповые лазеры. *А. О. Матковский, И. М. Сыворотка, С. Б. Узбиский, С. С. Мельник, Н. М. Вакив, И. И. Ижнин*

3

**Электроника и транспорт**

Устройства контроля уровня бодрствования водителя. *Д. И. Левинзон, Г. А. Чаусовский, Р. В. Головаха*

1

Экоинформационный комплекс контроля транспортных средств. *В. Ф. Примиский*

4—5

Система текущего контроля токсичности выхлопа двигателей транспортных средств. *М. Д. Скубилин, О. Б. Спиридонов*

4—5

**Системы и средства охлаждения**

Автоматизированное проектирование центральной системы контроля холодильной камеры. *Дж. Ф. Мамедов, Г. М. Мансуров, Х. М. Ахмедова*

1

Разомкнутая система охлаждения мощного транзистора с использованием плавящихся веществ. *А. И. Шапиро, Т. Ю. Николаенко*

1

Контурные тепловые трубы с алюминиевым испарителем для комбинированных систем охлаждения РЭА. *Ю. Е. Николаенко, Б. М. Рассемакин, С. М. Хайрнасоев*

3

Охлаждение перспективных накопителей на жестких магнитных дисках с применением тепловых труб. *Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец, В. А. Стрюченко, А. С. Белоконенко*

6

**Библиография**

В. Г. Вербицкий. Ионные технологии в электронике. *С. В. Денбновецкий*

6