

Технология и конструирование в электронной аппаратуре

К статье «Мощные излучающие диоды
инфракрасного диапазона»



1 2012

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

ТРИНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

4 — 8 июня 2012 года
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи
e-mail <tkea@optima.com.ua>
тел. +38 (048) 728-49-46,
728-18-50.

- Информационные системы и технологии
- Компьютерные системы и компоненты
- Системы и средства искусственного интеллекта
- Защита информации в широкополосных системах и компьютерных сетях
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии

*С текущей информацией
можно ознакомиться на сайте
www.tkea.com.ua/siet/inf.html*

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине** Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
- В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
- В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.



Номер выпущен при поддержке
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048) 728-18-50,
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 28.02.2012. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 7,5+1,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 250 экз. Заказ № 79.

Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2012

№ 1

Год издания 36-й

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антощук (г. Одесса)
Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д. ф.-м. н. М. И. Самойлович
(г. Москва)
Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)
Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)
Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.т.н. В. М. Шокало (г. Харьков)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство промышленной полити-
ки Украины
Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство "Политехпериодика"

Одобрено к печати Ученым советом
ОНПУ
(Протокол № 6 от 28.02 2012 г.)

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Реальная и предельная чувствительность некоторых приемников излучения ТГц/суб-ТГц-диапазонов. *Шевчик-Шекера А. В.* 3

Электронные средства: исследования, разработки

Система искусственного интеллекта для технической диагно-
стики фотошаблонов. *Козина Ю. Ю., Козин А. А.* 7
КИХ-фильтры с независимым управлением фазочастотной
характеристикой. *Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакур-
ский М. В.* 10

Импедансный анализатор для идентификации марок водно-
спиртовых напитков. *Кукла А. Л., Павлюченко А. С., Май-
стренко А. С., Мамыкин А. В.* 15

Системы передачи и обработки сигналов

Непрерывная и импульсная синхронизация работы генерато-
ров Чуа. *Элияшив О. М., Галюк С. Д., Политанский Л. Ф.,
Кушнир Н. Я., Танасюк В. С.* 22

Энергетическая электроника

Влияние толщины кремниевых пластин на характеристики
многопереходных солнечных элементов с вертикальными
 $p-n$ -переходами. *Гниленко А. Б., Дзензерский В. А., Плаксин
С. В., Погорелая Л. М.* 27

Функциональная микро- и наноэлектроника

Определение радиационной стойкости ИС с помощью низко-
энергетического излучения. *Перевертайло В. Л.* 30
Мощные излучающие диоды инфракрасного диапазона. *Ко-
ган Л. М.* 35

Природа переходов и механизмы генерации в лазерах на ос-
нове радиационно легированных кристаллов CdS. *Гаркавен-
ко А. С.* 41

Микрополосковые электромагнитные кристаллы с низкоим-
педансными неоднородностями. *Назарько А. И.* 44

Обеспечение тепловых режимов

Интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности ма-
лого размера. *Алексеев О. С., Кравец В. Ю., Копчевская И. А.* 49

Технологические процессы и оборудование

Подключающее МЭМС-устройство для контроля BGA-ком-
понентов. *Невлюдов И. Ш., Мартыняк Р. М., Палагин
В. А., Слободян Б. С., Разумов-Фризюк Е. А., Жарикова
И. В., Дмитриев М. И., Беляев А. С.* 54

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2011 г. 57

Список рецензентов номера 59

Новые книги 14, 34

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Реальна та гранична чутливість деяких приймачів випромінювання ТГц/суб-ТГц-діапазонів. *Шевчик-Шекера А. В.* (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Система штучного інтелекту для технічної діагностики фотошаблонів. *Козина Ю. Ю., Козин А. О.* (7)
Проектування цифрових КІХ-фільтрів з незалежним управлінням фазочастотною характеристикою. *Іванов В. В., Шакурський В. К., Шакурський М. В.* (10)

Імпедансний аналізатор для ідентифікації марок водно-спиртових напоїв. *Кукла О. Л., Павлюченко О. С., Майстренко А. С., Мамикін А. В.* (15)

Системи передачі та обробки сигналів

Безперервна та імпульсна синхронізація роботи генераторів Чуа. *Еліяшів О. М., Галюк С. Д., Політанський Л. Ф., Кушнір М. Я., Танасюк В. С.* (22)

Енергетична електроніка

Вплив товщини кремнієвих пластин на характеристики багатоперехідних сонячних елементів з вертикальними $p-n$ -переходами. *Гниленко О. Б., Дзензерський В. О., Плаксін С. В., Погоріла Л. М.* (27)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Визначення радіаційної стійкості ІС за допомогою низькоенергетичного випромінювання. *Перевертайло В. Л.* (30)

Потужні випромінюючі діоди інфрачервоного діапазону. *Коган Л. М.* (35)

Природа переходів та механізмів генерації в лазерах на основі радіаційно легованих кристалів CdS. *Гаркавенко О. С.* (41)

Мікросмужкові електромагнітні кристали з низькоімпедансними неоднорідностями. *Назарько А. І.* (44)

Забезпечення теплових режимів

Інтенсивність тепловіддачі при кипінні на поверхні малого розміру. *Алексейк О. С., Кравець В. Ю., Копчевська І. А.* (49)

Технологічні процеси та обладнання

Підмикальний MEMC-пристрій для контролю BGA-компонентів. *Невлюдов І. Ш., Мартиняк Р. М., Палагін В. А., Слободян Б. С., Разумов-Фризюк Є. А., Жарикова І. В., Дмитрів М. І., Беляєв О. С.* (54)

CONTENTS

New components for the electronic equipment

Real and limit sensitivity of some radiation detectors of THz/sub-THz ranges. *Shevchik-Shekera A. V.* (3)

Electronic facilities: investigations, development

Artificial intelligence system for technical diagnostics of photomasks. *Kozina Yu. Yu., Kozin A. A.* (7)

Designing of digital FIR-filters with independently controlled phase-frequency characteristic. *Ivanov V. V., Shakurskiy V. K., Shakurskiy M. V.* (10)

Impedance analyzer for trademarks of aqueous-alcoholic drinks identification. *Kukla A. L., Pavlyuchenko A. S., Maistrenko A. S., Mamykin A. V.* (15)

Systems of signals transfer and processing

Continuous and pulse synchronization of Chua oscillators. *Eliyashiv O. M., Galyuk S. D., Politanskii L. F., Kushnir N. Ya., Tanasyuk V. S.* (22)

Power electronics

The influence of silicon wafer thickness on characteristics of multijunction solar cells with vertical $p-n$ -junctions. *Gnilenko A. B., Dzenzerskii V. A., Plaksin S. V., Pogorelaya L. M.* (27)

Functional micro- and nanoelectronics

Determination of radiation resistance of integrated circuits with the use of low-energy X-radiation. *Perevertailo V. L.* (30)

Powerful infrared emitting diodes. *Kogan L. M.* (35)

The nature of transitions and generation mechanisms in optically homogeneous CdS crystals. *Garkavenko A. S.* (41)

Microstrip electromagnetic crystals with low-impedance inhomogeneities. *Nazarko A. I.* (44)

Ensuring of thermal modes

Boiling heat transfer intensity on small-size surface. *Alekseik O. S., Kravets V. Yu., Kopevskaya I. A.* (49)

Technological processes and equipment

Connecting MEMS device for BGA components functional testing. *Neolyudov I. Sh., Martynyak R. M., Palagin V. A., Slobodyan B. S., Razumov-Frizyuk E. A., Zharikova I. V., Dmytriv M. I., Belyaev A. S.* (54)

УДК 621.383

А. В. ШЕВЧИК-ШЕКЕРА

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева НАН Украины

E-mail: shevchik_anya@mail.ru

РЕАЛЬНАЯ И ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ТГц/суб-ТГц-ДИАПАЗОНОВ

Показано, что при расчете предельных параметров NEP приемников излучения ТГц/суб-ТГц-диапазонов, ограниченных флуктуациями потоков фонового излучения, необходимо учитывать фактор группировки фотонов при их излучении нагретыми телами и влияние дифракции, вносимой антенной при введении излучения в ПИ.

Ключевые слова: NEP, приемники ТГц/суб-ТГц-диапазонов.

Терагерцевый/субтерагерцевый (ТГц/суб-ТГц) диапазоны излучения, расположенные между дальним ИК-диапазоном и микроволновым радиодиапазоном (0,03–3 мм, 0,1–10 ТГц), не изучены в полной мере. Результаты исследований в этой области спектра долгое время не находили широкого применения из-за отсутствия мощных источников ТГц/суб-ТГц-излучения и приемников, способных зарегистрировать излучение в данных областях спектра.

За последние годы с развитием фемтосекундных твердотельных лазеров (особенно лазеров на кристаллах сапфира, активированных ионами титана) и приемников ТГц/суб-ТГц-диапазонов излучения наметился существенный сдвиг в изучении этих диапазонов длин волн.

Излучение в ТГц/суб-ТГц-области может быть использовано для контроля качества пищевых продуктов, биомолекулярных исследований, создания сканеров для досмотра пассажиров в аэропортах, проверки почтовых отправок на содержание биологического оружия и др. ТГц/суб-ТГц-диапазоны являются важными для астрофизических исследований, т. к. излучение Вселенной после Большого Взрыва в данном диапазоне длин волн содержит около 98% фотонов [1].

ТГц/суб-ТГц-излучение является, в определенной мере, альтернативой рентгеновским технологиям, поскольку многие материалы (пластмасса, ткань, бумага и т. д.) прозрачны в этом спектральном диапазоне или имеют характерные полосы поглощения. К тому же, ТГц/суб-ТГц-излучение является неионизирующим.

Важным звеном в системах ТГц/суб-ТГц-излучения являются приемники излучения (ПИ), преобразующие электромагнитные волны (оптические сигналы) в электрические. Все системы приема ТГц/суб-ТГц-излучения делятся на две группы — когерентные (гетеродинные) и некогерентные (прямого детектирования) системы (см., например, [2]). Гетеродинные системы, в

отличие от систем с прямым детектированием, позволяют регистрировать не только амплитуду сигнала, но и его фазу, что дает дополнительную информацию о регистрируемом объекте. Частота принимаемых сигналов в гетеродинных системах преобразуется в значительно меньшую частоту (1–10 ГГц), при которой сигналы уже могут быть усилены малошумящими усилителями. Эти системы являются в основном селективными (узкополосными).

Одной из основных характеристик приемников ТГц/суб-ТГц-излучения является параметр NEP (noise equivalent power) — мощность, эквивалентная шуму. Значения NEP описывают минимальный поток $W_s^{\min}$, который может быть зарегистрирован приемником при условии, что отношение сигнала к шуму равно единице.

На сегодняшний день, опубликовано достаточно много материалов, посвященных ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов, где приведены значения их NEP. Например, в [3–6] описаны такие ПИ и их предельные значения NEP. Однако в литературных источниках нет результатов исследований, в которых учитывались бы флуктуации потоков фонового излучения для разных температур фона в случае дифракционно-ограниченных пучков.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ реальной и предельной чувствительности некоторых приемников излучения ТГц/суб-ТГц-диапазонов. Расчет значений NEP проводился без учета фактора Бозе — Эйнштейна и с его учетом, что важно для рассматриваемого диапазона [2].

Схемы с прямым и гетеродинным детектированием сигналов

Схемы ПИ с прямым и гетеродинным типами регистрации сигналов могут быть в равной мере использованы в технических системах видения. Преимуществом приемников с прямым детектированием сигналов является простота регистра-

ции сигналов. Такие системы, как правило, являются пассивными и не требуют дополнительных источников для подсветки наблюдаемого объекта. Преимуществом гетеродинного детектирования сигналов по сравнению с прямым детектированием является более высокое отношение сигнал/шум для сигнального тока (или напряжения) из-за присутствия мощности опорного излучателя. Квантовый предел для нефоторезистивных ПИ, ограниченных флуктуациями фотонов только от опорного излучателя, равен одному фотону.

Схема прямого (некогерентного) детектирования сигналов (рис. 1)

Такие схемы используются в основном в спектроскопии и системах технического зрения в ультрафиолетовом, видимом, ИК-, ТГц- и мм-диапазонах спектра, т. е. в системах, не требующих сверхвысокого спектрального разрешения и «быстрых» детекторов (здесь могут применяться даже неохлаждаемые детекторы умеренной чувствительности с временем ответа $\tau=10^{-2}-10^{-3}$ с).

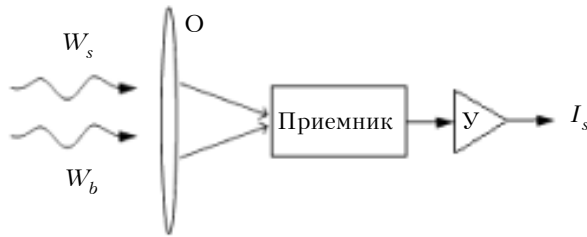


Рис. 1. Схема прямого детектирования сигнала: W_s — мощность сигнала; W_b — мощность фонового излучения; О — фокусирующая оптика; У — усилитель

В системах используются следующие приемники:

- низкотемпературные полупроводниковые болометры на горячих носителях ($\tau \approx 10^{-6}$ с);
- неохлаждаемые тепловые приемники излучения (ячейки Голя, пироэлектрики, болометры и микроболометры с $\tau=10^{-2}-10^{-3}$ с), их NEP обычно составляет $10^{-11}-10^{-8}$ Вт/Гц^{0,5} [7];
- различные типы полупроводниковых детекторов (InSb-, Si- или Ge-болометры на горячих электронах, примесные приемники излучения из Si и Ge) [8] с $\tau=10^{-6}-10^{-9}$ с и $NEP=10^{-11}-5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{0,5} при температуре, меньшей чем 4 К;
- примесные фоторезисторы, которые чувствительны вплоть до длины волны $\lambda=400$ мкм [9], с $NEP=5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2} при температуре, меньше чем 2 К;
- низкотемпературные болометры, имеющие близкую к предельной чувствительность в пределах от далекой ИК-области спектра до мм-диапазона, $NEP=(0,4-3) \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{0,5} при температуре 100–300 мК [10] и низком уровне фона.

Для нефоторезистивных ПИ, ограниченных флуктуациями фотонов только в сигнальном потоке, минимально детектируемая мощность и предельные значения NEP определяются как [2]

$$W_{s,dir}^{\min} = \frac{2h\nu}{\eta} \Delta f; \quad (1)$$

$$NEP_{dir} = \frac{W_{s,dir}^{\min}}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{2h\nu}{\eta} \sqrt{\Delta f}, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка;

ν — частота излучения;

η — квантовая эффективность (коэффициент связи) приемника излучения;

Δf — полоса пропускания.

Схема гетеродинного (когерентного) детектирования сигналов (рис. 2)

Такие схемы используются в основном при изучении космического фонового микроволнового излучения в мм- и ТГц-диапазонах спектра и в спектроскопии. Для них необходимы относительно мощные опорные источники излучения и «быстрые» детекторы ($\tau=10^{-10}-10^{-11}$ с) для обеспечения выполнения условия $W_o > W_s$ (W_o — мощность сигнала опорного излучателя LO частоты ν_{LO}).

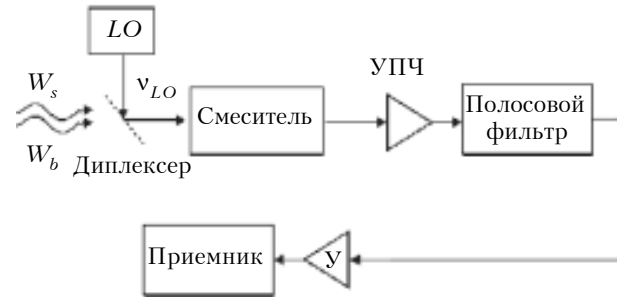


Рис. 2. Схема гетеродинного детектирования сигнала

Приемниками здесь могут служить высокочувствительные сверхпроводящие структуры, функционирующие при сверхнизких температурах (100–200 мК) с $NEP=10^{-17}-10^{-20}$ Вт/Гц^{0,5} [10] — СИС-структуры («сверхпроводник — изолятор — сверхпроводник») или сверхпроводящий болометр на горячих носителях (HEB — hot electron bolometer).

Для нефоторезистивных ПИ, ограниченных флуктуациями фотонов только в опорном потоке, минимально детектируемая мощность и предельные значения NEP определяются как [2]

$$W_{s,het}^{\min} = \frac{h\nu}{\eta} \Delta f; \quad (3)$$

$$NEP_{het} = \frac{W_{s,het}^{\min}}{\Delta f} = \frac{h\nu}{\eta} \Delta f. \quad (4)$$

Расчет предельных значений NEP ПИ без учета фактора Бозе—Эйнштейна и с его учетом

Предельные значения NEP ПИ, работающих в ТГц/суб-ТГц-диапазонах, определяются фундаментальными факторами — флуктуациями фонового излучения.

Для нефоторезистивных приемников излучения прямого детектирования, когда флуктуационный шум фонового излучения превалирует над остальными шумами, минимальный детектируемый сигнал, ограниченный фоном, определяется выражением [2]

$$W_{s,dir}^{min} = \sqrt{\frac{2h\nu}{\eta}} W_b \Delta f. \quad (5)$$

Отсюда видно, что $W_s^{min} \sim \Delta f^{0,5}$ и детектируемый сигнал может быть меньше мощности фонового излучения W_b .

Поскольку при переходе к низкочастотному излучению ($h\nu \ll k_B T_b$) среднее число фотонов увеличивается и это приводит к их группировке, при проведении расчета NEP ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов необходимо учитывать коэффициент Бозе — Эйнштейна [2]

$$K(\lambda) = \exp \frac{hc}{\lambda k_B T_b} / \left(\exp \frac{hc}{\lambda k_B T_b} - 1 \right), \quad (6)$$

где c — скорость света;

k_B — постоянная Больцмана;

T_b — температура излучения фона.

При таких расчетах также нужно учитывать влияние дифракционно-ограниченных пучков излучения, падающих на антенну. Ввод излучения в ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов часто осуществляется с помощью антенн, размер которых близок к длине волны излучения, а размеры приемных чувствительных элементов намного меньше. Использование антенн улучшает ввод мощности излучения в детекторы, что позволяет отследить изменение свойств детекторов при воздействии излучения небольшой мощности. Начиная с 1980-х годов для работы в этих спектральных диапазонах начали широко использоваться планарные антенны [11].

Учитывая «теорему антенн», согласно которой $A\Omega \geq \lambda^2$ (A — площадь антенны, Ω — телесный угол излучения антенны) [12, с. 35], для шага интегрирования $\Delta\lambda/\lambda=0,001$ и с учетом коэффициента Бозе — Эйнштейна выражение для расчета NEP принимает вид

$$NEP(\lambda, T_b) = \sqrt{\lambda^2 \frac{\varepsilon \tau_o}{\eta} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{4\pi h^2 c^3}{\lambda^6} K(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

где ε , τ_o — коэффициенты пропускания атмосферы и пропускания оптики соответственно.

Чувствительность гетеродинных детекторов часто приводится в терминах шумовой температуры T_{sys} , которая связана с NEP зависимостью [13]

$$NEP \approx 2k_B T_{sys} \sqrt{\frac{B_{IF}}{B_{out} \tau}}, \quad (8)$$

где B_{if} — полоса промежуточных частот;
 B_{out} — полоса частот на выходе.

На рис. 3 представлены графики зависимости значений предельных NEP ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазона, рассчитанные при $\varepsilon\tau_o/\eta=1$ и с учетом влияния дифракционно-ограниченных пучков излучения, падающих на антенну, при $\Delta\lambda/\lambda=0,001$. На рисунке также отмечены экспериментальные значения NEP для ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов с прямым и гетеродинным детектированием, известные из литературы. Некоторые характеристики этих приемников приведены в таблице.

Из графиков видно, что при $T_b=3$ К предельные значения NEP , связанные с величиной фоно-

№ ПИ	Характеристики ПИ	NEP , Вт/Гц ^{0,5}
ПИ с гетеродинным детектированием сигналов		
1	Диоды Шоттки, $T_b=300$ К, $B_{IF}=4$ ГГц, $T_{sys}=2220$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]	$3,9 \cdot 10^{-15}$
2	Диоды Шоттки, $T_b=300$ К, $f_{in}=2,5$ ТГц, $B_{IF}=4$ ГГц, $T_{sys}=2220$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]	$1,5 \cdot 10^{-14}$
3	HEB, $T_b=300$ К, $f_{in}=0,1$ ТГц, $B_{IF}=10$ ГГц, $T_{sys}=3190$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]	$9,4 \cdot 10^{-15}$
4	HEB, $T_b=300$ К, $f_{in}=0,1$ ТГц, $B_{IF}=10$ ГГц, $T_{sys}=4100$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]	$3,8 \cdot 10^{-14}$
ПИ с прямым детектированием сигналов		
5	GaAs/AlGaAs, сверхпроводниковый одноэлектронный транзистор (superconducting SET), $T_b \approx 50$ К, $\lambda=14-16$ мкм, $T_d=4,2$ К, $\Delta\nu/\nu=0,008$, $\eta=0,02$ [14]	$8,3 \cdot 10^{-19}$
6	HgCdTe, 288×4 , $T_b \approx 300$ К, $\lambda=8-11$ мкм, $T_d \approx 80$ К, $\Delta\nu/\nu=0,315$, $\eta=0,02$ [15]	$1,5 \cdot 10^{-14}$
7	Субмиллиметровая болометрическая линейка общего пользования (SCUBA), $\lambda=850$ мкм [15]	$1,5 \cdot 10^{-16}$
8	Массив из 48 болометрических детекторов, $\lambda=3000$ мкм [15]	$1,5 \cdot 10^{-17}$
9	Датчик на краю сверхпроводящего перехода (TES), $\lambda=60$ мкм [16]	$1,5 \cdot 10^{-18}$
10	HEB, $\lambda=300$ мкм [17]	$3,0 \cdot 10^{-17}$
11	MoAu-TES, Ta-TES, $\lambda=460$ мкм [18]	$1,3 \cdot 10^{-18}$
12	TES, $\lambda=460$ мкм [18]	$3,0 \cdot 10^{-19}$

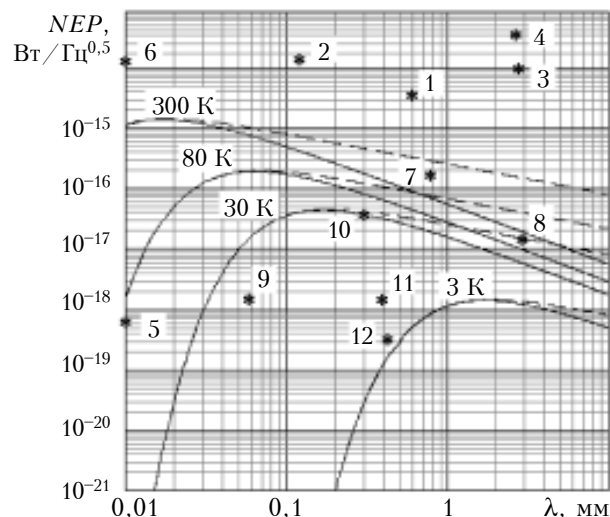


Рис. 3. Зависимости предельного NEP ПИ от длины волны, рассчитанные без учета фактора группировки фотонов (сплошные линии) и с его учетом (пунктир), а также экспериментальные значения (*) NEP для ПИ, указанных в таблице (цифры соответствуют номеру ПИ в таблице)

вой нагрузки, ограничены длиной волны 200 мкм, а при $T_b=30$ К — длиной волны 20 мкм. Из существующих приемников рассматриваемого диапазона наиболее чувствительными являются охлаждаемые сверхпроводниковые болометры на эффекте электронного разогрева (HEB) и датчики на краю перехода (TES). Они работают при низких фоновых нагрузках ($T_b=3-30$ К), и их NEP приближается к своим предельным значениям, $10^{-17}-10^{-19}$ Вт/Гц^{0.5}.

Приведенные на рис. 3 данные показывают, что рассчитанные для диапазона длин волн $\lambda=0,01-10$ мм и различных температур фона (3, 30, 80, 300 К) предельные значения NEP приемников излучения с учетом и без учета коэффициента Бозе — Эйнштейна, могут существенно отличаться друг от друга. Так, например, при $T_b=300$ К отличия начинают появляться при длине волны $\lambda=20$ мкм, а при $\lambda=3$ мм эти значения отличаются уже на порядок. Из результатов следует, что при расчете предельных значений NEP ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов необходимо учитывать фактор группировки фотонов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Blain A. W., Smail I., Ivison R. J. et al. Submillimetre galaxies // *Physics Reports*. — 2002. — Vol. 369. — P. 111176.
2. Сизов Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения. — К.: Академперіодика, 2011. [Sizov F. F. Fotoelektronika dlya sistem videniya. Kiev Akadempriodika. 2011]
3. Richards P. L. Bolometers for infrared and millimeters waves // *Appl. Phys.* — 1994. — Vol. 76, N 1. — P. 1–24. <http://dx.doi.org/10.1063/1.357128>
4. Hubers H. W. Terahertz heterodyne receivers // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* — 2008. — Vol. 14. — P. 378–391.
5. Benford D. J. Transition edge sensor bolometers for cmb polarimetry // *CMBpol Technology Whitepaper*. — 2008. http://cmbpol.uchicago.edu/workshops/technology2008/depot/cmbpol_technologies_benford_jcps_4.pdf

6. Karasik B. S., Sergeev A. V. The hot-electron photon counter // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2005. — Vol. 15, N 2. — P. 618–621. DOI: 10.1109/TASC.2005.849963

7. Sizov F., Rogalski A. THz detectors // *J. Prog. Quantum Electron.* — 2010. — Vol. 34. — P. 278–347.

8. Siegel P. H. Terahertz technology // *IEEE T. Microw. Theory.* — 2002. — Vol. 50. — P. 910–928.

9. Hubers H. W., Pavlov S. G., Holldack K. et. al. Long wavelength response of unstressed and stressed Ge:Ga detectors // *Proc. SPIE*. — 2006. — Vol. 6275. — P. 505–603.

10. Wei J., Olaya D., Karasik B.S. et. al. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics // *Nat. Nanotechnol.* — 2008. — Vol. 3. — P. 496–500.

11. Grade J., Haydon P., van der Weide D. Electronic terahertz antennas and probes for spectroscopic detection and diagnostics // *Proc. IEEE*. — 2007. — Vol. 95. — P. 1583–1591.

12. Brown E. R. Fundamentals of terrestrial millimeter-wave and THz remote sensing // In book: *Terahertz Sensing Technology*. — N.-Y.: World Scientific. — 2003. — Vol. 2. — P. 1–103.

13. Siegel P. H., Dengler R. J. Terahertz heterodyne imaging: instruments // *J. of Infrared and Millimeter Waves*. — 2006. — Vol. 27, N 5. — P. 631–656. DOI: 10.1007/s10762-006-9109-4

14. Takeji Ueda, Zhenghua An, Susumu Komiyama. Temperature dependence of novel single-photon detectors in the long-wavelength infrared range // *IR MM THz Waves*. — 2011. — Vol. 32, N. 5. — P. 673–680.

15. Sizov F., Rogalski A. THz radiation sensors // *Progr. Quant. Electr.* — 2010. — Vol. 34. — P. 278–347.

16. Morozov D., Mauskopf P. D., Ade P. et al. Ultrasensitive TES bolometers for space based FIR Astronomy // *AIP Conf. Proc.* — 2009. — Vol. 1185. — P. 48–51.

17. Siegel P. H., Dengler R. J. THz heterodyne imaging part I: Introduction and technique // *IR MM waves*. — 2006. — Vol. 27, N. 4. — P. 456–480.

18. Karasik B. S., Cantor R. Optical NEP in hot-electron nanobolometers // *21st International symposium on Space Terahertz Technology*. — Oxford. — 2010. — P. 291–297.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.08.2011 г.

Shevchik-Shekera A. V. **Real and limit sensitivity of some radiation detectors of THz/sub-THz ranges.**

Keywords: NEP detectors, terahertz/sub-terahertz detectors.

It is shown that while calculating the NEP parameter of radiation detectors of THz/sub-THz range, the fluctuations of the background radiation flux at different temperatures of the background in the case of diffraction-limited beam should be taken into account.

Ukraine, Kiev, V. Ye. Lashkaryov institute of semiconductor physics.

Шевчик-Шекера А. В. **Реальна та гранична чутливість деяких приймачів випромінювання ТГц/суб-ТГц-діапазонів.**

Ключові слова: NEP, приймачі ТГц/суб-ТГц-діапазонів.

Показано, що при розрахунку параметра NEP приймачів випромінювання ТГц/суб-ТГц-діапазонів необхідно враховувати флуктуації потоків фонових випромінювань для різних температур фону в разі дифракційно-обмежених пучків.

Україна, м. Київ, ІФН ім. В. Є. Лашкар'єва НАНУ.

УДК 621.382

К. т. н. Ю. Ю. КОЗИНА, А. А. КОЗИН

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: yuliyakc@mail.ru

СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ФОТОШАБЛОНОВ

Разработанная система имеет высокий уровень помехоустойчивости, поэтому ее включение в состав программно-аппаратного комплекса для технической диагностики фотошаблонов позволит уменьшить требования к его аппаратному исполнению, т. е. снизить стоимость комплекса, а в результате — сделать рентабельным мелкосерийное производство изделий.

Ключевые слова: фотошаблон, система искусственного интеллекта, техническая диагностика, реперные знаки.

При производстве изделий микроэлектроники одной из важнейших технологических операций является выполнение технической диагностики фотошаблонов — носителей информации о размерах и конфигурации изделий. Суть технической диагностики фотошаблонов (**ФШ**) заключается в выявлении их пригодности к дальнейшему использованию при производстве изделий микроэлектроники, а в случае их неисправности — в выделении их дефектов. Эта задача решается с помощью программно-аппаратных комплексов (**ПАК**), включающих подсистемы формирования, регистрации и распознавания изображений. При этом используется сложная прецизионная механика и дорогостоящая осветительно-фокусирующая аппаратура, которые обеспечивают высокую производительность и достоверность результатов диагностики. Применение таких комплексов обоснованно в случае крупносерийного производства. Однако в последние годы все чаще возникает потребность в производстве мелких и средних партий изделий, предназначенных для использования в аппаратуре специального назначения и в научных экспериментах. В этом случае применение существующих **ПАК** приводит к неоправданному росту стоимости технической диагностики фотошаблонов. Эта проблема может быть разрешена снижением требований к используемой в **ПАК** аппаратуре, но это приводит к появлению нежелательных мультипликативных и аддитивных помех на изображениях **ФШ**, что негативно отражается на достоверности результатов их технической диагностики.

Целью настоящей работы была разработка системы искусственного интеллекта (**СИИ**) для технической диагностики фотошаблонов в условиях помех.

Анализ процессов, которые реализуются в **ПАК** технической диагностики фотошаблонов показал, что при распознавании изображений одними из основных процедур, определяющих достоверность результатов диагностики фотошаблонов в условиях помех, являются локализация и классификация реперных знаков (**РЗ**) [1]. Эти процедуры являются основой метода, который базируется на позиционировании изображения диагностируемого фотошаблона относительно эталона по **РЗ**. Однако существующие методы локализации и классификации изображений не позволяют обеспечить достаточную достоверность результатов технической диагностики фотошаблонов в условиях помех. Эта проблема может быть решена при использовании вейвлет-преобразования, которое позволяет при распознавании объектов на изображении учитывать не только информацию про величину интенсивности пикселей, но и про геометрические размеры.

Процедура локализации **РЗ** (определение их координат на изображении фотошаблона) реализуется в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования (**ГВП**) [2], что позволяет обеспечить работоспособность метода локализации в условиях аддитивной помехи при отношении сигнал/шум не менее 9 (по мощности) и не менее 8 в условиях мультипликативной помехи. Применение метода для локализации **РЗ** позволило объединить две процедуры: поиска **РЗ** и выделения их контуров. При разработке процедуры идентификации (формирование образов) **РЗ** использован структурно-статистический подход, который базируется на выделении геометрических моментов-признаков (**ГМП**) с использованием информации о характерных точках контуров **РЗ** [3]. Процедура классификации (построение разделяющей поверхности в простран-

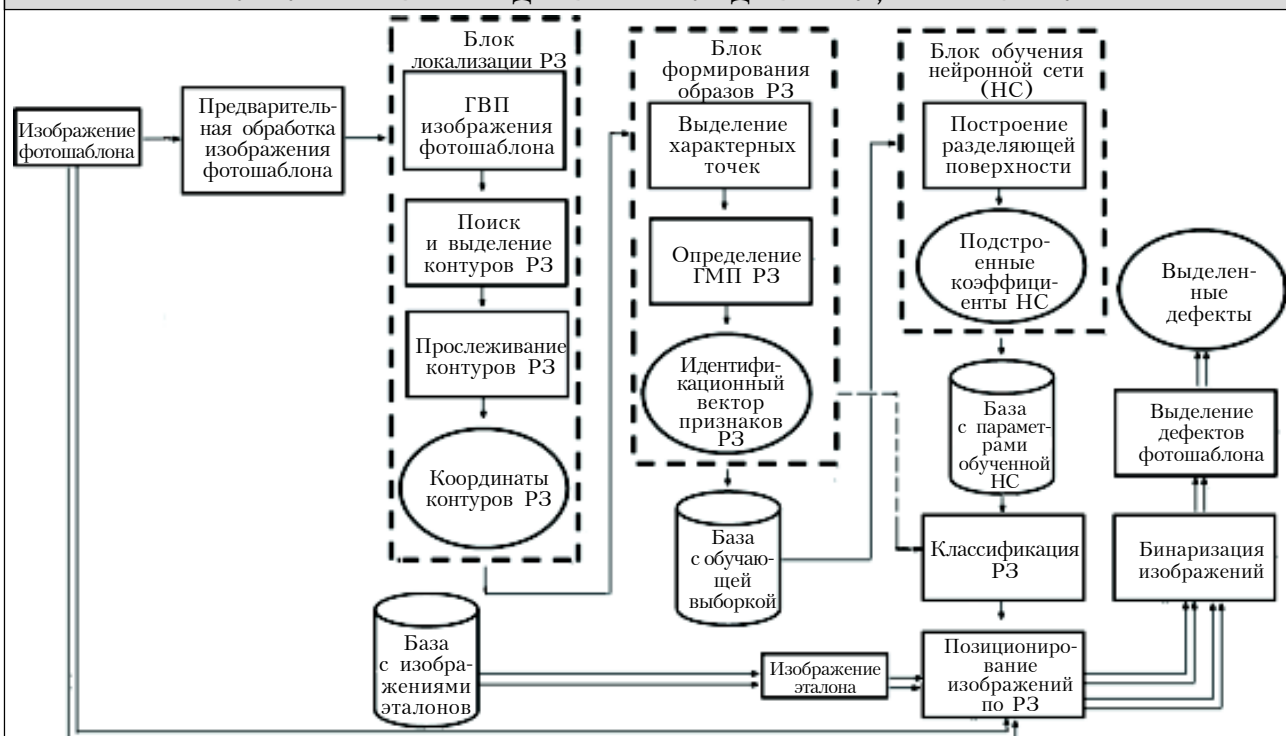


Рис.1. Структурная схема системы искусственного интеллекта для технической диагностики фотошаблонов
(— — передача данных для позиционирования изображений; — передача данных для выделения дефектов;
- - - - - передача в рабочем режиме)

стве признаков) реализована на основе субградиентного итеративного поиска экстремумов в пространстве ГВП, что позволило повысить достоверность классификации образов РЗ в условиях помех [4]. Для реализации процедуры выделения дефектов фотошаблона разработана методика бинаризации, основанная на автоматизации выбора порога в пространстве ГВП [5].

На рис. 1 представлена структура разработанной СИИ.

Реализация процедуры локализации РЗ позволяет получить координаты их местоположения на изображении фотошаблона. При этом сокращается объем обрабатываемой информации, поступающей на вход следующей процедуры — идентификации. Сформированный в результате идентификации набор признаков используется для формирования обучающей выборки. Далее происходит обучение системы на основе нейросетевого подхода, в результате чего строится разделяющая поверхность. После этого переходят к этапу классификации РЗ, на котором получают информацию о принадлежности РЗ к определенному классу. Результатом распознавания является классификационное решение. Далее выполняется позиционирование изображений диагностируемого фотошаблона относительно эталона, поступающего из специальной базы. После этого выполняется их бинаризация. В результате работы системы выделяются дефекты, т. е. определяется их местоположение на изображении ФШ.

Для реализации процедуры, выполняемой блоком локализации РЗ, использовался метод локализации малоразмерных объектов на изображении [2]. Созданная на его базе методика локализации РЗ на изображении ФШ позволила за счет применения ГВП получить их контур в условиях помех. Процедура, выполняемая блоком формирования образов РЗ, реализована на основе методики идентификации [2].

С целью уменьшения уровня шумов в системе предусмотрена предварительная обработка подаваемого на ее вход изображения фотошаблона. Обработка производится с помощью медианного фильтра для устранения аддитивной помехи и с помощью гомоморфной фильтрации для устранения мультипликативной помехи.

Разработанная система искусственного интеллекта кроме автоматического режима может также работать и в ручном, позволяющем наблюдать за всеми этапами обработки изображения и за получением результата.

На рис. 2 приведен результат проведения диагностики одного из фотошаблонов.

Следует отметить, что в СИИ реализована функция экспертизы, с помощью которой получаем информацию о количестве, радиусе и площади выделенных дефектов.

Тестирование разработанной системы показало, что по сравнению с существующими комплексами она позволяет до 1,2 раза повысить достоверность результатов диагностики при отношении сигнал/шум 10–20 (по мощности).

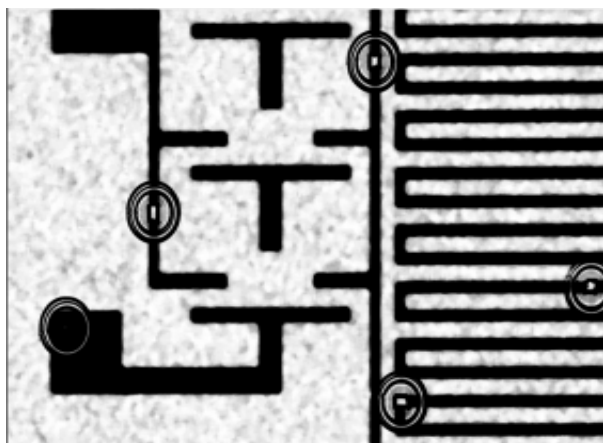


Рис. 2. Фрагмент изображения фотошаблона с выделенными дефектами

При величине этого отношения 7–10 достоверность результата составляет 0,95, в то время как существующие комплексы в условиях такой зашумленности вообще не работоспособны. Это означает, что разработанная система искусственного интеллекта имеет высокий уровень помехоустойчивости, поэтому ее включение в состав программно-аппаратного комплекса для технической диагностики фотошаблонов позволит уменьшить требования к его аппаратному исполнению, т. е. снизить стоимость комплекса, а в результате — сделать рентабельным мелкосерийное производство изделий.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Грачев А. А., Мельник А. А., Панов Л. И. Поверхностный монтаж при конструировании и производстве электронной аппаратуры. — Одесса: ЦНТЭПИ ОНЮА, 2003. [Grachev A. A., Mel'nik A. A., Panov L. I. Poverkhnostnyi montazh pri konstruirovanii i proizvodstve elektronnoi apparatury. Odessa: TsNTEPI ONYuA, 2003.]

2.. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Козина Ю. Ю. Позиционирование изображений фотошаблонов в системах автоматизированного оптического контроля // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 3. — С. 61–64. [Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu., Kozina Yu. Yu. Pozitsionirovanie izobrazhenii fotoshablonov v sistemakh avtomatizirovannogo opticheskogo kontrolya // Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature. 2007. N 3. P. 61–64.]

3. Щербакова Г. Ю., Крылов В. Н., Козина Ю. Ю. Идентификация изображений реперных знаков в системах АОК ИЭТ // Тр. Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2006». — Украина, г. Одесса, 2006. — С. 67. [Shcherbakova G. Yu., Krylov V. N., Kozina Yu. Yu. Identifikatsiya

izobrazhenii repornykh znakov v sistemakh AOK IET // Tr. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «SIET-2006». Ukraine, Odessa, 2006. P. 67.]

4. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Козина Ю. Ю., Волошин В. В. Помехоустойчивая классификация реперных знаков в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования // Системні технології. — 2007. — № 6. — С. 125–130. [Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu., Kozina Yu. Yu., Voloshin V. V. // Sistemni tekhnologiyi. 2007. N 6. P. 125]

5. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Антошук С. Г., Козина Ю. Ю. Помехоустойчивая бинаризация изображений фотошаблонов в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования // Труды Одес. политехн. ун-та. — 2007. — Вып. 2. — С. 119–122. [Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu., Antoshchuk S. G., Kozina Yu. Yu. // Trudy Odes. politekhn. un-ta. 2007. Iss. 2. P. 119]

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.10 2011 г.

Kozina Yu. Yu., Kozin A. A. **Artificial intelligence system for technical diagnostics of photomasks**

Keywords: photomask, artificial intelligence system, technical diagnostics, fiducial marks.

The developed artificial intelligence system has a high level of noise immunity, so its inclusion in the hardware and software for technical diagnostics of photomasks will reduce the hardware requirements for its execution, and thereby reduce the cost of the complex. As a result it will allow to make a small-scale production profitable.

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

Козина Ю. Ю., Козин А. О. **Система штучного інтелекту для технічної діагностики фотошаблонів**

Ключові слова: фотошаблон, система штучного інтелекту, технічна діагностика, реперні знаки.

Розроблена система штучного інтелекту має високий рівень завадостійкості, тому її включення до складу програмно-апаратного комплексу для технічної діагностики фотошаблонів дозволить зменшити вимоги до його апаратного виконання, тобто знизити вартість комплексу, а в результаті — зробити рентабельним дрібносерійне виробництво виробів.

Україна, Одеський національний політехнічний університет

УДК 681.3.06(075.8)

Д. т. н. В. В. ИВАНОВ, д. т. н. В. К. ШАКУРСКИЙ¹, М. В. ШАКУРСКИЙРоссия, г. Тольятти, Поволжский гос. университет сервиса, ¹Тольяттинский гос. университет

E-mail: Ivanov@tolgas.ru

КИХ-ФИЛЬТРЫ С НЕЗАВИСИМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Рассматривается структурная реализация цифровых КИХ-фильтров методом частотной выборки с возможностью управления фазочастотной характеристикой в реальном времени. Приводятся характеристики элементарных цифровых фильтров, алгоритм сложения их выходных сигналов и способ смещения фазочастотной характеристики.

Ключевые слова: цифровые фильтры, КИХ-фильтры, комплексное преобразование Фурье, управление фазочастотной характеристикой.

Проектирование цифровых КИХ-фильтров связано с решением задач обеспечения заданного быстродействия и заданных амплитудочастотных и фазочастотных характеристик (**АЧХ** и **ФЧХ**). Ряд цифровых устройств, например цифровые управляемые автоколебательные системы [1], фазовые модуляторы, системы синхронизации и другие, требует использования фильтров с возможностью двухстороннего смещения ФЧХ при неизменной АЧХ.

Одним из вычислительно эффективных методов реализации цифровых КИХ-фильтров, который позволяет реализовать управление ФЧХ, является метод частотной выборки [2, с. 418]: заданная АЧХ аппроксимируется рядом Котельникова, а каждая составляющая ряда реализуется элементарным цифровым фильтром (**ЭЦФ**). Такой подход позволяет распараллелить вычисления и получить максимальное быстродействие. Смещение ФЧХ достигается введением комплексного множителя для дополнительного поворота на необходимый угол вектора выходного сигнала.

Целью настоящей работы является синтез вычислительно эффективных КИХ-фильтров с независимыми АЧХ и ФЧХ.

Этапы проектирования КИХ-фильтров

На первом этапе проектируются ЭЦФ. Для этого используется скользящее дискретное преобразование Фурье выборки сигнала и формируются комплексные значения текущих отсчетов заданных составляющих спектра выборки сигнала. В этом случае не используется импульсная характеристика фильтра, которая нужна в сверточных алгоритмах, и нет необходимости выполнять обратное преобразование Фурье [3].

Определим комплексное значение отсчета выходного сигнала n -го ЭЦФ следующим образом:

$$\underline{U}_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp \frac{j \cdot 2\pi n k}{N}, \quad (1)$$

где X_k — массив нормированных отсчетов текущей выборки сигнала;

k — номер отсчета;

N — количество отсчетов в выборке;

j — мнимая единица.

На каждом шаге дискретизации происходит смещение выборки входного сигнала на один отсчет. При этом происходит удаление самого старого отсчета и добавление нового. При смещении выборки на один отсчет удаляется первое слагаемое в векторной сумме (1) и добавляется одно новое. Все остальные слагаемые остаются неизменными, изменяются лишь их порядковые номера на единицу, что эквивалентно повороту суммарного вектора на угол $-j \cdot 2\pi n / N$. Таким образом комплексное значение текущего отсчета выходного сигнала можно определить на основании комплексного значения предыдущего отсчета.

Используя допущение $N-1 \approx N$ [4], задачу можно упростить. В результате (1) преобразуется к виду

$$\underline{U}_{n,i} = \underline{U}_{n,i-1} \exp \frac{j \cdot 2\pi n}{N} - X_0 + X_i, \quad (2)$$

где i — номер отсчета выходного сигнала;

X_0 — самый старый нормированный отсчет предыдущей выборки;

X_i — новый нормированный отсчет текущей выборки.

Выражение (2) является алгоритмом работы ЭЦФ и позволяет проектировать его структуру. Импульсная характеристика ЭЦФ при фильтрации первой гармонической составляющей яв-

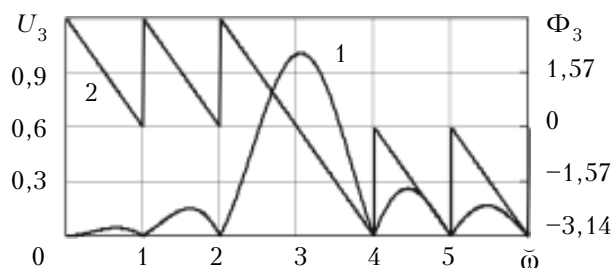


Рис. 1. АЧХ (1) и ФЧХ (2) элементарного цифрового фильтра

ляется конечной и описывается одним периодом косинусоиды, который равен длительности выборки T сигнала. При фильтрации n -й гармонической составляющей импульсная характеристика описывается n периодами косинусоиды. Известно, что АЧХ ЭЦФ в этом случае описывается sinc-функцией на интервале частот $\pm\infty$, максимум которой совпадает с частотой n -й гармонической составляющей текущего спектра, а ФЧХ фильтра является линейной функцией. Частотная характеристика ЭЦФ в области положительных частот описывается выражением

$$\underline{S}_n(\tilde{\omega}) = \frac{2T^2 \tilde{\omega} \sin(-2\pi\tilde{\omega})}{2\pi(T^2 n^2 + 2Tn - T^2 \tilde{\omega}^2 + n^2)} - \frac{2jT^2 \tilde{\omega} (\cos(-2\pi\tilde{\omega}) - 1)}{2\pi(T^2 n^2 + 2Tn - T^2 \tilde{\omega}^2 + n^2)}, \quad (3)$$

где $\tilde{\omega}$ — нормированная угловая частота.

Примеры АЧХ и ФЧХ для ЭЦФ при $n=3$ приведены на **рис. 1** (Φ_3 — фазовый сдвиг выходного сигнала третьего ЭЦФ относительно входного на соответствующей нормированной угловой частоте).

На втором этапе проектируется алгоритм сложения комплексных значений отсчетов выходных сигналов ЭЦФ по методу частотной вы-

борки. С учетом необходимости согласованного сложения ФЧХ получим следующее выражение:

$$\underline{U}_i = \sum_n (-1)^n A_n \underline{U}_{n,i}, \quad (4)$$

где A_n — коэффициенты, определяемые по заданной АЧХ с учетом асимметрии АЧХ ЭЦФ.

На третьем этапе определяется алгоритм управления смещением эквивалентной ФЧХ проектируемого фильтра. Оптимальным является введение управляемого поворота вектора выходного сигнала (4) умножением его на единичный вектор $e^{j\psi}$, где ψ — угол смещения ФЧХ фильтра. Как показали исследования, в этом случае отсутствует динамическая погрешность при изменении угла поворота вектора выходного сигнала, а АЧХ остается прежней. Значения отсчетов выходного сигнала проектируемого фильтра определяются выражением

$$u_i = \text{Re}(\underline{U}_i e^{j\psi}). \quad (5)$$

Реализация фильтров

Структурная схема фильтра, которая реализует алгоритмы (2), (4), (5), приведена на **рис. 2** [5]. Цифровой фильтр содержит блок 1 памяти текущего входного отсчета, блок 2 памяти всех отсчетов скользящей выборки сигнала, n идентичных по структуре вычислителей частичных вещественных и мнимых составляющих отсчета выходного сигнала ($V_1 \dots V_n$), входной вычитатель 3. В каждый из вычислителей $V_1 \dots V_n$ введены блок 4 памяти predetermined коэффициентов, четыре умножителя 5–8, вычитатель 9, первый сумматор 13 и второй 10, первый 15 и второй 16 выходные блоки суммирования n частичных вещественных составляющих отсчета выходного сигнала, преобразователь 17 угла единичного вектора в его проекции, первый 18 и второй 19 выходные умножители, выходной вычитатель 20, выход которого является выходом фильтра.

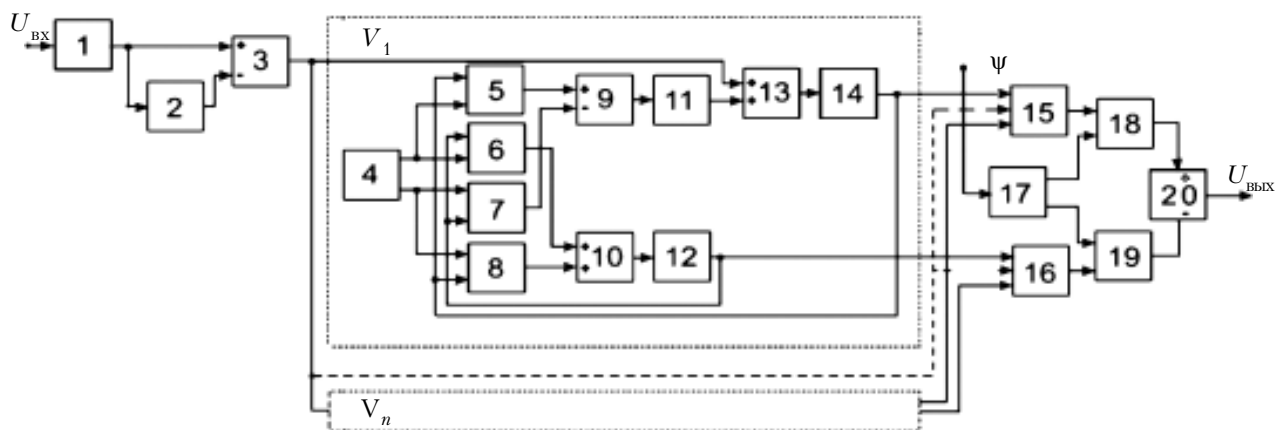


Рис. 2. Структурная схема фильтра

АЧХ и ФЧХ цифрового фильтра определяются суперпозицией характеристик элементарных фильтров, которые являются результатом работы вычислителей частичных составляющих отсчета выходного сигнала.

Перед каждым этапом вычислений на интервале дискретизации состояние схемы фильтра следующее. В блоке памяти 1 записано нормированное значение последнего отсчета сигнала, полученное на предыдущем интервале дискретизации. Выход блока 2 памяти всех отсчетов является выходом ячейки, где хранится значение самого старого отсчета выборки. В блоке 4 записаны вещественная b_{re} и мнимая b_{im} части единичного вектора поворота $e^{j\frac{2\pi n}{N}}$. В блоке памяти 14 хранится вещественная часть x_{re} комплексного значения последнего выходного отсчета, в блоке памяти 12 — его мнимая часть x_{im} .

Операцию поворота комплексного значения последнего выходного отсчета представим в алгебраической форме:

$$\underline{U}_{n,i-1} \exp \frac{j \cdot 2\pi n}{N} = b_{re} x_{re} - b_{im} x_{im} + \\ + j (b_{re} x_{im} + b_{im} x_{re}).$$

Эта операция выполняется с помощью умножителей 5–8, вычитателя 9 и сумматора 10. При необходимости смещения ФЧХ фильтра аналогичным образом поворачивается и результирующий комплексный отсчет, который формируется блоками суммирования 15 и 16. Для этого используются преобразователь 17 угла единичного вектора в его проекции, умножители 18 и 19, и вычитатель 20, с помощью которого выделяется вещественная часть комплексного значения выходного отсчета, являющаяся выходным сигналом. В зависимости от решаемой задачи, блок 17 может хранить необходимое количество значений проекций единичного вектора поворота или вычислять их по известным алгоритмам.

На каждом интервале дискретизации текущий нормированный отсчет входного сигнала записывается на место предыдущего отсчета в блок памяти 1. В вычитателе 3 из него вычитается значение самого старого отсчета. В сумматоре 13 каждого вычислителя полученная разность складывается с вещественной частью комплексного значения предыдущего выходного отсчета, а результат записывается в блок памяти 14. После этого выполняется перерасчет x_{re} и x_{im} , которые записываются в блоки памяти 11 и 12. Одновременно в блок памяти отсчетов 2 вместо самого старого отсчета записывается последний отсчет и выполняется переадресация выхода блока 2. Вещественная и мнимая части результирующего комплексного сигнала вычисляются суммированием в блоках 15 и 16 значений со своими знаками и коэффициентами, которые хранятся в блоках памяти 14 и 12 каждого вычислителя. В умножителях 18 и 19 вещественная и мнимая части результирующего комплексного сигнала умножаются на соответствующие проекции единичного вектора, значения которых определяются текущим углом управления ФЧХ в блоке 17. В выходном вычитателе 20 вычисляется текущий вещественный отсчет выходного сигнала.

Пример проектирования фильтра

При проектировании цифрового фильтра с заданной АЧХ и управляемой ФЧХ используем приведенные координаты. В этом случае номер деления по оси абсцисс соответствует номеру ЭЦФ. Реальные частоты при этом будут определяться умножением приведенной частоты на величину $(N\Delta t)^{-1}$, где Δt — интервал дискретизации.

Пусть задана АЧХ трапецевидной формы, представленная на рис. 3 зависимостью 1. Использование коэффициентов A_n ЭЦФ по отсчетам трапеции дает результат, представленный зависимостью 2 в линейных координатах и зависимостью 3 в логарифмических.

Как видно из рисунка, результирующая АЧХ обладает достаточно сильными биениями в по-

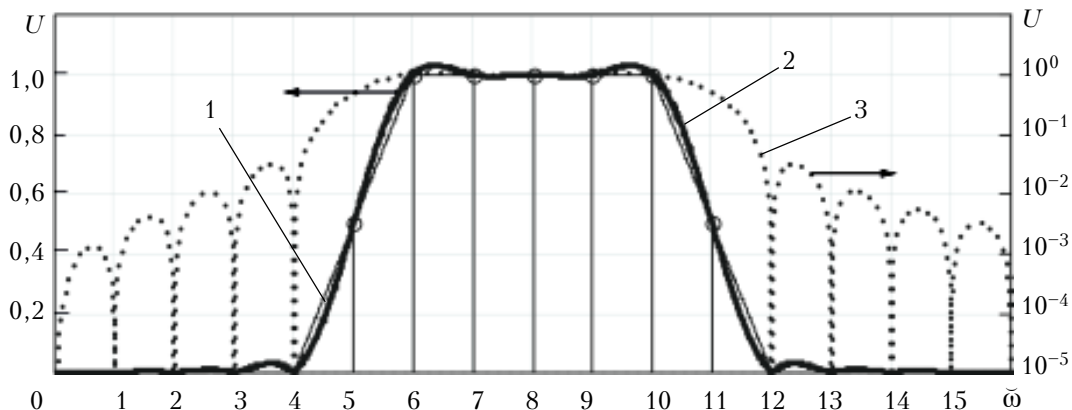


Рис. 3. Исходная (1) и результирующая (2, 3) АЧХ

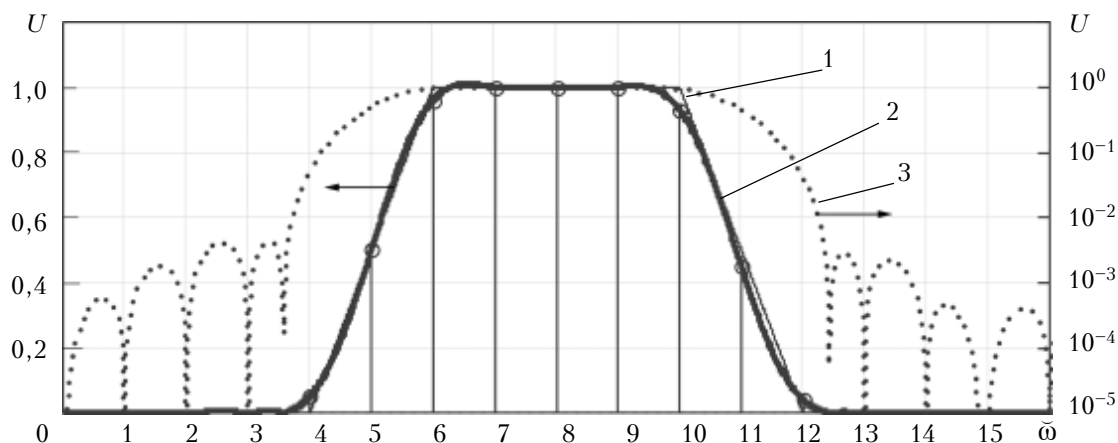


Рис. 4. Исходная (1) и результирующая (2, 3) АЧХ после подбора коэффициентов

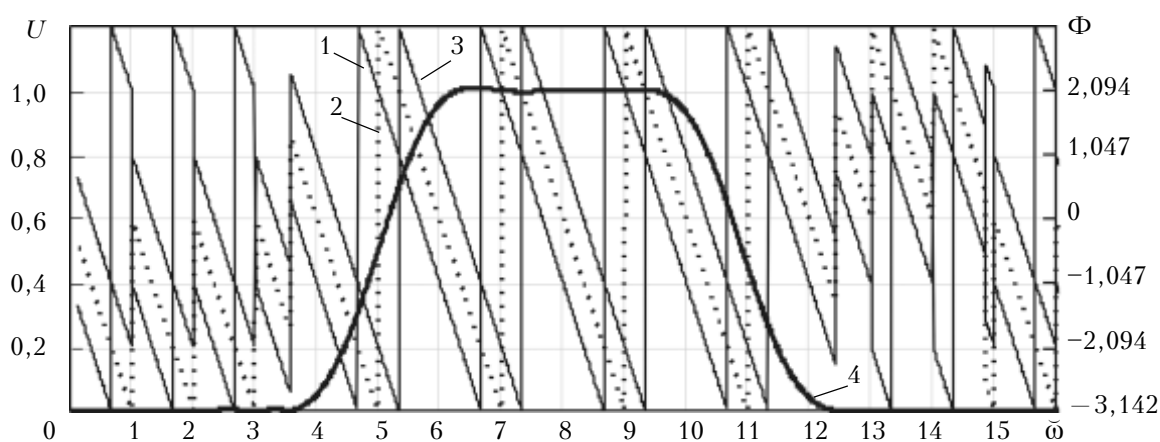


Рис. 5. ФЧХ исходная (1), смещенная на -60° (2) и на $+60^\circ$ (3), а также исходная АЧХ (4)

Таблица 1

n	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A_n	0,05	0,5	0,96	1	1	1	0,93	0,45	0,04

Таблица 2

Угол смещения в градусах	-60	0	60
Вещественная составляющая вектора поворота	0,5	1	0,5
Мнимая составляющая вектора поворота	$-0,866$	0	$0,866$

лосе пропускания и невысокой степенью подавления вне полосы пропускания. Для более точного соответствия результирующей АЧХ заданной требуется ввести дополнительные ЭЦФ и подобрать значения коэффициентов A_n .

После проведенного подбора по разработанной технологии были получены коэффициенты, приведенные в **табл. 1**.

Результирующая АЧХ после подбора коэффициентов представлена на **рис. 4** (зависимости 2 и 3), где видно, что АЧХ заметно улучшилась. Асимметрия амплитудных коэффициентов

вызвана асимметрией АЧХ ЭЦФ для положительных частот (рис. 1).

На **рис. 5** приведена исходная ФЧХ (пунктирная линия 2) и смещенные ФЧХ на углы -60° и $+60^\circ$ (линии 1 и 3), что демонстрирует возможность независимого смещения ФЧХ. Смещенные ФЧХ получены с помощью векторов поворота, значения вещественной и мнимой частей которых приведены в **табл. 2**.

Составляющие вектора поворота следует рассматривать как управляющий сигнал, который может вводиться в фильтр в динамическом режиме. При таком управлении переходный процесс для фазы выходного сигнала отсутствует, что является преимуществом разработанных фильтров. АЧХ при этом остается прежней (см. рис. 5, кривая 4). Смещение ФЧХ происходит без изменения ее угла наклона, из чего следует, что разработанный алгоритм управления не является аналогом цифровой линии задержки.

Выводы

В отсутствие жестких требований к подавлению вне полосы пропускания проектирование цифровых КИХ-фильтров следует вести методом частотной выборки. В этом случае достига-

ется большее быстродействие, чем при использовании сверточных алгоритмов.

Наличие в алгоритме работы фильтра отсчетов выходного сигнала в комплексной форме позволяет смещать его ФЧХ путем умножения отсчета на единичный комплексный вектор поворота. Смещение ФЧХ не вызывает переходного процесса для фазы выходного сигнала и не влияет на АЧХ.

Разработанная структура фильтра минимизирует количество последовательных вычислений на интервале дискретизации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шакурский В.К., Иванов В.В., Нагаев Д.А. Цифровые генераторные преобразователи повышенной чувствительности для систем управления и контроля // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — №1. — С.13—15. [Shakurskii, V.K., Ivanov V.V., Nagaev D.A. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2008. N 1. P.13]

2. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2004. [Aificher, E.S., Dzhervis B.U. Tsifrovaya obrabotka signalov: prakticheskii podkhod. Moscow: Izdat. dom «Vil'yams», 2004]

3. Шакурский М.В. Алгоритм синтеза цифровых фильтров на основе прямого и обратного преобразования Фурье с промежуточной обработкой спектра // Инфокоммуникационные технологии (ИКТ). — 2010. — Т. 8, №4. — С. 29—32. [Shakurskii M.V. // Infokommunikatsionnye tekhnologii (IKT). 2010. Vol. 8, N 4. P. 29]

4. Шакурский М.В., Воловач В.И. Метод увеличения быстродействия цифровых фильтров на основе скользящего дискретного преобразования Фурье // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2010. — №3. — С. 20—22. [Shakurskii, M.V., Volovach V.I. // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy, 2010. N 3. P. 20]

5. Патент РФ на полезную модель № 113597. Цифровой фильтр со смещаемой фазочастотной характеристикой / Шакурский В.К., Шакурский М.В. — 20.02.2012. — Бюл.

№ 5. [Patent RF na poleznuyu model' N 113597. 20.02.2012. — Bull. 5 // Shakurskii V.K., Shakurskii M.V.]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 07.09 2011 г.*

Ivanov V. V., Shakurskiy V. K., Shakurskiy M. V.
**Designing of digital FIR-filters with independently
controlled phase-frequency characteristic.**

*Keywords: digital filters, FIR-filters, complex Fourier
transform, phase-frequency characteristic control.*

The structural realization of digital FIR-filters using frequency sampling with real time control of phase-frequency characteristic is considered. The characteristics of elementary digital filters, the algorithm of their output signals summation and the way of phase-frequency characteristic shift are given.

Rissia, Togliatti, Volga region State University of Service, State University of Togliatti.

Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакурский М. В.
**Проектирование цифровых КИХ-фильтров с независи-
мым управлением фазочастотной характеристикой.**

*Ключевые слова: цифровые фильтры, КИХ-фильтры,
комплексные преобразования Фурье, управление фа-
зочастотной характеристикой.*

Розглядається проектування та структурна реалізація цифрових КИХ-фільтрів методом частотної вибірки з можливістю управління фазочастотною характеристикою в реальному часі. Наводяться характеристики елементарних цифрових фільтрів, алгоритм складання їх вихідних сигналів і спосіб зміщення фазочастотної характеристики.

Росія, м. Тольятті, Поволзький держ. ун-т сервісу, Тольяттінський держ. ун-т.

НОВЫЕ КНИГИ

Голдсмит А. Беспроводные коммуникации.— Москва: Техносфера, 2011.— 904 с.

Книга знакомит читателей с основами теории и технологиями беспроводной связи, а также с аналитическими инструментами исследований в этой области. Она способствует формированию у читателя комплексного понимания фундаментальных принципов, лежащих в основе систем беспроводной связи. Приведен обзор беспроводных систем и стандартов, представлены характеристики беспроводных каналов, включая ограничения их пропускной способности. Детально рассматриваются различные методы модуляции и кодирования, а также схемы обработки сигнала, включая современную адаптивную модуляцию, технологии широкополосной передачи, модуляции нескольких несущих. Подробно рассмотрены технологии многоэлементных антенных систем. Последние главы посвящены системам множественного доступа, созданию сотовых систем и специальных беспроводных сетей.

Предназначена для широкого круга специалистов, работающих в области беспроводной связи.



УДК 532.538; 539.21; 621.38

К. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА, А. С. ПАВЛЮЧЕНКО,
А. С. МАЙСТРЕНКО, А. В. МАМЫКИН

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва НАНУ
E-mail: kukla@isp.kiev.ua

ИМПЕДАНСНЫЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАРОК ВОДНО-СПИРТОВЫХ НАПИТКОВ

Показана возможность определения марки и распознавания нелегального водно-спиртового напитка на основе измерения и анализа частотных характеристик активной и реактивной составляющих импеданса исследуемого раствора в диапазоне частот $0,5 - 10^5$ Гц.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, водно-спиртовой раствор, электрохимическая ячейка, добротность.

Определение качества водно-спиртовых напитков (**ВСН**) и соответствия их заявленным маркам приобретает актуальность в связи с появлением большого количества некачественных напитков и подделок водочных изделий. При этом очень важен оперативный контроль как марок ВСН, так и наличия в них токсичных примесей, таких как метанол, ацетон, альдегиды, эфиры, сивушные масла и др. Наиболее часто для удешевления продукции используют спирт-сырец, в котором типовая концентрация метилового спирта в 4–5 раз больше, а массовые концентрации эфиров и сивушных масел на 1–2 порядка больше, чем в питьевом этиловом спирте [1]. Традиционный контроль водочных изделий основан на использовании сугубо химических методов анализа, которые достаточно длительны и требуют проведения измерений в специальных лабораториях.

Для оперативной диагностики ВСН могут быть использованы современные сенсорные методы экспресс-анализа, положенные в основу работы приборов типа «электронный нос». Известны применения таких приборов для распознавания марок вин и коньячных напитков по их запаху. С помощью многоэлементного массива чувствительных слоев полимеров [2], электропроводных полимеров [3] или каликсаренов [4] и мультивариационной обработки многомерных данных сигналов от сенсорного массива формируются так называемые химические образы исследуемых объектов с возможностью их идентификации. Недостатком таких приборов является их относительная сложность, необходимость подготовки набора чувствительных элементов и низкая воспроизводимость результатов анализа напитков с большим процентным содержанием спирта. То есть имеется потребность в разработке других оперативных методов диагностики и

создания на этой основе новых аналитических приборов, способных быстро и с достаточной надежностью оценивать качество водочных изделий.

Для решения этой задачи может быть использован метод импедансной спектроскопии, основанный на анализе частотных характеристик активной и реактивной компонент электропроводности исследуемых растворов в определенном диапазоне частот, полученных методом импедансной спектроскопии [5]. Следует отметить, что известно применение импедансных измерений как метода детектирования вместе с искусственными нейронными сетями для создания варианта «электронного языка» для классификации разных вин [6].

В настоящей работе метод импедансной спектроскопии реализован на базе разработанного анализатора для экспресс-диагностики марок водочных изделий. Принцип работы такого анализатора состоит в следующем. Исследуемый раствор помещается в электрохимическую ячейку (**ЭХЯ**) с двумя плоскими металлическими (золотыми) электродами с эффективной площадью порядка 1 см^2 и расстоянием между ними около 2 мм. Параметры эквивалентной схемы такой ячейки зависят от состава и консистенции исследуемого ВСН, а также от присутствия в нем примесей. При этом характерными являются частотные зависимости этих параметров и наличие резонансного пика добротности на определенной частоте, соответствующей минимуму диэлектрических потерь.

Для изготовления водочных изделий используется вода из разных источников и, следовательно, с разным минеральным составом, разные по происхождению спирты, а также разная технология. Все это должно влиять на значения параметров эквивалентной схемы электрохимической ячейки. Поэтому частотные зависимости

активной и реактивной составляющих полного сопротивления и добротности для разных типов напитков будут отличаться как по величине, так и по положению резонансного пика, что позволяет проводить идентификацию напитков путем анализа полученных для них частотных характеристик импеданса.

Целью настоящей работы была проверка возможности проведения идентификационного анализа водно-спиртовых напитков с помощью разработанной схемой реализации импедансного анализатора, оптимизация условий и процедуры анализа для достижения приемлемой стабильности и повторяемости результатов, а также разработка методики автоматизированной идентификации типов напитков и исследование возможности проведения на ее основе оперативной оценки подлинности образцов напитков.

Принцип работы

Принцип работы устройства основан на измерении полного импеданса анализируемого водно-спиртового раствора в диапазоне частот от 0,5 Гц до 150 кГц.

Блок-схема измерителя приведена на рис. 1. Микропроцессорное устройство (МПУ) осуществляет генерацию синусоидальных сигналов необходимой частоты, которые с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) преобразуются в ступенчатый сигнал и затем подаются на вход фильтра низких частот, выделяющего необходимую основную гармонику. Полученный синусоидальный сигнал поступает на вход исследуемой жидкостной ячейки. Выходной сигнал снимается с резистивной нагрузки R_n . Входной и выходной сигналы синхронно оцифровываются двухканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), и полученные дискретные значения поступают на МПУ, где с помощью цифровой фильтрации определяются их амплитуды $U_{вх}$, U_n и фазовый сдвиг. Далее рассчитывается полный импеданс $\dot{Z}$ исследуемого образца из соотношения:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}_{вх} - \dot{U}_n}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_{вх} - \dot{U}_n}{\dot{U}_{вх}} R_n = R + jX, \quad (1)$$

где R , X — соответственно, активная и реактивная составляющие импеданса ЭХЯ.

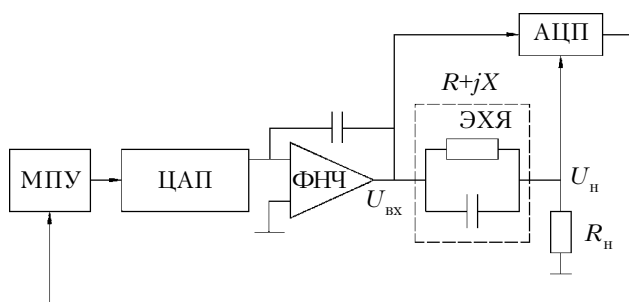


Рис. 1. Функциональная блок-схема импедансного измерителя

Электронная схема устройства может быть условно разделена на два взаимосвязанных блока: блок генератора гармонического сигнала и блок анализатора сигнала, прошедшего через исследуемый образец. Микропроцессорное устройство, показанное на рис. 1, фактически состоит из пяти микропроцессоров: одного главного и четырех вспомогательных. Главный микропроцессор осуществляет генерацию гармонического сигнала, а также управление блоком анализатора, содержащего АЦП и вспомогательные процессоры. Главный процессор связывается с сопряженной ЭВМ через последовательный интерфейс и со вспомогательными процессорами через шину SPI. Управление работой измерителя и вторичная обработка результатов измерения (включая собственно вычисление импеданса) осуществляется с помощью программного обеспечения ЭВМ.

Блок генератора содержит главный микропроцессор (ATmega8515), ЦАП (AD7945), цепи сдвига и фильтрации выходного сигнала. Принципиальная электрическая схема блока показана на рис. 2.

Главный микропроцессор работает на тактовой частоте 16 МГц. Выдача отсчетов гармонического сигнала происходит на фиксированной частоте 400 кГц (равной примерно 1,3 от частоты Найквиста для верхней границы рабочего диапазона частот). Таким образом, рабочий цикл микропроцессора составляет 40 тактов. Для генерации сигнала используется табулированная (2048 12-разрядных отсчетов) синусоида, записанная в ПЗУ микропроцессора.

В рамках рабочего цикла главный микропроцессор выполняет следующие операции:

- вычисление необходимого фазового смещения для табулированной синусоиды соответственно заданной частоте сигнала;
- выбор соответствующего значения синусоиды из таблицы и его выдачу на вход ЦАП;
- синхронный запуск входного и выходного АЦП.

Эти операции циклически повторяются на протяжении 10 или более периодов генерируемого сигнала. По окончании этого времени генерация останавливается, результаты измерения считываются со вспомогательных процессоров и передаются на сопряженную ЭВМ. После этого начинается генерация на следующей рабочей частоте (в режиме развертки частоты) или ожидается поступление очередной команды от ЭВМ.

Амплитуда сигнала на выходе усилителя А1.1 определяется источником опорного напряжения ЦАП (LM285) и для рассматриваемой схемы составляет 1,2 В. Этот сигнал удваивается и добавляется к постоянному опорному напряжению U_0 с помощью цепи смещения (усилитель А1.2). Сигнал на выходе А1.2 изменяется в пределах от $-U_0$ до U_0 . Активный фильтр низких частот с частотой среза 150 кГц, построенный на усилителе А2, удаляет из выходного сигнала гене-

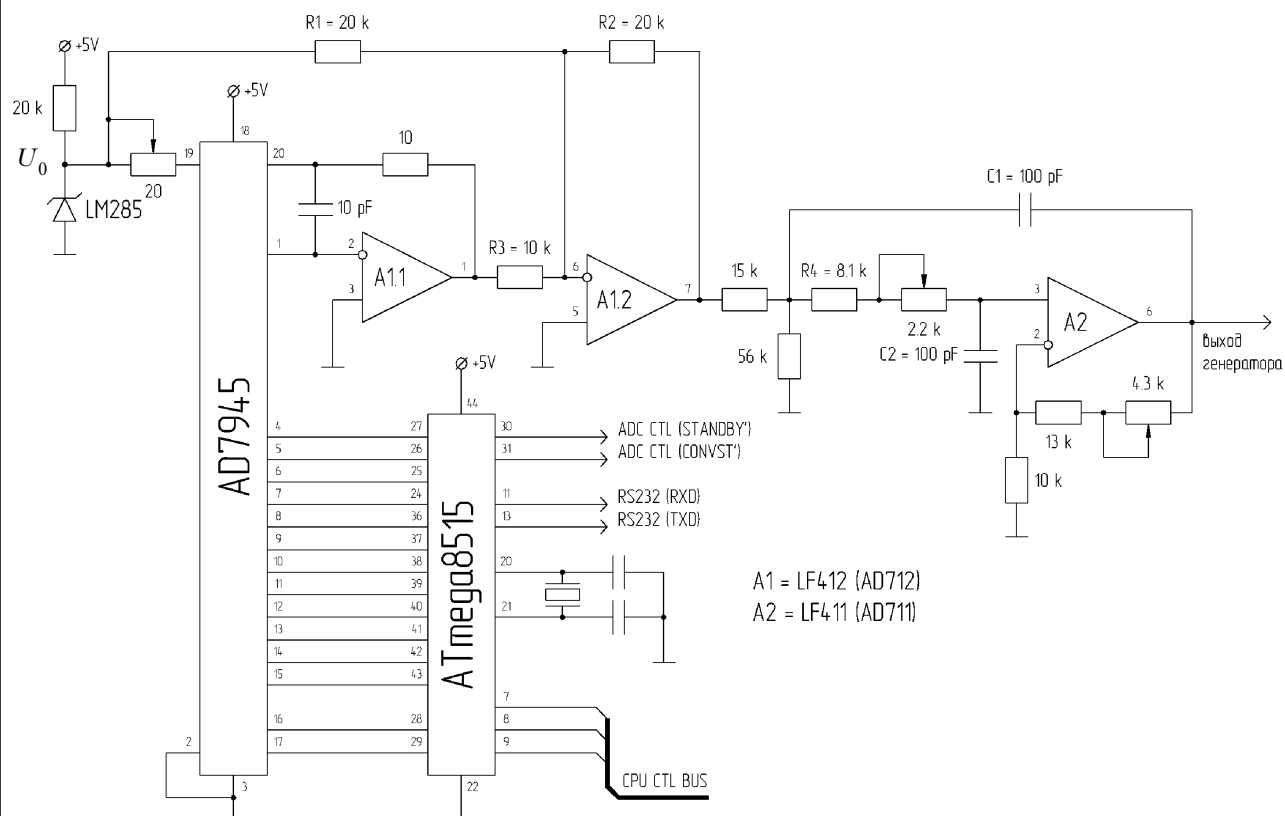


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема блока генератора

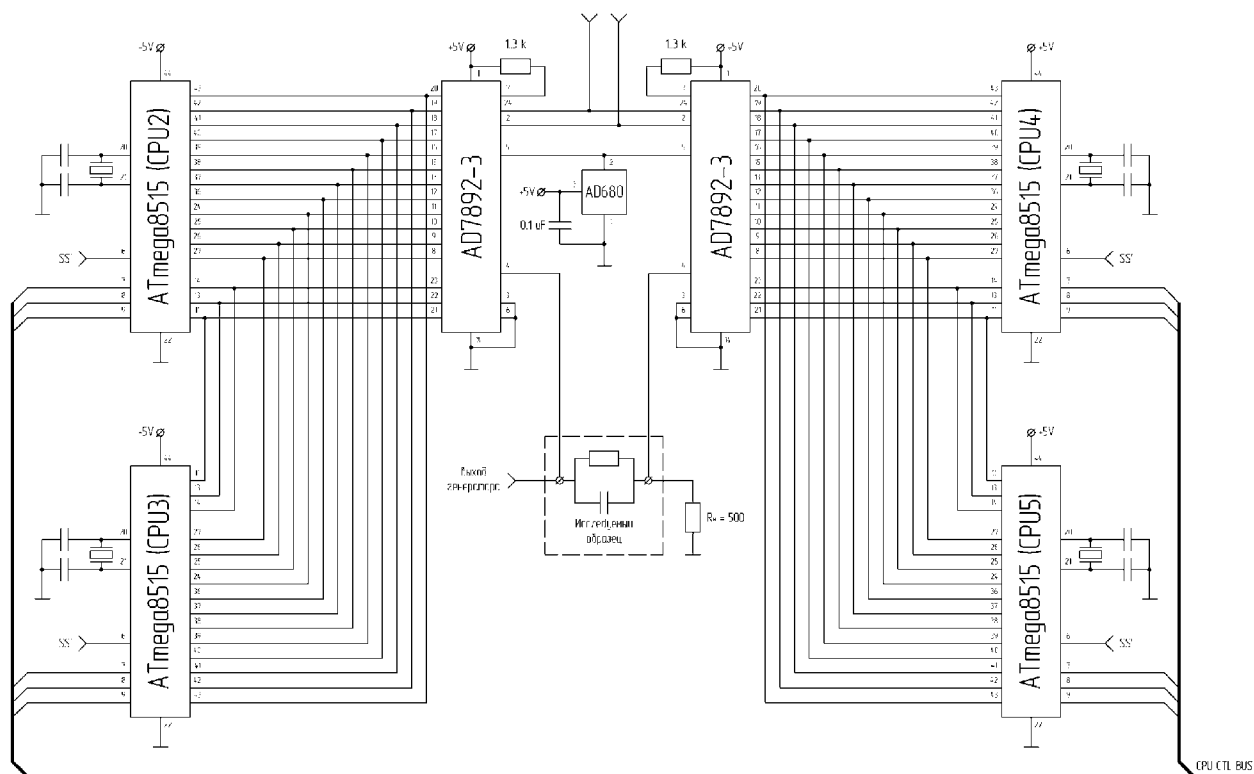


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока анализатора

ратора высокочастотные составляющие, обусловленные дискретизацией во времени, и усиливает амплитуду сигнала приблизительно вдвое для максимального заполнения динамического диапазона АЦП ($\pm 2,5$ В). Гармонический сигнал с выхода генератора подается непосредственно на анализируемый образец.

Блок анализатора содержит два АЦП для анализа сигнала соответственно на входной и выходной клеммах ЭХЯ с анализируемым образцом и четыре вспомогательных микропроцессора, осуществляющих дискретное преобразование Фурье (ДПФ) входного и выходного сигналов для дальнейшего определения их амплитуды и фазы. Принципиальная электрическая схема блока анализатора показана на **рис.3**.

Синхронизация работы АЦП (AD7892) осуществляется главным микропроцессором. В ходе измерения вспомогательные микропроцессоры находятся в режиме ожидания до окончания очередного аналого-цифрового преобразования. В начале каждого рабочего цикла главный процессор одновременно запускает оба АЦП, после чего продолжает генерацию гармонического сигнала. После окончания преобразования АЦП формирует сигнал #ЕОС, который прерывает работу пары вспомогательных процессоров (CPU2 и CPU3 или CPU4 и CPU5). Получив запрос на прерывание, один из вспомогательных процессоров переключает АЦП в режим выдачи оцифрованного сигнала и осуществляет процедуру считывания. Второй из пары процессоров отслеживает состояние сигналов переключения АЦП (#CS и #RD) и осуществляет процедуру считывания, когда оба сигнала примут значение логического нуля. После этого происходит очередной шаг расчета ДПФ. Первый из пары вспомогательных процессоров вычисляет синусную, а второй — косинусную составляющую. Окончив вычисления, вспомогательные процессоры возвращаются в режим ожидания.

Для повышения точности анализа процедура расчета ДПФ производится на протяжении нескольких периодов входного гармонического сигнала. После окончания заданного времени вычисленные синусная и косинусная составляющие ДПФ передаются в главный процессор по шине SPI и далее на сопряженную ЭВМ по последовательному интерфейсу.

Методика эксперимента

Объектами для исследований были выбраны семь марок водки разных производителей.

С помощью разработанного анализатора были получены кривые частотной зависимости активной R и реактивной X составляющих импеданса электрохимической ячейки и величины добротности $Q = R/X$ для выбранных образцов в диапазоне частот от 0,5 Гц до 100 кГц. На **рис.4** приведены соответствующие кривые для пяти из них.

Как видно из рисунка, обе составляющие импеданса на низких частотах имеют большие значения (что обусловлено интерфейсными процессами на границе “раствор — электроды”), кото-

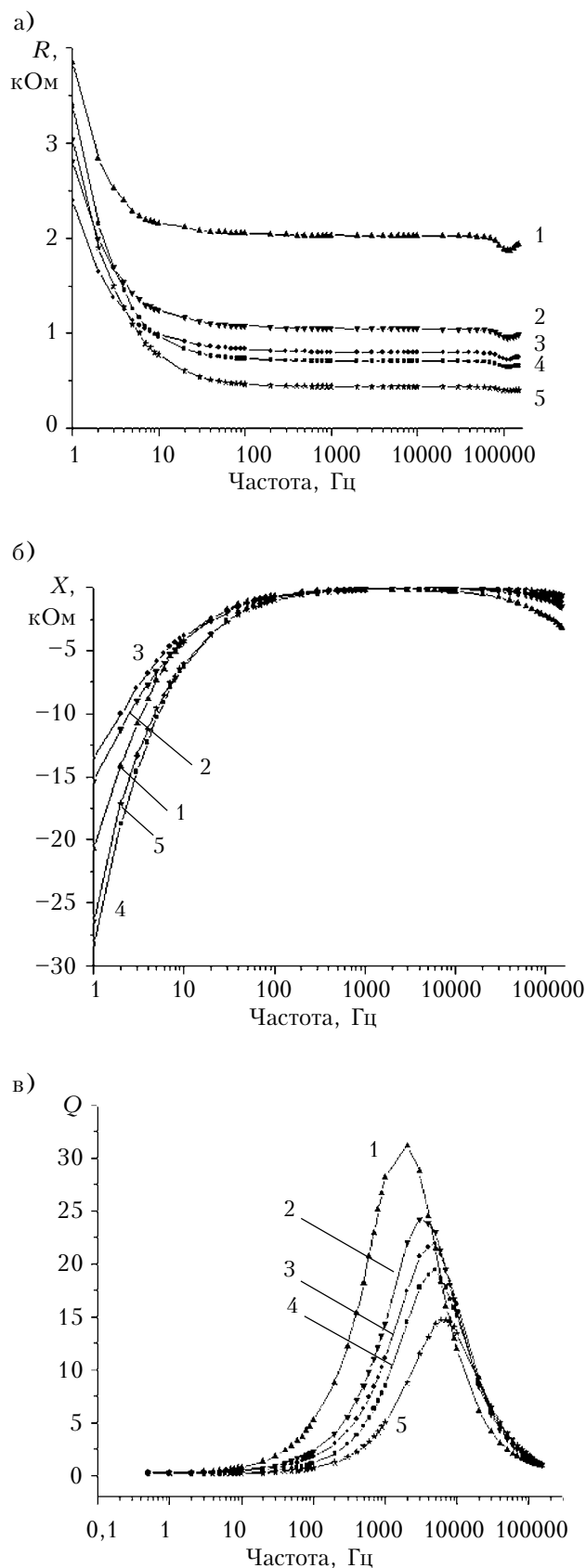


Рис. 4. Частотная зависимость активной (а) и реактивной (б) составляющих импеданса ЭХЯ и добротности (в) для пяти различных марок водки

рые быстро уменьшаются с ростом частоты, и в области сотен герц активное сопротивление выходит на практически постоянное значение (рис. 4, а), а реактивная составляющая достигает минимального значения, близкого к нулю (рис. 4, б), которое обусловлено сугубо схемотехническими эффектами (при заданных параметрах элементов эквивалентной схемы ЭХЯ). В результате, отношение R/X , т. е. добротность, в этой частотной области имеет экстремум. На рис. 4, в хорошо видно, что с точки зрения лучшего разделения кривых добротности для разных марок водки наиболее удобна частотная область от 100 до 1000 Гц, где все кривые имеют участок монотонного роста определенной крутизны.

На рис. 5, а демонстрируется воспроизводимость кривых зависимостей $Q(f)$ для этих же образцов в диапазоне частот от 100 до 1000 Гц при многократных измерениях. Кроме того, на рис. 5, б показаны кривые усредненных значений добротности, полученных в двух сериях из-

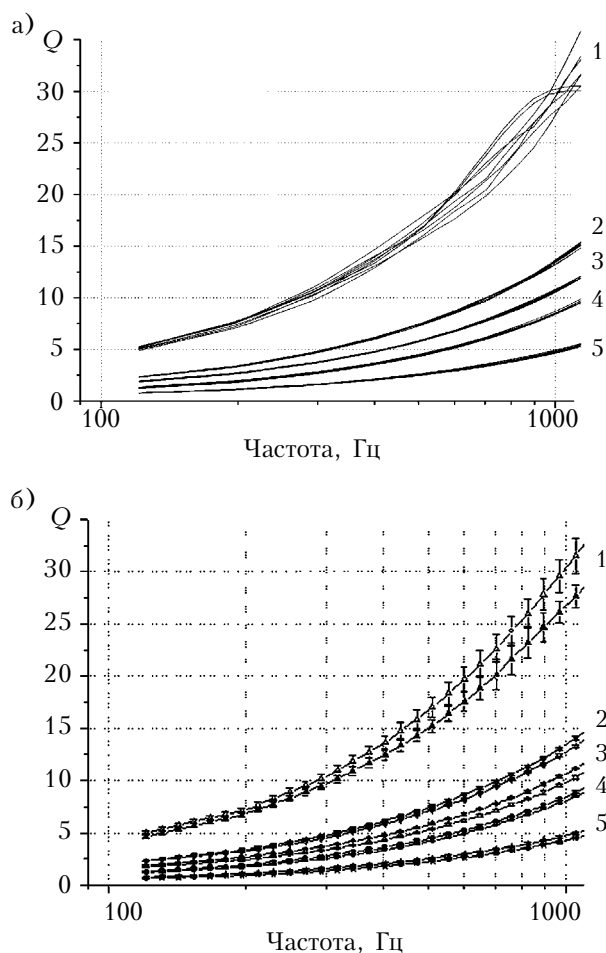


Рис. 5. Частотные зависимости добротности для различных марок водки, полученные в восьми последовательных измерениях (а), и кривые усредненных значений добротности для двух серий измерений тех же образцов (б)

мерений, проведенных в разное время для тех же образцов, с указанными среднеквадратическими отклонениями. Как видно из приведенных данных, расстояния между кривыми для разных марок (даже с учетом их дисперсии) существенно превышают ошибку измерения для отдельных экспериментальных кривых. Эксперименты показали, что именно частотная область 100–1000 Гц оказалась оптимальной для наилучшего распознавания марки напитка по значению добротности Q , поэтому она была выбрана в качестве основной анализируемой полосы в дальнейших процедурах измерения параметров ВСН и расчетов показателей разделимости напитков.

Система автоматической идентификации напитков

Для идентификации марки ВСН был использован метод линейной классификации с Евклидовой метрикой [7]. Расчет меры подобия разных напитков основан на вычислении расстояния между векторами, которые соответствуют всем возможным парам исследуемых веществ в n -мерном пространстве, где n — число отсчетов величины добротности Q в частотном интервале 100–1000 Гц с учетом дисперсии измеряемых значений. На указанном интервале равномерно выбирают 10 отсчетных точек с шагом 100 Гц. Эти 10 отсчетов на кривой $Q(f)$ формируют 10-мерный вектор отклика. На рис. 6 схематически показано положение векторов отклика разных аналитов (напитков) в пространстве откликов и иллюстрируется мера их раздельности (или, наоборот, подобия).

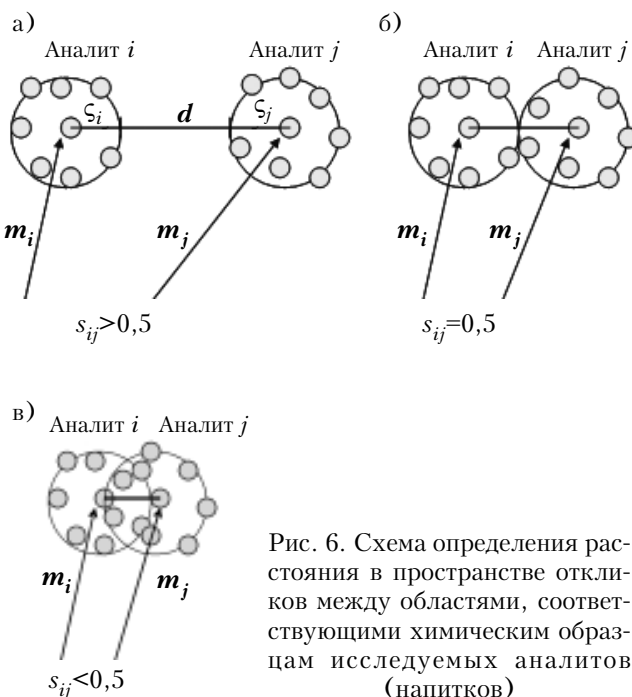


Рис. 6. Схема определения расстояния в пространстве откликов между областями, соответствующими химическим образцам исследуемых аналитов (напитков)

Для каждой пары i, j из k анализируемых образцов определяется показатель разделимости s_{ij} в следующем виде [7]:

$$s_{ij} = \frac{\|d\|}{\|d\| + \zeta_i + \zeta_j}. \quad (2)$$

Здесь d — вектор расстояния между центрами областей, которые соответствуют i -му и j -му напитку в Евклидовом пространстве: $d = m_i - m_j$;

m_i, m_j — усредненные векторы откликов для i -го и j -го напитков;

ζ_i, ζ_j — проекции векторов среднеекватического отклонения откликов на направление d :

$$\zeta_i = \frac{|\sigma_i| \cdot \|d\|}{\|d\|}, \quad \zeta_j = \frac{|\sigma_j| \cdot \|d\|}{\|d\|}; \quad (3)$$

σ_i, σ_j — векторы среднеекватического отклонения откликов:

$$\sigma_i = \sqrt{(m_i - x_i)^2}, \quad \sigma_j = \sqrt{(m_j - x_j)^2} \quad (4)$$

x_i, x_j — отдельные векторы откликов в Евклидовом пространстве для i -го и j -го напитков;

$|\cdot|$ — операция поэлементного взятия модуля;

$\|\cdot\|$ — евклидова норма.

Согласно введенному определению показателя разделимости (2) устанавливаются следующие критерии для меры раздельности пары напитков: $s_{ij} \geq 0,5$ соответствует надежному разделению (рис. 6, а, б); $s_{ij} < 0,5$ соответствует случаю частичного перекрытия характеристик напитков (рис. 6, в); значения $s_{ij} < 0,1$ и близкие к нулю указывают практически на совпадение характеристик данных напитков, т. е. на их идентичность.

Процедура идентификации марки исследуемого напитка состоит в том, что для него измеряется зависимость $Q(f)$ в установленном частотном диапазоне, из этих данных вычисляется его уникальный 10-мерный вектор отклика и далее рассчитывается показатель разделимости s_{ij} данного напитка по отношению к каждому другому из базы данных, предварительно сформированной по эталонным образцам. Наконец определяется показатель подобия пары напитков в виде $1 - s_{ij}$. Наибольшее полученное значение (для надежной идентификации желательно, чтобы оно было не менее 0,3–0,4) будет соответствовать тому базовому напитку, к которому анализируемый образец наиболее близок. В настоящих исследованиях, например, из семи исследуемых образцов были идентифицированы шесть, но для трех из них наблюдалась значительная мера подобия нескольким маркам. Отметим также, что аналогичное тестирование тех же самых образцов напитков, проведенное через два месяца,

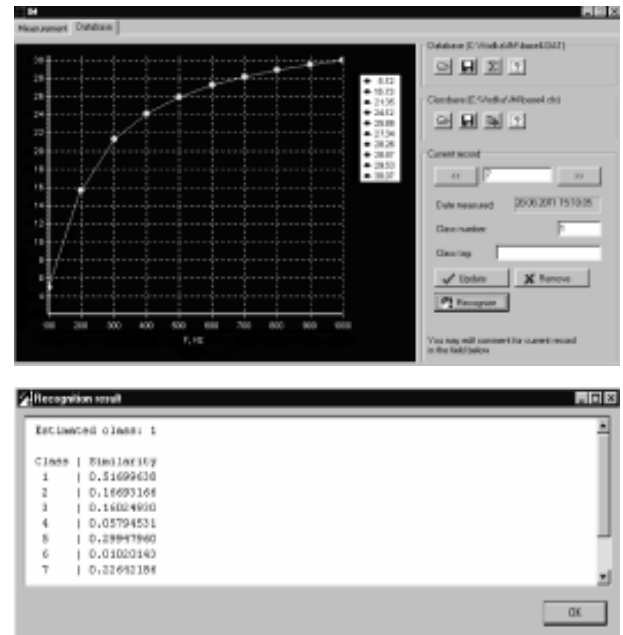


Рис. 7. Интерфейс программы автоматической идентификации марки водочно-спиртового напитка (вверху) и результат оценки исследуемого образца по базе данных (внизу)

ца, дало такой же результат по их распознаванию.

Предложенная методика фактически является разновидностью методики распознавания химических образов исследуемых аналитов (в данном случае — марки водки), которая основывается на применении математических методов мультивариационного анализа к многомерным данным откликов от анализируемого объекта. Новизна разработанной системы идентификации состоит в сочетании выбранного метода статистического анализа (линейного классификатора с Евклидовой метрикой) с методом спектрального анализа в применении к сигналам многомерных данных (значениями добротности в десяти определенных точках выбранного частотного диапазона), полученных из импедансных измерений исследуемого раствора.

Управление процедурой идентификации напитком осуществляется с помощью программы высокого уровня, работающей на ЭВМ в среде Win32 в диалоговом режиме (рис. 7). Процедура предусматривает вначале формирование общей базы данных, составленной из параметров активного и реактивного сопротивления и модуля импеданса, полученных последовательно для всех эталонных напитков путем измерения их спектральных импедансных характеристик. Далее из полученных экспериментальных данных программа рассчитывает средние значения векторов параметров каждого напитка, а также их дисперсию. Этим формируется трансформированная база, которая уже непосредственно используется при идентификации. Следующим

шагом служит сравнение результатов однократных измерений какого-либо анализируемого напитка с указанной базой классов и расчет показателей его подобия каждому из эталонных напитков.

Следует отметить, что предложенный метод может быть успешно использован с целью распознавания нелегальной водки. Такая водка может быть пригодной для потребления и соответствовать стандартам по содержанию вредных примесей (ДСТУ 12712-80), но быть изготовленной с использованием других исходных спирта-сырца и воды или же с несоблюдением технологических условий, т. е. не на предприятии-производителе.

Выводы

Таким образом, система автоматической идентификации ВСН позволила провести экспрессный анализ и сделать оперативную оценку рассмотренных образцов напитков. Полученная при этом информация может быть в дальнейшем использована для детальной проверки сомнительных образцов с помощью традиционных химических методов анализа.

Тестирование разработанного прибора и алгоритмов идентификации позволяют сделать вывод о достаточной информативности анализа в ограниченном диапазоне частот, что упрощает требования к метрологическим и конструктивно-технологическим характеристикам анализатора. Это свидетельствует также о том, что существует возможность и целесообразность создания упрощенного портативного прибора с интегрированными средствами обработки результатов измерений, с невысокой для серийного производства себестоимостью, пригодного для экспрессной идентификации предварительно установленного ряда продуктов водочной промышленности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Позняковский В. М., Помазова В. А., Кисилева Т. Ф., Пермякова Л. В. Экспертиза напитков. — Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1999. [Poznyakovskii V. M., Pomazova V. A., Kisileva T. F., Permyakova L. V. Ekspertiza napitkov. Novosibirsk. Izd-vo Novosibirskogo un-ta. 1999.]
2. Заворотный А. Л., Кошеч И. А., Белов Ю. А. и др. Новый подход к распознаванию запахов с помощью математической обработки по данным от обонятельных рецепторов // Математическое моделирование. — 2005. — Т. 17, № 3. — С. 75—82. [Zavorotnyi A. L., Koshets I. A., Belov Yu. A. i dr. // Matematicheskoe modelirovanie. 2005. Vol. 17, N 3. P. 75]
3. Kukla A. L., Pavlyuchenko A. S., Shirshov Yu. M. et al. Application of sensor arrays based on thin films of conducting polymers for chemical recognition of volatile organic solvents // Sensors and Actuators. — 2009. — В 135. — Р. 541—551.

4. Koshets I. A., Kazantseva Z. I., Belyaev A. E., Kalchenko V. I. Sensitivity of Resorsinarene Films towards Aliphatic Alcohols // Sensors and Actuators. — 2009. — Vol. В 140. P. 104—108.

5. Патент на корисну модель № 19620 України. Спосіб визначення марок горілко-коньячних напоїв / Я. І. Верцімаха, О. Л. Кукла, О. С. Павлюченко, Г. П. Савченко. 2006. — Бюл. № 12. [Patent na korisnu model' № 19620 Ukraine / Ya. I. Vertsimakha, O. L. Kukla, O. S. Pavlyuchenko, G. P. Savchenko. 2006. Bull. 12.]

6. Riul A., De Sousa H., Malmegrim R. et al. Wine classification by taste sensors made from ultra-thin films and using neural networks // Sensor and Actuators. — 2004. — Vol. В 98. — Р. 77—82.

7. Павлюченко А. С., Казанцева З. И., Кошеч И. А., Ширшов Ю. М. Применение линейных классификаторов для анализа информативности сенсорных массивов при регистрации молекул легколетучих веществ // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2005. — Вип. 2. — С. 33—41. [Pavlyuchenko A. S., Kazantseva Z. I., Koshets I. A., Shirshov Yu. M. P // Sensorna elektronika i mikrosistemni tekhnologiyi. 2005. Iss. 2. P. 33]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 6.10 2011 г.*

Kukla A. L., Pavlyuchenko A. S., Maistrenko A. S., Mamykin A. V. **Impedance analyzer for trademarks of aqueous-alcoholic drinks identification.**

Keywords: impedance spectroscopy, aqueous-alcoholic solution, electrochemical cell, Q-factor.

The article shows a possibility of determining the type of aqueous-alcoholic drink, based on measurements and analysis of the frequency characteristics of active and reactive impedance components of the solution in the frequency range 0,5—10⁵ Hz.

Ukraine, Kiev, V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine.

Кукла О. Л., Павлюченко О. С., Майстренко А. С., Мамакин А. В. **Імпедансний аналізатор для ідентифікації марок водно-спиртових напоїв.**

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, водно-спиртовий розчин, електрохімічний елемент, добротність.

Показана можливість визначення типів водно-спиртових напоїв (марок горілок) на основі вимірювання та аналізу частотних характеристик активної та реактивної складових імпедансу розчинів в діапазоні частот 0,5—10⁵ Гц.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України.

УДК 621.391.01

О. М. ЭЛИЯШИВ, С. Д. ГАЛЮК, д. т. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ,
к. ф.-м. н. Н. Я. КУШНИР, В. С. ТАНАСЮК

Украина, Черновицкий нац. университет имени Юрия Федьковича

E-mail: politanskyu@chnu.cv.ua, melyart111@ukr.net

НЕПРЕРЫВНАЯ И ИМПУЛЬСНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ЧУА

Экспериментально исследованы процессы непрерывной и импульсной синхронизации двух генераторов Чуа. Предложенные методы синхронизации хаотических генераторов перспективны для применения в средствах связи при построении безопасных радиотехнических систем.

Ключевые слова: хаос, синхронизация, схема Чуа.

За последние десять лет был предложен ряд систем связи, использующих модуляцию хаотического сигнала информационным [1, 2]. Необходимым условием функционирования таких систем является синхронизация работы хаотических систем приемника и передатчика, поскольку она необходима для восстановления информационного сигнала на приемной стороне [3]. Исследования в этой области были начаты авторами [4], которые теоретически и экспериментально показали возможность синхронизации двух хаотических колебаний. Этот метод, получивший название метода декомпозиции, заключается в следующем.

Рассмотрим автономную n -мерную динамическую систему, описываемую уравнением

$$\frac{du}{dt} = f(u), \quad (1)$$

где $f = f_1, f_2, \dots, f_n$.

Разобьем систему u на две подсистемы v и w :

$$\frac{dv}{dt} = g(v, w); \quad \frac{dw}{dt} = h(v, w), \quad (2)$$

где $v = u_1, \dots, u_m$; $g = f_1, \dots, f_m$;

$w = u_{m+1}, \dots, u_n$; $h = f_{m+1}, \dots, f_n$.

Пусть подсистема w' идентична подсистеме w , то есть

$$\frac{dw'}{dt} = h(v, w'). \quad (3)$$

Систему (1) называют ведущей, а подсистему w' — ведомой. Если переменные в (3) асимптотически приближаются к переменным второго уравнения из (2) и сохраняют свои значения с изменением $w(t)$ в двух подсистемах, говорят о наличии синхронизации. При непрерывной синхронизации необходима постоянная передача синхронизирующего сигнала от передатчика к приемнику, что является недостатком метода.

В [5] была предложена импульсная синхронизация, при которой временной интервал, необходимый для передачи сигналов синхронизации, значительно уменьшается по сравнению с непрерывной. При импульсной синхронизации по системе связи передаются сигналы, представляющие собой последовательность временных выборок с периодом T , который состоит из двух интервалов. Первый интервал, длительностью Q , включает в себя импульсы синхронизации, второй, продолжительностью $T-Q$, используется для передачи зашифрованного сообщения. Поскольку, как правило, $Q \ll T$, временные потери в пакете передаваемого сообщения незначительны.

Экспериментальные результаты импульсной синхронизации двух генераторов Чуа с помощью узких импульсов ($Q/T=0,016$, $1/T=18000$ Гц) одними из первых представили авторы [6].

Целью настоящей работы является реализация генераторов Чуа на операционных усилителях и экспериментальные исследования их синхронной работы.

Схема Чуа

Схема Чуа представляет собой автоколебательную систему с хаотическим поведением, которая имеет 1,5 степени свободы [7, с. 151]. Схема состоит из катушки индуктивности L , резистора R , конденсаторов C_1 и C_2 и нелинейного элемента N_r (рис. 1, а). Математическая модель схемы Чуа может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} &= \frac{1}{R} (V_{C2} - V_{C1}) - g(V_{C1}); \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} &= \frac{1}{R} (V_{C1} - V_{C2}) + i_L; \\ L \frac{di_L}{dt} &= -V_{C2}. \end{aligned} \quad (4)$$

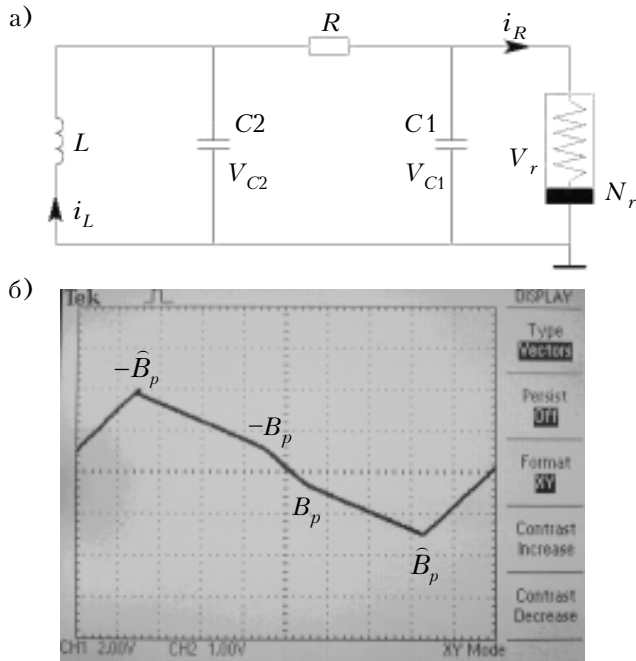


Рис. 1. Схема генератора Чуа (а) и кусочно-линейная ВАХ нелинейного элемента (б)

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) нелинейного элемента $g(v_r)$ (рис. 1, б) описывается кусочно-линейной функцией согласно [8]:

$$g(v_r) = m_a v_r + 0,5(m_a - m_b) \times \times [|v_r + B_p| - |v_r - B_p|], \quad (5)$$

где m_a , m_b – крутизна участков кусочно-линейной характеристики нелинейного элемента, $m_a = -0,76$ См, $m_b = -0,41$ См; $B_p, \hat{B}_p$ – параметры точек перегиба кусочно-линейной ВАХ, $B_p = 1$ В.

Переходя к нормируемым величинам в уравнении (4) получим

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - z - f(x)); \\ \dot{y} &= x - y + z; \\ \dot{z} &= -\beta y, \end{aligned} \quad (6)$$

где $x = v_{C1}/B_p$; $y = v_{C2}/B_p$; $z = i_L/(B_p G)$;

$$f(x) = bx + 0,5(a - b)[|x + 1| - |x - 1|];$$

$$a = Rm_a; b = Rm_b; \beta = C_2 R^2 / L; G = 1/R.$$

Если имеются две идентичные хаотические системы с параметрами $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$ и $x'(\tau)$, $y'(\tau)$, $z'(\tau)$ соответственно, то условием их синхронизации является минимум разности между соответствующими параметрами:

$$\begin{aligned} p(\tau) &= x(\tau) - x'(\tau); \\ q(\tau) &= y(\tau) - y'(\tau); \\ r(\tau) &= z(\tau) - z'(\tau), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\tau = tG/C_2$.

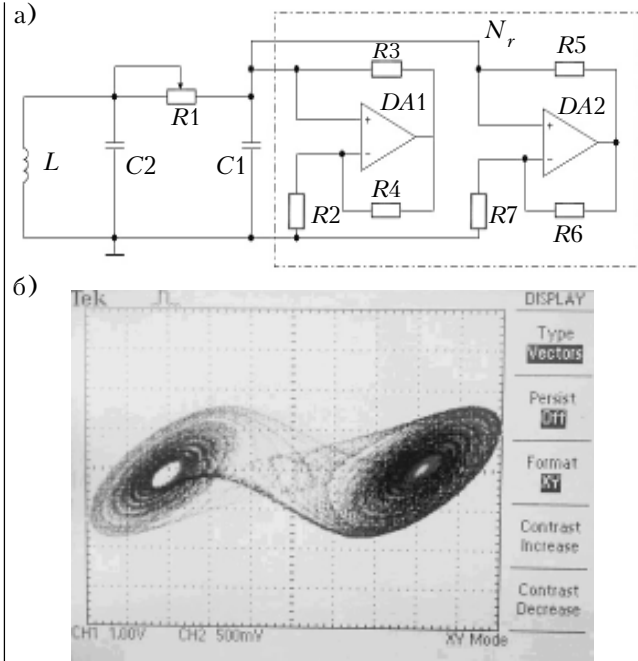


Рис. 2. Схемотехническая реализация нелинейного элемента (а) и аттрактор генератора Чуа (б)

На рис. 2 приведена схемотехническая реализация нелинейного элемента N_r на операционных усилителях и аттрактор генератора Чуа типа «двойной завиток» в системе координат x , y .

Непрерывная синхронизация хаоса

Синхронизация двух хаотических систем является проблематичной, поскольку они обладают высокой чувствительностью к начальным условиям. Даже идентичные хаотические системы, стартующие из одинаковых начальных условий, эволюционируют в фазовом пространстве по траекториям, которые со временем теряют коррелированность. В [8] было показано, что синхронизация двух хаотических систем возможна, когда их эволюция происходит по одной траектории фазового пространства. Система безразмерных уравнений в этом случае имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(y - x - f(x)); \\ \dot{y} = x - y; \\ \dot{z} = -\beta y, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{y}' = x - y' + z'; \\ \dot{z}' = -\beta y', \end{cases} \quad (9)$$

где $\alpha = C_2/C_1$.

Разницу между сигналами генераторов, описываемыми системами уравнений (8) и (9), с учетом (7) можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ -\beta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ r \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Неустойчивая синхронизация по параметру y ведущей системы объясняется слабым уровнем сигнала V_{C2} . Буферные усилители в схемах, приведенных на рис. 3 и 5, используются для однонаправленной связи генераторов между собой.

Импульсная синхронизация

Схема импульсной синхронизации приведена на рис. 7. Генераторы Чуа 1 и 2 являются ведущим и ведомым соответственно.

Временные выборки формируются с помощью ключа напряжения K , управляемого генерато-

ром импульсов. Последовательности стробирующих импульсов (нижний канал) и синхроимпульсов (верхний канал) изображены на рис. 8. Поскольку микросхема КР590КН5, на которой реализован ключ K , является нормально замкнутой, стробирующие импульсы подаются с обратной скважностью. При низком уровне импульсов управления ключ находится в разомкнутом состоянии, и синхроимпульсы подаются на вход ведомого генератора. При подаче на вход ключа импульсов высокого напряжения ключ

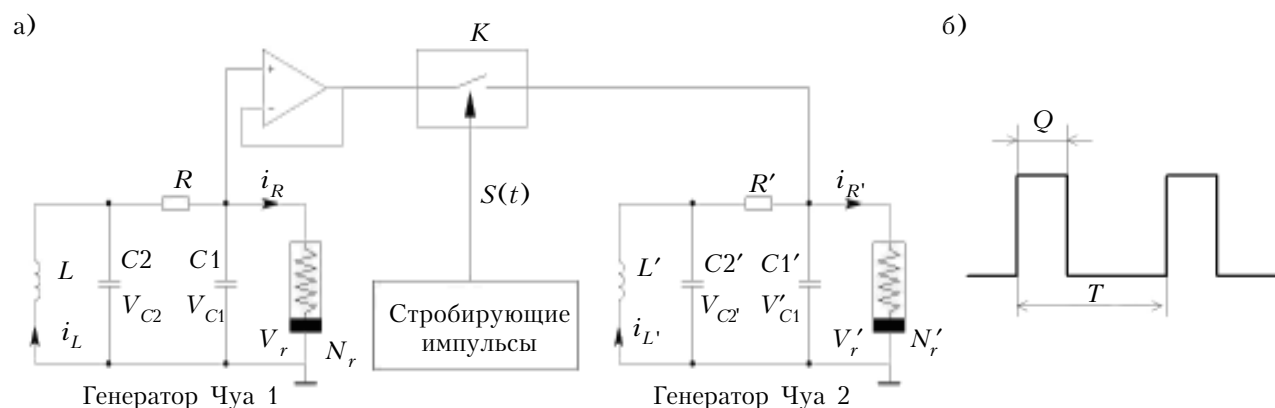


Рис. 7. Экспериментальная схема импульсной синхронизации (а) и схематическое изображение стробирующих импульсов (б)

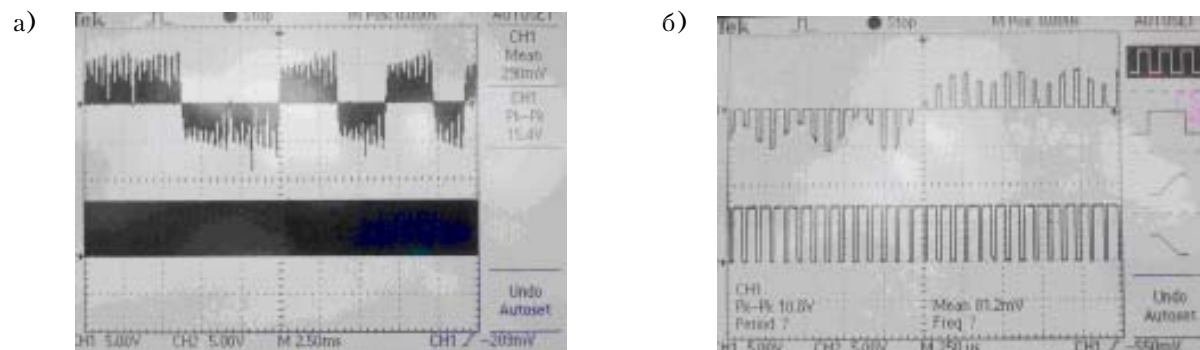


Рис. 8. Последовательность подачи импульсов синхронизации (а) и стробирующих импульсов (б)

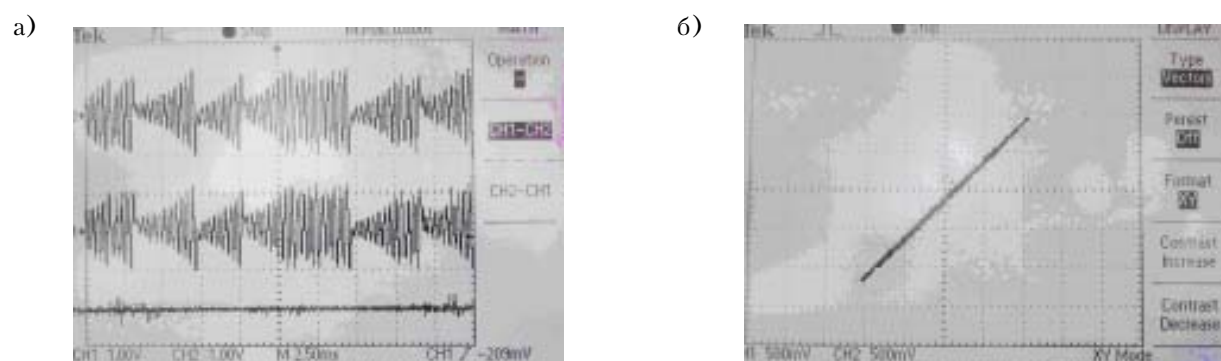


Рис. 9. Временные зависимости амплитуды сигналов V_{C2} и $V_{C2'}$ и их разность (а) и зависимость $V_{C2'}$ от V_{C2} при импульсной синхронизации (б)

переходит в закрытое состояние, и электрическая связь между генераторами пропадает. В экспериментально реализованной схеме сигнал генератора Чуа / выбран в качестве ведущего. Различия между параметрами генераторов составляли не более 0,5%.

Зависимость сигнала $V_{C2'}$ от V_{C2} при импульсной синхронизации (рис. 9) выражается прямой линией с углом наклона к оси абсцисс $\pi/4$, что указывает на синхронную работу ведущего и ведомого генераторов Чуа, т. е. синхронизация генераторов Чуа была достигнута (см., например, [9]).

Экспериментальная реализация импульсной синхронизации двух хаотических систем затруднена в силу наличия внешних помех и шума в канале, а также расхождения параметров соответствующих элементов компонентной базы хаотических систем в передатчике и приемнике, что приводит к росту ширины области синхронизации. В нашем случае ширина области синхронизации составляла $Q=0,83 \times 10^{-6}$ с при периоде следования временных выборок $T=23 \times 10^{-6}$ с ($Q/T=0,0375$).

Выводы

Таким образом, установлено, что существенных различий между непрерывной синхронизацией и импульсной не наблюдается при достаточно коротких периодах стробирующих импульсов. Точность импульсной синхронизации зависит как от периода следования временных выборок, так и от ширины импульса. Отношение ширины импульса к периоду для синхронизации, почти идентичной непрерывной, возрастает по мере увеличения периода импульсов стробирования. Предложенные методы синхронизации хаотических генераторов Чуа достаточно эффективны и могут применяться в средствах связи при построении безопасных радиотехнических систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Dadiou H., Kennedy M., Hasler M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of chaotic carrier using self-synchronizing chua's circuits // IEEE Transactions on circuit and Systems—II: Analog and digital signal processing. — 1993. — Vol. 40, N 10. — P. 634–642.
2. Yang T., Chua L. O. Secure communication via chaotic parameter modulation // IEEE Transactions on circuit and Systems—I: Fundamental Theory and applications. — 1996. — Vol. 43, N 9. — P. 817–819.
3. Itoh M., Murakami H. New communication systems via chaotic synchronizations and modulations // IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics. — 1995. — Vol. E78-A, N 3. — P. 285–290.

4. Pecora L.M., Carroll T. L. Synchronization in Chaotic Systems // Physical review letters. — 1990. — Vol. 64, N 8. — P. 821–824.

5. Yang T., Chua L. O. Impulsive control and synchronization of nonlinear dynamical systems and application to secure communication // International Journal of Bifurcation and Chaos. — 1997. — Vol. 7, N 3. — P. 645–664.

6. Panas A. I., Yang T., Chua L. O. Experimental results of impulsive synchronization between two Chua's circuits // International Journal of Bifurcation and Chaos. — 1998. — Vol. 8, N 3. — P. 639–644.

7. Шахтарин Б. И., Кобылкина П. И., Сидоркина Ю. А. и др. Анализ генератора Чуа // В кн.: Генераторы хаотических колебаний. — Москва: Гелиос АРВ, 2007. — С 150–162. [Shakhtarin B. I., Kobylkina P. I., Sidorkina Yu. A. i dr. // V kn.: Generatory khaoticheskikh kolebanii. Moskva: Gelios ARV. 2007. P. 150]

8. Chua L.O., Itoh M. Chaos synchronization in Chua's circuit // Journal of Circuits, Systems and Computers. — 1993. — Vol. 3, N 1. — P. 93–108.

9. Itoh M., Yang T., Chua L.O. Experimental study of impulsive synchronization of chaotic and hyperchaotic circuits // International Journal of Bifurcation and Chaos. — 1999. — Vol. 9, N 7. — P. 1393–1424.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 07.07 2011 г.*

Eliyashiv O. M., Galyuk S. D., Politanskii L. F., Kushnir N. Ya., Tanasyuk V. S. **Continuous and pulse synchronization of Chua oscillators.**

Keywords: chaos, synchronization, Chua circuit.

Continuous and pulse synchronization of two Chua oscillators has been experimentally studied. The proposed synchronization methods of chaotic oscillators are promising for application in communication facilities in the construction of secure radio systems.

Ukraine, Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University.

Еліяшів О. М., Галюк С. Д., Політанський Л. Ф., Кушнір М. Я., Танасюк В. С. **Безперервна та імпульсна синхронізація роботи генераторів Чуа.**

Ключові слова: хаос, синхронізація, схема Чуа.

У роботі експериментально досліджено процеси безперервної і імпульсної синхронізації двох генераторів Чуа. Запропоновані методи синхронізації хаотичних генераторів є перспективними для застосування в засобах зв'язку при побудові безпечних радіотехнічних систем.

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича.

УДК 621.383

К. ф.-м. н. А. Б. ГНИЛЕНКО, д. т. н. В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ,
д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ

Украина, г. Днепропетровск, Институт транспортных систем и технологий НАНУ
E-mail: plm@westa-inter.com

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ p – n -ПЕРЕХОДАМИ

Проведено компьютерное моделирование, которое позволило исследовать зависимость основных характеристик солнечного элемента от толщины Si-пластин в широком диапазоне значений.

Ключевые слова: многопереходный солнечный элемент, вертикальный p – n -переход, кремниевая пластина, компьютерное моделирование, программный пакет Silvaco TCAD.

Среди множества различных конструкций фотопреобразователей, пожалуй, наименее изученными остаются солнечные элементы с вертикальными p – n -переходами [1, с. 182]. В таких солнечных элементах излучение направлено вдоль переходов, а не по нормали к ним, как в традиционных планарных конструкциях. Поскольку поперечный размер этих элементов ограничен длиной пробега носителей заряда, элементарные фотопреобразователи соединяют последовательно, получая так называемые многопереходные солнечные элементы с вертикальными p – n -переходами.

Как известно, традиционные планарные солнечные элементы однородны в поперечном направлении, поэтому возможности улучшения их характеристик за счет выбора оптимального набора конструктивных параметров (толщины кремниевой пластины, глубины залегания диффузионных слоев и т. д.) ограничены только одним направлением, совпадающим с направлением падающего излучения. Это порождает ряд противоречивых требований к конструкции солнечных элементов, поскольку для улучшения поглощения света в длинноволновой области спектра необходимо увеличивать толщину элементов, а для обеспечения оптимальных условий собирания носителей эту толщину требуется согласовывать с длиной свободного пробега.

Многопереходные солнечные элементы с вертикальными переходами позволяют снять это противоречие, т. к. в них разделены направления переноса носителей заряда и фотонов, что дает возможность оптимизировать соответствующие конструктивные параметры независимо друг от друга.

К другим немаловажным достоинствам солнечных элементов с вертикальными переходами можно отнести отсутствие затеняющей контактной сетки на фронтальной поверхности, лучшую температурную устойчивость и спектральную чувствительность, возможность получать высо-

кие напряжения за счет последовательного соединения элементов. При создании каскадных солнечных элементов одним из перспективных направлений может стать использование многопереходных структур с вертикальными переходами. Двухсторонняя прозрачность таких элементов и отсутствие необходимости переноса носителей заряда между каскадами позволяет в этом случае обойтись без коммутирующих каскады туннельных диодов, обычных для планарной конструкции.

Известные работы по многопереходным солнечным элементам с вертикальными p – n -переходами посвящены в основном экспериментальным исследованиям, направленным на разработку эффективных технологий изготовления данного класса фотопреобразователей [2–4]. Несмотря на свою первостепенную важность, натурный эксперимент зачастую не позволяет провести оптимизацию устройства, выявить зависимость выходных характеристик от различных конструктивных параметров в широком диапазоне значений. В связи с этим, большое значение приобретает компьютерное моделирование на основе математических моделей, адекватно отображающих реальные физические процессы.

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование многопереходной n^+p-p^+ -структуры с вертикальными переходами при помощи программного пакета Silvaco TCAD [5] (симулятор устройств ATLAS), средствами которого решаются уравнения Пуассона

$$\operatorname{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho$$

и непрерывности

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n;$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p$$

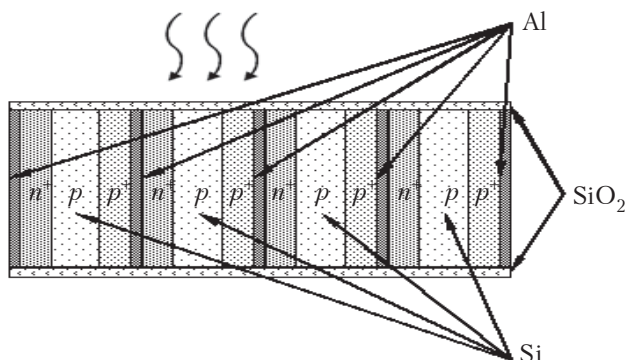


Рис. 1. Многопереходный солнечный элемент с вертикальными $p-n$ -переходами

в рамках диффузионно-дрейфовой модели с учетом механизма рекомбинации Шокли – Рида – Холла

$$R(p, n) = (pn - n_{ie}^2) / (\tau_p (p + n_{ie}) / [1 + N_{\Sigma} / N_0] + \tau_n (n + n_{ie}) / [1 + N_{\Sigma} / N_0])$$

и эмпирической модели подвижности, зависящих от концентрации носителей.

В качестве примера выбран многопереходный солнечный элемент из последовательно соединенных четырех n^+-p-p^+ -структур с вертикальными переходами, изображенный на рис. 1. С помощью симулятора устройств ATLAS была создана модель исследуемой структуры, представляющей собой пластину кристаллического кремния p -типа с концентрацией примеси 10^{14} см^{-3} , на боковых поверхностях которой сформированы диффузионные слои n^+ - и p^+ -типов толщиной 1 мкм. Распределение примеси в диффузионных слоях задавалось аналитически по закону Гаусса с пиковой концентрацией 10^{18} см^{-3} . Размер самих кремниевых пластин в вертикальном направлении принимался равным 200 мкм. Расположенные вертикально алюминиевые контакты покрывают всю боковую поверхность пластин. Фронтальная и тыльная поверхности структуры покрыты пассивирующим слоем SiO_2 толщиной 0,05 мкм. Для определения электрических характеристик фотопреобразователя моделировалось освещение последовательно соединенных n^+-p-p^+ -структур солнечным светом при условиях освещения АМ 1,5 в направлении, параллельном переходам.

Для солнечного элемента с вертикальными переходами наиболее значительным представляется влияние на его основные характеристики толщины кремниевых пластин. Поскольку толщина пластины соответствует направлению, в котором происходит перенос носителей заряда, моделирование проводилось для различного времени жизни неосновных носителей (диффузионной длины неосновных носителей), которое является косвенной характеристикой качества кремния и в расчетах обычно варьируется в пределах $10^{-6} - 10^{-4} \text{ с}$ [6, с. 30].

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента полезного действия и тока короткого замы-

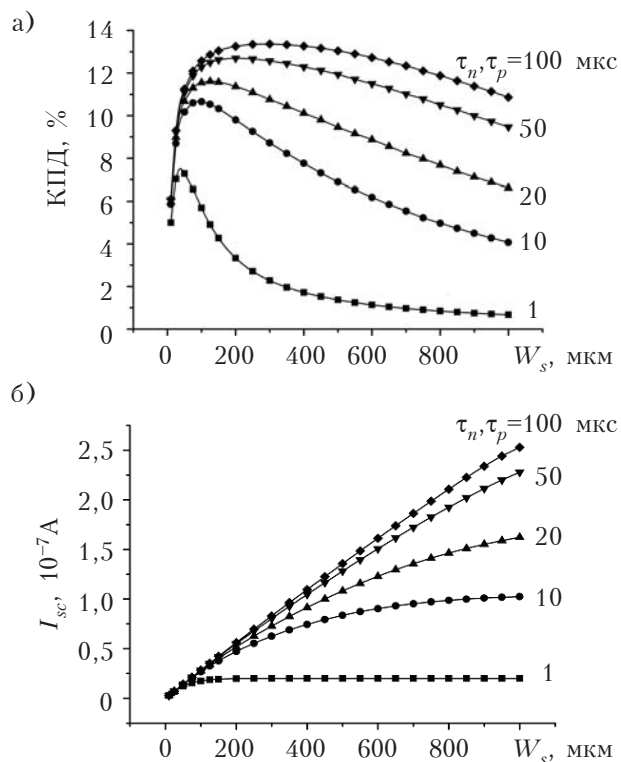


Рис. 2. Зависимость КПД n^+-p-p^+ -структуры (а) и тока короткого замыкания (б) от толщины кремниевых пластин при разных значениях τ_n, τ_p

кания I_{sc} исследуемой структуры от толщины кремниевых пластин W_s , составляющих многопереходный солнечный элемент. Семейство кривых получено для различных значений времени жизни неосновных носителей заряда τ_n и τ_p , соответствующих слабому легированию.

Из рис. 2, а хорошо видно, что при определенной толщине пластин КПД выходит на пиковые значения. Они соответствуют оптимальным условиям сбора носителей, при которых количество носителей заряда, способных достичь контактов солнечного элемента, максимально. Уменьшение толщины пластин относительно ее оптимального значения уменьшает КПД солнечного элемента за счет сужения эффективной области слаболегированного p -слоя, из которой носители могут достичь перехода. Увеличение толщины приводит к появлению и расширению участка p -слоя, носители из которого не достигают перехода, что приводит к уменьшению КПД. С увеличением толщины пластин возрастает ток короткого замыкания (см. рис. 2, б), стремясь выйти на некоторый уровень «насыщения», при котором дальнейшее увеличение толщины не приводит к увеличению количества носителей заряда, участвующих в процессе фотопреобразования солнечного излучения.

Улучшение качества материала p -слоя, что отражается в росте времени жизни неосновных носителей заряда, позволяет увеличить значение оптимальной толщины кремниевых пластин. Так, для времени жизни носителей 20 мкс (согласно спецификациям на промышленно выпускаемые

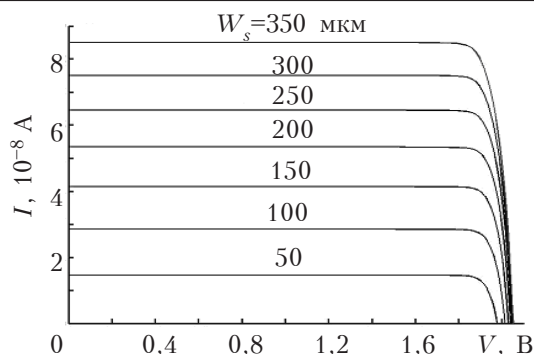


Рис. 3. ВАХ исследуемого многопереходного солнечного элемента для различных значений толщины пластин

пластины кремния, время жизни неосновных носителей заряда должно превышать 10–20 мкс) при толщине кремниевой пластины каждой n^+-p-p^+ -структуры 150 мкм достигаются коэффициент полезного действия 11,9% и плотность тока короткого замыкания 25,8 мА/см².

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) исследуемого многопереходного солнечного элемента представлена на рис. 3. Графики зависимости получены для разных значений толщины n^+-p-p^+ -структур при времени жизни неосновных носителей заряда 20 мкс. ВАХ демонстрирует возможность получения высоких напряжений при применении многопереходных структур с последовательным соединением элементов. Для многопереходной структуры из четырех элементов получено напряжение холостого хода порядка 2 В, в то время как одиночный солнечный элемент на n^+-p-p^+ -структуре дает напряжение холостого хода порядка 0,5 В.

Увеличение толщины кремниевых пластин, как следует из рис. 3, практически не сказывается на величине напряжения холостого хода, при том, что ток короткого замыкания растет (рис. 2, б).

Таким образом, многопереходные солнечные элементы с вертикальными $p-n$ -переходами, в отличие от традиционных планарных конструкций, имеют дополнительную степень свободы с точки зрения возможностей оптимизации характеристик. Проведенное средствами программного пакета Silvaco TCAD моделирование показало, что изменяя толщину кремниевых пластин n^+-p-p^+ -структур, входящих в такой солнечный элемент, можно получить увеличение коэффициента полезного действия фотопреобразователей солнечного излучения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. — М.: Энергоатомиздат, 1987. [Farenbrukh A., B'yub R. Solnechnye elementy. Teoriya i eksperiment. M. Energoatomizdat. 1987]
2. Гук Е. Г., Налет Т. А., Шварц М. З., Шуман В. Б. Характеристики кремниевых многопереходных солнечных элементов с вертикальными $p-n$ -переходами // Физика и техника полупроводников. — 1997. — Т. 31, № 7. — С. 855–857.

[Guk E. G., Nalet T. A., Shvarts M. Z., Shuman V. B. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. Vol. 31, N 7. P. 855]

3. Воронков В. Б., Гук Е. Г., Козлов В. А. и др. Использование твердофазного прямого срачивания кремния для формирования структур солнечных элементов с вертикальными $p-n$ -переходами // Физика и техника полупроводников. — 1998. — Т. 32, № 7. — С. 886–888. [Voronkov V. B., Guk E. G., Kozlov V. A. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1998. Vol. 32, N 7. P. 886]

4. Корольченко А. С., Ившин П. А. Кремниевые высоковольтные многопереходные солнечные батареи – новые технологии // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. — Москва: НПП «Квант», 2010. — № 27. — С. 10–13. [Korol'chenko A. S., Ivshin P. A. // Avtonomnaya energetika: tekhnicheskii progress i ekonomika. Moskva: NPP «Kvant», 2010. N 27. P. 10]

5. ATLAS User's Manual. — Santa Clara, CA: Silvaco, 2004.

6. Польский Б. С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. — Рига: Зинатне, 1986. [Pol'skii B. S. Chislennoe modelirovanie poluprovodnikovyykh priborov. Riga. Zinatne, 1986]

Дата поступления рукописи
в редакцию 08.09 2011 г.

Gnilenko A. B., Dzenzersky V. A., Plaksin S. V., Pogorelaya L. M. The influence of silicon wafer thickness on characteristics of multijunction solar cells with vertical $p-n$ -junctions.

Keywords: multijunction solar cell, vertical $p-n$ -junction, silicon wafer, computer simulation, Silvaco TCAD software package.

A multijunction silicon solar cell with vertical $p-n$ junctions consisted of four serial n^+-p-p^+ -structures was simulated using Silvaco TCAD software package. The dependence of solar cell characteristics on the silicon wafer thickness is investigated for a wide range of values.

Ukraine, Dnepropetrovsk, Institute of Transport Systems and Technologies of NASU.

Гниленко О. Б., Дзензерський В. О., Плаксін С. В., Погоріла Л. М. Вплив товщини кремнієвих пластин на характеристики багатоперехідних сонячних елементів з вертикальними $p-n$ -переходами.

Ключові слова: багатоперехідний сонячний елемент, вертикальний $p-n$ -перехід, кремнієва пластина, комп'ютерне моделювання, програмний пакет Silvaco TCAD.

Проведено комп'ютерне моделювання багатоперехідного кремнієвого сонячного елементу з вертикальними $p-n$ -переходами, що складається з чотирьох послідовно з'єднаних n^+-p-p^+ -структур. Розрахунки виконано за допомогою програмного пакета Silvaco TCAD. Досліджено залежність основних характеристик сонячного елемента від товщини кремнієвих пластин в широкому діапазоні значень.

Україна, м. Дніпропетровськ, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ.

УДК 539.1.074.5; 621.382

К. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ

E-mail: detector@carrier.kiev.ua

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИС С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Предложен метод определения мощности дозы излучения по ионизационному току в $p-n$ -переходе и радиационной стойкости МДП интегральных схем с помощью низкоэнергетического (10–40 кэВ) рентгеновского излучения.

Ключевые слова: радиационные испытания, низкоэнергетическое рентгеновское излучение, МОП структура, радиационная стойкость ИС.

При исследовании радиационной стойкости интегральных схем (ИС) и при разработке их технологии и конструкции возникает необходимость в методе, позволяющем оценивать радиационное воздействие на ИС на различных стадиях их изготовления, а также после изготовления непосредственно на пластинах кремния, когда они еще не собраны в корпуса, в условиях производства кристаллов или в лаборатории. Применение высокоэнергетических (ВЭ) источников ионизирующего излучения для облучения ИС (обычно это ^{60}Co (1,2 МэВ), ^{137}Cs (662 кэВ) и др.) требует специальных мер по организации испытаний и защите персонала при их проведении, расположения контрольно-измерительной аппаратуры на значительном удалении от исследуемых объектов, сборки ИС в корпуса и контактирование к ним через разъемы и длинные кабели, необходим дозиметрический контроль и другие технические меры. Все это значительно усложняет и удлиняет сроки таких исследований. Поэтому чрезвычайно привлекательным является применение источников низкоэнергетического (НЭ) ионизирующего излучения (например, рентгеновского), позволяющих существенно упростить защиту персонала от ионизирующих излучений и, соответственно, расположить контрольно-измерительную аппаратуру рядом с источником и исследуемым объектом, осуществить контактирование к ИС или к тестовым структурам с помощью зондов прямо на пластине или короткими проводниками к выводам корпусов. Однако для того, чтобы результаты, полученные при использовании НЭ-источника, можно было применить для оценки стойкости изделий к ВЭ-излучению, необходимо определить условия моделирования его воздействия и калибровочные коэффициенты.

Известно [1–4], что в МДП ИС наиболее чувствительной к радиации частью является МОП-структура, а точнее — оксидный диэлект-

рик. Основной причиной «нестойкости» МОП-структуры является встраивание положительного заряда в оксид вблизи поверхности раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$, приводящее к сдвигу порогового напряжения V_T МОП-структуры при облучении. Поведение МОП-структур при ВЭ- и НЭ-облучении изучено в ряде работ [5–10] и позволяет сделать вывод о сходстве поведения характеристик МОП-структуры (МОП-транзистора) в обоих случаях, но с различной чувствительностью к излучению и с некоторыми особенностями.

Метод использовался при проверке конструктивных решений и для оптимизации технологического процесса изготовления радиационно стойких (РС) МДП ИС и МОП-транзисторов, а также для контроля параметров готовых кристаллов на пластинах до сборки изделий. Другим применением метода является исследование параметров МОП-транзисторов, предназначенных для дозиметрии ионизирующего излучения [11]. При его использовании облегчается выполнение требований санитарных норм и техники безопасности для работающего персонала, ускоряется и удешевляется выполнение испытаний, что дает существенные преимущества перед использованием ВЭ γ -излучения.

Экспериментальная установка

Установка для радиационных исследований схематически показана на **рис. 1**, контроль параметров облучаемых структур осуществлялся аппаратурой, расположенной снаружи защитного экрана. Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП-транзисторов и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МОП-варакторов. Рентгеновская трубка излучателя «РЕИС-И» имеет медный анод, что определяет энергию характеристического излучения около 8 кэВ.

Результаты измерения спектров нескольких трубок, полученные с помощью блока детектиро-

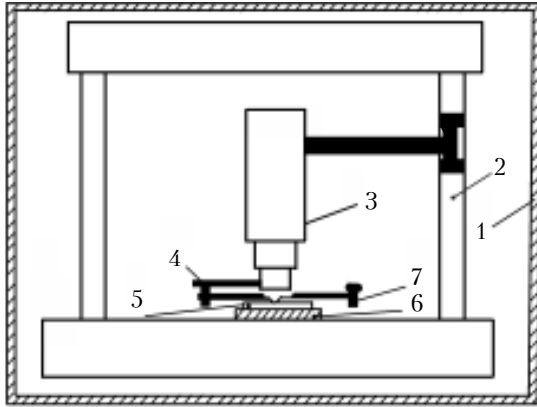


Рис. 1. Установка для облучения полупроводниковых структур:

1 — экран; 2 — микрозондовая установка; 3 — рентгеновский излучатель «РЕИС-И», 4 — упор, 5 — образец (пластина); 6 — столик, 7 — зонды

вания рентгеновского излучения БДРК на основе полупроводникового детектора БДРК-1/4-50, показали, что доля тормозного излучения в интенсивности общего излучения зависит от ускоряющего напряжения на аноде. Например, при напряжении на аноде 10 кВ тормозное излучение может достигать 35%, а при напряжении 20 кВ — 7–10%. Кроме того, различные экземпляры трубок могут иметь свои индивидуальные особенности в спектре (например, в одной из трубок наблюдалась линия железа около 6,4 кэВ), т. е. спектр используемых рентгеновских источников необходимо контролировать, чтобы учитывать полученные ранее калибровочные коэффициенты.

Определение мощности рентгеновского излучения по току $p-n$ -перехода

Одной из основных трудностей предлагаемого метода является определение дозы излучения, поглощенной подзатворным диэлектриком. Для этого необходимо знать спектральное распределение излучения рентгеновского источника, структуру и параметры слоев МДП-прибора. Ситуация усложняется также тем, что для данного диапазона энергии квантов и мощности излучения нет достаточно простого дозиметра. Поэтому нами был использован метод контроля мощности и дозы облучения образца по ионизационному току в $p-n$ -переходе I_{pn} ($p-n$ -переход может располагаться на облучаемой пластине в качестве тестового элемента).

В ионизационном токе присутствуют две компоненты: дрейфовая $I_{др}$, генерируемая в области пространственного заряда (ОПЗ) $p-n$ -перехода, и диффузионная $I_{диф}$, генерируемая в прилегающем к ОПЗ объеме кремния. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости, из которых видно, что I_{pn} практически линейно зависит от $(U+U_{крп})^{0,5}$ (U — приложенное к $p-n$ -переходу обратное напряжение, $U_{крп}$ — «встроенное» напряжение, рав-

ное контактной разнице потенциалов между n - и p -областями). Точки пересечения графиков с осью ординат соответствуют значениям диффузионной составляющей ионизационного тока $I_{диф}$, которая не зависит от напряжения. Из рисунка видно, что значения $I_{диф}$ различны для разных образцов, т. е. эта составляющая не может быть использована для определения мощности рентгеновского излучения. Дрейфовая составляющая $I_{др}$ пропорциональна объему ОПЗ, который линейно зависит от $U^{0,5}$, а идентичность хода приведенных на рисунке кривых говорит о том, что зависимости $I_{др}(U)$ одинаковы для всех образцов. Таким образом, дрейфовая составляющая позволяет однозначно определить мощность излучения.

Найти мощность падающего на образец излучения dD/dt можно без радиометра, воспользовавшись выражением, аналогичным (1.23) или (3.11) в [12, с. 27, 71]:

$$I_{др} = S d_{опз} e g \frac{dD}{dt}, \quad (1)$$

где S — площадь перехода;

$d_{опз}$ — глубина ОПЗ;

e — заряд электрона;

g — скорость генерации носителей заряда;

D, t — доза и время облучения.

Однако для использования этой формулы необходимо сначала определить скорость генерации g , проведя измерение ионизационного тока I_{pn} и мощности рентгеновского излучения (любым рентгеновским радиометром с нижним пределом диапазона чувствительности до 5 кэВ). После этого нужно вычислить значение дрейфового тока (вычитая из I_{pn} значение $I_{диф}$ для данного образца), а затем подставить полученное значение $I_{др}$ и измеренную мощность излучения в выражение (1). Получив таким образом скорость генерации g , далее уже можно по

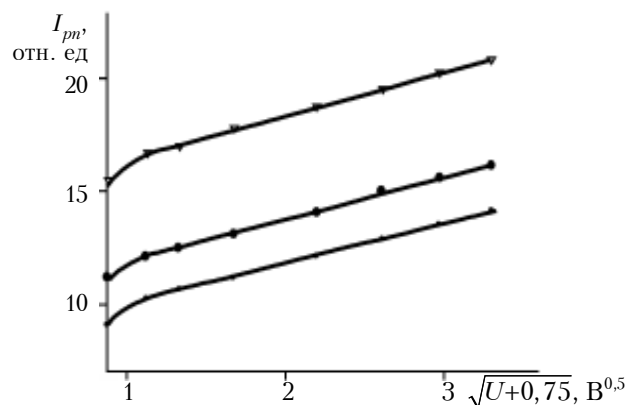


Рис. 2. Зависимость ионизационного тока $p-n$ -перехода от напряжения для трех образцов, облученных рентгеновской трубкой БС-1 (Cu) при ускоряющем напряжении на аноде 20 кВ, токе трубки 60 мкА, расстоянии от анода до образца 10 мм

формуле (1) вычислять мощность излучения, измеряя только величину тока.

Сравнение результатов измерения параметров МОП-элементов при ВЭ- и НЭ-облучении

Исследование влияния постоянной и импульсной дозы ионизирующего излучения на поведение параметров МДП ИС (пороговые напряжения, ВФХ и др.) и определение коэффициентов для «сшивки» результатов ВЭ- и НЭ-испытаний проводилось с использованием испытательной базы в г. Лыткарино (Россия) и в Институте физики НАН Украины (линейный ускоритель электронов и установка МРХ-1000 на изотопе ^{60}Co).

Значение ускоряющего напряжения на аноде рентгеновской трубки составляло 20 кВ, ток трубки 60 мкА, мощность эквивалентной дозы рентгеновского излучения 100–1000 рад/с. Поскольку доза в 1 Мрад поглощается в течение нескольких минут, метод является экспрессным по сравнению с методикой стандартных испытаний, включающих сборку МДП ИС в корпуса, подключение контрольно-измерительной аппаратуры, облучение ВЭ γ -излучением от источника на ^{60}Co (^{137}Cs), термолюминисцентную дозиметрию.

Коэффициенты, необходимые для расчета стойкости, определены из сопоставления результатов, полученных при использовании ВЭ γ -источника (^{60}Co) и НЭ рентгеновского источника. Погрешность метода при оценке стойкости находится в пределах 20%.

Результаты влияния НЭ рентгеновского облучения на варакторы, изготовленные по стандартной КМОП-технологии, приведены на рис. 3, 4. Варакторы изготовлены на пластинах p -типа, толщина подзатворного оксида 400 Å, материал

затвора — поликремний толщиной 0,5 мкм. На поликремнии выращивали оксид толщиной 0,2 мкм, затем наносили слой фосфоросиликатного стекла 0,65 мкм и слой алюминия 1,2 мкм. Насыщение величины сдвига (см. рис. 3) может объясняться тем, что накопление заряда в оксиде с увеличением времени облучения изменяет распределение электрического поля в оксиде, уменьшая его до некоторой величины, при которой процесс накопления заряда уравнивается процессом его исчезновения вследствие «заброса» электронов из металла или полупроводника в оксид. Зависимости на рис. 3 и 4 качественно согласуются с зависимостями, полученными при использовании ВЭ-источника ^{60}Co (1,2 МэВ).

Таким образом, результаты облучения элементов МДП ИС НЭ рентгеновским излучением (8 кэВ) могут быть использованы для моделирования воздействия ВЭ γ -излучения от ^{60}Co , поскольку в обоих случаях наблюдаются в основном одни и те же эффекты, а именно:

- встраивание положительного заряда в оксид кремния;
- зависимость сдвига ВФХ от электрического поля в диэлектрике;
- качественное сходство зависимостей сдвига ВФХ от дозы облучения и от параметров поля излучения.

Следует отметить, что при исследованиях целесообразно работать с более высокими полями, т. к. в этом случае сглаживается разница в рекомбинации генерированных электронно-дырочных пар [5, 13], обусловленная различием в энергии ^{60}Co -излучения и низкоэнергетического (10–40 кэВ) рентгеновского излучения. В случае низких полей эта разница должна быть максимальной, что усложняет сравнение результатов этих двух видов испытаний.

В таблице приведены данные о режимах облучения ВЭ γ -излучением от ^{60}Co и рентгеновским излучением при испытании транзисторов, изготовленных по специальной («стойкой») тех-

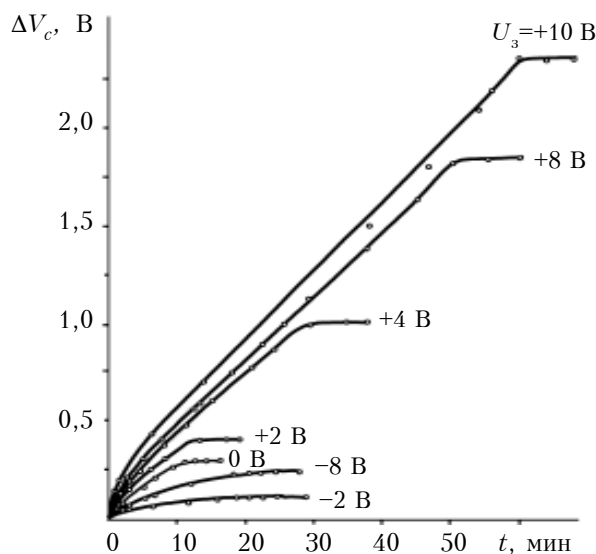


Рис. 3. Зависимость сдвига ВФХ МОП-варактора от времени облучения t при различных значениях напряжения на затворе U_3

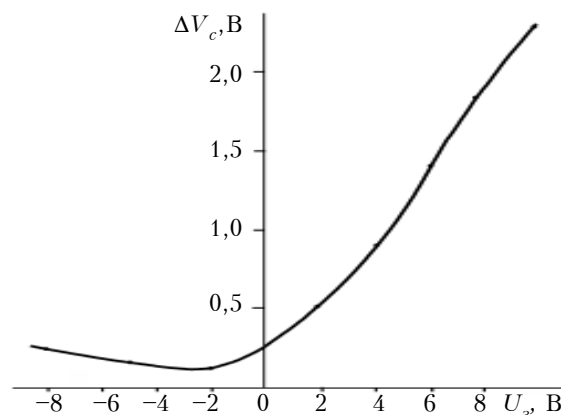


Рис. 4. Зависимость максимального (в насыщении) сдвига ВФХ МОП-варактора от напряжения на затворе

Соответствие режимов ВЭ- и НЭ-облучения

ВЭ-облучение		ΔV_T , В	НЭ-облучение	
U_3 , В	Доза облучения, 10^5 рад		Время облучения, мин	U_3 , В
+10	1	0,02	1,0	+10
+10	5	0,13	8,2	+10
+10	10	0,16	11,6	+10

нологии. Эти данные могут быть использованы при выборе времени облучения рентгеновским источником, необходимого для накопления заданной дозы облучения.

Как видно из таблицы, в предлагаемом методе измеряется величина сдвига порогового напряжения МОП-структуры при облучении ионизирующим излучением, которая является одним из основных параметров, характеризующих стойкость МОП ИС и ее элементов. Следует отметить, что приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что испытанные образцы имеют более высокую радиационную стойкость, чем изготовленные по стандартной технологии. Так, для стандартных МОП ИС уже при дозах 10^4 – 10^5 рад наблюдаются сдвиги ΔV_T от десятых долей вольта до нескольких вольт, тогда как для исследованных образцов при значительно более высокой дозе в 10^6 рад сдвиги ΔV_T составляют всего лишь десятые доли вольта.

Таким образом, метод дает возможность оценить степень стойкости элементов МОП ИС.

Область применения метода

Известно, что при дозах облучения порядка 10^8 рад и более проявляются эффекты, связанные с дефектообразованием в кремниевой подложке, что приводит к изменению эффективной концентрации легирующей примеси в канале (и, соответственно, к изменению концентрации подвижных носителей в канале), к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда, к уменьшению подвижности носителей заряда и к другим эффектам (см., например, [1–4, 12, 14]). В настоящей работе не рассматривается применение метода при больших дозах облучения ($\geq 10^8$ рад).

Применение представленного метода ограничено диапазоном доз, когда дефекты в подложке еще незначительно влияют на характеристики МОП-транзисторов. При этом основным эффектом при облучении МОП-структуры считается генерация электронно-дырочных пар в оксиде со встраиванием положительного заряда дырок в оксид (SiO_2) вблизи поверхности раздела Si – SiO_2 . Исходя из этого можно считать, что метод применим в рассмотренном диапазоне доз, когда влияние облучения в основном сводится к сдвигу порогового напряжения ΔV_T МОП-струк-

туры (МОП-транзистора), которое и контролируется при испытаниях.

Следует также отметить, что калибровка при ВЭ-облучении проводится с учетом влияния корпуса (или подложки), которое сводится к усилению дозы и экранировке излучения, результатом чего является некоторый дополнительный вклад в ΔV_T . Поэтому при изменении корпуса изделия необходимо проводить новую калибровку.

Таким образом, разработанный экспрессный метод позволяет определять радиационную стойкость МДП ИС с помощью низкоэнергетического рентгеновского излучения, а также мощность поглощенной дозы по ионизационному току в p – n -переходе МОП-структуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ma T. P., Dressendorfer P. V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. — New York: Wiley Interscience, 1989.
2. Oldham T. R. Ionizing radiation effects in MOS oxides in «Advances in Solid State Electronics and Technology» (ASSET) Series. — Singapore: World Scientific, 1999.
3. Hughes H. L., Benedetto J. M. Radiation effects and hardening of MOS technology devices and circuits // IEEE Trans. on Nuclear Science. — 2003. — Vol. 50, N 3. — P. 500–521.
4. Oldham T. R., McLean F. B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices // IEEE Trans. on Nuclear Science. — 2003. — Vol. 50, N 3. — P. 483–499.
5. Hughes R. C. Charge-carried transport phenomena in amorphous SiO_2 : direct measurements of the drift mobility and lifetime // Phys. Rev. Lett. — 1973. — Vol. 30. — P. 1333–1336.
6. Benedetto J. M., Boesch H. E. The relationship between ^{60}Co and 10 keV X-ray damage in MOS devices // IEEE Trans. on Nuclear Science. — 1986. — Vol. NS-33. — P. 1318–1323.
7. Dozier C. M., Brown D. B. Effect of photon energy on the response of MOS devices // IEEE Trans. on Nuclear Science. — 1981. — Vol. NS-28. — P. 4137–4141.
8. Dozier C. M., Brown D. B. The use of low energy X-rays for device testing – a comparison with Co^{60} radiation // IEEE Trans. on Nuclear Science. — 1983. — Vol. NS-30. — P. 4382–4387.
9. Fleetwood D. M., Winokur P. S., Dozier C. M., Brown D. B. Effect of bias on the response of metal-oxide-semiconductor devices to low energy X-ray and Cobalt-60 irradiation // Appl. Phys. Lett. — 1983. Vol. 52. — P. 1514–1516.
10. Paillet P., Schwank J. R., Shaneyfelt M. R. et al. Comparison of charge yield in MOS devices for different radiation sources // IEEE Trans. on Nuclear Science. — 2002. — Vol. NS-49. — P. 2656–2661.
11. Перевертайло В. Л. Датчики интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 5–6. — С. 22–29. [Perevertailo V. L. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2010, N 5–6 P. 22]
12. Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. — Минск: Наука и Техника, 1986. [Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V., Vavilov V. A. Vozdeistvie radiatsii na integral'nye mikroskhemy. Minsk: Nauka i Tekhnika. 1986]

13. Hu G. J., Aitken J. M., Dennard R. H. A hardened field insulator // IEEE Trans. on Nuclear Science. — 1981. — Vol. NS-28, N 6. — P. 4102—4104.

14. Вологдин Э. Н., Лысенко А. П. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов. — М.: МИЭМ, 2001. [Vologdin E. N., Lysenko A. P. Radiatsionnye efekty v nekotorykh klassakh poluprovodnikovyykh priborov. Moscow. MIEM. 2001]

Дата поступления рукописи
в редакцию 4.07 2011 г.

Perevertailo V. L. **Determination of radiation resistance of integrated circuits with the use of low-energy X-radiation.**

Keywords: radiation testing, low-energy X-rays, MOS structure, radiation hardness of IC.

A method is proposed for determination of radiation dose via the ionization current in the $p-n$ -junction

and of radiation resistance of MIS integrated circuits with the use of low-energy (10—40 keV) X-rays.

Ukraine, Kiev, Institute of Microdevices STC "IMC" NASU.

Перевертайло В. Л. **Визначення радіаційної стійкості ІС за допомогою низькоенергетичного випромінювання.**

Ключові слова: радіаційні випробування, низькоенергетичне рентгенівське випромінювання, МОШ-структура, радіаційна стійкість ІС.

Запропоновано метод визначення потужності дози випромінювання за іонізаційним струмом в $p-n$ -переході та радіаційної стійкості МДН інтегральних схем за допомогою низькоенергетичного (10—40 кеВ) рентгенівського випромінювання.

Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів НТК ІМК НАНУ.

І І АУ А ЕІ ЕАЕ

І І АУ А ЕІ ЕАЕ



Губарев В. В. Информатика: прошлое, настоящее, будущее.— Москва: Техносфера, 2011.— 432 с.

В пособии излагается взгляд автора на то, что такое информатика, ее состав, основные понятия, концепция описания ее истории и поколений средств вычислительной техники. Особое внимание уделяется хронологии создания базовых средств и технологий информатики, сведениям о лицах, внесших весомый вклад в развитие разных разделов информатики, а также ближайшим перспективам их развития. Содержатся многочисленные справочные, в частности статистические, сведения и перечень междисциплинарных проблемных вопросов, касающихся понятия информации, информатики и ее разделов. В книгу включены учебные и справочные материалы, предназначенные для изучения в рамках учебного процесса при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная математика и информатика», «Программная инженерия», «Системный анализ и управление», «Информационные системы и технологии», «Прикладная информатика» (по отраслям), «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем», «Управление в технических системах», «Бизнес-информатика», «Информационная безопасность» и т. п.



І І АУ А ЕІ ЕАЕ



Д. Эрентраут, Э. Мейсснер, М. Боковски. Технология выращивания кристаллов нитрида галлия.— Москва: Техносфера, 2011.— 384 с.

Книга представляет собой первый подробный обзор передовой технологии выращивания кристаллов нитрида галлия. Проведен анализ возможностей долгосрочного и краткосрочного применения объемных подложек на основе GaN, а также мотивация и задачи по внедрению соответствующей технологии в конкретные приборы. Книга написана командой из 45 специалистов, признанных лидеров науки и промышленности, и подготовлена опытными редакторами. Издание окажется незаменимым ресурсом для инженеров, исследователей и студентов, работающих в области выращивания кристаллов GaN и занимающихся обработкой и изготовлением приборов на их основе как в сугубо научных, так и промышленных целях.



УДК 621.383.933

Д. т. н. Л. М. КОГАН

Россия, г. Москва, НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ»

E-mail: levkogan@mail.ru

МОЩНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Представлены разработанные в НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ» мощные ИК-диоды с длиной волны излучения 805 ± 10 , 870 ± 20 и 940 ± 10 нм. Сила излучения узконаправленных диодов — до 4 Вт/ср в непрерывном режиме и до 100 Вт/ср в импульсном. Мощность излучения широкоугольных диодов достигает 1 Вт в непрерывном режиме. Внешний квантовый выход излучения ИК-диодов достигает 30%. Созданы также модули ИК-диодов с блоком плоских линз Френеля с силой излучения до 70 Вт/ср.

Ключевые слова: мощные излучающие диоды, ИК-диапазон.

Излучающие диоды инфракрасного диапазона (ИК-диоды) широко используются в технике ночного видения, видеонаблюдения, инфракрасного освещения, дистанционного управления, в телевизионных системах с электронно-оптической связью (ЭОП) на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), в оптической связи и др. Важнейшие показатели качества ИК-диодов — это значения мощности излучения и силы излучения в сочетании с длиной волны.

Исследования в области создания ИК-диодов проводятся в течение последних нескольких десятилетий [1]. Первоначально в ИК-диодах использовался диффузионный $p-n$ -переход в GaAs, и максимальный внешний квантовый выход излучения ($\eta_{\text{вн}}$) составлял 1,4–1,7% при быстром действии 20–50 нс [2]. Создание жидкостно-эпитаксиальной $p-n$ -структуры GaAs, легированной Si [3], позволило значительно увеличить эффективность этих приборов. Значения $\eta_{\text{вн}}$ диодов на основе этой структуры с плоским кристаллом составляли 3–4,5%, но такие диоды характеризовались пониженным быстродействием (0,2–1,5 мкс) [4, 5]. При использовании полусферического кристалла величина $\eta_{\text{вн}}$ составила 20–28%, а на кристалле с мезоструктурой при выводе света через подложку — от 3 до 8%. Созданные позже излучающие диоды на основе двойных гетероструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ с переизлучающим слоем на GaAs-подложке имели $\eta_{\text{вн}}=4-8\%$ и быстродействие 15–25 нс [6, 7]. Однако для многих применений такая эффективность была недостаточной. И только разработка многопроходных двойных гетероструктур (МДГС) в системе $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, возможность создания которых теоретически была обоснована в [7], позволила значительно увеличить квантовый выход их излучения. Высокое значение квантового выхода здесь обусловлено тем, что внутренний кванто-

вый выход достигает почти 100%, а также эффектом «электронного ограничения» в активной области (приводит к снижению поглощения излучения в активной области) и эффектом «многoproходности». Вследствие второго эффекта фотоны, направленные к нижней грани кристалла, а также отраженные внутрь кристалла верхней и боковыми гранями, испытывают многократное внутреннее отражение без поглощения в активной области и тем самым вносят вклад в выводимое излучение.

Первые высокие результаты ($\eta_{\text{вн}}=30\%$) были получены на МДГС $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ с мезоструктурой с полусферическим покрытием из эпоксидной смолы [8]. При использовании плоского кристалла без мезоструктуры с полимерной полусферой квантовый выход составлял 22% [9].

В настоящей статье описаны мощные узконаправленные и широкоугольные ИК-диоды, а также модули на их основе, созданные в НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ». Диоды реализованы на базе структур и кристаллов, выпускаемых ОАО «Восход» (Россия, г. Калуга).

Излучающие структуры и кристаллы

МДГС из $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ типа ЭСАГА-140 имеют активную область p -типа толщиной приблизительно 2 мкм, легированную Zn и Ge, эмиттерные области с содержанием AlAs около 30% и пассивную область с 15–30% AlAs. Общая толщина структуры — 150 ± 20 мкм. Проводимость верхнего слоя гетероструктуры — n -типа. Излучение структур характеризуется длиной волны в максимуме спектра (λ_{max}) 805 ± 10 , 870 ± 20 и 940 ± 10 нм.

ИК-диоды с $\lambda_{\text{max}}=805\pm 10$ нм используются в телевизионных системах с электронно-оптическими преобразователями и ПЗС [10]. ПЗС-матрицы, работающие в ближней ИК-области

спектра, имеют более высокую спектральную чувствительность для коротковолнового излучения (805 ± 10 нм), чем для излучения с длиной волны 870 ± 20 нм (разница в чувствительности составляет 15–20%).

ИК-диоды с длиной волны излучения в максимуме спектра $\lambda_{\max} = 870 \pm 20$ нм широко применяются для видеонаблюдения, инфракрасного освещения, дистанционного управления радиоаппаратурой, для оптической связи, в медицинской терапевтической аппаратуре и др. Диоды с $\lambda_{\max} = 940 \pm 10$ нм предназначены для скрытого ИК-видеонаблюдения, т. к. их свечение невидимо для человеческого глаза.

Кристаллы имеют мезаструктуру, обеспечивающую стабильность приборов в процессе работы, омические контакты выполнены на основе Au. При разработке кристаллов были решены проблемы оптимизации площади омических контактов (для обеспечения низкого прямого напряжения, а также снижения потерь излучения на омических контактах за счет поверхностной рекомбинации и внутреннего отражения) и снижения теплового сопротивления кристалла. Площадь омического контакта верхней грани кристалла, содержащего элементы улучшения растекания тока, не превышает 20% площади мезаструктуры. Омический контакт к нижней грани кристалла состоит из точек диаметром около 80 мкм. Общая площадь омического контакта к нижней грани кристалла не превышает 30–40% площади нижней грани. Типичный кристалл имеет вид, представленный на рис. 1. Размеры контактной площадки для сварки гибкого вывода — $0,14 \times 0,14$ мм.

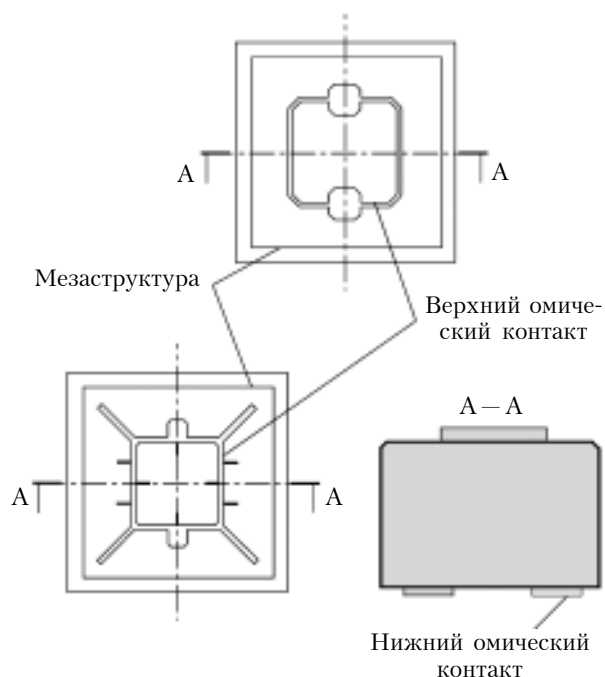


Рис. 1. Излучающие ИК-кристаллы размерами $0,6 \times 0,7$ мм (вверху) и $1,24 \times 1,24$ мм (внизу)

Излучающие ИК-диоды с узконаправленным излучением

Это диоды с шириной диаграммы направленности излучения не более 10–12 градусов на уровне 0,5 от максимальной интенсивности.

ИК-кристаллы размещаются в полимерном корпусе из эпоксидного компаунда с показателем преломления $n \approx 1,56$. Использование полимерного корпуса позволяет увеличить внешний квантовый выход излучения примерно в 1,5 раза за счет увеличения критического угла вывода излучения из кристалла.

Для получения светового потока в виде пучка почти параллельных лучей применяется асферический полимерный купол (ранее применялся сферический) с уменьшенными потерями на сферическую абберацию [11, 12]. Такое решение обусловлено тем, что применение безабберационной асферической линзы дает максимальную силу излучения. Получение параллельного пучка лучей (рис. 2) основано на использовании принципа Ферма. Уравнение безабберационной поверхности вращения может быть записано так:

$$n'x + nt = ns.$$

Учитывая, что

$$t = \sqrt{y^2 + (s - x)^2},$$

после преобразования получим

$$y^2 = 2sx(1 - n'/n) + x^2(n'^2/n^2 - 1). \quad (1)$$

Это уравнение эллипса, и при $n' = 1$

$$b^2/a^2 = 1 - 1/n^2, \quad e = 1/n, \quad (2)$$

где a и b — большая и малая полуоси эллипса, e — его эксцентриситет. То есть, эксцентриситет эллипса обратно пропорционален показателю преломления компаунда. Длина малой полуоси эллипса выбирается равной радиусу полимерного

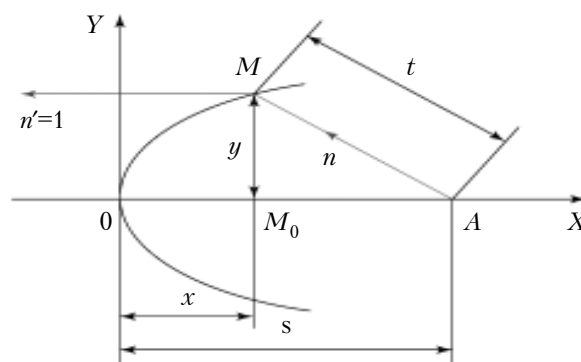


Рис. 2. Ход луча через преломляющую поверхность полимерного купола:

A — положение светоизлучающего кристалла; n, n' — показатели преломления полимера и воздуха; s — расстояние от излучающей поверхности до вершины полимерного купола; M — точка падения луча на поверхность полимерного купола; t — длина пути светового луча

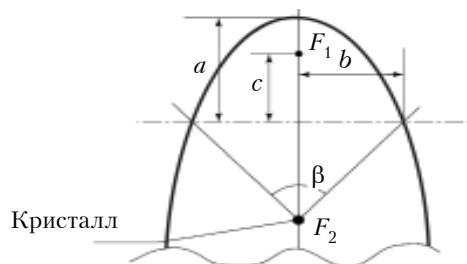


Рис. 3. Эллиптическая поверхность полимерного купола светодиода:

β — угол захвата излучения; F_1, F_2 — фокусы эллипса купола (исходя из намеченных габаритов прибора: 5, 8, 18 мм и др.). Тогда из приведенного выше соотношения (2) можно легко найти длину большой полуоси: $a = b / (1 - 1/n^2)^{0.5}$. Преломляющая свет эллиптическая поверхность рассчитывается по уравнению (1). Принцип ее построения показан на рис. 3.

Конструкции ИК-диодов различной мощности излучения с эллиптическим полимерным куполом приведены на рис. 4, параметры некоторых из них — в табл. 1.

ИК-диоды АОИ 188, АОИ 189 и АОИ 190 выполнены с кристаллом размерами 0,35×0,35 мм, диоды У-190 — 0,6×0,7 мм, диоды У-224 и У-176 — 1,24×1,24 мм. Сила излучения диодов У-190 достигает 1 Вт/ср, У-224 и У-176 — 4 Вт/ср, что позволяет создавать на их основе модули и ИК-прожекторы с силой излучения в сотни ватт на стерадиан и обеспечивать инфракрасное освещение на значительном расстоянии.

ИК-диоды с длиной волны излучения $\lambda_{\max}$, равной 805 и 870 нм, обладают высоким быстродействием: время нарастания (τ_n) и спада ($\tau_{\text{сп}}$) импульса излучения по уровням 0,1–0,9 составляет 5–25 нс. Диоды с длиной волны излучения $\lambda_{\max} = 940$ нм имеют меньшее быстродействие — τ_n и $\tau_{\text{сп}}$ составляют примерно 200 нс.

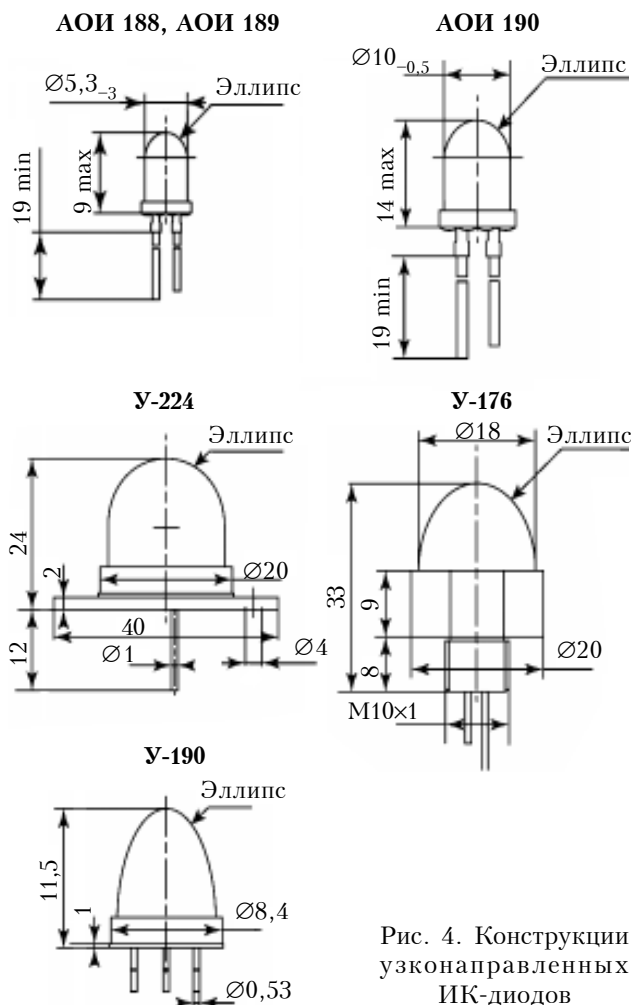


Рис. 4. Конструкции узконаправленных ИК-диодов

Все приборы могут работать в импульсном режиме. Для диодов типов У-224 и У-176 ток в импульсе может достигать 10 А при среднем токе не более 350 мА. При этом сила излучения ИК-диода в импульсе достигает 100 Вт/ср.

Таблица 1

Фотометрические и электрические параметры узконаправленных ИК-диодов

Тип дио́да	Мощность излучения P_e , мВт		Сила излучения J_e , мВт/ср		Угол излучения $2\theta_{0,5}$, градус	Прямое напряжение $U_{\text{пр}}$, В, не более	Длина волны излучения λ_{max} , нм
	не менее	типичное значение	не менее	типичное значение			
Прямой ток ($I_{\text{пр}}$) 100 мА							
АОИ 188В	—	20	170	190	10±3	2,2	805±10
$I_{\text{пр}} = 400$ мА							
У-190А-П	90	100	—	1000	10±3	3,0	805±10
$I_{\text{пр}} = 700$ мА							
У-224А	200	250	—	4000	7±2	2,2	805±10
У-176А	200	250	—	4000	7±2	2,2	805±10
У-176Б	200	250	—	4000	7±2	2,2	870±20

Спектральные и энергетические характеристики ИК-диодов

Полуширина полос излучения составляет 35 нм для диодов с длиной волны излучения $\lambda_{\max}$, равной 805 ± 10 и 870 ± 20 нм, и 50 нм для диодов с $\lambda_{\max} = 940 \pm 10$ нм (рис. 6). Зависимость мощности излучения от прямого тока близка к линейной (рис. 7). Внешний квантовый выход излучения ИК-диодов составляет 25–30%. Типичные зависимости мощности излучения от температуры окружающей среды приведены на рис. 8, а типичные диаграммы направленности излучения — на рис. 9.

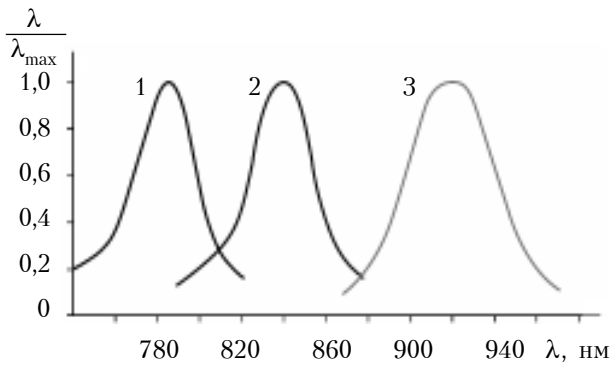


Рис. 6. Спектры излучения ИК-диодов с различным значением $\lambda_{\max}$:
1 — 805 ± 10 нм; 2 — 870 ± 20 нм; 3 — 940 ± 10 нм

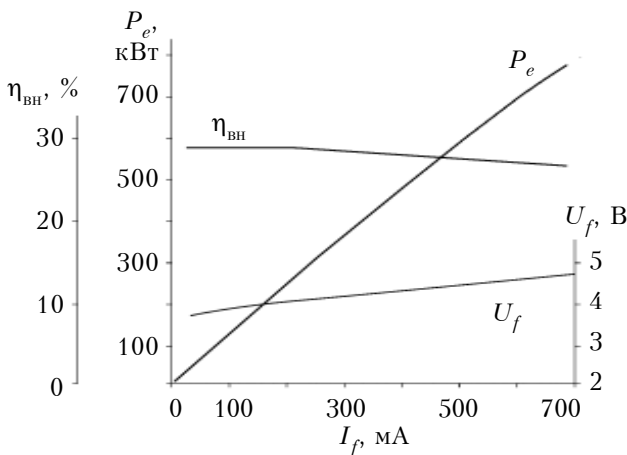


Рис. 7. Зависимости мощности излучения, внешнего квантового выхода и прямого напряжения от прямого тока I_f для ИК-диода У-234Б

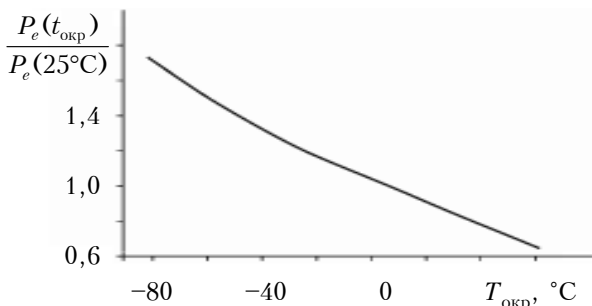


Рис. 8. Типичная зависимость мощности излучения ИК-диодов от температуры окружающей среды

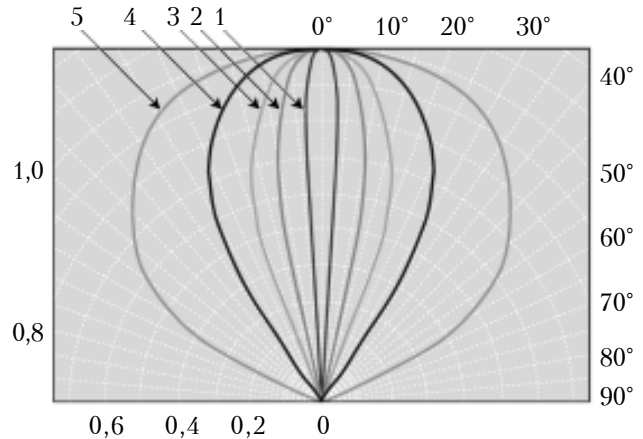


Рис. 9. Типичные диаграммы направленности излучения диодов с различным углом излучения $2\Theta_{0,5}$:
1 — 7° ; 2 — 25° ; 3 — 40° ; 4 — 75° ; 5 — 120°

Инфракрасные осветительные модули направленного действия

Разработаны два вида модулей. Они используются для прожекторного ИК-освещения вместе с очками или приборами ночного видения на основе ЭОП и ПЗС-матриц.

Модуль с использованием блока плоских линз Френеля (рис. 10) [13, 14]. Модули типа У-200ИК созданы на основе двенадцати ИК-диодов диаметром 5 мм (например, типа У-136), размещенных вблизи фокуса блока плоских линз Френеля, включают также печатную плату с элементами управления. Фотометрические параметры модулей приведены в табл. 3. Их габаритные размеры $\varnothing 106 \times 43$ мм, угол излучения $2,5 - 3,5^\circ$, входные электрические параметры:

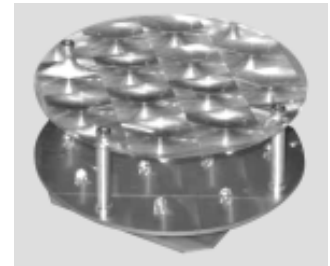


Рис. 10. Модуль ИК-диодов с блоком плоских линз Френеля

$U_{\text{вх}} = 12 \pm 1$ В, $J_{\text{вх}} = 200$ мА. Сила излучения модулей достаточно велика (до 70 Вт/ср), что позволяет обеспечить дальность ИК-освещения до 500 м и высокую яркость. Излучение модуля У-200ИК-3 невидимо для человеческого глаза.

Таблица 3
Фотометрические параметры модулей

Тип модуля	Спектр излучения		Сила излучения J_e , Вт/ср		
	$\lambda_{\max}$, нм	$\Delta\lambda$, нм	не менее	типичное значение	max
У-200ИК-1	870 ± 20	35	60	65	70
У-200ИК-2	805 ± 10	35	60	65	70
У-200ИК-3	940 ± 10	50	30	35	40

Модули с использованием мощных ИК-диодов. При использовании мощных узконаправленных диодов У-176 или У-224 удается получить значительную силу излучения модулей на их основе. Так, модуль с тридцатью диодами указанных типов обеспечивает силу излучения 120 Вт/ср и дальность более 700 м. Модули на основе мощных ИК-диодов содержат радиатор для отвода тепла. В других конструкциях для отвода тепла может быть использован корпус осветителя.

Для освещения на меньшее расстояние предназначены модули на основе ИК-диодов типа АОИ 195 и др.

Стабильность параметров ИК-диодов в процессе эксплуатации

Разработанные ИК-диоды характеризуются высокой стабильностью параметров в процессе работы: в условиях максимальной рабочей температуры 70°C при предельно-допустимом рабочем токе в течение 100 ч изменение мощности излучения не превышает 15–25%. Срок службы ИК-диодов — не менее 25 тыс. ч. Диапазон рабочих температур составляет от –60 до 70°C.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. — М.: Энергоатомиздат, 1983. [Kogan L. M. Poluprovodnikovye svetoizluchayushchie diody. Moscow. Energoatomizdat, 1983]
2. Herzog A. H., Keune D. L., Craford M. G. High efficiency Zn-diffused GaAs electroluminescent diodes. // J. Appl. Phys. — 1972. — Vol. 43. — N 2. — P. 600–608.
3. Rupprecht H., Woodail J. M., Konnerth K., Petit D. G. Efficient electroluminescence from GaAs diodes at 300 K // Appl. Phys. Lett. — 1966. — Vol. 9, N 6. — P. 221–223.
4. Дубровская Н. С., Кривошеева Р. Н., Мескин С. С. и др. Квантовый выход излучения GaAs *p-n*-структур, легированных кремнием // Физика и техника полупроводников. — 1969. — Т. 3, вып. 12. — С. 1845–1850. [Dubrovskaya N. S., Krivosheeva R. N., Meskin S. S. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1969. Vol. 3, iss. 12. — P. 1845]
5. Коган Л. М., Водовозова М. Л., Деготь Ю. М. и др. Диодные источники инфракрасного излучения из арсенида галлия // В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. — М.: Сов. радио, 1977. — Вып. 2. — С. 154–171. [Kogan L. M., Vodovozova M. L., Degot' Yu. M. i dr. // V kn.: Mikroelektronika i poluprovodnikovye pribory. Moscow. Sov. radio, 1977. Iss. 2. P. 154]
6. Брагин Н. В., Бондарь С. А., Малышкин М. А. и др. ФЭЛ-диоды для системы ВОЛС // Письма в ЖТФ. — 1982. — Т. 8, вып. 11. [Bragin N. V., Bondar' S. A., Malyshekin M. A. i dr. // Pis'ma v ZhTF. 1982. Vol. 8, iss. 11]
7. Алферов Ж. И., Агафонов В. Г., Гарбузов Д. З. и др. Многопроходные гетероструктуры. Внешний квантовый выход излучения // Физика и техника полупроводников. — 1976. — Т. 10, вып. 8. — С. 1497–1506. [Alferov Zh. I., Agafonov V. G., Garbuzov D. Z. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1976. Vol. 10, iss. 8. P. 1497]
8. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Гарбузов Д. З. Светодиоды меза-конструкции на основе двойных гетероструктур в системе AlAs-GaAs // ЖТФ. — 1977. — Т. 47, № 8. — С. 1772–1777. [Alferov Zh. I., Andreev V. M., Garbuzov D. Z. // ZhTF. 1977. Vol. 47, N 8. P. 1772]

9. Коган Л. М., Андреев Ю. П., Вишневская Б. И. и др. Высокоэффективные и быстродействующие излучающие диоды для фотоэлектрических устройств // Электронная промышленность. — 1991. — № 12, С. 44–47. [Kogan L. M., Andreev Yu. P., Vishnevskaya B. I. i dr. // Elektronnaya promyshlennost'. 1991. N 12, P. 44]

10. Волков В., Коган Л. Телевизионные системы с использованием светодиодных осветителей // Электронные компоненты. — 2002. — № 2. — С. 27–31. [Volkov V., Kogan L. // Elektronnye komponenty. — 2002. N 2. P. 27]

11. Коган Л. М., Водовозова М. Л., Вишневская Б. И. и др. Светодиоды с узконаправленным излучением // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1988. — Вып. 1. — С. 17–23. [Kogan L. M., Vodovozova M. L., Vishnevskaya B. I. i dr. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory. 1988. Iss. 1. P. 17]

12. Патент РФ на полезную модель № 48673. Мощный светодиод. 25.10.2004. [Patent RF na poleznuyu model' N 48673. 25.10.2004]

13. Коган Л. М., Рассохин И. Т. Светодиодные модули направленного действия // Светотехника. — 2001. — № 5. — С. 13–14. [Kogan L. M., Rassokhin I. T. // Svetotekhnika. 2001. — N 5. P. 13]

14. Патент РФ на изобретение. № 2202731. Световой прибор на светодиодах. 13.12.2000. [Patent RF na izobretenie. N 2202731. 13.12.2000]

*Статья перепечатана из журнала
«Электроника: НТБ» № 8 2011
с некоторыми сокращениями*

Kogan L. M. Powerful infrared emitting diodes.

Keywords: high-power emitting diodes, infrared range.

Powerful infrared LEDs with emission wavelength 805 ± 10 , 870 ± 20 and 940 ± 10 nm developed at SPC OED "OPTEL" are presented in the article. The radiant intensity of beam diode is under 4 W/sr in the continuous mode and under 100 W/sr in the pulse mode. The radiation power of wide-angle LEDs reaches 1 W in continuous mode. The external quantum efficiency of emission IR diodes runs up to 30%. There also has been created infrared diode modules with a block of flat Fresnel lenses with radiant intensity under 70 W/sr.

Russia, Moscow, SPC OED "OPTEL".

Коган Л. М. Потужні випромінюючі діоди інфрачервоного діапазону.

Ключові слова: потужні випромінюючі діоди, ІЧ-діапазон.

В НВЦ ОЕП «ОПТЕЛ» розроблено потужні ІК-діоди з довжиною хвилі випромінювання 805 ± 10 , 870 ± 20 та 940 ± 10 нм. Сила випромінювання вузьконаправлених діодів — до 4 Вт/ср в безперервному режимі та до 100 Вт/ср в імпульсному. Потужність випромінювання ширококутних діодів досягає 1 Вт в безперервному режимі. Зовнішній квантовий вихід випромінювання ІЧ-діодів досягає 30%. Створено також модулі ІЧ-діодів з блоком плоских лінз Френеля з силою випромінювання до 70 Вт/ср.

Россія, м. Москва, НВЦ ОЕП «ОПТЕЛ».

УДК 535.14.62 :375.828

К. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО

Германия, г. Штутгарт, Международный НПЦ энергосберегающих технологий

E-mail: garks@arcor.de

ПРИРОДА ПЕРЕХОДОВ И МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ НА ОСНОВЕ РАДИАЦИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ CdS

Исследование показало, что оптимальными рабочими переходами в лазерах с электронным возбуждением на основе радиационно легированных, оптически однородных кристаллов CdS являются переходы из вырожденной зоны проводимости на мелкие акцепторные уровни изотопов палладия и серебра.

Ключевые слова: лазер, электронная накачка, радиационное легирование

Для создания мощных полупроводниковых лазеров на основе радиационно легированных кристаллов CdS необходимо исследовать механизмы генерации в них и выявить оптимальные высокоэффективные переходы, ответственные за получение больших мощностей. Для оптимизации свойств и улучшения выходных параметров лазеров с электронной накачкой с помощью радиационных технологий производилась модификация свойств нелегированных образцов CdS с целью создания оптически однородных кристаллов, слабо поглощающих и рассеивающих собственное излучение.

Исходные образцы подвергались облучению быстрыми нейтронами с энергией 14,5 МэВ и дозой $6,3 \cdot 10^{18}$ нейтрон/см². В результате ядерных реакций, протекающих при взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами кристаллической решетки, происходит ядерное (трансмутационное) легирование кристалла стабильными изотопами палладия ($^{108}_{46}\text{Pd}$) и серебра ($^{109}_{47}\text{Ag}$), создающими в кристалле мелкие акцепторные уровни [1, 2]. Высокая проникающая способность быстрых нейтронов обеспечивает достаточно равномерное распределение легирующей примеси по объему кристалла, что способствует улучшению его оптической однородности. После проведения легирования кристаллы облучались ионами неона (ионная имплантация) с энергией 100 кэВ и дозой $6 \cdot 10^{14}$ ион/см², создающими мелкие донорные уровни, и подвергались термическому отжигу [2]. После отжига значительная часть ионов, захватив электроны, превращалась в нейтральные атомы, уменьшая тем самым равновесную концентрацию свободных электронов, что в свою очередь уменьшало потери лазерного излучения из-за поглощения на свободных носителях заряда. Кроме того, диффундируя по кристаллу, атомы неона создавали равномерное распределение примеси, что также способ-

ствовало улучшению оптической однородности исследуемых образцов. Отобранные по методике, описанной в [3, 4], кристаллы CdS обладали высокой оптической однородностью, флуктуации показателя преломления в них составляли $\Delta n = 10^{-4} - 10^{-2}$.

Для оценки качества материала методом оптического фазового сдвига измерялось время жизни излучательной рекомбинации, которое составило $(3,1 - 1,0) \cdot 10^{-9}$ с [3, 4]. Было установлено, что при 300 К минимальная пороговая плотность накачки ($2 - 3$ А/см²) и максимальные КПД (до 11 – 15%) достигаются в кристаллах с концентрацией акцепторной примеси изотопа серебра $N_a^{\text{Ag}} \approx 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Мощность излучения в них достигала 200 – 250 Вт (рис. 1). При 80 К

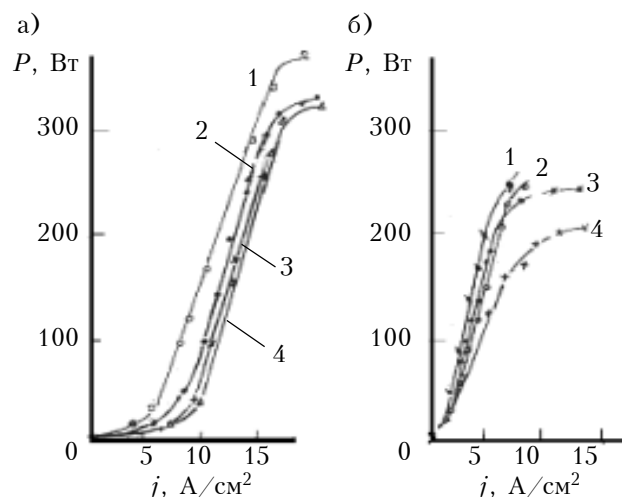


Рис. 1. Зависимость мощности P излучения лазеров на основе кристаллов CdS, радиационно легированных изотопами Ag (1, 2) и Pd (3, 4), от плотности накачки j при 80 К (а) и 300 К (б) для различной концентрации примеси (10^{17} см⁻³)
1 – $N_a^{\text{Ag}} = 2$; 2 – $N_a^{\text{Ag}} = 1,5$; 3 – $N_a^{\text{Pd}} = 1$; 4 – $N_a^{\text{Pd}} = 0,85$

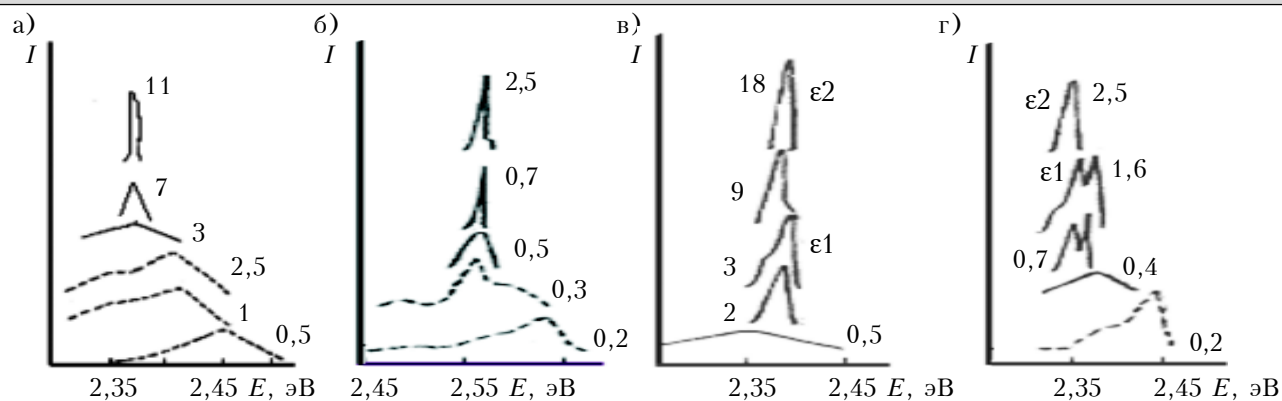


Рис. 2. Спектры катодолуминесценции (штриховые) и генерации (сплошные) кристаллов CdS, нелегированных (а, б) и радиационно легированных (в, г) изотопами Pd (ε1) и Ag (ε2), при 300 К (а, в) и 80 К (б, г) (Цифры возле кривых указывают плотность тока j в А/см²)

у таких кристаллов также были низкие пороговая плотность $j_{\text{пор}}$ (0,5–1,0 А/см²) и высокие КПД (вблизи предельных значений 25–30%), мощность достигала 300–400 Вт. В то же время, в нелегированных образцах с концентрацией носителей 10^{16} см⁻³ при 300 К и $j_{\text{пор}} = 25–30$ А/см² генерация практически не была достигнута, а наблюдалось только сужение линии суперлюминесценции. При 80 К параметры излучения в этих кристаллах также были существенно хуже, чем в легированных — $j_{\text{пор}} = 2,5–3,5$ А/см², КПД не выше 5%, а мощность излучения с ростом накачки быстро насыщалась. Было установлено, что такое отличие параметров излучения легированных и нелегированных оптически однородных кристаллов CdS обусловлено разными механизмами генерации в них.

Исследование зависимости спектров катодолуминесценции и генерации от уровня возбуждения при 80 и 300 К позволило выявить причины существенного отличия процесса генерации в чистых и легированных кристаллах CdS (рис. 2). Оказалось, что новые спектральные линии, обнаруженные в легированном CdS, возникают в результате излучательной рекомбинации свободных носителей через мелкие акцепторные уровни с глубиной залегания 81 мэВ (ε1) и 94 мэВ (ε2), создаваемые примесью изотопов, соответственно, палладия и серебра. Вероятность такой рекомбинации с ростом концентрации примесей растет. Измерения времени жизни носителей заряда в этих кристаллах подтвердили высокую вероятность W излучательной рекомбинации носителей в примесных образцах через ε-уровни: $W=1/\tau \approx (0,3–1,0) \cdot 10^9$ с⁻¹ [2–4].

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента усиления G в максимуме полосы из-

лучения от концентрации неравновесных носителей при 80 и 300 К для перехода «зона проводимости — мелкий акцепторный уровень изотопа серебра» при концентрации примесей $N_{\text{д}}^{\text{Ne}}=1 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $N_{\text{а}}^{\text{Ag}}=2 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и энергии акцепторного уровня изотопа серебра $E_{\text{а}}=94$ мэВ и для сравнения — для межзонных переходов. В таблице приведены расчетные значения коэффициентов межзонной (B_{33}) и «зона — акцептор» ($B_{3\text{а}}$) излучательной рекомбинации и расчетные значения пороговой плотности тока $j_{\text{пор}}$ [5]. Согласно расчету, величина пороговой плотности тока в случае примесных переходов значительно меньше, чем в случае межзонных переходов, и при 300 К составила 2,3 А/см², а при 80 К — 0,42 А/см², что хорошо согласуется с полученными экспериментальными значениями.

Более существенное снижение внешней дифференциальной квантовой эффективности η_d в

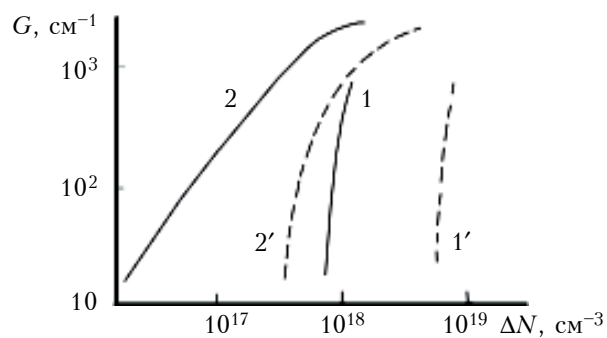


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления кристалла CdS от концентрации неравновесных носителей ΔN для межзонных переходов (1, 1') и для переходов «зона проводимости — мелкий акцепторный уровень изотопа серебра» (2, 2') при 80 К (1, 2) и 300 К (1', 2')

T, К	B_{33} , см ⁻³ ·с ⁻¹	$B_{3\text{а}}$, см ⁻³ ·с ⁻¹	Переход межзонный		Переход «зона — примесь» ($E_{\text{а}} = 94$ мэВ)	
			$\Delta N_{\text{пор}}$, см ⁻³	$j_{\text{пор}}$, А/см²	$\Delta N_{\text{пор}}$, см ⁻³	$j_{\text{пор}}$, А/см²
80	$9,2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$8,6 \cdot 10^{17}$	14	$9 \cdot 10^{16}$	0,42
300	$8,1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{18}$	46	$4,2 \cdot 10^{17}$	2,3

нелегированных кристаллах CdS обусловлено тем, что значения пороговых концентраций неравновесных носителей $\Delta N_{\text{пор}} (\Delta P_{\text{пор}})$, а соответственно и коэффициентов поглощения на свободных носителях $\alpha_{\text{сн}}^{e,h}$, в таком материале больше, а величина внутреннего квантового выхода излучения β — меньше [6, 7]. В легированных полупроводниках пороговая концентрация неравновесных носителей для излучательного перехода «зона проводимости — мелкий акцептор» существенно меньше, чем в нелегированных, с межзонным механизмом излучательных переходов. При этом потери на поглощение свободными носителями, принципиально ограничивающие КПД, на порядок меньше [8].

Спектральные и энергетические характеристики лазеров с электронным возбуждением на основе нелегированных оптически однородных полупроводников CdS показали, что излучение в них возникает в результате рекомбинации носителей, которые образуют электронно-дырочную плазму большой плотности. Мощность таких лазеров может достигать высоких значений, однако существенно меньших, чем у лазеров на основе оптически однородных, радиационно легированных кристаллов.

Выводы

Исследование механизмов генерации в чистых и радиационно легированных оптически однородных ($\Delta n = 10^{-4} - 10^{-3}$) кристаллах CdS показало, что в лазерах с электронным возбуждением на основе таких кристаллов оптимальными рабочими переходами, позволяющими достигать максимальной мощности излучения, являются переходы из вырожденной зоны проводимости на мелкие акцепторные уровни, обусловленные наличием примеси изотопов палладия и серебра. Оптимальные значения концентрации легирующих примесей определяются особенностями зонной структуры и физико-химическими свойствами исходного кристалла. Следует отметить, что в очень чистых, с концентрацией примеси $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, и оптически однородных ($\Delta n = 10^{-6} - 10^{-5}$) кристаллах CdS при температуре 80 К может возникать экситонный механизм генерации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мокрицкий В. А., Гаркавенко А. С., Зубарев В. В., Ленков С. В. Радиационное легирование сульфида кадмия и арсенида галлия // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 6. — С. 14–17. [Mokritskii V. A., Garkavenko A. S., Zubarev V. V., Lenkov S. V. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2003. N 6. P. 14]
2. Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Гаркавенко А. С. и др. Радиационное управление свойствами материалов и изделий опто- и микро-электроники. — Одесса: Друк, 2003. [Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Garkavenko A. S. i dr. Radiatsionnoye upravleniye svoystvami materialov i izdelii opto- i mikro-elektroniki. Odessa. Druk. 2003.]

3. Гаркавенко А. С., Зубарев В. В., Ленков С. В. и др. Новые лазерные методы, средства и технологии. — Одесса: Астропринт, 2002. [Garkavenko A. S., Zubarev V. V., Lenkov S. V. i dr. Novyye lazernyye metody, sredstva i tekhnologii. Odessa. Astroprint. 2002.]

4. Видолоб В. В., Гаркавенко А. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А. Лазеры в метрологии полупроводников. — Одесса: Атлант, 2006. [Vidolob V. V., Garkavenko A. S., Lenkov S. V., Mokritskii V. A. Lazery v metrologii poluprovodnikov. Odessa. Atlant. 2006.]

5. Гаркавенко А. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Видолоб В. В. Полупроводниковые лазеры с электронной накачкой. Том 1. Механизм генерации, свойства излучения. — Одесса: Полиграф, 2006. [Garkavenko A. S., Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Vidolob V. V. Poluprovodnikovyye lazery s elektronnoy nakachkoy. Tom 1. Mekhanizm generatsii, svoystva izlucheniya. Odessa. Poligraf. 2006.]

6. Гаркавенко А. С., Мокрицкий В. А. Расчет коэффициента поглощения ИК излучения свободными носителями заряда в полупроводниках // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1995. — № 1. — С. 36–37. [Garkavenko A. S., Mokritskii V. A. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 1995. N 1. P. 36]

7. Гаркавенко А. С., Гатало М. С., Кособуцкий П. С. Измерение квантового выхода фото- и электролюминесценции // Физическая электроника, 1992. — Вып. 42. — С. 116–118. [Garkavenko A. S., Gatalo M. S., Kosobutskii P. S. // Fizicheskaya elektronika, 1992. Iss. 42. P. 116]

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.04 2011 г.

Garkavenko A. S. **The nature of transitions and generation mechanisms in lasers based on radiation-doped CdS crystals.**

Keywords: laser, electron pumping, radiation-doping.

The research has shown that the optimum laser transitions in electronic excitation lasers based on radiation doped, optically homogeneous CdS crystals are the transitions from the degenerate conduction band to shallow acceptor levels of palladium and silver isotopes.

Germany, Stuttgart, International Energy-saving Technologies Research Center.

Гаркавенко А. С. **Природа переходів та механізмів генерації в лазерах на основі радіаційно легованих кристалів CdS.**

Ключові слова: лазер, електронна накачка, радіаційне легування.

Дослідження показало, що оптимальними робочими переходами в лазерах з електронним збудженням на основі радіаційно легованих, оптично однорідних кристалів CdS є переходи з виродженої зони провідності на дрібні акцепторні рівні ізотопів палладію та срібла.

Німеччина, Штутгарт, Міжнародний ННЦ енергозаощаджуючих ресурсів.

УДК 621.372.543

А. И. НАЗАРЬКО

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: nazarko@kivra.kpi.ua

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ С НИЗКОИМПЕДАНСНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Предложены микрополосковые электромагнитные кристаллы на основе низкоимпедансных неоднородностей. Показано, что низкоимпедансные неоднородности обеспечивают существенное улучшение развязки сигналов по сравнению с традиционными высокоимпедансными.

Ключевые слова: электромагнитный кристалл, запрещенная зона, низкоимпедансная неоднородность.

Искусственные кристаллоподобные структуры представляют значительный интерес как основа разнообразных устройств обработки сигналов. Одна из разновидностей таких структур — электромагнитные кристаллы (ЭК) — позволяет значительно улучшить характеристики устройств радиодиапазона [1]. Для моделирования ЭК необходимо использовать трехмерное электромагнитное моделирование. Теоретические характеристики ЭК, приведенные в статье, рассчитаны в одной из наиболее развитых систем такого моделирования — программном пакете CST Microwave Studio (MWS).

ЭК представляет собой несимметричную микрополосковую линию передачи с периодически расположенными неоднородностями. Для повышения эффективности устройств на основе ЭК первостепенное значение имеет повышение зонной избирательности таких структур.

Зонная избирательность ЭК определяется развязкой сигналов в разрешенных и запрещенных зонах. Волновые импедансы неоднородной (Z) и однородной (Z_0) области ЭК существенно различаются. Традиционная неоднородность ЭК — отверстие, расположенное под полосковым проводником и выполненное обычно лишь на металлизированной поверхности, — является высокоимпедансной. Будем обозначать высокоимпедансные неоднородности, индексы их параметров и ЭК на их основе буквой H , а низкоимпедансные — буквой L . Развязка сигналов возрастает с увеличением отношения $\rho_H = Z_H / Z_0$ для H -неоднородностей или с уменьшением отношения $\rho_L = Z_L / Z_0$ для L -неоднородностей.

Для увеличения ρ_H необходимо выполнить отверстие еще и в диэлектрическом основании. Значение ρ_H возрастает с увеличением глубины отверстия. Так, для неоднородности, рассмотренной в [2], с углублением отверстия значение ρ_H возрастает

приблизительно с 2 до 4 при $Z_0 = 50$ Ом. Однако, поскольку углубление отверстия ограничено толщиной основания, дальнейшее увеличение ρ_H можно обеспечить комбинированной неоднородностью, объединяющей неоднородности на металлизированной поверхности, в диэлектрическом основании и на сигнальной поверхности. Для комбинированных H -неоднородностей, которые используются в фильтре [3], $\rho_H = 7$ при $Z_0 = 50$ Ом.

Низкоимпедансные неоднородности

Рассмотрим конструктивные возможности реализации L -неоднородности. Характеристический импеданс микрополосковой линии уменьшается при расширении сигнального проводника, при уменьшении толщины диэлектрика и увеличении его диэлектрической проницаемости. Исходя из этого L -неоднородностью может являться несквозное металлизированное отверстие в основании, гальванически связанное с металлизированной поверхностью, или отверстие в основании, заполненное диэлектриком с более высокой диэлектрической проницаемостью, чем основание.

На рис. 1 показан ЭК с L -неоднородностями в виде металлизированных отверстий. На одной

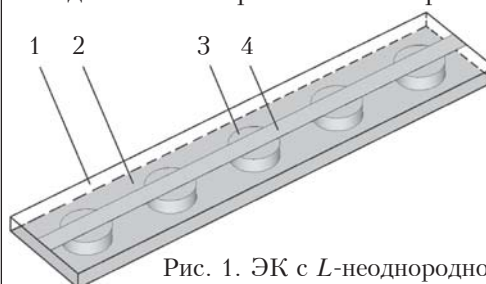


Рис. 1. ЭК с L -неоднородностями в виде металлизированных отверстий:
1 — диэлектрическое основание; 2 — слой металлизации; 3 — металлизированные отверстия; 4 — полосковый проводник

стороне диэлектрического основания 1 выполнена металлизация 2 и ряд периодически размещенных в слое металлизации и в основании металлизированных отверстий 3, гальванически связанных с металлизацией основания. На другой стороне основания размещен полосковой проводник 4. Глубина отверстий h' меньше толщины основания h . Величина h' рассчитывается из выражения для волнового импеданса Z несимметричной микрополосковой линии [4]

$$Z = \frac{120\pi / \sqrt{\epsilon_e}}{x + 1,393 + 0,667 \ln(x + 1,444)}, \quad (1)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon + 1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{2\sqrt{1 + 12/x}}, \quad (2)$$

где ϵ и ϵ_e — относительная и относительная эффективная диэлектрическая проницаемость;

$$x = w / \Delta h;$$

w — ширина сигнального проводника;

$\Delta h = h - h'$ — зазор между отверстием и сигнальным проводником.

Покажем, что низкоимпедансные неоднородности более эффективны по сравнению с традиционными высокоимпедансными. Воспользуемся формулами (1) и (2). Для узких зазоров, когда $x \gg 1$, выполняется условие $\epsilon_e \approx \epsilon$ и тогда $Z \approx 120\pi \Delta h / (w\sqrt{\epsilon})$. В этом случае величина импеданса прямо пропорциональна ширине зазора и обратно пропорциональна ширине проводника.

Рассчитаем возможное значение ρ_L для L -неоднородности с параметрами, соответствующими H -неоднородности из [3]: $\epsilon = 10,2$, $h = 1,28$ мм, $w = 8$ мм. При $h' = 1$ мм согласно (1) имеем $Z_L = 3,8$ Ом (по приближенной формуле для узких зазоров $Z_L = 4,1$ Ом), что соответствует $\rho_L = 0,08$. Поскольку $\rho_L^{-1} / \rho_H = 1,8$, ЭК- L заметно эффективнее ЭК- H .

Рассмотрим соотношение между ϵ_{eH} и ϵ_{eL} . Для H -неоднородности из [3] $\epsilon_{eH} = 1,5$. Согласно (2), $\epsilon_{eL} = 9,5$. Поскольку $\epsilon_{eL} \gg \epsilon_{eH}$, при заданной электрической длине размер L -неоднородности в направлении распространения волны должен быть существенно меньше, чем для H -неоднородности. При одинаковых габаритах диапазон рабочих частот ЭК- L ниже, чем ЭК- H , а для заданного диапазона частот габариты ЭК- L меньше по сравнению с ЭК- H .

Представленные на **рис. 2** частотные зависимости коэффициентов прохождения T и отражения R сигнала в первой полосе подавления соответствуют предложенному ЭК- L с металлизированными отверстиями (см. рис. 1) и традиционному ЭК с отверстиями без металлизации [5] (f_0 — средняя частота первой запрещенной зоны). Параметры устройств следующие: длина $a = 60$ мм, ширина $b = 13$ мм, $h = 2,1$ мм, $w = 2,5$ мм, толщина медной фольги $t = 0,05$ мм,

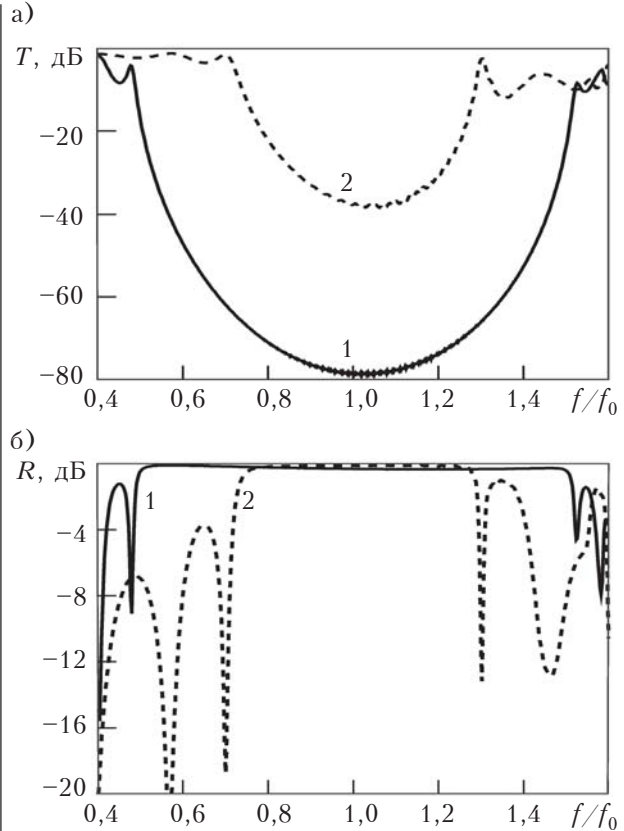


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов прохождения (а) и отражения (б) сигнала для ЭК- L с металлизированными отверстиями (1) и традиционного ЭК с отверстиями без металлизации (2)

период структуры $p = 12$ мм, диаметр отверстий $d = 6$ мм, $h' = 1,9$ мм, количество отверстий $n = 5$. Материал подложки — Флан-7,2 с параметрами: $\epsilon = 7$, тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ГГц $\text{tg} \delta = 0,0025$.

Волновой импеданс однородных областей равен 50 Ом, а неоднородных областей — 9,3 Ом в ЭК- L и 152,2 Ом в ЭК без металлизации отверстий [5], что отвечает значениям $\rho_H = 3,0$, $\rho_L^{-1} = 5,4$, $\rho_L^{-1} / \rho_H = 1,8$. При использовании L -неоднородностей отношение импедансов разнородных областей ЭК увеличивается почти в два раза, что обеспечивает существенное расширение полос подавления и уменьшение уровня сигнала в этих полосах. Абсолютная и относительная ширина полосы подавления (по первым нулям характеристики), минимальный уровень сигнала в этой полосе и частота f_0 для устройств 1 и 2 равны, соответственно, 5,14 и 4,18 ГГц; 104 и 60%; -79 и -38 дБ; 4,93 и 6,94 ГГц.

L -неоднородности со стороны сигнального проводника

Волновой импеданс неоднородности в виде металлизированного отверстия определяется диэлектрической проницаемостью основания, зазором между сигнальным проводником и отверстием и площадью перекрытия сигнального про-

водника «дном» отверстия. При заданных материале основания и ширине зазора значение Z_L уменьшается с увеличением площади перекрытия. Наибольшую площадь перекрытия, равную площади дна отверстия, имеет сигнальный проводник, форма и размеры которого над отверстием такие же, как и форма и размеры дна. Таким образом, минимальное значение Z_L ограничено площадью дна отверстия. Дальнейшее повышение эффективности L -неоднородностей обеспечивается выполнением отверстий со стороны сигнального проводника.

В случае, показанном на рис. 3, волновой импеданс определяется площадью всей поверхности отверстия, а не только площадью его дна. При одинаковых диаметрах неоднородность со стороны сигнального проводника эффективнее

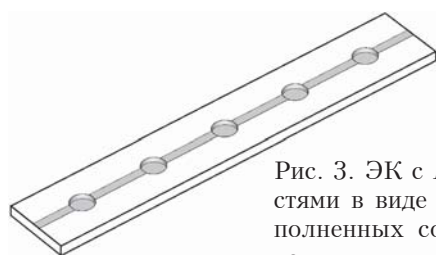


Рис. 3. ЭК с L -неоднородностями в виде отверстий, выполненных со стороны сигнального проводника и гальванически связанных с ним

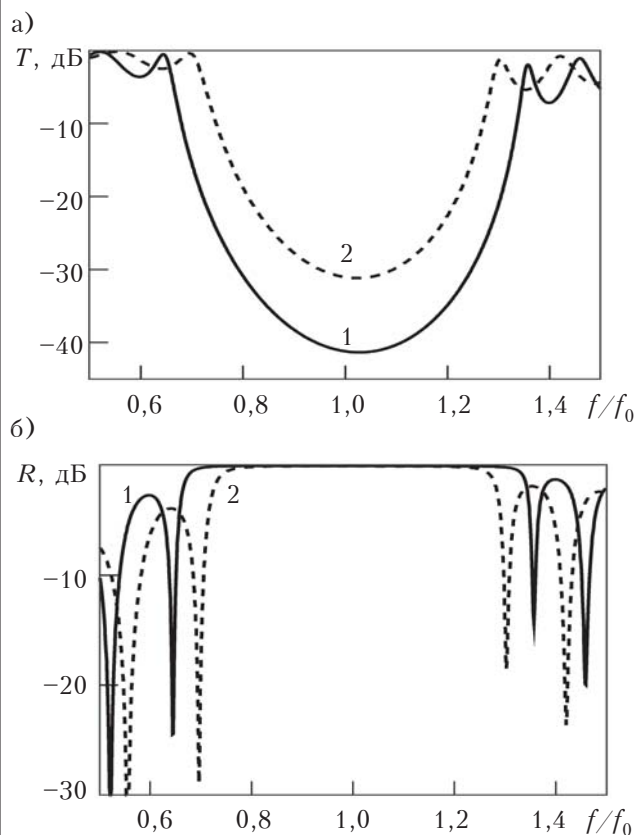


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов прохождения (а) и отражения (б) для ЭК- L с неоднородностями, выполненными на сигнальной (1) и на заземленной (2) поверхностях

неоднородности со стороны металлизированной поверхности. Это обеспечивает уменьшение волнового импеданса и, значит, улучшение развязки сигналов.

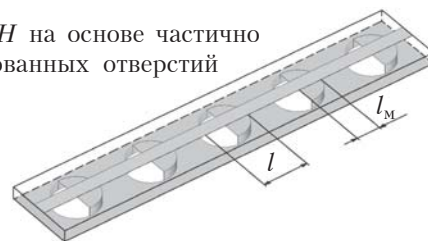
Зависимости на рис. 4 иллюстрируют повышение эффективности ЭК- L при выполнении неоднородностей на сигнальной поверхности (1) в сравнении с неоднородностями на заземленной поверхности (2). Параметры ЭК следующие: $a=53$ мм, $b=9$ мм, $t=0,035$ мм, $h=1,28$ мм, $w=1,1$ мм, $p=10$ мм, $d=3$ мм, $h'=0,7$ мм, $n=5$. Материал подложки — Rogers RO3010 с параметрами: $\epsilon=10,2$, $\text{tg}\delta=0,0023$. В ЭК- L 2 полосковый проводник над отверстиями имеет форму и размеры дна отверстия.

Абсолютная и относительная ширина полосы подавления, минимальный уровень сигнала в этой полосе и частота f_0 для ЭК- L 1 и 2, соответственно, равны 3,64 и 3,21 ГГц; 71 и 61%; -41 и -31 дБ; 5,10 и 5,29 ГГц. ЭК- L 1 улучшает развязку сигналов на 10 дБ.

ЭК на основе L/H -неоднородностей

Введение в неоднородность дополнительной внутренней границы между разнородными областями позволит сформировать дополнительный (внутренний) отражатель, что повысит эффективность L -неоднородности. Поскольку в такой неоднородности сочетаются металлизированная и неметаллизированная области, обозначим ее как L/H -неоднородность.

Рис. 5. ЭК- L/H на основе частично металлизированных отверстий



На рис. 5 показан ЭК с L/H -неоднородностями. В направлении распространения волны размер l_m области металлизации каждого из отверстий меньше размера l отверстия. Наиболее технологичное решение определяется условием $l_m=l/2$. При оптимальных значениях l_m , которые рассчитываются моделированием, достигается минимум T_1 или максимум T_2 . Индекс при T соответствует номеру запрещенной зоны, т. е. обеспечивается максимальная эффективность ЭК в первой запрещенной зоне и максимальное подавление второй запрещенной зоны, что дает дополнительные возможности в формировании частотных характеристик устройства на основе ЭК.

Рис. 6 иллюстрирует улучшение развязки сигналов ЭК- L/H (1) в сравнении с ЭК- L с полностью металлизированными отверстиями (2). Параметры ЭК следующие: $a=74$ мм, $b=13$ мм, $t=0,035$ мм, $h=2,1$ мм, $w=2,5$ мм, $p=14$ мм, $d=8$ мм, $h'=1,7$ мм, $n=5$, материал подложки — Флан-7,2. Значение T_1 и средней

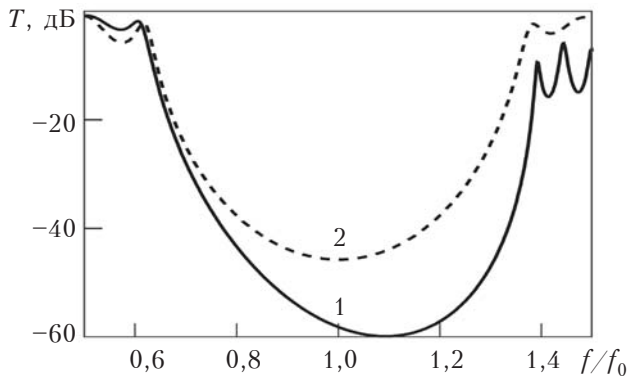


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициентов прохождения ЭК-L/H при $l_m = l/2 = 4$ мм (1) и ЭК-L с полностью металлизированными отверстиями (2)

частоты f_0 устройств 1 и 2 равны, соответственно, $-59,9$ и $-45,8$ дБ; $4,56$ и $4,33$ ГГц.

Для ЭК-L/H из условия минимума T_1 получим $l_m = 4,5$ мм. При этом $T_1 = -60,3$ дБ, что лишь на $0,4$ дБ меньше, чем в случае $l_m = 4$ мм. Таким образом, значение $l_m = 4$ мм близко к оптимальному.

Из условия максимума T_2 имеем $l_m = 7,4$ мм. В этом случае $T_1 = -48,3$ дБ, а $T_2 = -3,8$ дБ.

Для ЭК-L $T_2 = -13,9$ дБ. По сравнению с ЭК-L, ЭК-L/H обеспечивает уменьшение значения T_1 на $2,5$ дБ и повышение значения T_2 на $10,1$ дБ. В характеристике ЭК-L/H вторая запрещенная зона отсутствует.

По сравнению с ЭК-L, при $l_m = 4$ мм ЭК-L/H улучшает развязку сигналов на $14,1$ дБ, а при $l_m = 4,5$ мм — на $14,5$ дБ.

Устройства на основе L-неоднородностей

На рис. 7 приведены частотные зависимости коэффициента прохождения сигнала для ЭК-L на основе неоднородностей на заземленной поверхности с такими параметрами: $w = 2,5$ мм, $d = 8,6$ мм, $p = 20$ мм, $n = 5$, $h = 2,1$ мм, $h' = 1,7$ мм, материал подложки — Флан-7,2, $Z_0 = 50$ Ом.

Согласно выражениям (1) и (2), $Z_L = 17,5$ Ом, $\epsilon_{eL} = 5,8$. Исходя из одномерной модели ЭК-L в виде линии передачи, образованной чередующимися отрезками с импедансами Z_L и Z_0 , характеристике 2 соответствуют значения $Z_L = 15,5$ Ом и $\epsilon_{eL} = 5,6$, что хорошо согласуется с полученными из (1) и (2). Экспериментальные и расчетные значения средней частоты запрещенной зоны, определяемой минимумом коэффициента прохождения $T_{\min}$, и значение $T_{\min}$ равны, соответственно, $3,33$ и $3,27$ ГГц, -43 и -44 дБ. Экспериментальные и расчетные параметры для ЭК-H, который отличается от рассмотренного ЭК-L тем, что отверстия нематаллизированные, такие: $4,19$ и $4,04$ ГГц, -22 и -30 дБ. При этом $\epsilon_{eH} = 1,7$, $Z_H = 130$ Ом. Меньшее значение $T_{\min}$ для ЭК-L объясняется тем, что $\rho_L^{-1} = 3,2 > \rho_H^{-1} = 2,6$ и длина L-неоднородности намного ближе к четвертьвол-

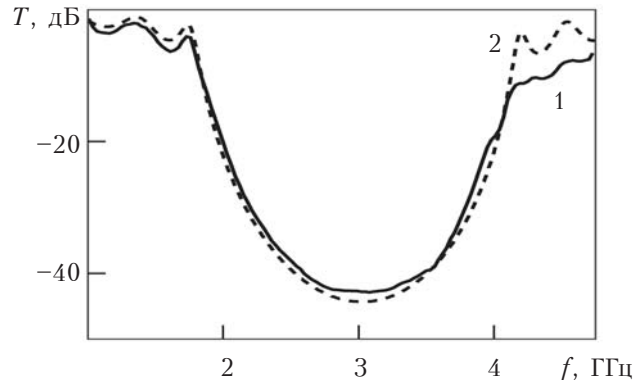


Рис. 7. Экспериментальная (1) и расчетная (2) частотные зависимости коэффициента прохождения для ЭК-L на основе неоднородностей на заземленной поверхности

новой в сравнении с H-неоднородностью (соответственно, $0,9$ и $0,6$ от четверти длины волны). Уменьшение средней частоты ЭК-L обусловлено меньшей скоростью волны, поскольку $\epsilon_{eL} > \epsilon_{eH}$.

Предложенные L-неоднородности позволяют не только формировать высокоэффективные ЭК, но и могут быть использованы как отдельные эффективные отражатели или резонаторы в структурах фильтров. На рис. 8 показана структура узкополосного фильтра, соответствующая

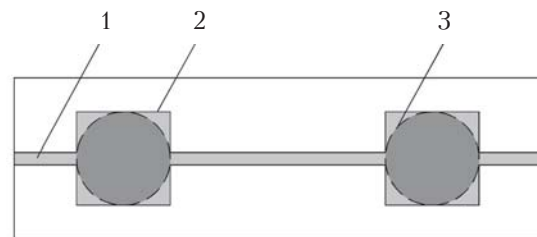


Рис. 8. Фильтр на основе L-неоднородностей: 1 — полосковый проводник, 2 — широкий полосковый отрезок, 3 — L-неоднородность

резонатору Фабри — Перо. Отражатели резонатора формируются отдельными L-неоднородностями, а резонаторная полость — отрезком полоскового проводника. Для снижения Z_L сигнальный проводник над неоднородностями имеет ширину, равную диаметру отверстий. Резонансный отклик фильтра обусловлен резонансным прохождением волны. Для повышения коэффициента отражения отражателя необходимо использовать несколько периодически расположенных неоднородностей в виде кристаллоподобной структуры (КС). Резонансный отклик такого фильтра соответствует уровню дефекта суммарной КС, образованной КС-отражателями, в ее запрещенной зоне.

На рис. 9 приведены характеристики фильтра со структурой, соответствующей рис. 8, имеющей следующие параметры: $a = 42,2$ мм, $b = 13$ мм, $t = 0,035$ мм, $h = 1,28$ мм, $w = 1$ мм, $d = 7,5$ мм, $h' = 0,65$ мм, расстояние между неоднородностями

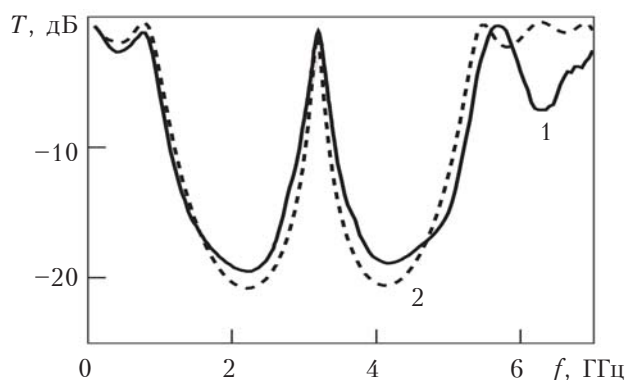


Рис. 9. Экспериментальная (1) и расчетная (2) амплитудно-частотные характеристики фильтра на основе L -неоднородностей

ми 17,2 мм. Материал подложки — Rogers RO3010, $h=1,28$ мм, $h'=0,65$ мм, толщина металлизации 0,035 мм, $Z_0=50$ Ом. Согласно выражениям (1) и (2), $Z_L=8,4$ Ом, $\epsilon_{eL}=8,8$. Экспериментальные и расчетные значения средней частоты и вносимых потерь совпадают и равны, соответственно, 3,2 ГГц и 1,5 дБ; экспериментальные и расчетные значения ширины полосы пропускания по уровню -3 дБ равны, соответственно, 0,18 и 0,15 ГГц.

Выводы

Проведенные исследования показали, что ЭК с низкоимпедансными неоднородностями более эффективны, чем с высокоимпедансными. ЭК- L обеспечивают существенное улучшение развязки сигналов по сравнению с ЭК- H (например, в одном из рассмотренных вариантов с -38 до -79 дБ). Предложенные варианты L -неоднородностей позволяют реализовать ЭК в различных конструктивных решениях микрополосковых устройств. L -неоднородности могут быть использованы как отдельные эффективные отражатели или резонаторы в структурах фильтров. Структура на основе двух L -неоднородностей как отражателей резонатора Фабри—Перо позволяет реализовать узкополосный фильтр.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Weng L. H., Guo Y. C., Shi X. W., Chen X. Q. An overview on defected ground structure // Progress In Electromagnetics Research. — 2008. — Vol. 7, B. — P. 173—189.

2. Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф., Нелин Е. А., Попсуй В. И. Повышение зонной избирательности микроволновых кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 6. — С. 38—41. [Nazarko A. I., Timofeeva Yu. F., Nelin E. A., Popsui V. I. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2009. N 6. P. 38]

3. Назарько А. И., Нелин Е. А., Попсуй В. И., Тимофеева Ю. Ф. Узкополосный частотный фильтр на основе кристаллоподобных неоднородностей // ЖТФ. — 2010. — Т. 80, Вып. 10 — С. 148—149. [Nazarko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I., Timofeeva Yu. F. // Technical Physics. — 2010. — Vol. 55, N. 10 — P. 1536—1537]

4. Hong J. S., Lancaster J. Microstrip filters for RF/microwave applications. — New York: Wiley, 2001.

5. Radisic V., Qian Y., Itoh T. Broad-band amplifier using dielectric photonic bandgap structure // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. — 1998. — Vol. 8, N 1. — P. 13—14.

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.07 2011 г.

Nazarko A. I. **Microstrip electromagnetic crystals with low-impedance inhomogeneities.**

Keywords: electromagnetic crystal, forbidden gap, low-impedance inhomogeneity.

It is shown, that the low-impedance inhomogeneities provide a significant improvement in signals decoupling compared to conventional high-impedance inhomogeneities. Proposed low-impedance inhomogeneities allow to create high-effective electromagnetic crystals, and also can be used as separate effective reflectors or resonators in filter structures.

Ukraine, NTUU «Kyiv Polytechnic Institute».

Назарько А. І. **Мікросмужкові електромагнітні кристали з низькоімпедансними неоднорідностями.**

Ключові слова: електромагнітний кристал, заборонена зона, низькоімпедансна неоднорідність.

Показано, що низькоімпедансні неоднорідності забезпечують істотне поліпшення розв'язки сигналів в порівнянні з традиційними високоімпедансними. Запропоновано мікросмужкові електромагнітні кристали на основі низькоімпедансних неоднорідностей.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».

УДК 536.24

О. С. АЛЕКСЕИК, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ, И. А. КОПЧЕВСКАЯ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: helga-gor@mail.ru, kravetz_kpi@ukr.net

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ МАЛОГО РАЗМЕРА

Исследовано влияние характерных размеров, граничных условий, а также теплофизических свойств теплоносителя (воды и этанола) на интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера. Получена критериальная зависимость для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении в указанных условиях.

Ключевые слова: кипение, поверхность малого размера, интенсивность теплоотдачи, критериальная зависимость.

Среди используемых в настоящее время способов охлаждения электронной аппаратуры отвод теплоты за счет изменения фазового состояния теплоносителя был и остается одним из наиболее эффективных. Однако при значительных плотностях теплового потока на охлаждаемой поверхности может образоваться паровая пленка, что приведет к ухудшению условий теплоотвода и, как следствие, к резкому возрастанию температуры поверхности. Увеличить отводимую мощность позволяет применение точечных теплоотводов. Вследствие более свободного, чем на поверхности большого размера, доступа теплоносителя к центру парообразования происходит увеличение не только критической плотности теплового потока $q_{кр}$, но и эффективности передачи теплоты в целом. Некоторые авторы отмечают, что уменьшение размеров теплоотдающей поверхности приводит к увеличению $q_{кр}$ до 10 раз по сравнению с гладкими поверхностями большого размера [1, 2].

В последнее время значительная часть исследований процесса кипения на гладких поверхностях посвящена изучению таких характеристик, как скорость роста, характер изменения формы и размеров паровых пузырей и частота их отрыва [3–6], а также моделированию процесса испарения в полость парового пузыря [7–9].

В то же время, для решения практических задач более актуальным является определение кривых кипения или же зависимости коэффициента теплоотдачи на теплоотдающей поверхности от отводимой мощности и ряда других параметров. Подобного рода исследования представлены в [10–15]. В большей части этих работ в качестве теплоносителя использовалась вода, давление — атмосферное, а непосредственно процесс кипения исследовался на поверхности большого размера [10–14]. Исключение составляет [11], где были исследованы характеристики кипения жидкостей FC-72 и изопропано-

ла, и [12], где были определены кривые кипения воды при давлении от 0,1 до 7,0 МПа. Отдельно следует отметить работу L. Cheng и J. R. Thome [15], в которой проводились предварительные исследования системы охлаждения микропроцессора на жидком CO₂ при помощи компьютерного моделирования.

Среди рассмотренных работ только в одной можно выделить исследования интегральных характеристик теплообмена, близких к характеристикам на поверхностях малых размеров. Исследованную в [10] поверхность со структурированными центрами парообразования можно рассматривать как совокупность поверхностей малого размера на теплопроводящей подложке. Однако, поскольку геометрия поверхности оказывает значительное влияние на интенсивность теплообмена при кипении, распространение результатов, полученных в [10], на массивы поверхностей малого размера может привести к значительным погрешностям в расчетах.

Таким образом, анализ литературных источников показал, что в настоящее время нет достаточного количества данных для получения обобщающих зависимостей для определения основных характеристик процесса кипения на поверхности малого размера. В данной работе сделана попытка получения эмпирических зависимостей, позволяющих определить коэффициент теплоотдачи для такого процесса в зависимости от характерных размеров поверхности, граничных условий, а также теплофизических свойств различных теплоносителей.

Описание экспериментальной установки и проведения экспериментов

Конструкция рабочего участка установки представлена на **рис. 1**. В качестве тепловыделяющего элемента был использован медный стержень 1 круглого сечения диаметром $d=1,73$ мм. В тепловыделяющую поверхность на торце стерж-

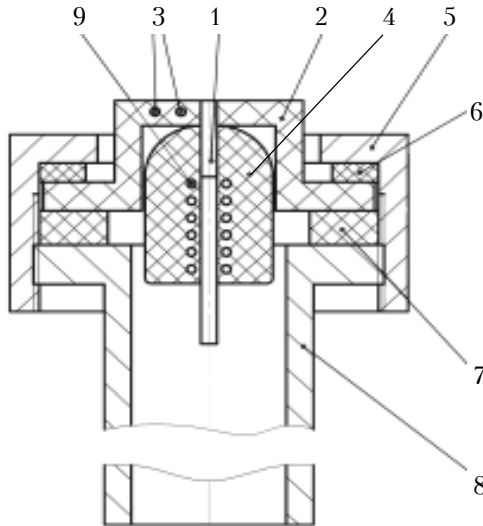


Рис. 1. Конструкция рабочего участка экспериментальной установки:

1 — медный стержень; 2 — стекловолокнистая несущая стенка; 3 — медь-константановые термопары; 4 — теплоизоляция; 5 — корпус; 6, 7 — уплотняющие шайбы; 8 — прижимная гайка; 9 — электронагреватель

ня (далее — микроповерхность) и на расстоянии $\delta = 7,5$ мм от нее в стержень были зачеканены две константановые проволоки. С помощью образованных таким образом термопар определялся как передаваемый тепловой поток, так и температура поверхности. Стержень 1 с помощью эпоксидной смолы был вклеен заподлицо в стекловолокнистую шайбу 2. С целью определения утечек теплоты через шайбу в нее на различных диаметрах были вмонтированы четыре медь-константановые термопары 3 (рис. 2). Также к стекловолокнистой шайбе была присоединена гильза с термопарой (на рис. 1 не показана), по показаниям которой определялась температура жидкости T_5 . К гильзе была припаяна калибровочная проволока диаметром 0,85 мм, ко-

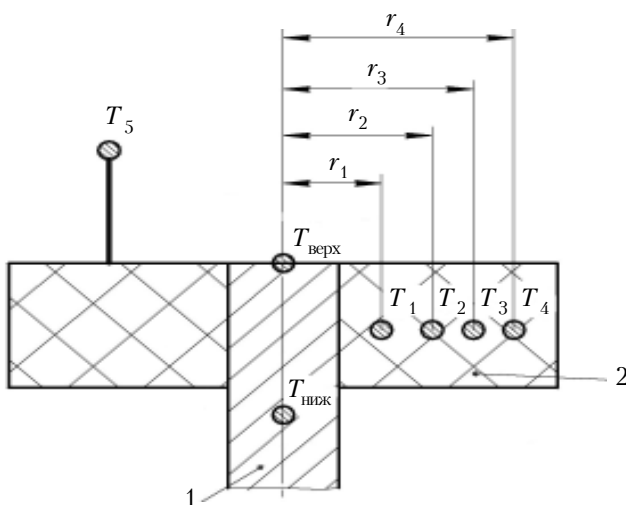


Рис. 2. Схема расположения термопар на рабочем элементе:

1 — тепловыделяющий стержень; 2 — стекловолокнистая шайба

торая служила мерилем масштаба при определении размеров паровых пузырьков. Теплоподвод к элементу осуществлялся с помощью нихромового нагревателя 9, намотанного на стержень 1, который для уменьшения теплопотерь в окружающее пространство был покрыт слоем теплоизоляции 4.

Шайба 2 с тепловыделяющим элементом 1 располагалась в корпусе 5 и фиксировалась с помощью двух уплотняющих колец 6 и 7 и прижимной гайки 8. Уплотняющие кольца выполнены из вакуумной резины, что позволяет проводить испытания при пониженном давлении.

Схема установки, на которой проводились исследования, приведена на рис. 3.

Рабочий участок РУ вставляли в специальный стакан С, вваренный в нижнюю часть экспериментальной камеры РК, и фиксировали с помощью прижимной гайки ГП. Экспериментальная камера представляла собой стальной цилиндр диаметром 0,1 м и длиной 0,1 м. При проведении эксперимента она располагалась таким образом, чтобы тепловыделяющая поверхность находилась в горизонтальной плоскости. В торцевых стенках камеры выполнены смотровые окна, что позволяло вести визуальное наблюдение за процессом кипения.

Заполнение камеры рабочей жидкостью осуществляли через штуцер ШЗ, расположенный в верхней части камеры. Уровень жидкости был на 10–20 мм выше термопары, посредством которой определяли температуру рабочей среды. Во время проведения опытов к штуцеру ШЗ присоединяли конденсатор-холодильник для поддержания постоянного давления и уровня жидкости в камере.

Экспериментальную камеру нагревали с помощью нихромового электронагревателя НЭ1. С целью уменьшения потерь теплоты в окружающее пространство рабочая камера и электронагреватель были теплоизолированы.

Показания термопар через аналого-цифровой преобразователь АЦП ICP CON I-7018Z передавались на компьютер. Установленное на нем программное обеспечение позволяло наблюдать показания термопар в реальном времени, а также вести их запись.

Перед проведением основной серии опытов проводили дегазацию камеры и рабочей жидкости, после чего их нагревали до температуры насыщения с помощью внешнего нагревателя НЭ1. После того как на внутренних стенках камеры появлялись одиночные центры парообразования, мощность на электронагревателе НЭ1 уменьшали до величины, достаточной для компенсации тепловых потерь в окружающее пространство, когда температура рабочей жидкости поддерживалась равной температуре насыщения.

Вслед за этим подавали нагрузку на электронагреватель рабочего элемента НЭ2, и мощность увеличивали до тех пор, пока на микроповерхности не начинался процесс кипения. На-

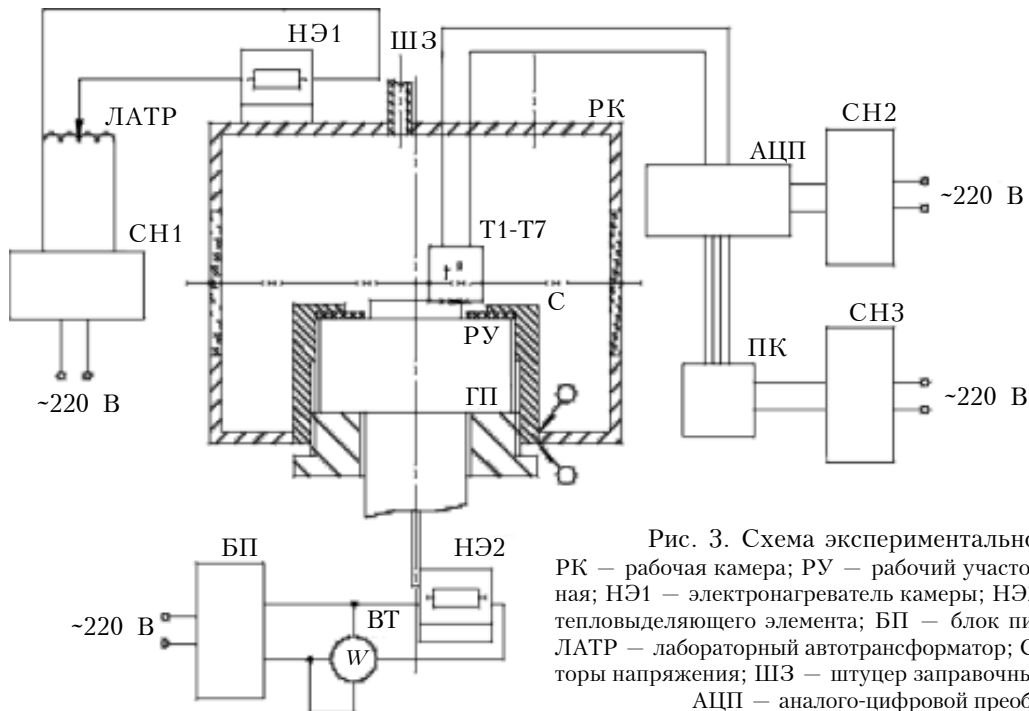


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:
РК — рабочая камера; РУ — рабочий участок; ГП — гайка прижимная; НЭ1 — электронагреватель камеры; НЭ2 — электронагреватель тепловыделяющего элемента; БП — блок питания; ВТ — ваттметр; ЛАТР — лабораторный автотрансформатор; СН1...СН3 — стабилизаторы напряжения; ШЗ — штуцер заправочный; БП — блок питания; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

чало кипения фиксировали визуально. Значение мощности, подводимой к тепловыделяющему стержню, контролировали по показаниям ваттметра. После выхода на стационарный режим запись показаний термодатчиков проводили на протяжении еще некоторого времени. Далее мощность на рабочем элементе увеличивали на некоторую фиксированную величину и описанные действия повторяли. Опыт проводился до тех пор, пока температура поверхности элемента не достигала предельно допустимого для данной конструкции значения (в нашем случае это была температура плавления клея, которым стержень клеивался в шайбу).

Методика обработки экспериментальных данных

После анализа первичных экспериментальных данных определяли границы стационарных режимов. Для каждого режима рассчитывали значения температуры в точках расположения термодатчиков (см. рис. 2).

Количество теплоты, подводимое к тепловыделяющей поверхности, определяли согласно закону Био — Фурье

$$Q_{\text{подв}} = \lambda_{\text{ст}} F_{\text{мк}} (T_{\text{ниж}} - T_{\text{верх}}) / \delta,$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности тепловыделяющего стержня;

$F_{\text{мк}}$ — площадь микроповерхности.

Для определения утечек теплоты $Q_{\text{пот}}$ через стекловолнистую шайбу допускалось, что ее можно рассматривать как кольцевое ребро с односторонним отводом теплоты, и расчет проводили согласно методике, представленной в [16, с. 55—57].

После определения количества теплоты $Q_{\text{пот}}$, отведенного шайбой, рассчитывали передаваемый тепловой поток $Q_{\text{отв}}$ и коэффициент теплоотдачи α от микроповерхности:

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{подв}} - Q_{\text{пот}};$$

$$\alpha = Q_{\text{отв}} / [F_{\text{мк}} (T_{\text{верх}} - T_5)].$$

При расчете безразмерных комплексов Рейнольдса Re и Нуссельта Nu в качестве определяющего размера принималась капиллярная постоянная Лапласа l_c [16, с. 282], а в качестве скорости — приведенная скорость парообразования w [16, с. 298]:

$$Nu = \alpha l_c / \lambda; Re = w l_c / \nu;$$

где λ — коэффициент теплопроводности жидкости;

$$w = q / (r \rho'');$$

q — плотность подводимого теплового потока;

r — теплота парообразования;

ρ'' — плотность пара на линии насыщения;

ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Результаты исследований

В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности отводимого теплового потока при кипении на технически гладкой поверхности малого размера при атмосферном давлении.

Как видно из рис. 4, в случае использования поверхности малого размера достигается большая плотность теплового потока q , чем при кипении на большой поверхности. Это объясняется тем, что к поверхности малого размера жидкость

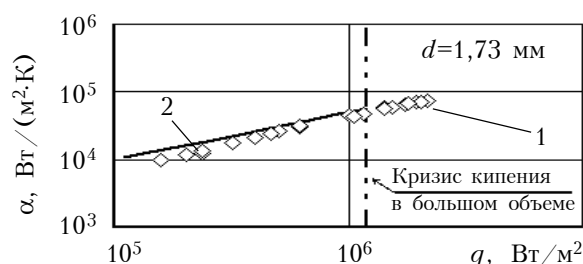


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от отводимой мощности для воды, полученная экспериментально для микроповерхности (1) и расчетным путем в [16, с. 308] для кипения на бесконечной пластине в большом объеме (2)

имеет лучший доступ, вследствие чего образование сухого пятна происходит при больших плотностях теплового потока.

Сопоставление полученных опытных данных с расчетной зависимостью, приведенной в [16], показало некоторое (до 30%) расхождение между ними. К тому же, значительная часть опытных данных была получена для плотностей теплового потока, которые превышают критические значения при кипении на бесконечной пластине, а формула в [16] применима только в докритической области. Все это говорит о том, что ее использование при расчете интенсивности теплоотдачи при кипении на поверхностях малого размера может привести к существенным погрешностям.

При исследованиях было отмечено существенное влияние диаметра микроповерхности на интенсивность теплоотдачи при кипении (рис. 5): при увеличении диаметра происходило ухудшение теплоотдачи, что, вероятно, можно объяснить увеличением толщины теплового пограничного слоя.

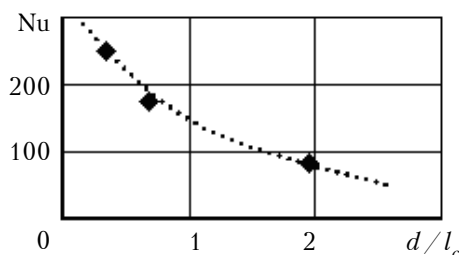


Рис. 5. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от безразмерного диаметра теплоотдающей поверхности для воды при $Re \approx 8,3 \cdot 10^3$

Кроме этого, экспериментально было установлено, что степень влияния плотности теплового потока на интенсивность теплоотдачи (т. е. прирост Nu с ростом Re) при кипении практически не зависит от теплофизических свойств теплоносителя (рис. 6).

В результате обобщения экспериментальных данных по кипению воды и этанола на поверх-

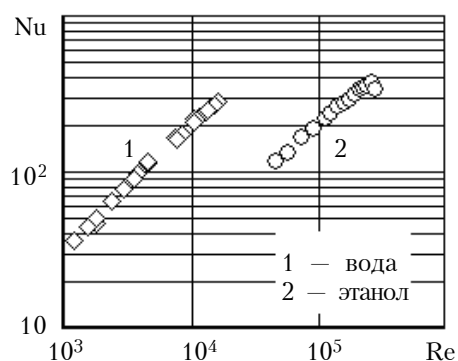


Рис. 6. Влияние теплофизических свойств теплоносителя на интенсивность теплообмена при кипении

ностях диаметрами 0,88, 1,73 и 4,94 мм была получена критериальная зависимость

$$Nu = 0,184 Re^{0,718} (d/l_c)^{-0,314} \cdot Pr^{0,45},$$

которая применима при значениях отводимой мощности от $3,1 \cdot 10^4$ до $7,4 \cdot 10^6$ Вт/м² для воды и от $2,7 \cdot 10^5$ до $1,4 \cdot 10^6$ Вт/м² для этанола (здесь Pr — число Прандтля).

Данная зависимость аппроксимирует имеющиеся экспериментальные данные (рис. 7) со средней точностью $\pm 12\%$, при этом максимальное отклонение не превышает 23%.

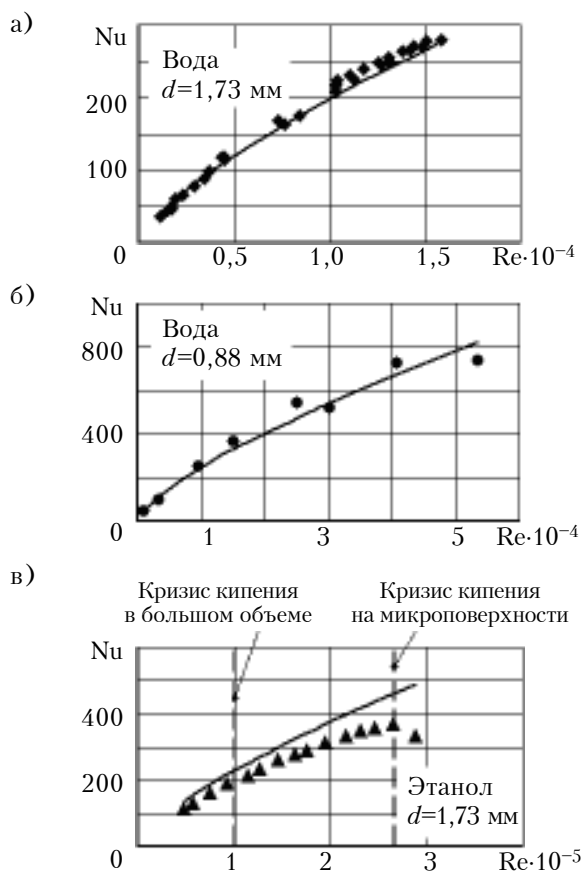


Рис. 7. Сопоставление расчетных и опытных данных для воды (а, б) и для этанола (в)

Отметим, что для плотностей теплового потока q выше $1,4 \cdot 10^6$ Вт/м² при кипении этанола наблюдались предкризисные и кризисные явления. Полученная же обобщающая зависимость не может применяться в предкризисной области вследствие изменения механизма кипения, поскольку в таком случае расчетные значения интенсивности теплоотдачи могут значительно превышать реальные (см. на рис. 7, в область, где $Re > 2,5 \cdot 10^5$).

Таким образом, получена эмпирическая зависимость для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера, которая учитывает влияние не только плотности отводимого теплового потока, но и физических свойств теплоносителя и диаметра теплоотдающей поверхности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кравец В. Ю., Фридрихсон Ю. В., Босая О. В. Кризис теплоотдачи при кипении жидкостей на микроповерхностях // Инженерно-физический журнал. — 1991. — Т. 60 — № 2. — С. 266–270. [Kravets V. Yu., Fridrikhson Yu. V., Bosaya O. V. // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 1991. Vol. 60. N 2. P. 266]
2. Кудрицкий Г. Р. Теплообмен при кипении в условиях определяющего влияния геометрических характеристик поверхности нагрева / Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. — Киев: ИТТФ НАНУ, 1995. [Kudritskii G. R. / Avtoref. ... dis. d-ra tekhn. nauk. Kiev: ITTF NANU. 1995]
3. Siedel S., Cioulachtjian S., Bonjour J. Experimental analysis of bubble growth, departure and interactions during pool boiling on artificial nucleation sites // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2008. — Vol. 38. — P. 1504–1511.
4. Щербakov В. К., Кравец В. Ю. Температурный режим и теплоотдача при кипении на микроповерхностях воды в большом объеме // В сб. статей “Тепломассообмен-VI”. — Т. 4, ч. 1. — Минск, 1980. — С. 90–95. [Shcherbakov V. K., Kravets V. Yu. // V sb. statei Teplomassobmen-VI. Vol. 4, p. 1. Minsk, 1980. P. 90]
5. Kim J., Oh B. D., Kim M. H. Experimental study of pool temperature effects on nucleate pool boiling // International Journal of Multiphase Flow. — 2006. — Vol. 32. — P. 208–231.
6. Gerardi C., Buongiorno J., Hu L., McKrell T. Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2010. — Vol. 53. — P. 4185–4192.
7. Kim J., Kim M. H. On the departure behaviours of bubble at nucleate pool boiling // International Journal of Multiphase Flow. — 2006. — Vol. 32. — P. 1269–1286.
8. Genske P., Stephan K. Numerical simulation of heat transfer during growth of single vapour bubbles in nucleate boiling // International Journal of Thermal Sciences. — 2006. — Vol. 45. — P. 299–309.
9. Stephan P., Kern J. Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2004. — V. 25. — P. 140–148.
10. Das A. K., Das P. K., Saha P. Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2007. — V. 31. — P. 967–977
11. Sakashita H., Ono A. Boiling behaviors and critical heat flux on a horizontal plate in saturated pool boiling of water at high pressures // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2009. — Vol. 52. — P. 744–750
12. Auracher H., Marquardt W. Heat transfer characteristics and mechanisms along entire boiling curves under steady-state and transient conditions // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2004. — V. 25. — P. 223–242.
13. Coursey J. S., Kim J. Nanofluid boiling: The effect of surface wettability // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2008. — Vol. 29. — P. 1577–1585.
14. Myers J. G., Yerramilli V. K. et al. Time and space resolved wall temperature and heat flux measurements during nucleate boiling with constant heat flux boundary conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2005. — Vol. 48. — P. 2429–2442
15. Cheng L., Thome J. R. Cooling of microprocessors using flow boiling of CO₂ in a micro-evaporator: Preliminary analysis and performance comparison // Applied Thermal Engineering. — 2009. — Vol. 29. — P. 2426–2432
16. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.-Л.: Энергия, 1965. [Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha. Moscow — Leningrad: Energiya. 1965]

Дата поступления рукописи
в редакцию 21.09 2011 г.

Alekseik O. S., Kravets V. Yu., Kopchevskaya I. A.
Boiling heat transfer intensity on small-size surface.

Keywords: boiling, small-size surface, heat transfer coefficient, criterion equation.

Dependence of heat-release surface of heat carrier (water and ethanol) characteristic size, boundary conditions and thermophysical properties on boiling heat transfer intensity on small-size surface was investigated. Criterion equation for boiling heat transfer coefficients on small-size surface was obtained.

Ukraine, NTUU “Kyiv polytechnical institute”

Алексей О. С., Кравец В. Ю., Копчевська І. А.
Інтенсивність тепловіддачі при кипінні на поверхні малого розміру.

Ключові слова: кипіння, поверхня малого розміру, інтенсивність тепловіддачі, критеріальна залежність.

Досліджено вплив характерних розмірів, граничних умов, а також теплофізичних властивостей теплоносія (води та етанолу) на інтенсивність тепловіддачі при кипінні на поверхні малого розміру. Отримано критеріальні залежності для розрахунку інтенсивності тепловіддачі при кипінні в зазначених умовах.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».

УДК 621.3.049.77

Д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ, д. ф.-м. н. Р. М. МАРТЫНЯК, к. т. н. В. А. ПАЛАГИН,
к. ф.-м. н. Б. С. СЛОБОДЯН, к. т. н. Е. А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК,
И. В. ЖАРИКОВА, М. И. ДМИТРИВ, А. С. БЕЛЯЕВ

Украина, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

ПОДКЛЮЧАЮЩЕЕ МЭМС-УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ BGA-КОМПОНЕНТОВ

Разработано многозондовое подключающее устройство для входного и функционального контроля электронных компонентов с матричными шариковыми выводами, обеспечивающее бездефектное пневматическое прижатие зондов к выводам.

Ключевые слова: компоненты BGA/CSP, функциональный контроль, многозондовое подключающее устройство.

Компоненты с матричными шариковыми выводами типа BGA/CSP (ball grid array/chip scale packaging), благодаря их преимуществам перед другими видами корпусов и выводов микросхем [1], все чаще применяются в радиоэлектронной аппаратуре. Микросхемы в корпусе BGA относительно недороги и отличаются малыми размерами [2]. Тестирование BGA-компонентов выявляет соответствие параметров микросхем заданным параметрам и составляет большую часть производственных затрат. Обнаружение же дефектов после завершения процесса монтажа приводит к значительным потерям. Поэтому качественный входной и функциональный контроль электронных компонентов типа BGA/CSP является актуальной задачей, решение которой зависит от используемых методов и средств подключения выводов микросхем к автоматическим контролирующим комплексам или специализированным пультам контроля. Существующие методы контроля отличаются либо высокой стоимостью, либо необходимостью проведения дополнительных проверок вручную.

Известные подключающие устройства реализуются в виде конструкций, представляющих собой матрицы подпружиненных контактов («ложе гвоздей»), причем зонды-иглы для подключения к шариковым выводам имеют сложную форму. При таком методе автоматического контроля возможны ошибки из-за отсутствия контакта зонда с шариковым выводом (что не исключено при большом количестве выводов микросхемы), вследствие чего может быть забракована годная микросхема или пропущено бракованное изделие. Кроме того, многозондовые подключающие устройства (МПУ) являются сложными и дорогостоящими (стоимость одного пружинного контакта-зонда около 100 гривен).

Одним из требований к таким соединителям является отсутствие повреждений шариков в процессе контактирования с иглой и обеспечение

стабильного контакта. В [3] было установлено, что при приложении чрезмерного усилия зонд оставляет следы на поверхности шарика, что негативно сказывается на BGA-компоненте и его надежности. Появление на поверхности шарика вмятин может привести к накоплению в этих местах флюса, что в свою очередь приводит к некачественному соединению в процессе пайки. Кроме того, любое появление деформаций на шарике припоя может отразиться на компланарности и на качестве монтажа устройств. К тому же следует отметить, что зонды из твердых материалов имеют ограниченный срок службы, и после каждых 2000 касаний возникает необходимость проверки целостности наконечников [3].

В настоящей статье описано разработанное микроэлектромеханическое многозондовое устройство подключения к электронным компонентам (ЭК) с матричными выводами шарикового типа для входного и функционального контроля [4], которое обеспечивает возможность проверки (самотестирования, самомониторинга) контактирования каждого отдельного зонда с соответствующим выводом контролируемого ЭК.

Устройство представляет собой гибкий многослойный шлейф с алюминиевой проводниковой разводкой. Соединение проводников соседних слоев производится сваркой через окна в изоляции. Зонды подключающего устройства выполнены в виде плоской контактной площадки, разделенной на несколько частей (рис. 1), которые объединены в две группы с чередующимися элементами. Элементы каждой группы электрически связаны между собой, и каждая группа отдельным проводником в шлейфе свя-



Рис. 1. Площадка-зонд для подключения к одному выводу ЭК [5]

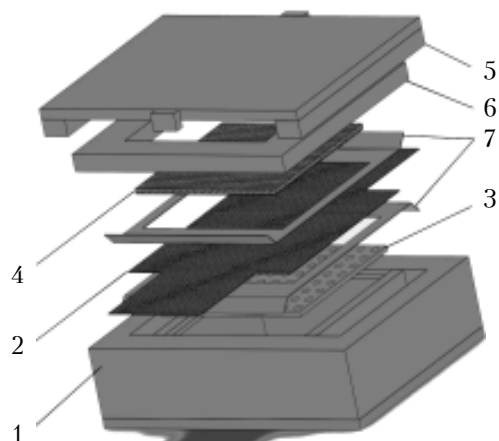


Рис. 2. 3D-модель МПУ:

1 — корпус; 2 — МПУ; 3 — полка с перфорацией; 4 — контролируемый ЭК; 5 — крышка; 6 — центрирующая рамка; 7 — изолирующие прокладки

зана с внешним соединителем — гнездом типа ZIF (zero insertion force — нулевая сила вставки). При контактировании шариковые выводы контролируемого электронного компонента замыкают электрически разведенные элементы зондов, что свидетельствует о наличии контакта.

На рис. 2 представлена модель МПУ, созданная с помощью САД-пакета «SolidWorks2010» для 3D-моделирования.

В корпусе 1 в горизонтальном положении располагается МПУ 2 зондами вверх на поддерживающей полке 3 с перфорациями. На массив плоских зондов устанавливается контролируемый компонент 4 и фиксируется крышкой 5. Центрирующая рамка 6 обеспечивает совмещение шариковых выводов с контактами-зондами МПУ по двум координатам. Для поджатия контактов и создания необходимого давления на шарик в объем корпуса под перфорированной полкой подается сжатый воздух. Для предотвращения утечки воздуха используются изолирующие прокладки 7.

Площадка-зонд (рис. 1) имеет размеры 600×600 мкм, размеры контактного элемента (контактной площадки) 200×200 мкм, ширина перемычек между ними 100 мкм, ширина проводников 75 мкм, минимальное расстояние между ними

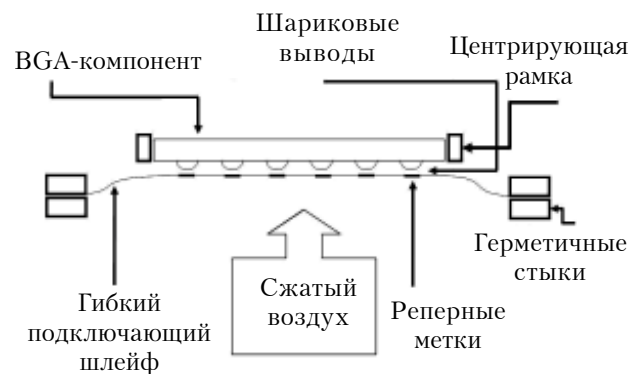


Рис. 3. Схема подключения BGA-компонентов

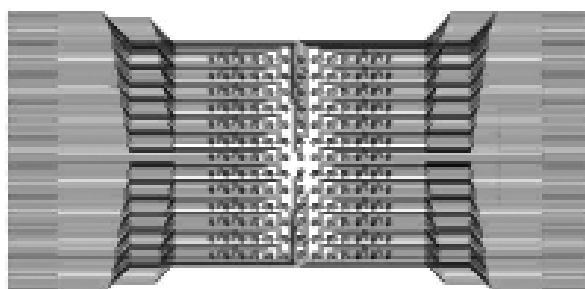


Рис. 4. Топология прижимающей пластины

100 мкм. Плата — двухслойная, межслойные соединения проводников выполняются ультразвуковой сваркой, размеры технологических окон в полиимиде для межслойной сварки составляют 150×100 мкм. Слои соединяются с помощью полиимидного клея.

Упрощенная структурная схема подключения BGA-компонентов представлена на рис. 3. Экспериментально было проверено, что надежный контакт обеспечивается при давлении 7—30 г на каждый шарик.

Моделирование напряженно-деформированного состояния прижимающей пластины МПУ (рис. 4) было проведено с помощью метода конечных элементов с учетом деформирования шариков и модели Герца. Для вычислений использовалась среда Femar 10/2 и дополнительный модуль, написанный на языке VB.NET. Числовые эксперименты проводили для случаев, когда шарики размещались равномерно и когда часть из них отсутствовала. Такой подход позволяет проверять качество и равномерность подключения контактной площадки к шарик, например выявлять слишком большое проседание или недостаточное давление прижатия.

Модель распределения сил реакции шариков для случая равномерного расположения шариков в отсутствие одного из них представлена на рис. 5 (см. также с. 3 обложки).

Анализ распределения эквивалентных напряжений в пластине, прогибов пластины и сил реакции шариков показал, что в отсутствие отдельного шарикового вывода или зоны шариков изменение давления наблюдается только в первом

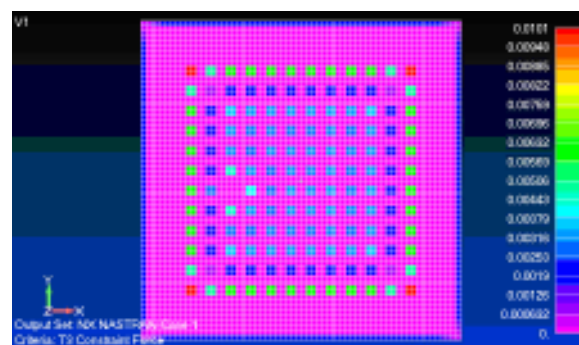


Рис. 5. Распределение силы реакции шариков на прижим пластину

ряду выводов, окружающих отсутствующие элементы. Моделирование подтвердило возможность прижатия зондов к шарикам с усилием в диапазоне 0,03—0,30 Н при условии растяжения шлейфа-пленки (полиимид ФДИ-А-24) в пределах упругой деформации. При этом прогибы-вспучивания пленки находились в пределах 15 мкм. Напряжение в пленке в зонах отсутствия шариков изменялось примерно в 7 раз (0,3—0,046 Н/мм²). Отсутствие какого-либо шарика увеличивало давление на окружающие его выводы примерно в 1,5 раза, а реакция на возмущение распространялась только на один шаг. Анализ также показал, что наиболее нагруженными элементами являются угловые и наружные шары. Острый угол по контуру прижатия является концентратором напряжений в пленке и шариковых выводах, и поэтому прижимающую рамку необходимо скруглять.

Выводы

Благодаря использованию технологии многослойных плат на гибком пленочном носителе удалось существенно упростить конструкцию устройств, подключающих BGA/CSP-компоненты для входного и функционального контроля, обеспечить самоконтроль подключения каждого (или любого) зонда к контролируемому компоненту, повысить надежность контакта зондов и контролируемого объекта за счет его дублирования по крайней мере двумя частями зонда, а также придать подключающим устройствам свойства интеллектуальности, т. е. способности предоставлять информацию о наличии контакта.

В перспективе возможно повышение разрешающей способности проводниковой системы гибких плат до десятков нанометров, что обеспечит возможность контроля микросхем с шариковыми выводами диаметром в десятки микрометров [6] и проводниковых структур плат типа кросс-баров [7].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Семенец В. В., Кратц Дж., Невлюдов И. Ш., Палагин В. А. Технология межсоединений электронной аппаратуры. Учеб. для вузов. — Харьков: «СМИТ», 2005. [Semenets V. V., Kratts Dzh., Nevlyudov I. Sh., Palagin V. A. Tekhnologiya mezhsoedinenii elektronnoi apparatury. Ucheb. dlya vuzov. Khar'kov: «SMIT», 2005]
2. Невлюдов И. Ш., Жарикова И. В. Анализ особенностей создания электронных компонентов по BGA-технологии // Матер. VI Междунар. науч. практич. конфер. «Основные проблемы на современном этапе науки-2010» — Т. 23. «Технологии. Физика». — Болгария, София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2010. — С. 62—65. [Nevlyudov I. Sh., Zharikova I. V. Analiz osobennostei sozdaniya elektronnykh komponentov po BGA-tekhnologii // Mater. VI Mezhdunar. nauch. praktich. konfer. «Osnovni problemi na svremennata nauka-2010». Vol. 23. «Tekhnologii. Fizika». Bulgaria, Sofia: «Byal GRAD-BG» OOD. 2010. P. 62]
3. Чин-Май Ко, Шень-Ли Фу, Ю-Цзунг Хуанг, Минг-Кун Чень. Надежность тестирования BGA-компонентов // Технологии в электронной промышленности. — 2009. — № 4. — С. 38—42. [Chin-Mai Ko, Shen'-Li Fu, Yu-Tsung

Khuang, Ming-Kun Chen' // Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti. 2009. N 4. P. 38]

4. Пат. 95190 України. Мікроелектромеханічний багато-зондовий підмикальний пристрій / В. Н. Борщев, І. В. Жарикова, Л. Д. Кошій та ін. — 11.07.2011. [Pat. 95190 Ukraine. / V. N. Borshchev, I. V. Zharikova, L. D. Koshchii ta in. 11.07.2011]

5. Невлюдов И. Ш., Палагин В. А., Тымчук И. Т. и др. Многозондовое подключающее устройство для контроля BGA-компонентов // III Междунар. науч. конфер. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники». — Украина, Крым, Казивели, 2010. — Сб. науч. тр. — Украина, г. Харьков: ХНУРЭ, 2010. — С. 191—194. [Nevlyudov I. Sh., Palagin V. A., Tymchuk I. T. i dr. Mnogozondovoe podklyuchayushchee ustroystvo dlya kontrolya BGA-komponentov // III Mezhdunar. nauch. konfer. «Funktsional'naya komponentnaya baza mikro-, opto- i nanoelektroniki». Ukraine, Krimea, Katsiveli, 2010. — Sb. nauch. tr. Ukraine, Kharkov: KhNURE, 2010. P. 191]

6. Рева В. П., Голенков А. Г., Забудский В. В. и др. Тепловизор на основе матричного фотоприемного устройства из 128×128 GdHgTe-фотодиодов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 4. — С. 24—28. [Reva V. P., Golenkov A. G., Zabudskii V. V. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2010. N 4. P. 24]

7. Кьюкс Ф., Снайдер Г., Уильямс С. Кроссбар наноконпьютеры // В мире науки. — 2006. — № 3. — С. 66—73. [K'yuks F., Snaider G., Uil'yams S. // V mire nauki. 2006. N 3. P. 66]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 13.09 2011 г.*

Nevlyudov I. Sh., Martynyak R. M., Palagin V. A., Slobodyan B. S., Razumov-Frizyuk E. A., Zharikova I. V., Dmytriv M. I., Belyaev A. S. **Connecting MEMS device for BGA components functional testing.**

Keywords: BGA/CSP components, multiprobe connecting device, functional testing.

Multiprobe connecting device for initial and functional check of electronic components with matrix pin balls has been developed. The device ensures nondefect pneumatic pressing of probes against the terminals.

Ukraine, Kharkov national university of radioelectronics.

Невлюдов І. Ш., Мартиняк Р. М., Палагін В. А., Слободян Б. С., Разумов-Фризюк Є. А., Жарикова І. В., Дмитрів М. І., Беляєв О. С. **Підмикальний МЕМС-пристрій для контролю BGA-компонентів.**

Ключові слова: компоненти BGA/CSP, функціональний контроль, багатозондовий підмикальний пристрій.

Розроблено багатозондовий підмикальний пристрій для вхідного та функціонального контролю електронних компонентів з матричними кульковими выводами. Пристрій забезпечує бездефектне пневматичне притиснення зондів до виводів.

Україна, Харківський національний університет радіоелектроніки.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2011 г.

Техническая политика

Новый подход к созданию устройств с энерго-
независимой памятью на основе Si-MOP-тран-
зисторов. *Гуляев Ю. В., Ждан А. Г., Чучева Г. В.* 3

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Моделирование электротоковых микрореле.
Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П. 3

Электронные средства: исследования, разработки

Волоконно-оптические демультиплексоры с по-
вышенной стойкостью к механическим воздей-
ствиям. *Дементьев С. Г., Ключник Н. Т., Кузне-
цов В. А., Яковлев М. Я.* 1-2

Автоматизированная диагностика химических
источников тока. *Дзензерский В. А., Беда
М. А., Житник Н. Е., Лесничий В. Н., Плаксин
С. В., Ткаченко Ю. А.* 1-2

Выбор оптимальных параметров некоторых уз-
лов частотомеров СВЧ-диапазона. *Криваль
И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьен-
ко А. В.* 3

Скоростные уравнения экситонного лазера. *Гар-
кавенко А. С.* 3

Анизотропный термоэлемент в режиме генера-
ции эдс и тока. *Анатычук Л. И., Прибыла А. В.* 3

Электрооптические модуляторы и фильтры на ос-
нове кольцевых микрорезонаторов для воло-
конно-оптических систем связи. *Берикашвили
В. Ш., Ключник Н. Т., Яковлев М. Я.* 4

Применение технологии тонких пленок и нано-
структурированных материалов при изготовлении
теплонагруженных печатных плат. *Сахно Э. А.,
Балашов М. А., Жиликов В. В., Лобасов Д. В.* 5

Термовакuumные испытания системы электро-
снабжения наноспутника НТУУ «КПИ». *Рассама-
кин Б. М., Хайрмасов С. М., Хоминич В. И., Бу-
денный А. В., Коваленко Е. Ю., Елисеева Е. Н.* 5
Сшивки полигонов на двухслойной печатной
плате. *Муров С. Ю.* 6

Системы передачи и обработки сигналов

Архитектура устройств цифровой обработки сиг-
налов с перестраиваемой структурой. *Шейк-Сей-
кин А. Н.* 4

Фоторефрактивные кристаллы в запоминающих
устройствах оптоэлектронных процессоров кор-
реляционного типа. *Липинский А. Ю., Рудякова
А. Н., Данилов В. В.* 6

Сенсоэлектроника

Радиационная стойкость нитевидных кристаллов
SiGe, используемых для сенсоров физических
величин. *Дружинин А. А., Островский И. П.,
Ховерко Ю. Н., Литовченко П. Г., Павловская
Н. Т., Павловский Ю. В., Цмоць В. М., Поварчук
В. Ю.* 1-2

Увеличение чувствительности сенсоров изме-
нения показателя преломления среды на ос-
нове поверхностного плазмонного резонанса.
*Ушенин Ю. В., Самойлов А. В., Христосенко
Р. В.* 1-2

Температурная зависимость рабочих характери-
стик пьезоэлектрических сенсоров на основе по-
ливинилиденфторида. *Ревенюк Т. А., Федосов
С. Н.* 1-2

Автотрассовый газоанализатор. *Девятко Г. А.,
Кучменко В. А., Лацис С. А., Орлов М. А.,
Партышев В. А., Подольский В. Я.* 1-2

Индуктивный негасенсор. *Войцеховская Е. В.,
Лищинская Л. Б., Лазарев А. А.* 3

Датчик скорости газового потока. *Годованюк
В. Н., Рюхтин В. В., Михайличенко Ю. С.,
Швец А. Г., Шимановский А. Б., Фединчук И. И.* 4

Низкоразмерные кристаллы кремния для фото-
электрических преобразователей. *Дружинин
А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н., Ничкало
С. И., Бережанский Е. И.* 5

Формирование дельта-легированного водородом
p-слоя в природных и CVD-кристаллах ал-
маза. *Алтухов А. А., Афанасьев М. С., Зяб-
люк К. Н., Митягин А. Ю., Талипов Н. Х., Чу-
чева Г. В.* 5

Математическая модель процесса избыточных
измерений при непрерывном воздействии изме-
ряемой физической величины на чувствитель-
ный элемент датчика. *Редько В. В.* 6

Функциональная микро- и нано- электроника

Роль пластической деформации в получении на-
нокремния. *Смынтына В. А., Кулинич О. А.,
Яцунский И. Р., Марчук И. А.* 1-2

Некоторые особенности ограничителя тока на
полевом транзисторе. *Каримов А. В., Джуреев
Д. Р., Ёдгорова Д. М., Рахматов А. З., Абдул-
хаев О. А., Каманов Б. М., Тураев А. А.* 1-2

Разработка конструкции и технологии изготов-
ления комплементарных транзисторов для ра-
диационно стойких ИС. *Горбань А. Н., Кравчи-
на В. В.* 3

- Кремниевый $p-i-n$ -фотодиод с малым темновым током. Добровольский Ю. Г., Ащеулов А. А. 3
Особенности проектирования высокочастотных КМОП ИС для генераторов с кварцевой стабилизацией частоты. Вербицкий В. Г., Вирозуб Т. М., Воишин А. Ф., Золотаревский В. И., Само-
товка В. Л., Самотовка Л. И. 4
Устройства считывания информации с крупноформатных матриц ИК-фотодиодов. Рева В. П., Мар-
чишин И. В., Коринец С. В., Сизов Ф. Ф. 4
Интегральные двухсторонние кремниевые мик-
ростриповые детекторы. Перевертайло В. Л. 5
Методика и установка для определения тепло-
проводности полупроводников с использованием лучистой энергии. Гурбанниязов М. А., Кур-
банов М. А. 5
Тонкая структура спектров лазерного излучения
при электронной накачке на основе радиацион-
но модифицированных оптически однородных
нелегированных кристаллов GaAs. Гаркавенко
А. С. 5
Модель алмазного транзистора. Алтухов А. А.,
Зяблюк К. Н., Митягин А. Ю., Талипов Н. Х.,
Чучева Г. В. 6
Гибридная интегральная схема для обработки
звукового сигнала. Ковальчук В. А., Севастья-
нов В. В. 6
- Обеспечение тепловых режимов**
- Моделирование температурных режимов в эле-
ментах микроэлектронных устройств. Гаврыш
В.И., Косач А.И. 1-2
Проектирование радиаторов с оптимальными
массогабаритными параметрами. Шило Г. Н.,
Огренич Е. В., Гапоненко Н. П. 1-2
Система охлаждения испарительно-конденсаци-
онного типа для рентгеновских трубок. Гершуни
А. Н., Нищик А. П. 1-2
Режим работы двухкаскадного термоэлектри-
ческого охлаждающего устройства, обеспечи-
вающий минимальную интенсивность отказов.
Сочеслав Д. П. 1-2
Теплотехнические характеристики радиатора для
эффективных систем охлаждения радиоэлектрон-
ной техники. Руденко А. И., Кравец В. Ю., Зари-
пов В. К. 3
- Технологические процессы и оборудо-
вание**
- Высокочастотный реактор с асимметричными
электродами для плазмохимического травления
полупроводников. Дудин С. В., Лисовский В. А.,
Дахов А. Н., Плетнёв В. М. 1-2
Оборудование для формирования омических
контактов полупроводниковых приборов на ос-
нове соединений A_3B_5 . Александров С. Б., Кру-
пальник К. М., Корнилов Н. А., Кондратьева
Т. А. 1-2
- Лазерная абляция и фотостимулированная пас-
сивация поверхности кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$.
Загоруйко Ю. А., Коваленко Н. О., Христьян
В. А., Федоренко О. А., Герасименко А. С., До-
бровольская М. В., Матейченко П. В. 3
Высокочувствительная установка для оценки из-
менения показателя преломления водных раство-
ров. Подкамень Л. И., Гавриляк М. С. 3
Новое технологическое оборудование для ин-
новационных технологий микро-, нано- и радио-
электроники. Одинокоев В. В., Павлов Г. Я. 3
Повышение помехоустойчивости бинаризации
изображений фотошаблонов в пространстве вей-
влет-преобразования. Щербакова Г. Ю., Дилев-
ский А. А., Крылов В. Н., Логвинов О. В., Пла-
чинда О. Е. 6
Формирование полированной поверхности халь-
когенидов Bi и Sb в травильных композициях
 $K_2Cr_2O_7-HBr$. Павлович И. И., Томашик З. Ф.,
Томашик В. Н., Стратийчук И. Б. 6
Метод определения температуры и теплового со-
противления точек поверхности кристалла инте-
гральной схемы. Попов В. М., Клименко А. С.,
Поканевич А. П., Самотовка В. Л. 6
- Материалы электроники**
- 3D-наноконкомпозиты — опаловые матрицы с вклю-
чениями металлического Co и слоистые струк-
туры «опаловая матрица — Co/Ig». Самойлович
М. И., Ринкевич А. Б., Белянин А. Ф., Пащенко
П. В. 1-2
Эффективные сцинтилляционные материалы на
основе твердых растворов $ZnS_{1-x}Te_x$ и перспек-
тивы их применения. Катрунов К. А., Лалайянц
А. И., Гальчинецкий Л. П., Старжинский Н. Г.,
Жуков А. В., Галкин С. Н., Брылёва Е., Зеня
И. М., Трубаева О. Г. 1-2
Исследование свойств пленок нитрида и оксида
кремния, полученных методом плазмохимиче-
ского осаждения на кремниевую подложку. Руб-
цевич И. И., Соловьев Я. А., Высоцкий В. Б.,
Дудкин А. И., Ковальчук Н. С. 4
Особенности морфологии фрактальных нано-
объектов в кристаллах $A_2^V B_3^{VI}$ <примесь>. Али-
ева А. П., Кахраманов К. Ш., Кахраманов С. Ш. 4
Влияние обработки водородом монокристаллов
теллурида кадмия на их спектры оптического про-
пускания. Пигур О. Н., Попович В. Д., Potera P.,
Вирт И. С., Цибрий (Ивасиев) З. Ф. 4
Химическая связь сурьмы. Технологические ас-
пекты. Ащеулов А. А., Маник О. Н., Маник Т. О.,
Билинский-Слотыло В. Р. 4
Межслоевые примесные наноконкомпозиты поверх-
ности (0001) кристалла Bi_2Te_3 , легированного цин-
ком и селеном. Алиева А. П., Алескерев Ф. К.,
Кахраманов С. Ш. 5

Исследование спектров фотолюминесценции низкоразмерных структур InSb, сформированных в матрице GaSb. *Андропова Е. В., Баганов Е. А., Курак В. В.* 5

Влияние слоя поликристаллического кремния на механизмы токопереноса в контактах «металл — р-кремний». *Смынтына В. А., Кулинич О. А., Яцунский И. Р., Свиридова О. В., Марчук И. А.* 5

Особенности конденсации фуллеренов из молекулярного пучка в вакууме. *Нелюба П. Л.* 6
Исследование процесса термической деполяризации сегнетокерамики (Pb,Sr)(Zr,Ti)O₃. *Кузнецов Д. В., Бажин А. И., Ступак В. А., Кисель Н. Г., Дорофеева В. В., Старшинов И. Н., Покинтелица А. Е.* 6

Исследование допустимой импульсной мощности кремниевой р⁺–р–п⁺-структуры. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Абдуллаев О. А., Каримов А. А., Асанова Г. О.* 6

Метрология. Стандартизация

Погрешности при измерении характеристик рентгеновских установок. *Душкин С. А., Иванский В. Б., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н.* 3

Измерительный преобразователь, индифферентный к хаотическому возбуждению чувствительного элемента. *Короткий В. П., Ильин В. Н.* 6

СВЧ-техника

Влияние внутренних параметров стабилизированных СВЧ-генераторов на формирование автодинного отклика при сильном отраженном сигнале. *Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М.* 4
Автодинные характеристики стабилизированных СВЧ-генераторов при сильном отраженном сигнале. *Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М.* 5

Фокусировка интенсивных электронных потоков в спиральной ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем. *Часнык В. И.* 6
Перспективная телекоммуникационная аппаратура (НИИ "Орион", г. Киев) 6

К истории науки и техники

Развитие полупроводниковых СВЧ-технологий в НИИ «Орион». *Болтовец Н. С., Мальцев С. Б.* 1-2

Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2010 г. 1-2

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Банков Сергей Евгеньевич, д-р. техн. наук, гл. научн. сотр. Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва

Данилов Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой радиофизики Донецкого национального университета

Корбутяк Дмитрий Васильевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

Костенко Виталий Леонидович, д-р тех. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет

Крылов Виктор Николаевич, д-р тех. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики и информационных технологий в бизнесе Одесского национального политехнического университета

Панов Леонид Иванович, канд. тех. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет

Рыбка Александр Викторович, канд. физ.-мат. наук, Национальный научный центр Харьковского физико-технического института

Ситников Валерий Степанович, д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой компьютерных систем Одесского национального политехнического университета

Трофимов Владимир Евгеньевич, канд. тех. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

Чечельницкий Виктор Яковлевич, канд. тех. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

Шеремет Владимир Николаевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью.

Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются между собой поставленная задача, выводы и название статьи.

5. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

6. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (напр., [2, с. 418]).

7. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (напр., на материалы конференций) или на недолговечные (напр., Интернет). Принятое в журнале описание источников см. на сайте журнала.

8. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на русском и английском языках с аннотацией до 500 печатных знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

9. Материалы статьи направляйте по e-mail tkea@optima.com.ua. Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи набирается на русском или английском языке в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с одним пробелом между словами, с междустрочным интервалом не менее 1,5. Правый край текста выравнивать не обязательно.

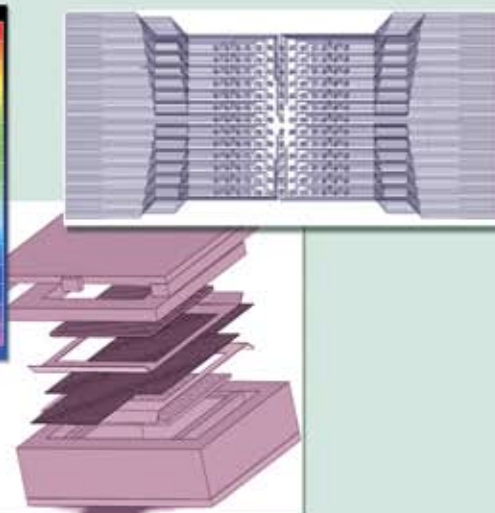
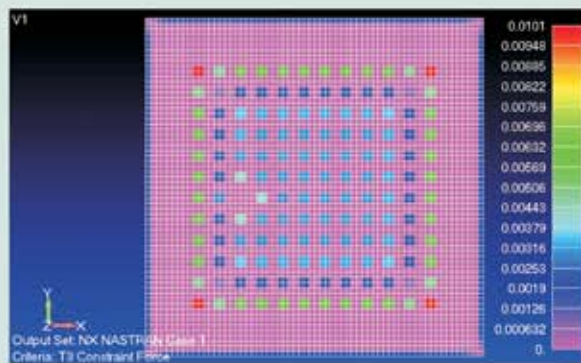
Допускается использование программы Equation только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 dpi.

10. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, телефакс).

11. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.



К статье «Подключающее МЭМС-устройство
для контроля BGA-компонентов»



НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ НИИ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Малогабаритная вакуумная установка магнетронного напыления настольного типа **МВУ ТМ-Магна Т**



Назначение:

Нанесение плёнок металлов (Cu, Cr, Al, и др.)
и диэлектриков (SiO_2 , Si_3N_4 , др.) методом магнетронного распыления.

Особенности:

- Групповая обработка пластин:

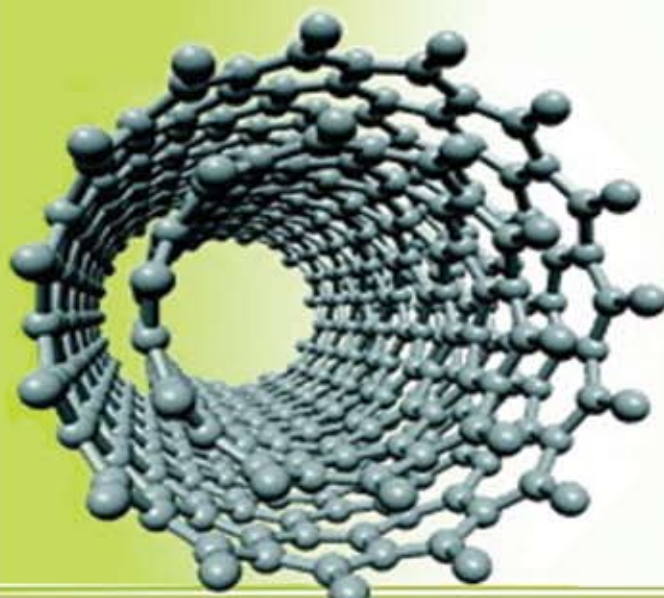
60x48 мм	- 6шт.	- двухсторонняя обработка.
Ø 150 мм	- 2шт.	- односторонняя обработка.
Ø 60, 76, 100 мм	- 4шт.	
- Откачка реактора до предельного разряжения $5 \cdot 10^{-4}$ Па;
- Подготовка поверхности подложек – нагрев и ВЧ ионная очистка.
- Автоматизированное управление от микропроцессора.
- Малогабаритная безмасляная вакуумная система откачки.
- Автономная система водяного охлаждения.
- Потребляемая мощность не более 5,5 кВт.
- Площадь, занимаемая одной установкой $\sim 1,5 \text{ м}^2$.
- Возможны комбинации нескольких источников на одной рабочей камере.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
Факультет электроники



XXXII Международная
научно-техническая конференция

ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОТЕХНОЛОГИИ



10—12 АПРЕЛЯ 2012 г.
Киев, Украина
<http://elnano.kpi.ua/>

*Номер готовили
Днепропетровск, Донецк, Киев, Москва,
Одесса, Тюльятти, Харьков, Черновцы,
Штутгарт.*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте