

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. М. К. Можар (г. Киев)
В. А. Проценко (г. Киев)
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. Гушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
Д.т.н. В. Т. Дейнега (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов (г. Одесса)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков (г. Одесса)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович (г. Москва)
Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)
Д.х.н. В. Н. Томашич (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство промышленной политики
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 23.02 2010 г.)

Электронные средства: исследования, разработки

- Эффект усиления фототока в фотодиодной структуре с прямо- и обратновключенными переходами. *Ёдгорова Д. М.* 3
Специализированное устройство электропитания. *Гунченко Ю. А., Банзак О. В., Селюков А. В., Куташев В. И.* 6
Радиоволновое охранное устройство на излучающем кабеле. *Прудус И. Н., Проць Р. В., Сторож В. Г.* 10
Особенности стирания информации с многодисковых винчестеров импульсным магнитным полем. *Герус С. В., Митягин А. Ю., Соколовский А. А., Темиряева М. П., Хлопов Б. В.* 14
Оценка структурной избыточности БИС с помощью помехоустойчивой кластеризации. *Щербакова Г. Ю.* 18

Вопросы приборостроения

- Алгоритм оценки состояния эргатических систем управления. *Скубилин М. Д., Стефаненко В. К., Финаев В. И.* 22

Сенсозлектроника

- Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы. *Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Лях-Кагуй Н. С., Маслюк В. Т., Мегела И. Г.* 26
Вихретоковый анизотропный термоэлектрический первичный преобразователь лучистого потока. *Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д., Романюк И. С.* 30

- Системы контроля-мониторинга температуры и влажности среды на основе толстых пленок оксидных пленок. *Вакив Н. М.* 32

Функциональная микро- и нанозлектроника

- Ртутный микронд для исследования локальных электрофизических свойств полупроводниковых структур. *Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П., Шустов Ю. М.* 35

Обеспечение тепловых режимов

- Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе. *Кравец В. Ю., Наумова А. Н., Вовкогон А. Н.* 39

Технологические процессы и оборудование

- Метод защиты поверхности расплавленного припоя от окисления. *Курмашев Ш. Д., Лавренова Т. И., Бугаёва Т. Н.* 44

Материалы электроники

- Термостабильные интерференционные оксидные покрытия для активных элементов лазеров ИК-диапазона. *Загоруйко Ю. А., Федоренко О. А., Коваленко Н. О., Кузьминов Е. А., Матейченко П. В.* 47
Опико-акустические эффекты в решетчатых упаковках (опаловые матрицы как метаматериал). *Чернега Н. В., Кудрявцева А. Д., Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М.* 49
Стабильность свойств пьезокерамических материалов при внешних воздействиях. *Кузенко Д. В., Бажин А. И., Дорофеева В. В., Гусакова Л. Г., Ищук В. М., Спиридонов Н. А.* 58

Библиография

- Указатель статей, опубликованных в журнале в 2009 г. 62

Новые книги

5, 21, 29, 46, 57, 64

Выставки. Конференции

25, 2-я, стр. обл.

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Ефект посилення фотоструму у фотодіодній структурі з прямо- та зворотньоувімкнутими переходами. *Йодгорова Д. М.* (3)

Спеціалізоване джерело електроживлення. *Гунченко Ю. О., Банзак О. В., Сєлюков О. В., Кутаєв В. І.* (6)

Радіохвильовий охоронний пристрій на випромінюючому кабелі. *Прудиус І. Н., Проць Р. В., Сторож В. Г.* (10)

Особливості стирання інформації з багатодискових вінчестерів імпульсним магнітним полем. *Герус С. В., Митягін А. Ю., Соколовський А. А., Теміряєва М. П., Хлопов Б. В.* (14)

Оцінка структурної надмірності ВІС за допомогою завадостійкості кластеризації. *Щербакова Г. Ю.* (18)

Питання приладобудування

Алгоритм оцінки стану ергатичних систем управління. *Скубілін М. Д., Стефаненко В. К., Фінаєв В. І.* (22)

Сенсоелектроніка

Дослідження впливу електронного опромінення на кремнієві тензорезистори. *Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С., Маслюк В. Т., Мегела І. Г.* (26)

Вихретоковий анізотропний термоелектричний первинний перетворювач променевого потоку. *Ащеулов А. А., Бучковський І. А., Величук Д. Д., Романюк І. С.* (30)

Системи контролю-моніторингу температури і вологості середовища на основі товстих плівок оксидів. *Ваків М. М.* (32)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Ртутний мікрозонд для дослідження локальних електрофізичних властивостей напівпровідникових структур. *Попов В. М., Клименко А. С., Pokanevich О. П., Шустов Ю. М.* (35)

Забезпечення теплових режимів

Дослідження процесів теплообміну в пульсаційній тепловій трубі. *Кравець В. Ю., Наумова А. М., Вовкогон А. М.* (39)

Технологічні процеси та обладнання

Метод захисту поверхні розплавленого припою від окислення. *Курмашев Ш. Д., Лавренова Т. І., Бугайова Т. М.* (44)

Матеріали електроніки

Термостабільні інтерференційні оксидні покриття для активних елементів лазерів ІЧ-діапазону. *Загоруйко Ю. А., Федоренко О. О., Коваленко Н. О., Кузьмів Є. А., Матейченко П. В.* (47)

Оптико-акустичні ефекти в ґратчастих упаковках (опалові матриці як метаматеріал). *Чернега М. В., Кудрявцева А. Д., Самойлович М. І., Белянін А. Ф., Клещева С. М.* (49)

Стабільність властивостей п'єзокерамічних матеріалів при зовнішніх діях. *Кузенко Д. В., Бажин А. І., Дорофєєва В. В., Гусакова Л. Г., Ішчук В. М., Спиридонов М. А.* (58)

CONTENT

Electronic means: investigations, development

Effect of photocurrent amplification in the photodiode structure with both directly and back switched junctions. *Yodgorova D. M.* (3)

Specialized device of power supplies. *Gunchenko Y. A., Banzak O. V., Selukov A. V., Kutashev V. I.* (6)

Radio wave guard device on a radiative cable. *Prudyus I. N., Prots' R. V., Storozh V. G.* (10)

Features of information erasing from multidisc HDDs by pulse magnetic field. *Gerus S. V., Mityagin A. Yu., Sokolovskiy A. A., Temiryazeva M. P., Hlopov B. V.* (14)

VLSI structure redundancy evaluation with the aid of noise stability clustering. *Shcherbakova G. Yu.* (18)

Questions of instrument making

Algorithm of the managing systems state estimation. *Skubilin M. D., Stefanenko V. K., Finaev V. I.* (22)

Sensoelectronics

Study of silicon strain gauges under electron irradiation. *Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Kutakov A. P., Liakh-Kaguj N. S., Masluk V. T., Mehela I. G.* (26)

Eddy current anisotropic thermoelectric converter primary radiant flux. *Ascheulov A. A., Buchkovskiy I. A., Velichuk D. D., Romanyuk I. S.* (30)

Control-monitoring systems of environment temperature and humidity based on oxyspinel thick films. *Vakiv N. M.* (32)

Functional micro- and nanoelectronics

The mercury microprobe for investigation of local electro-physical properties of semiconductor structures. *Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P., Shustov Y. M.* (35)

Ensuring of thermal modes

Research of heat exchange rate of the pulsating heat pipe. *Kravets V. Yu., Naumova A. M., Vovkogon A. M.* (39)

Technological processes and equipment

Method of defence of solder surface from oxidization. *Kurmashev Sh. D., Lavrenova T. I., Bugajova T. N.* (44)

Materials of electronics

Thermostable interference oxide coatings for active elements of IR lasers. *Zagoruiko Yu. A., Fedorenko O. A., Kovalenko N. O., Kuzminov E. A., Mateychenko P. V.* (47)

Optic acoustic effects in lattice packings (opal matrices as metamaterial). *Cherniega N. V., Kudryavtseva A. D., Samoylovich M. I., Belyanin A. F., Klesheva S. M.* (49)

The stability of piezoceramic materials properties at external influences. *Kuzenko D. V., Bazhin A. I., Dorofeeva V. V., Gusakova L. G., Ishchuk V. M., Spiridonov N. A.* (58)

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА

Республика Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»
E-mail: yodgorova@uzsci.net

Дата поступления в редакцию
2.07 2009 г.

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

ЭФФЕКТ УСИЛЕНИЯ ФОТОТОКА В ФОТОДИОДНОЙ СТРУКТУРЕ С ПРЯМО- И ОБРАТНОВКЛЮЧЕННЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Произведена оценка коэффициента фотоэлектрического усиления по току двухбарьерной фотодиодной Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структуры. Такие структуры, обладая свойством усилителя, представляют интерес для создания устройств приема оптических сигналов.

Качественный прием оптических сигналов возможен при условии высокой чувствительности приемников слабых оптических сигналов. Однако используемые в настоящее время лавинные фотодиоды не могут работать без стабилизации рабочего режима, и в лавинном режиме в них увеличиваются шумовые токи [1, с. 143–145]. В связи с этим, для повышения чувствительности приемников разработчики оптоэлектронных устройств стали обращаться к биполярным ($n-p-n$, $p-n-p$) и полевым транзисторам с управляющим $p-n$ -переходом, обладающим внутренним усилением. Однако эффект накопления заряда в базе и сравнительно большие токи утечки ($7 \cdot 10^{-5}$ А/см²) в биполярных фототранзисторах ограничивают их использование при низких уровнях входного сигнала [2, с. 488–507], т. к. полезный сигнал должен быть намного больше тока утечки. Кроме того, для увеличения коэффициента их усиления необходимо уменьшать толщину базы, а для увеличения фоточувствительности толщину базы необходимо увеличивать. Уйти от этого противоречия сложно, т. е. биполярный фототранзистор может иметь либо большую фоточувствительность, либо высокий коэффициент усиления.

Полевые фототранзисторы обладают высоким коэффициентом усиления, однако имеют ограничения в части повышения частотного диапазона. Необходимо отметить, что в режиме отсечки канала биполярный транзистор содержит два обратно- ($n-p-n$) или прямо- ($p-n-p$) включенных перехода (рис. 1, а), а полевой транзистор имеет два обратновключенных относительно рабочего напряжения ($n-p-n$) перехода (рис. 1, б).

Авторы [3, 4], воспользовавшись этими свойствами полевого и биполярного транзисторов, разработали двух- и трехбарьерные фотодиодные структуры с прямо- и обратновключенными переходами, в которых один из полупроводниковых переходов заменен на металлополупроводниковый. При этом в зависи-

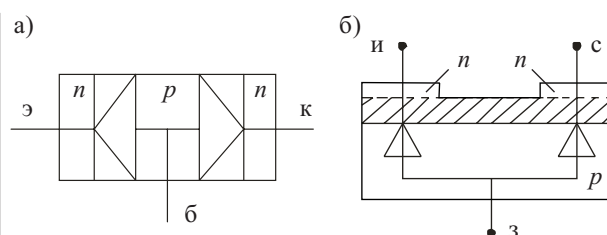


Рис. 1. Эквивалентные схемы биполярного (а) и полевого (б) транзисторов в режиме отсечки

мости от режима включения металлополупроводниковый или полупроводниковый переходы поочередно выполняют роль затвора, управляющего толщиной слоя объемного заряда, а напряжение затвора зависит от интенсивности падающего света. С помощью таких фотодиодов можно создавать оптоэлектронные устройства для приема и передачи слабых оптических сигналов.

В настоящей работе проводились исследования оптико-электрических характеристик двухбарьерной фотодиодной Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структуры с изотипным гетеропереходом, которая использовалась в качестве приемника оптических сигналов, а также была произведена оценка коэффициента фотоэлектрического усиления такого приемника. Технология изготовления и основные параметры двухбарьерной Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структуры приведены в ранее опубликованной работе [4].

Принципиальная схема приема и передачи оптического сигнала приведена на рис. 2. В качестве излучателя использовался светодиод АЛ1107А. По паспортным данным его рабочее напряжение лежит в интерва-

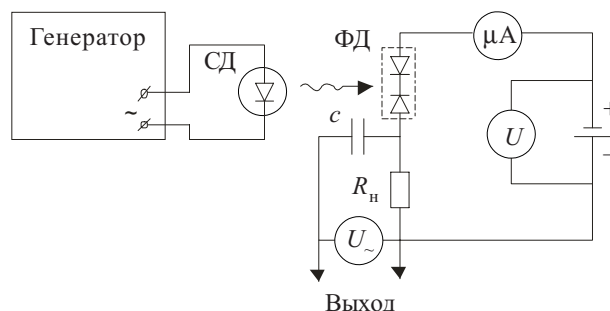


Рис. 2. Принципиальная схема, иллюстрирующая прием светового излучения фотодиодом

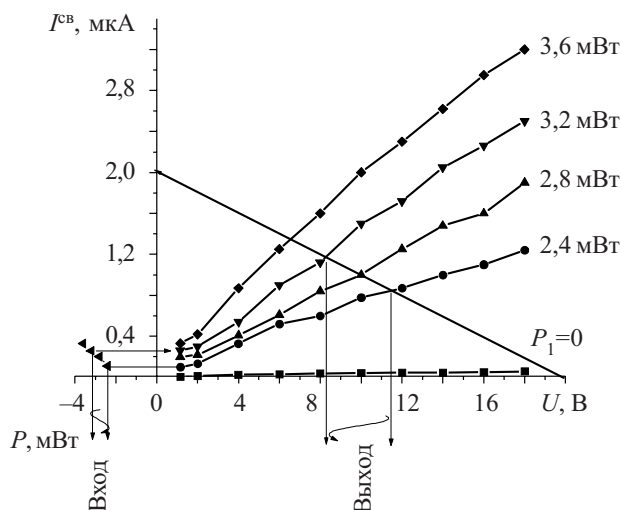


Рис. 3. Выходные характеристики двухбарьерной Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структуры

ле от 0 до 1,5 В, максимальная мощность излучения составляет $P=6$ мВт при длине волны $\lambda=0,95$ мкм [5, с. 34–35]. Оптический сигнал на фотодиодную двухбарьерную структуру подавался от светодиода, возбуждаемого генератором синусоидальных импульсов с частотой 200 Гц. Без подсветки темновой ток, который определяется запираемым переходом «металл–полупроводник», составил 57 нА при напряжении питания 18 В. При подсветке с ростом рабочего напряжения наблюдалось увеличение светового тока, а темновой ток изменялся незначительно, т. е. при заданной интенсивности светового излучения выходной сигнал увеличивается. Было сформировано семейство выходных характеристик при фиксированных значениях интенсивности излучения по мере ее увеличения (рис. 3).

Токовая фоточувствительность S_I^Φ при заданной интенсивности светового излучения и соответствующих значениях напряжения определяется отношением выходного фототока $I_{\text{вых}}^\Phi$ к величине мощности светового возбуждающего сигнала:

$$S_I^\Phi = I_{\text{вых}}^\Phi / P_{\text{п}}.$$

Как следует из рис. 3, выходная токовая фоточувствительность увеличивается с ростом рабочего напряжения, и, соответственно, выходной сигнал относительно входного светового сигнала (исходящего от светодиода) увеличивается. В данном случае за входной сигнал принимается первичный фототок $I_{\text{п}}^\Phi$, создаваемый при рабочем напряжении, равном контактной разности потенциалов освещаемого перехода, когда усиление еще не наступило. Входная токовая фоточувствительность — отношение фототока к поступающей мощности $S_{\text{вх}}^\Phi = I_{\text{вх}}^\Phi / P_{\text{п}}$ — определяется для каждого фиксированного значения интенсивности светового излучения.

Для приведенной электрической схемы включения фотодиода (рис. 2) коэффициент усиления будет определяться отношением выходного сигнала к входному, т. е. отношением выходной токовой фоточувствительности к входной $M_I = S_I^\Phi / S_{\text{вх}}^\Phi$.

Значения светового тока и коэффициента усиления по току M_I , рассчитанного на основании экспериментально полученных кривых, представленных на рис. 3, сведены в таблицу.

Как видно из таблицы, коэффициент усиления по току увеличивается с ростом рабочего напряжения, а с ростом мощности светового сигнала — уменьшается. Это говорит о том, что исследуемая Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структура эффективна для приема слабых оптических сигналов (рис. 4).

Следует отметить, что выходное напряжение, являясь произведением фоточувствительности и сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$, имеет тем большее значение, чем больше выходное динамическое сопротивление $R_{\text{д}}$:

$$U_{\text{вых}}^\Phi = I_{\text{вых}}^\Phi R_{\text{з}},$$

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{д}} R_{\text{н}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{н}}};$$

$$R_{\text{д}} = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial I_{\text{вых}}},$$

где $R_{\text{з}}$ — сопротивление эквивалентной нагрузки.

Световой ток $I_{\text{св}}^{\text{св}}$ и коэффициент усиления по току M_I при различной мощности светового излучения

$U_{\text{раб}}, \text{В}$	$I_{\text{темн}}, \text{мкА}$	$I_{\text{св}}^{\text{св}}, \text{мкА}$, при различных $P_{\text{п}}$			M_I при различных $P_{\text{п}}$		
		2,4 мВт	3,2 мВт	3,6 мВт	2,4 мВт	3,2 мВт	3,6 мВт
1,15	0,007	0,11	0,25	0,36	1,00	1,00	1,00
2	0,015	0,135	0,30	0,42	1,16	1,17	1,14
4	0,025	0,33	0,60	0,87	2,96	2,36	2,39
6	0,030	0,52	0,90	1,25	4,75	3,58	3,45
8	0,040	0,60	1,12	1,60	5,43	4,44	4,42
10	0,043	0,78	1,50	2,00	7,15	5,99	5,54
12	0,046	0,87	1,72	2,30	8,00	6,88	6,38
14	0,048	1,00	2,05	2,62	9,24	8,24	7,28
16	0,050	1,10	2,26	2,95	10,19	9,09	8,21
18	0,057	1,24	2,50	3,20	11,48	10,05	8,90

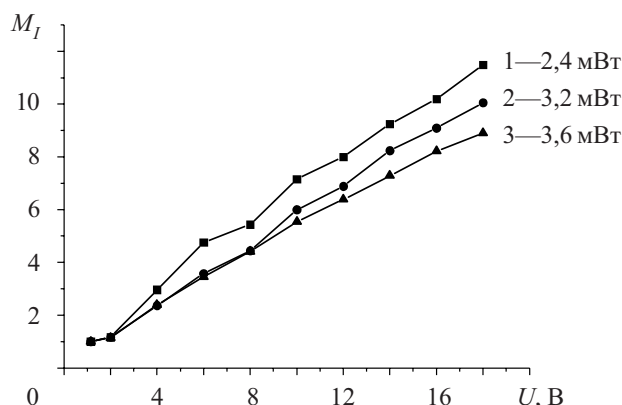


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления по току двухбарьерной структуры от рабочего напряжения при различной мощности падающего светового излучения

Слабую зависимость обратного темнового тока от рабочего напряжения можно объяснить генерационными процессами, протекающими в области объемного заряда запираемого потенциального барьера.

Рассматривая коэффициент усиления фотодиода, управляемого полем, следует учитывать зависимость толщины слоя объемного заряда от рабочего напряжения и процессов фотогенерации носителей. Как видно из выходных характеристик двухбарьерной фотодиодной структуры, пропорционально рабочему напряжению увеличивается фототок, т. е. темпы фотогенерации носителей. Соответственно, основной механизм усиления фототока связан с генерацией неосновных фотоносителей преимущественно в слое объемного заряда, а именно, пропорционально количеству носителей, фотогенерированных в запираемом переходе, переносятся темновые носители через прямовключенный переход.

Связь коэффициента усиления с рабочим напряжением можно выразить через толщину слоя объемного заряда W следующим эмпирическим выражением:

$$M = \frac{I^{\Phi}}{I^{\Phi} - I_{\Pi}^{\Phi}} = \left(\frac{W^{\text{раб}}}{W^{\text{исх}}} \right)^n,$$

где I^{Φ} — фототок при заданном напряжении;

I_{Π}^{Φ} — первичный фототок;

$W^{\text{раб}}$ — толщина слоя объемного заряда при заданном напряжении;

$W^{\text{исх}}$ — толщина слоя объемного заряда при нулевом смещении;

n — определяется закономерностью зависимости толщины слоя объемного заряда от напряжения.

Таким образом, экспериментально установлено, что двухбарьерная фотодиодная Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структура обладает качеством усилителя, в котором малые изменения входного сигнала вызывают большие изменения выходного сигнала.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Основы волоконно-оптической связи / Под ред. Е. М. Дианова. — М.: Сов. радио, 1980.
2. Техника оптической связи / Под. ред. М. А. Тришенкова. — М.: Мир, 1988.
3. А. с. 167399. Трехбарьерный фотодиод Каримова / А. В. Каримов. — 8.05 1991.
4. Каримов А. В., Едгорова Д. М., Гиясова Ф. А. и др. Особенности фотоэлектрических характеристик фотоэлектронепреобразовательных структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 4. — С. 23—28.
5. Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А., Симонов В. В. Конструирование электронных средств. Механические структуры: Справочник (на украинском языке.) — Одесса: Политехперіодика, 2009. — 548 с.

Справочник содержит широкую техническую информацию, которая поможет упорядочить и облегчить процесс конструирования деталей и сборочных единиц механических структур электронных средств. Это технологические требования, сведения о шероховатости и отклонениях формы и расположения поверхностей, о механических разъёмных и неразъёмных соединениях, обеспечении взаимозаменяемости, конструкционных материалах и покрытиях. В справочнике также имеются различные общие сведения, необходимые конструктору.

Справочник предназначен для инженеров электронного аппаратостроения, вместе с тем он может быть полезен студентам соответствующих специальностей технических вузов при курсовом и дипломном проектировании.



К. т. н. Ю. А. ГУНЧЕНКО, к. т. н. О. В. БАНЗАК,
к. т. н. А. В. СЕЛЮКОВ, В. И. КУТАШЕВ

Украина, Одесский нац. ун-т им. И. И. Мечникова,
Одесская нац. академия связи им. А. С. Попова,
Военный институт Киевского нац. ун-та им. Т. Г. Шевченко,
Киевский ин-т автоматики
E-mail: _ua@mail.ru

Дата поступления в редакцию
26.10 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. О. КОВАЛЕНКО
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Предложенное устройство электропитания способно изменять параметры выходного напряжения в зависимости от изменяющихся условий окружающей среды и параметров питаемого оборудования. Приведены примеры его применения для питания электролюминесцентного индикатора.

При эксплуатации лабораторного и специального оборудования возникает проблема обеспечения заданного уровня параметров электропитания в зависимости от требуемых параметров питаемого оборудования и окружающей среды.

Например, в авиации для повышения срока службы средств отображения информации, улучшения эргономических характеристик системы, экономии электроэнергии целесообразно вводить систему регулирования яркости индикатора [1], поскольку при отображении информации происходит многократное динамическое изменение величины яркости индикатора на несколько порядков (чередование эффектов «блик»-«тень»).

При эксплуатации автономных систем, например, сбора и обработки информации, можно в несколько раз повысить время автономной работы при заданной емкости аккумуляторных батарей если оптимизировать подачу напряжения питания для режимов сбора, хранения и обработки с учетом соответствующих им уровней потребляемой мощности [2]. Увеличение времени автономной работы особенно важно для эксплуатации автономных систем в труднодоступных и опасных местах.

Надежность функционирования системы в целом принципиально не может быть выше надежности источника ее питания. Если силовая часть источника электропитания большую часть времени работы недогружена, работает в щадящем режиме, то время наработки на отказ такого источника и, соответственно, системы в целом увеличивается.

Таким образом, разработка принципов функционирования и схемотехнической реализации специализированного устройства электропитания (СУЭ), обладающего рядом перечисленных особенностей, является актуальной научной и технической задачей.

Известен преобразователь, содержащий конвертер и модулятор, который преобразует постоянное на-

пряжение в переменное с необходимой частотой и мощностью [3]. Такой преобразователь экономнее за счет упрощенной части конвертера. Но это решение нецелесообразно при небольших мощностях и не обеспечивает изменение параметров выходного напряжения в зависимости от параметров питаемого оборудования и окружающей среды. Все это ухудшает функционирование оборудования.

Известно также устройство [4], содержащее датчик температуры, с помощью которого контролируется температура ответственного компонента питаемой системы. При достижении температурой верхнего порога допустимых значений прекращается снабжение электроэнергией. Такой источник электропитания предотвращает выход из строя оборудования путем его отключения. Но это не всегда приемлемо, особенно при питании ответственной аппаратуры. Кроме того, такой источник не изменяет параметры выходного напряжения в зависимости от изменяющихся параметров окружающей среды, а это может усложнять работу оборудования.

Задачей предлагаемого СУЭ является обеспечение необходимых параметров устройства электропитания в зависимости от заданного алгоритма функционирования, от параметров оборудования и параметров окружающей среды.

Структурная схема специализированного устройства электропитания приведена на рис. 1.

Входное напряжение от первичного источника электропитания (например, от бортовой сети постоянного тока) через входные клеммы 1 подается на конвертер 2, который представляет собой преобразователь постоянного напряжения ($DC-DC$ -преобразователь), при необходимости — с гальванической раз-

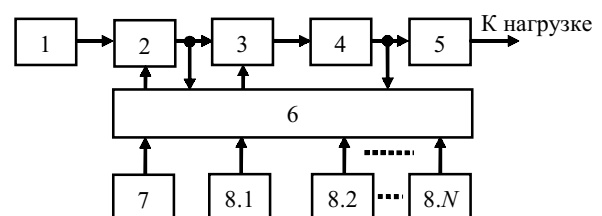


Рис. 1. Структурная схема специализированного устройства электропитания:

1 — входные клеммы; 2 — конвертер; 3 — модулятор; 4 — сглаживающий фильтр; 5 — выходные клеммы; 6 — система управления; 7 — орган управления; 8 — датчики параметров

Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2010, № 1

вязкой. На его выходе получаем постоянное напряжение, уровень которого может изменяться и контролируется системой управления 6. Напряжение с выхода конвертера модулируется с помощью модулятора 3 (*DC-AC-преобразование*) по заданному алгоритму управления алгоритму. Напряжение с выхода модулятора через фильтр 4, который уменьшает пульсации и сглаживает сигнал, подается через выходные клеммы 5 на нагрузку (питаемое оборудование), а также в систему управления для контроля. Орган управления 7 предназначен для изменения алгоритма функционирования системы управления, а следовательно и уровня выходного напряжения и оперативных параметров. Сигналы с датчиков собственных параметров оборудования и параметров окружающей среды 8.1—8.4 подаются в систему управления. В соответствии с этими сигналами корректируется функционирование СУЭ и показатели (частота, скважность, форма) напряжения. Система управления контролирует напряжение на выходе конвертера и подстраивает его работу для формирования необходимого уровня, а также контролирует напряжение на выходе фильтра, чем обеспечивается обратная связь с нагрузкой. Это позволяет избежать влияния параметров нагрузки на выходной сигнал СУЭ.

Схемотехническая реализация предложенного СУЭ для экспериментальных целей приведена на рис. 2.

Основная часть системы управления выполнена на однокристальном микроконтроллере (МК) типа ATmega8, который содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП). На нулевой вход АЦП *ADC0* через резистивный делитель *R13*, *R14* подается напряжение с выхода *DC-DC-конвертера* (U_{C7}). Два других входа АЦП — *ADC1* и *ADC2* предназначены для измерения освещенности с помощью датчиков — фоторезисторов *R15* и *R16*.

МК также содержит три таймера-счетчика, которые могут формировать на выходах контроллера программируемые импульсы с регулируемой частотой и продолжительностью. Два выхода первого таймера *OC1A* и *OC1B* через систему распределения и блокирования на логических элементах *D7*, *D8*, *D10*, *D11*, *D13*, *D14* формируют четыре сигнала (*LIN1*, *HIN1*, *LIN2*, *HIN2*) управления модулятором, выполненным по мостовой схеме с полевыми транзисторами *VT3*—*VT6*. Второй таймер (выход *OC2*) с помощью логических элементов *D9* и *D12* формирует сигналы управления на *DC-DC-конвертер*. Конвертер выполнен по двухтактной схеме на полевых транзисторах *VT1*, *VT2* с трансформатором со средней точкой *TV1*, выпрямителем на диодах *VD1*, *VD2* и фильтром низких частот *L1*, *C7*.

Орган управления представляет собой клавиатуру, собранную на элементах *S1*—*S4*, *VD9*—*VD12*, *R17*, изменения параметров отображаются на жидкокристаллическом дисплее *D15*.

На элементах *D2*, *D3*, *D5*, *D6* собраны драйверы, которые обеспечивают необходимый уровень и амплитуду сигналов управления транзисторами конвертера и модулятора. Дифференциальные цепи *C1*, *R3*, *VD3*; *C2*, *R4*, *VD4*; *C3*—*C6*, *R5*, *R6*, *R11*, *R12*, *VD5*—

VD8 обеспечивают задержку передних фронтов сигналов управления для устранения возможности протекания сквозного тока при одновременном включении соответствующих транзисторов.

Сигнал, пропорциональный току, который потребляется от первичного источника питания, поступает на шунт $R_{ш}$ и сравнивается с опорным напряжением с помощью компаратора *D4*. При превышении максимально допустимого тока (например, при коротком замыкании в нагрузке) формируется сигнал внешнего прерывания *INT* на МК, в результате чего транзисторы закрываются, отключая выходное напряжение.

Выходной фильтр *L2*, *C8* предназначен для сглаживания выходного напряжения и уменьшения помех на нагрузке.

Рассмотрим примеры использования СУЭ при питании электролюминесцентного индикатора (ЭЛИ). На рис. 3 представлены диаграммы работы СУЭ при питании ЭЛИ в условиях изменения внешней освещенности при синусоидальном выходном напряжении с регулируемой амплитудой при формировании положительной полуволны: Φ — сигнал внешней освещенности; IN_1 , IN_2 — сигналы управления транзисторами конвертера *VT1* и *VT2*; TV_1 — сигнал на выходной обмотке трансформатора *TV1*; U_{L1} — напряжение на входе фильтра *L1C7*; U_{C7} — напряжение на выходе фильтра; HIN_1 , LIN_1 , HIN_2 , LIN_2 — сигналы управления транзисторами моста модулятора соответственно *VT3*—*VT6*; U_{L2} — напряжение на выходе моста и входе фильтра *L2C8*, $U_{вых}$ — выходное напряжение.

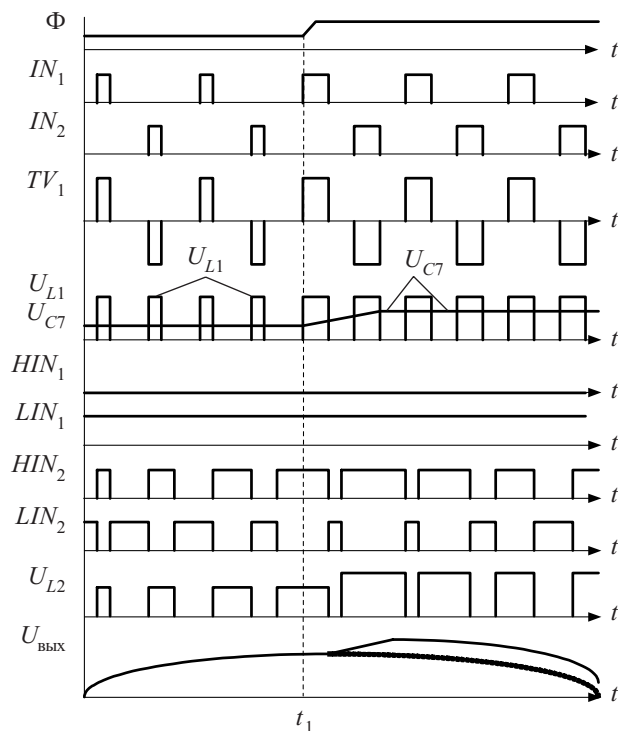


Рис. 3. Диаграммы работы схемы СУЭ при изменении внешней освещенности и синусоидальном выходном напряжении

В момент времени t_1 , например при включении освещения рабочего места оператора, сигнал внешней освещенности Φ изменяется. Это приводит к увеличению ширины импульсов управления конвертером IN_1, IN_2 . Вследствие этого увеличивается ширина импульсов TV_1 на выходе трансформатора TV_1 , что приводит к увеличению напряжения U_{C7} на выходе DC-DC-конвертера.

Ширина импульсов управления мостом модулятора $HIN_1, LIN_1, HIN_2, LIN_2$ изменяется по синусоидальному закону и не зависит от уровня внешней освещенности. Однако повышение напряжения U_{C7} на выходе конвертера соответственно увеличивает амплитуду выходных импульсов с модулятора U_{L2} . Это приводит к увеличению амплитуды выходного синусоидального сигнала $U_{\text{вых}}$ без изменения его частоты и в результате — к увеличению яркости отображения информации ЭЛИ, что компенсирует изменение освещенности рабочего места.

Описанный алгоритм позволяет увеличить срок службы индикатора за счет экономного режима работы и улучшить эргономичные показатели системы индикации за счет подстройки яркости в зависимости от внешнего освещения. При экспериментальной проверке описанного алгоритма срок службы ЭЛИ на основе сульфида цинка, легированного фторидом гольмия, увеличился в 4—6 раз.

На рис. 4 представлены диаграммы работы СУЭ при наличии фотодатчика в ЭЛИ и изменении ширины биполярных импульсов напряжения питания при постоянной их амплитуде: B_0 — яркость электролюминесцентного индикатора при неизменных параметрах напряжения питания; B — яркость при применении СУЭ. Другие обозначения на рисунке такие же как и на рис. 3.

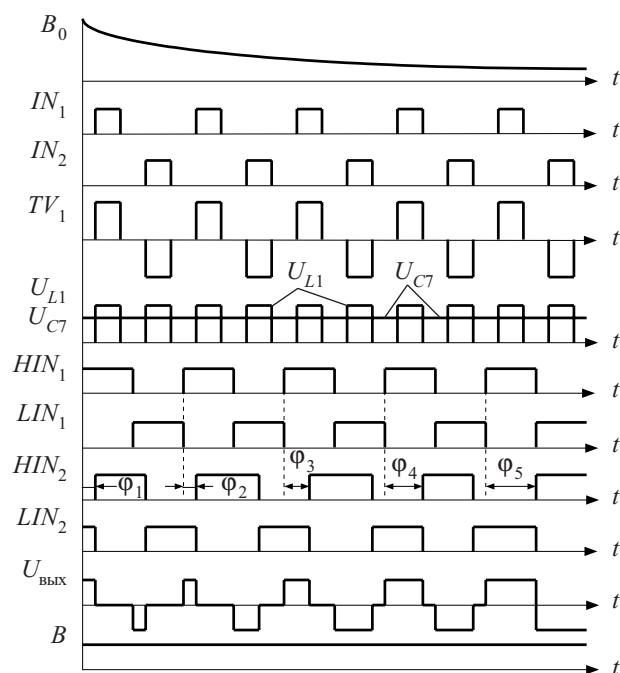


Рис. 4. Диаграммы работы специализированного источника электропитания при старении ЭЛИ и импульсном биполярном выходном напряжении

Как известно [5], вследствие старения уменьшается яркость электролюминесцентных индикаторов (условно показано графиком B_0). Конвертер устройства работает аналогично описанному выше, уровень напряжения U_{C7} на его выходе постоянный.

Пары сигналов управления модулятором HIN_1, LIN_1 и HIN_2, LIN_2 представляют собой одинаковые сигналы — меандры с регулируемым сдвигом ϕ между ними, который изменяется программно в зависимости от яркости индикатора. Чем больший сдвиг, тем больше ширина импульсов на выходе моста $U_{\text{вых}}$. Таким образом, сдвигам ϕ_1 и ϕ_2 соответствует малая ширина импульсов исходного напряжения, сдвигу ϕ_3 — большая ширина, а сдвигам ϕ_4, ϕ_5 — еще большая ширина импульсов. Изменение ширины импульсов напряжения питания $U_{\text{вых}}$ позволяет поддерживать яркость индикатора B на заданном уровне независимо от старения его параметров.

Разработанное СУЭ с фотодатчиком повысило срок службы ЭЛИ в среднем в 4,5 раза за счет обеспечения оптимального напряжения питания в начале срока службы и повышения действующего значения напряжения питания в конце срока службы. При более сложных алгоритмах функционирования, например многофакторных подстройках яркости ЭЛИ в зависимости от освещенности, температуры, старения и т. п., ожидается увеличение времени наработки на отказ индикаторов в 10 и более раз.

Таким образом, предложенное специализированное устройство электропитания обеспечивает необходимые параметры электропитания (уровень, форму, полярность, частоту, скважность напряжения), которые изменяются в зависимости от заданного алгоритма функционирования, от параметров оборудования и параметров окружающей среды (температура, освещенность, давление и т. п.). Это увеличивает срок службы оборудования, повышает качество и эргономичные показатели системы в целом за счет экономного режима функционирования.

Описанное устройство можно рекомендовать для электропитания лабораторного оборудования, работающего в режиме постоянного получения и обработки информации; ответственных приборов, таких как аппарат «искусственная почка»; оборудования, чувствительного к влиянию внешних факторов, и устройств двойного назначения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ленков С. В., Гунченко Ю. А., Жеревчук В. В., Селюков А. В. Зависимость эффективности электролюминесцентных индикаторов от параметров источника питания // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 4 (76). — С. 36—38.
2. Пат 38513 України. Багатофункціональний пристрій електричного живлення / О. В. Селюков, Д. О. Перегудов. — 2009. — Бюл. № 1.
3. Pat. 7,330,366 USA. DC-AC converter / Chih-Chang Lee, Lei-Ming Lee. — 12.02 2008.
4. Pat. 7,358,463 USA. Switching power supply and method for stopping supply of electricity when electricity of switching power supply exceeds rated electricity / Takafumi Mizuno, Kota Otoshi. — 15.04 2008.
5. Ленков С. В., Жеревчук В. В., Лепих Я. И. Меры повышения надежности электролюминесцентных индикаторов // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2008. — № 2. — С. 10—13.

Д. т. н. И. Н. ПРУДИУС, к. т. н. Р. В. ПРОЦЬ,
к. т. н. В. Г. СТОРОЖ

Украина, НУ «Львовская политехника»
E-mail: iprudys@polynet.lviv.ua, vstorozh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
09.11 2009 г.

Оппонент К. В. КОЛЕСНИК
(НИПИ «Союз», г. Харьков)

РАДИОВОЛНОВОЕ ОХРАННОЕ УСТРОЙСТВО НА ИЗЛУЧАЮЩЕМ КАБЕЛЕ

Предложена математическая модель, позволяющая проводить качественный анализ распределения чувствительности охранного устройства по длине излучающего кабеля.

Основу современной системы охраны объектов составляют технические средства обнаружения нарушителя для помещений и открытых территорий, работа которых, хотя и базируется на различных физических принципах, сводится к одному — превратить любое действие человека, направленное на несанкционированное проникновение на объект, в электрический сигнал и после обработки этого сигнала сформировать соответствующее сообщение службе охраны.

При создании рубежей охраны на открытых территориях эти задачи могут быть успешно решены с помощью радиоволновых охранных устройств на излучающих кабелях [1, 2]. Такие устройства формируют рубеж охраны, который нечувствителен к мелким животным, птицам и метеорологическим условиям и полностью повторяет рельеф местности и конфигурацию ограждения. Поэтому они могут быть успешно использованы для обеспечения охраны всего периметра объекта, его отдельного участка, а также отдельного локального объекта.

Принцип построения охранного устройства

Рассмотрим принцип работы охранных устройств на излучающих кабелях. Два кабеля — передающий и приемный — прокладывают параллельно друг другу при расстоянии 1—3 м между ними [1, с. 180; 2,

3]. Вследствие излучения от передающего кабеля в приемном кабеле устанавливается сигнал определенного уровня. Появление нарушителя в зоне расположения кабелей меняет распределение поля между ними, в результате чего амплитуда и фаза сигнала в приемном кабеле также меняется. Если величина и скорость изменения этих параметров соответствует заранее установленным критериям, охранный сигнал формирует сигнал тревоги. Эту конфигурацию устройства целесообразно применять для обеспечения охраны периметра всего объекта.

Для решения других задач оптимальным, на наш взгляд, будет устройство, которое состоит из одного излучающего кабеля — передающего и сосредоточенной приемной антенны. Конфигурация взаимного расположения кабеля и антенны определяется взаимным расположением необходимого рубежа и объекта охраны. Рассмотрим конфигурации охранного устройства для отдельного участка периметра и для отдельного локального объекта, окруженного излучающим кабелем с антенной в центре окружности (рис. 1).

В обоих случаях охранный прибор состоит из передатчика Пд, который подсоединен к излучающему кабелю ИК, и приемника Пм с приемной антенной А. Схема обработки полезного сигнала и формирования тревожного сообщения конструктивно размещены в корпусе приемника. Поскольку излучающий кабель можно располагать непосредственно на поверхности почвы, без предварительной инженерной подготовки территории, такая конфигурация позволяет легко менять территориальное расположение отдельных рубежей охраны, что обеспечивает высокую мобильность устройства.

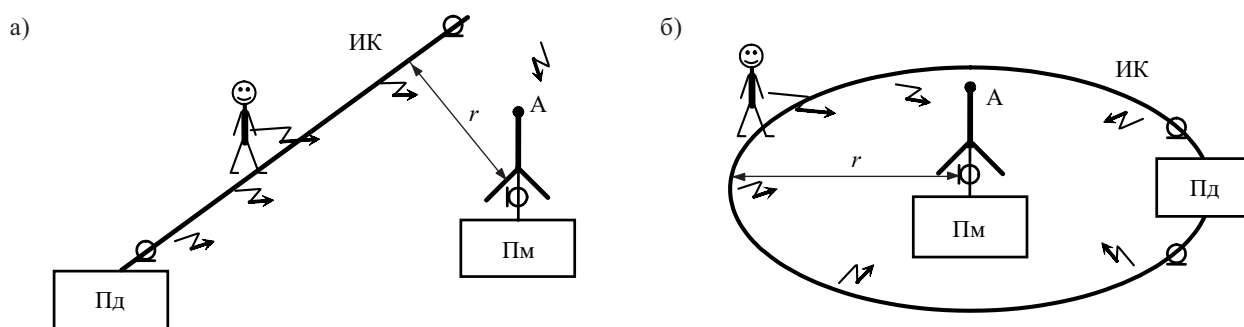


Рис. 1. Обеспечение охраны участка периметра (а) и локального объекта (б)

Моделирование сигналов, вызванных движением нарушителя

Анализ структуры поля излучающего кабеля [4, с. 48] и проведенные исследования [5] позволили сделать следующий вывод. Внешняя поверхность экрана кабеля возбуждается магнитным полем, которое охватывает поперечное сечение кабеля и через отверстия в экране излучается наружу, что аналогично возбуждению проводящего цилиндра совокупностью поперечных магнитных диполей. В итоге на поверхности экрана кабеля наводится продольный электрический ток, который и является причиной возбуждения в окружающей среде электромагнитного поля. Несмотря на то, что в самом кабеле существует режим бегущих волн, распределение тока на поверхности экрана кабеля и поля вдоль него неравномерное. Оно определяется взаимодействием двух волн с различными постоянными распространения. При этом излучающий кабель удобно представить линейной излучающей структурой, распределение тока вдоль которой может быть определено как аналитически, так и экспериментально [5, 6].

Охранные устройства на излучающих кабелях работают, как правило, в метровом и в нижней части дециметрового диапазона волн, где длина волны значительно больше поперечных размеров кабеля. В метровом диапазоне радиус излучающего кабеля, например, RX4-3R соответствует приблизительно $0,002\lambda$, а в дециметровом — $0,012\lambda$. Для кабеля РИ-75-4-12 эти величины еще меньше. Поэтому при анализе поля на основании [7, с. 33; 8, с. 158] излучающий кабель можно рассматривать как нить с током, разбитую на дискретные элементарные электрические излучатели длиной $\Delta l \ll \lambda$ с током I_n , где n — порядковый номер элемента. Тогда все последующие вычисления можно осуществить по известным для таких излучателей выражениям [9, с. 72].

Геометрическая модель расчета сигнала, наведенного в приемной антенне за счет отражения от нарушителя, представлена на рис. 2. Координаты и ориентация каждого элементарного излучателя с током

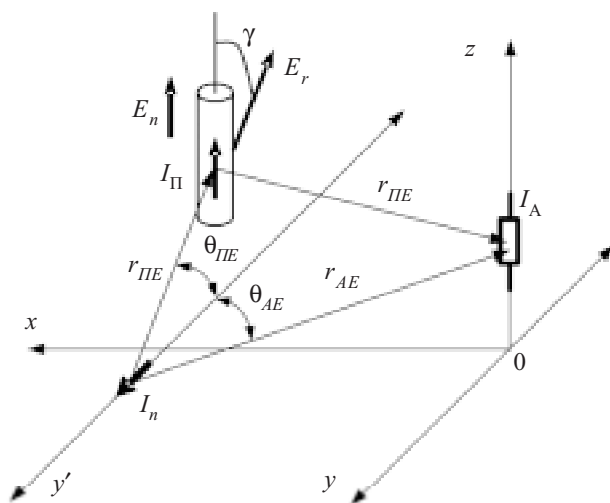


Рис. 2. Модель расчета сигнала от нарушителя

определяются в зависимости от способа укладки излучающего кабеля.

В качестве модели нарушителя примем цилиндрический элемент, в котором в результате действия поля излучающего кабеля наводится эквивалентный ток I_{Π} . Поскольку элемент ориентирован, в основном, перпендикулярно кабелю, этот ток будет пропорционален радиальной составляющей электрического поля элементарных излучателей, на которые условно разбит кабель. С учетом обозначений на рис. 2, вектор напряженности электрического поля, параллельный оси цилиндра, можно вычислить с помощью выражения [9, с. 72]

$$E_n = -j \frac{I_n \Delta l}{2\pi\omega\epsilon_a} e^{-j\beta r_{\Pi E}} \left(\frac{1}{r_{\Pi E}^3} + \frac{1}{r_{\Pi E}^2} \right) \cos\theta_{\Pi E} \cos\gamma, \quad (1)$$

где ω — рабочая частота;

ϵ_a — диэлектрическая проницаемость среды;

β — постоянная распространения;

$r_{\Pi E}$ — расстояние от элементарного излучателя до модели нарушителя;

$\theta_{\Pi E}$ — угол между осью элементарного излучателя и направлением на модель нарушителя;

γ — угол между радиальной составляющей поля элементарного излучателя и осью модели нарушителя.

При условии, что ток вдоль модели нарушителя распределяется равномерно, его величина определяется согласно выражению

$$I_{\Pi} = \frac{1}{Z_e} \sum_n \int_h E_n dh, \quad (2)$$

где Z_e — константа, учитывающая параметры тела;

h — высота тела.

Под действием поля, возбужденного током I_{Π} , в приемной антенне наводится ток I_A , амплитуда и фаза которого зависят от положения модели нарушителя. Поскольку эти токи имеют общую плоскость поляризации, силу тока I_A , а значит и величину полезного сигнала, которым является изменение напряжения на выходе детектора $U_{\text{вых}}$, можно рассчитать согласно [10, с. 71]. Изменяя координаты модели нарушителя, можно моделировать изменение уровня сигнала при перемещении нарушителя в системе «излучающий кабель — антенна» и таким образом определить распределение чувствительности вдоль рубежа охраны.

На рис. 3 показано изменение величины сигналов при перемещении модели нарушителя с внешней стороны рубежа охраны вдоль отдельного прямолинейного участка кабеля на расстоянии 1 м от него (см. рис. 1, а). Антенна в виде вертикального вибратора, расположенного на высоте 3 м, находилась на расстоянии $r=25$ м. Моделирование осуществлено на частоте 60 МГц для участка кабеля длиной 125 м.

Результаты моделирования нормированы к максимальному значению сигнала, который представлен кривой I .

Моделирование показало, что сигнал, вызванный перемещением нарушителя вдоль кабеля, зависит от взаимного расположения излучающего кабеля и ан-

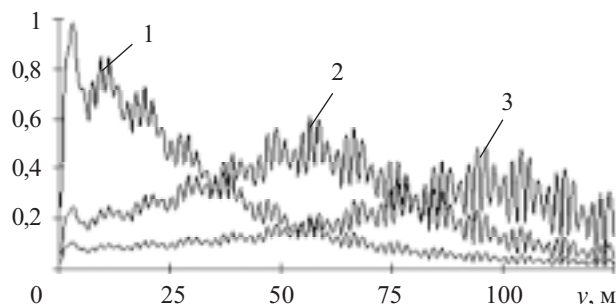


Рис. 3. Изменение сигналов при перемещении модели нарушителя вдоль излучающего кабеля на отдельном участке периметра для случаев размещения антенны на разном расстоянии от начала кабеля, м:

1 — 10; 2 — 60; 3 — 120

тенны. При установке антенны близко к началу кабеля наблюдается значительная неравномерность сигнала. Это осложняет выбор оптимальной величины порога срабатывания в схеме обработки сигнала. Несколько меньшая неравномерность сигнала будет при размещении антенны в конце кабеля.

Если расположение излучающего кабеля и антенны соответствует рис. 1, б, модель нарушителя перемещается вдоль внешней стороны охранного рубежа по окружности. При этом изменение амплитуды сигнала при движении вдоль кабеля носит более равномерный характер (рис. 4), который определяется, в основном, распределением тока вдоль кабеля и потерями в нем.

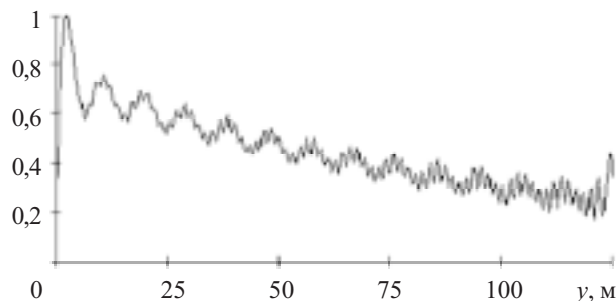


Рис. 4. Изменение сигнала при перемещении модели нарушителя вдоль излучающего кабеля, уложенного вокруг объекта

В реальных условиях на величину сигнала, вызванного перемещением нарушителя, влияет много факторов: границы раздела сред, неоднородность почвы, рельеф местности, индивидуальные особенности перемещения нарушителя. Поэтому предложенная модель позволяет сделать лишь качественный сравнительный анализ распределения чувствительности охранного устройства при разной конфигурации размещения излучающего кабеля, приемной антенны и траектории движения нарушителя.

Структурная схема охранного устройства и результаты исследований

Структурная схема экспериментального образца охранного устройства на излучающем кабеле (ОУИК) показана на рис. 5. Устройство состоит из передатчика и приемника с блоком корреляционной обработки.

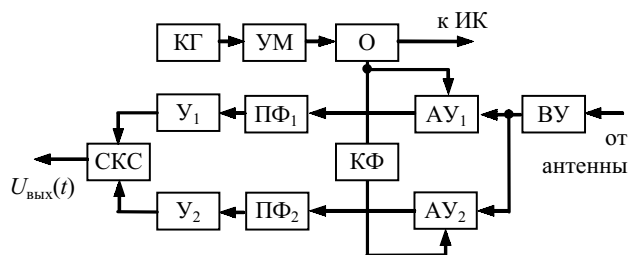


Рис. 5. Структурная схема охранного устройства на излучающем кабеле

Излучающий кабель подключается к передатчику, а антенна — к приемнику.

В состав передатчика входят стабилизированный кварцевым резонатором задающий генератор КГ с возможностью перестраивания в диапазоне частот 55—73,5 МГц, высокочастотный усилитель мощности УМ, который на нагрузке 50 Ом развивает мощность 100 мВт, и ответвитель О опорного сигнала для блока обработки. С учетом экранирующего действия кабеля, мощность излучаемого сигнала не превышает единиц милливатт.

Принятый антенной сигнал усиливается входным усилителем ВУ до уровня около 50 мВ и подается на блок обработки. Корреляционная обработка принятого сигнала осуществляется двумя аналоговыми умножителями АУ₁ и АУ₂ и полосными фильтрами ПФ₁ и ПФ₂. На другие входы АУ₁ и АУ₂ подаются опорные сигналы от ответвителя О, причем на АУ₂ через квадратурный фазовращатель КФ.

Напряжения на выходах АУ₁ и АУ₂ можно представить следующими выражениями:

$$U_{AV1}(\omega t) = \{U_C \sin(\omega t + \varphi_C) + U_{II}(t) \sin[\omega t + \varphi_{II}(t)]\} U_O \cos \omega t; \quad (3)$$

$$U_{AV2}(\omega t) = \{U_C \sin(\omega t + \varphi_C) + U_{II}(t) \sin[\omega t + \varphi_{II}(t)]\} U_O \sin \omega t, \quad (4)$$

где U_C и $U_{II}(t)$ — соответственно усиленные входным усилителем напряжения сигнала, наведенного в антенне от излучающего кабеля, и напряжение от изменения поля нарушителем;

φ_C и $\varphi_{II}(t)$ — фазовые сдвиги этих напряжений;
 U_O — амплитуда опорного напряжения.

Значения $U_{II}(t)$ и $\varphi_{II}(t)$ являются функциями времени, которые определяются местом и скоростью перехода нарушителя через кабель линии охраны. Их спектр лежит в пределах от 0,05 до 5 Гц. С выходов АУ₁ и АУ₂ сигналы поступают на полосовые фильтры ПФ₁ и ПФ₂ и на усилители У₁ и У₂.

Если учесть, что фильтры ПФ₁ и ПФ₂ пропускают сигналы только указанного спектра частот, то на выходе схемы среднеквадратического суммирования СКС без учета коэффициента передачи усилителей получим напряжение

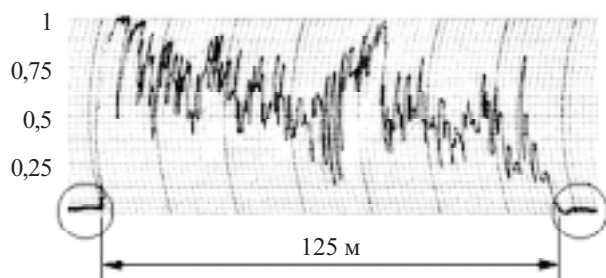


Рис. 6. Изменение сигнала при перемещении нарушителя вдоль кабеля, уложенного вокруг объекта

$$U_{\text{вых}}(t) = |U_0 U_{\text{л}}(t)|, \quad (5)$$

то есть при пересечении кабеля нарушителем величина выходного напряжения пропорциональна только приращению наведенного в антенне напряжения и не зависит от частоты сигнала и его фазы. Это напряжение может быть подано на пороговое устройство для формирования сигнала тревоги.

Экспериментальные исследования устройства проводились в полевых условиях с отрезками кабеля длиной 125 м и с вибраторной антенной, установленной на высоте 3 м, выполненной в виде вертикального несимметричного вибратора длиной 1,2 м с противовесами. Излучающий кабель был уложен непосредственно на почву с травяным покровом. Ширина чувствительной зоны по уровню сигнала, который по меньшей мере в десять раз превышал уровень наводок и флуктуаций, при этом составила 2—4 м вокруг кабеля.

Особенностью исследуемого охранного устройства является то, что независимо от выбранной конфигурации рубежа охраны перемещение людей под антенной и вблизи нее не приводит к изменению сигнала в антенне. Фиксируются только перемещения через кабель или непосредственно вблизи него. Это можно объяснить, во-первых, тем, что возбуждение тока в нарушителе осуществляется, в основном, за счет радиальной составляющей поля излучающего кабеля, во-вторых, тем, что вертикальный несимметричный вибратор практически не принимает сигналов, направленных вдоль его оси.

На рис. 6 показана диаграмма сигнала на выходе СКС от нарушителя, который перемещался с внешней стороны рубежа охраны на расстоянии 0,5—0,7 м от кабеля. Кабель длиной 125 м был уложен в виде окружности, в центре которой расположена антенна.

По краям диаграммы видно, что уровень флуктуаций и помех (они обведены) в десятки раз меньше уровня сигнала от нарушителя. Общий характер изменения амплитуды этого сигнала соответствует результатам моделирования (рис. 4). Локальные неравномерности сигнала обусловлены неоднородностью

участка, где проводились исследования, неровностями поверхности до 0,5 м и наличием насаждений, а также неравномерностью перемещения. Тем не менее, по всей длине кабеля сигнал от нарушителя более чем на порядок превышает фон помех и флуктуаций, что практически исключает вероятность ложного срабатывания устройства.

В ходе экспериментальных исследований различных вариантов построения охранного устройства также было установлено, что подключение передатчика к антенне, а приемника к кабелю не приводит к изменению чувствительности устройства и характера ее распределения вдоль охраняемой зоны. При этом, однако, значительная часть мощности бесполезно излучается в окружающее пространство и может создавать помехи другим радиоэлектронным средствам. В представленном варианте устройства эта часть энергии поглощается, в основном, в согласованной нагрузке кабеля.

Выводы

В результате проведенных исследований предложена простая математическая модель, которая дает возможность проводить качественный анализ распределения чувствительности охранного устройства вдоль излучающего кабеля.

По сравнению с устройством, в котором используются два излучающих кабеля, предложенное устройство с несколькими разнесенными антеннами с приемниками и одним передающим кабелем дает принципиальную возможность определить место пересечения рубежа охраны нарушителем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Петраков А. В. Защита и охрана личности, собственности, информации: Справ. пособие.— М.: Радио и связь, 1997.
2. Системы периметральной сигнализации фирмы Geoquip // Охранные системы.— 2001.— № 3 (21).— С. 22—24.
3. Прудис І. Н., Проць Р. В., Сторож В. Г. Засіб охорони периметру на випромінюючих кабелях // Захист інформації.— 2006.— № 2.— С. 67—74.
4. Вэнс Э. Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели.— М.: Радио и связь, 1982.
5. Сторож В. Г., Проць А. Р. Моделювання розподілу електричного струму вздовж випромінюючого кабелю // Вісник НУ «ЛП». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації».— 2001.— № 428.— С. 190—192.
6. Чаплин А. Ф., Пакош З. М., Ящипин Е. М., Тебенько Я. В. Спектр волн коаксиального кабеля с прореженной внешней оплеткой // Электросвязь.— 1991.— № 6.— С. 17—19.
7. Уолтер К. Антенны бегущей волны.— М.: Энергия, 1970.
8. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн.— М.—Л.: Энергия, 1967.
9. Марков Г. Т., Петров Б. М., Грудинская Г. П. Электродинамика и распространение радиоволн.— М.: Советское радио, 1979.
10. Кочержевский Г. Н. Антенно-фидерные устройства. Учебник для ВУЗов.— М.: Радио и связь, 1981.

К. ф.-м. н. С. В. ГЕРУС, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,
д. т. н. А. А. СОКОЛОВСКИЙ, к. ф.-м. н. М. П. ТЕМИРЯЗЕВА,
к. т. н. Б. В. ХЛОПОВ

Россия, г. Фрязино, Филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН; г. Москва, ЦНИРТИ им. акад. А. И. Берга
E-mail: alexandr-mityagin@yandex.ru; 208_otd@mail.ru

Дата поступления в редакцию
19.12.2009 г.

Оппонент д. т. н. В. С. СИТНИКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

ОСОБЕННОСТИ СТИРАНИЯ ИНФОРМАЦИИ С МНОГОДИСКОВЫХ ВИНЧЕСТЕРОВ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Приведены результаты исследования качества стирания информации с многодисковых накопителей на жестких магнитных дисках магнитными импульсными полями и даны рекомендации для выбора параметров стирающих импульсов.

Хорошо известно, что импульсные магнитные поля используются для уничтожения информации на магнитных носителях [1]. Особенности конструкции современных накопителей на жестких магнитных дисках (НЖМД) является их многодисковая структура, а также наличие дополнительных металлических элементов, разделяющих диски. Корпус НЖМД изготовлен, как правило, из алюминиевого сплава с утолщениями в виде ребер жесткости. В том или ином виде такие элементы присутствуют в винчестерах разных производителей. Указанные особенности конструкции приводят к экранированию достаточно больших участков дисков при воздействии на них импульсными магнитными полями, что снижает надежность стирания информации. Коэрцитивная сила магнитных материалов, используемых в современных НЖМД, может достигать 450 кА/м [2], что определяет высокие требования к магнитным стирающим системам. Существующий способ контроля качества стирания информации основан на регистрации магнитного рельефа поверхности каждого диска НЖМД методами силовой микроскопии [3]. Первый этап контроля — регистрация исходного магнитного рельефа, соответствующего записанной информации, а на втором этапе регистрируется магнитное изображение поверхности после воздействия на винчестер стирающим магнитным полем. Для надежного стирания информации необходимо оптимальное соотношение длительности и амплитуды стирающего импульса.

Экспериментальные результаты

Стирание информации с НЖМД осуществлялось последовательным воздействием продольным (лежащим в плоскости диска) и поперечным (ортогональным плоскости диска) магнитным полем со следующими параметрами импульсов:

— продольное поле: амплитуда 720—760 кА/м, длительность импульса по уровню 0,5 составляла 1,36—1,4 мс;

— поперечное поле: амплитуда 640—650 кА/м, длительность импульса по уровню 0,5 составляла 5,2—5,4 мс.

В работе исследовалось уничтожение информации на современных НЖМД, отличающихся высокой плотностью записи: Hitachi Travelstar 5K500 (2,5", 3 магнитных диска, 0,5 ТБ); Hitachi Ultrastar A7K1000 (5 магнитных дисков, 1 ТБ); Seagate Barracuda <ST31000333AS> (4 магнитных диска, 1 ТБ); Seagate Barracuda ES2 <ST31000340NS> (4 магнитных диска, 1 ТБ).

Качество стирания информации контролировалось методами атомной силовой микроскопии путем регистрации магнитного рельефа поверхности каждого диска в нескольких точках до и после воздействия импульсными магнитными полями. После воздействия снималось по 5 картин остаточного магнитного рельефа с различных участков каждой поверхности каждого диска. На рис. 1 приведен характерный магнитный рельеф поверхности диска со специально записанной информацией, из которого видно, что атомный силовой микроскоп «Смена А» [4] обеспечивал пространственное разрешение в магнитном изображении не хуже 50 нм с высоким контрастом между физическими нулем и единицей.

На рис. 2 приведена характерная магнитная картина поверхности одного из дисков трехдискового винчестера Hitachi Travelstar 5K500 после воздействия магнитными полями стирающего устройства. Здесь

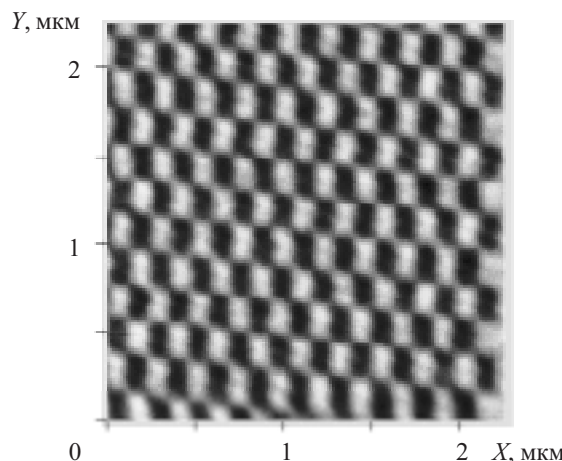


Рис. 1. Магнитный рельеф поверхности диска со служебной информацией

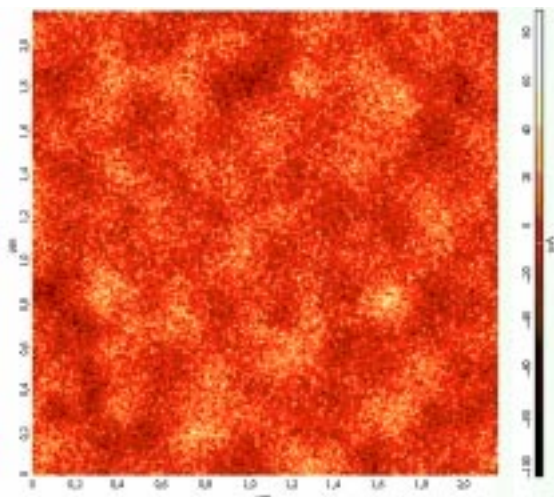


Рис. 2. Характерная картина магнитного рельефа поверхности одного из дисков винчестера Hitachi Travelstar 5K500 после воздействия импульсным магнитным полем

видно, что информация полностью стерта. На каждой поверхности каждого диска магнитный рельеф снимался в 5 точках. Все 30 картин аналогичны приведенной на рис. 2, что подтверждает полное уничтожение информации на НЖМД.

В отличие от этого случая, такое же воздействие на диски НЖМД Hitachi Ultrastar A7K1000 не приводит к полному стиранию информации. На рис. 3 показаны участки, на которых полностью стерта информация, и участки с ее остатками. Естественно, чтение этой информации штатными магнитными головками НЖМД практически неосуществимо. Методами атомной силовой микроскопии этот рельеф может быть визуализирован, однако восстановление остаточных фрагментов информации сопряжено с большими техническими трудностями. Неполное стирание информации, очевидно, связано с экранировкой импульсного магнитного поля металлическими элементами НЖМД. Заметную роль при этом играют и

алюминиевые подложки (толщиной около 1 мм) самих магнитных дисков.

Для проверки этого предположения один из НЖМД перед стиранием информации был разобран, воздействие магнитным полем осуществлялось непосредственно на каждый диск в отдельности. В таком случае стирание информации было полным, что подтверждает достаточность амплитуды применяемого магнитного импульса для надежного перемагничивания материалов, используемых в исследованных НЖМД.

Аналогичные результаты были получены и для НЖМД Seagate Barracuda <ST31000333AS> (4 магнитных диска, 1 ТБ); Seagate Barracuda ES2 <ST31000340NS> (4 магнитных диска, 1 ТБ).

Главный вывод из этих экспериментов заключается в том, что использованные импульсные магнитные поля превышают коэрцитивную силу магнитных материалов, применяемых в современных винчестерах. Этих полей достаточно, чтобы эффективно и надежно стереть информацию с винчестеров, в которых рабочий магнитный слой нанесен на стеклянные подложки. Ситуация с уничтожением информации на наиболее распространенных многодисковых винчестерах с дисками из алюминиевого сплава намного сложнее вследствие экранирования импульсного магнитного поля металлическими частями НЖМД.

Экранирование магнитного импульса в многодисковых винчестерах

Характерные элементы конструкции НЖМД, влияющие на экранировку импульсного магнитного поля, это корпус с дополнительными ребрами жесткости и металлическими накладками, алюминиевые подложки дисков, междисковые разделительные экраны толщиной около 0,5 мм (рис. 4).

При используемых напряженностях магнитного поля ($H_0 > 400$ кА/м) и временных параметрах импульсов решающую роль для ослабления внешнего поля играет электрическая проводимость материала, а не его магнитная проницаемость.

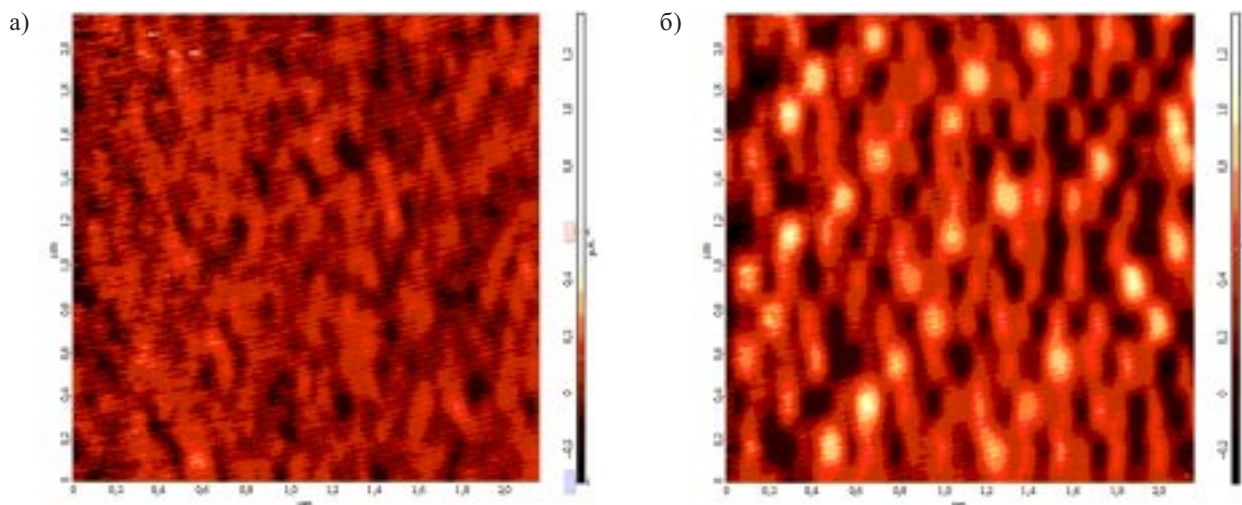


Рис. 3. Характерный магнитный рельеф разных участков поверхности одного из дисков винчестера Hitachi, 1 ТБ после воздействия импульсным магнитным полем:

а — информация полностью стерта; б — информация не стерта

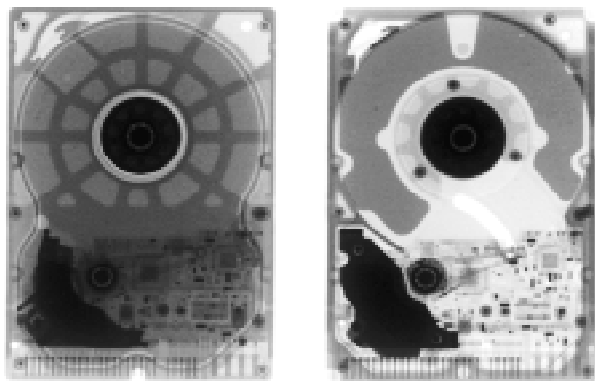


Рис. 4. Рентгеновские снимки НЖМД различных производителей, демонстрирующие особенности элементов экранировки

Как известно [5, с. 283], амплитуда напряженности переменного магнитного поля круговой частоты ω уменьшается с проникновением в немагнитный проводник на глубину z по закону

$$H(z) / H_0 = \exp(-z / \delta), \quad (1)$$

где H_0 — амплитуда напряженности поля на поверхности проводника;

δ — глубина скин-слоя;

$$\delta = \sqrt{2\rho / (\mu_0 \omega)}, \quad (2)$$

μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

ρ — удельное сопротивление проводника, для алюминия $\rho_{Al} = 2,82 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

При использовании импульсного магнитного поля необходимо рассматривать действие частотного экранирования (1), (2) с учетом всего спектра частот, составляющих используемый импульс. Эта громоздкая процедура предполагает представление исходного импульса в виде интеграла Фурье, воздействие на каждую спектральную компоненту по закону (1), (2) и последующее восстановление результирующего импульса посредством обратного преобразования Фурье с учетом фазовых сдвигов каждой спектральной компоненты.

В настоящей работе использовался другой подход. Магнитное поле $H(z, t)$ в одномерной экранирующей среде описывается уравнением [5, с. 279]

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\mu_0}{\rho} \frac{\partial H}{\partial t}$$

с соответствующими граничными условиями и начальными условиями, определяющими форму стирающего импульса. Эта задача решается стандартными численными методами [6].

На рис. 5 приведены результаты численного моделирования прохождения исходных магнитных импульсов разной длительности (длительность импульсов по уровню 0,5—1,4 мс и 5,4 мс) через экранирующий слой алюминия различной толщины. В качестве исходных в расчетах использовались импульсы, измеренные в экспериментальном стирающем устройстве.

Из приведенного рисунка видно, что по мере прохождения через слой металла импульс магнитного

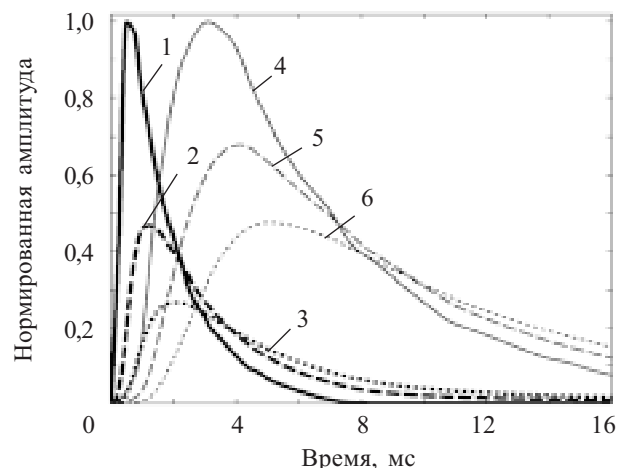


Рис. 5. Изменение формы и амплитуды магнитных импульсов различной длительности (1—3 — 1,4 мс; 4—6 — 5,4 мс) при их экранировании слоем алюминия различной толщины d :

1, 4 — $d=0$ (исходные импульсы); 2, 5 — $d=4$ мм; 3, 6 — $d=8$ мм

поля не только уменьшается по амплитуде, но и расширяется, что легко объяснимо ослаблением высокочастотных компонент импульса.

Для объяснения островного характера уничтожения информации (см. рис. 3) с многодисковых НЖМД (4—5 дисков) была решена задача распределения амплитуды напряженности импульсного магнитного поля внутри многодискового НЖМД с учетом экранирующего действия корпуса. Уравнение (3) решалось методами компьютерного моделирования для геометрии, показанной на рис. 6, которая соответствует типичной структуре современного многодискового НЖМД.

Характерные размеры элементов, показанных на рис. 6, составляют: толщина дисков и крышки НЖМД

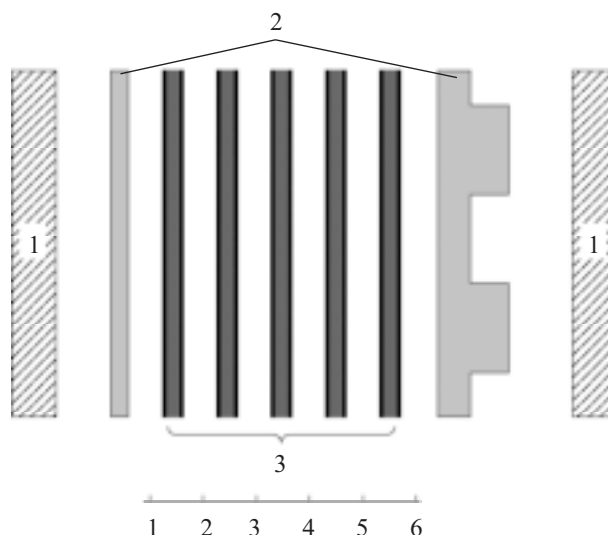


Рис. 6. Схематическое изображение расположения экранирующих элементов НЖМД:

1 — стирающая магнитная система; 2 — крышка и корпус НЖМД; 3 — алюминиевые диски с магнитным носителем (на шкале показаны номера промежутков между дисками)

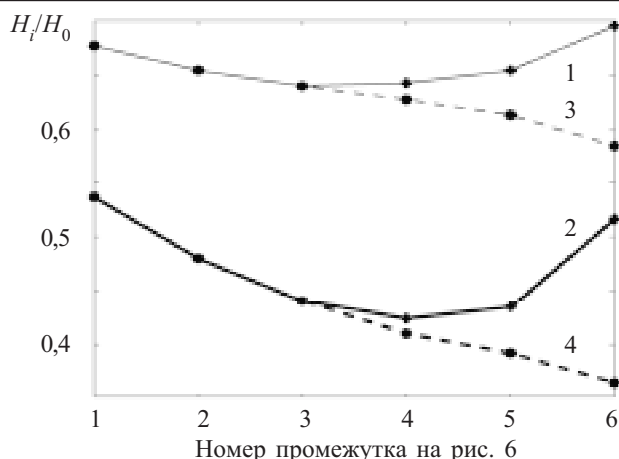


Рис. 7. Относительная амплитуда магнитного импульса (H_i/H_0) в различных промежутках между дисками НЖМД. Кривые 1 и 2 соответствуют импульсам 1 и 4 на рис. 5, кривые 3 и 4 соответствуют полям под утолщениями корпуса НЖМД

— по 1 мм, толщина корпуса в тонких местах — 2 мм, в ребрах жесткости — 5,5 мм.

Поле внутри каждого из промежутков, обозначенных на рис. 6, определялось как полусумма полей, прошедших от правой и левой частей магнитной стирающей системы 1, причем следует отметить, что распределения поля в разных сечениях НЖМД различаются вследствие разной толщины корпуса.

На рис. 7 приведено распределение относительной амплитуды импульса магнитного поля H_i/H_0 различной длительности в сечениях НЖМД, изображенного на рис. 6. Здесь H_0 — напряженность поля на поверхности проводника; H_i — напряженность поля в промежутках между проводниками ($i=1, 2, \dots, 6$).

Таким образом, для винчестеров, содержащих пять дисков (например Hitachi Ultrastar A7K1000, A7K2000 и др.), ослабление магнитного поля в зависимости от длительности импульса может достигать 30—70%. Как и следовало ожидать, при более длинном импульсе ослабление магнитного поля меньше, и его распределение является более однородным.

Исходя из результатов, приведенных на рис. 7, и учитывая, что коэрцитивная сила для магнитных материалов, применяемых в современных НЖМД, может достигать 450 кА/м [2], можно сделать вывод, что амплитуда магнитного импульса, необходимая для гарантированного уничтожения информации, должна превышать $450/0,37=1200$ кА/м при его длительности 1,4 мс и $450/0,58=775$ кА/м при длительности 5,4 мс. Степень превышения указанных величин зависит от «прямоугольности» петли гистерезиса применяемых магнитных материалов.

Следует отметить, что для НЖМД с меньшим количеством дисков условия стирания информации при заданной амплитуде и длительности магнитного импульса являются более благоприятными, т. е. геометрия, приведенная на рис. 6, соответствует наихудшему случаю с точки зрения надежного стирания информации. Иными словами, универсальное стирающее устройство, гарантированно уничтожающее информацию с пятидисковых НЖМД, несомненно бу-

дет уничтожать информацию с НЖМД с меньшим количеством дисков.

Из приведенных расчетов следует, что для надежного стирания информации с многодисковых винчестеров из магнитного материала, имеющего коэрцитивную силу порядка 450 КА/м [2], необходимо формировать магнитные импульсы длительностью более 5 мс с амплитудой не менее 800 кА/м. Из зависимостей на рис. 7 (кривые 3, 4) видно, что на магнитных дисках имеются зоны повышенного экранирования с пониженной напряженностью стирающего магнитного поля, на которых могут сохраняться остатки магнитного рельефа исходной информации. Следует отметить, что аналогичная картина наблюдается и на четырехдисковых винчестерах фирмы Seagate, в которых диски разделены дополнительными алюминиевыми экранами.

Качество стирания информации с многодисковых винчестеров можно повысить при меньшей напряженности магнитного поля, если применить магнитную систему [7]. Особенностью указанной магнитной системы является ее расположение в местах минимальной экранировки и меньший объем создаваемого магнитного поля, что существенно снижает энергозатраты. При этом в момент действия магнитного импульса магнитные диски НЖМД вращаются, и за время действия магнитного импульса все части дисков будут проходить область минимальной экранировки. При номинальной частоте вращения дисков современных винчестеров 7200 об/мин один оборот, соответственно, совершается за 8,5 мс, что соизмеримо со временем действия магнитного импульса.

Таким образом, представленные результаты исследования качества стирания информации с многодисковых винчестеров магнитными импульсными полями позволили сделать вывод о том, что островной характер стирания информации объясняется экранированием магнитного поля металлическими элементами конструкции НЖМД.

С увеличением длительности магнитного импульса снижаются требования к его амплитуде, необходимой для надежного стирания информации с современных многодисковых НЖМД

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуляев Ю. В., Герус С. В., Житковский В. Д. и др. Уничтожение информации с накопителей на жестких магнитных дисках // Инженерная физика.— 2004.— № 2.— С. 2—12.
2. Roy A. G., Jeong S., Laughlin D. E. High-coercivity CoCrPt-Ti perpendicular media by in situ interdiffusion of CrMn ultrathin overlayers // IEEE Transactions on Magnetics.— 2002.— Vol. 38, N 5, part 1.— P. 2018—2020.
3. Герус С. В., Митягин А. Ю., Соколовский А. А. и др. Экспериментальное исследование качества и полноты уничтожения информации с жестких магнитных дисков. // Междунар. науч.-технич. конфер. «Информационные технологии и моделирование приборов и техпроцессов в целях обеспечения качества и надежности». — Сусс, Тунис.— 2006.— Т. 1.— С. 38—43.
4. <http://www.ntmdt.ru>
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред.— М.: Наука, 1982.
6. MATLAB 7.9.0 (R2009b), <http://www.mathworks.com/>
7. Пат. 35919 РФ. Устройство для стирания записи с носителей на жестких магнитных дисках / Герус С. В., Соколовский А. А., Гуляев Ю. В. и др.— 10.02 2004.

К. т. н. Г. Ю. ЩЕРБАКОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: Galina_onpu@mail.ru

Дата поступления в редакцию
01.10 2009 г.

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

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ БИС С ПОМОЩЬЮ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Предложен метод выбора количества избыточных элементов БИС без неоправданного увеличения площади БИС.

Современный этап развития полупроводникового производства характеризуется ростом плотности компоновки БИС, из-за чего возрастает количество производственных дефектов и сокращается выход годных БИС.

Устойчивость к появлению дефектов у некоторых типов БИС обеспечивается путем структурной избыточности (резервирования), т. е. добавления к их схеме дополнительных элементов. Этот подход характерен для схем, состоящих из таких модулей как элементы памяти и цифровой логики. Однако количество дополнительных (резервных) элементов должно быть обоснованным, чтобы не вызывать неоправданного роста площади ИС.

Традиционно количество дополнительных элементов БИС определяется при требуемом уровне выхода годных с помощью различных компаунд-распределений на основе обобщенного распределения Пуассона [1—4]. Точность в значительной мере обусловлена типом функции, применяемой при обобщении распределения Пуассона. Эти функции разнятся количеством параметров, позволяющих оценивать статистические характеристики распределения дефектов на поверхности пластины при производстве БИС. Такими параметрами являются: постоянный для данного производства и типа ИС коэффициент (учитывает систематические технологические дефекты), среднее количество дефектов на единицу площади, коэффициент кластеризации, учитывающий неравномерность распределения этих дефектов, размер «блока» — единицы измерения размера кластера.

Вид компаунд-распределения (крупнокластерное или среднекластерное отрицательное биномиальное распределение) выбирается в зависимости от соотношения размеров кластера и анализируемой области. Для БИС с площадью больше квадратного дюйма большую точность при оценке выхода годных и, следовательно, при выборе количества дополнительных элементов дает среднекластерное отрицательное биномиальное распределение.

Оценка среднего количества дефектов проводится с учетом типа ИС, особенностей производственных линий и процессов обработки пластин.

При определении коэффициентов кластеризации применяется понятие «блока» как единицы измерения площади кластера [1]. Блоки статистически независимы друг от друга. Внутри блоков дефекты распределены равномерно, коррелированы между собой, их число в каждом блоке имеет отрицательное биномиальное распределение.

Как правило, для подобного исследования на производстве с целью сокращения затрат предъявляется малое количество пластин (10—12). В статистике это — малая выборка. Но определить размер блока в случае малых выборок сложно, т. к. ошибки оператора, сбои оборудования при измерении обуславливают искажение данных о дефектах при малом их объеме. Методы, основанные на сравнении распределений этих данных, чувствительны к отклонениям («шуму») данных. Влияние этих недостатков может быть уменьшено с помощью помехоустойчивых процедур кластеризации [4] при определении размера блока.

Настоящая статья посвящена разработке метода, позволяющего формализовать процедуру оценки необходимой избыточности БИС (при заданном уровне выхода годных) на основе выбора размера блока среднекластерного отрицательного биномиального распределения с помощью помехоустойчивого мультистартового субградиентного итеративного метода кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования.

Анализ методов оценки выхода годных ИС

При оценке выхода годных ИС используют компаунд-распределения дефектности.

Дефекты, приводящие к потере годных ИС при их производстве, распределены внутри пластины неравномерно, образуют кластеры, поэтому мелкокластерное распределение, не учитывающее этот эффект, дает меньшую точность при оценке выхода годных [4].

Вероятность того, что число дефектных модулей k будет равно 0 в рамках компаунд-распределения Пуассона для крупнокластерного распределения, когда вся микросхема располагается внутри одного блока, определяется согласно формуле

$$Y = P(k = 0) = (1 + N\lambda_m / \alpha_m)^{-\alpha_m}, \quad (1)$$

где k — число дефектных модулей;

N — размер микросхемы в модулях [1, 2];

λ_m — среднее число дефектов на один модуль;

α_m — параметр кластеризации.

Размер блока для крупнокластерного распределения равен всей площади пластины (в модулях). Достоинства такого представления — простота определения α_m и λ_m методом «окна» [3], нет необходимости определять размер блока. Недостаток — низкая точность для микросхем высокой степени интеграции и большой площади, когда размер микросхемы становится больше размера кластера.

Для среднекластерного распределения, когда размер блока B лежит в пределах $1 < B < N$, формула (1) преобразуется к виду

$$Y = P(k=0) = (1 + B\lambda_m / \alpha_m)^{-\frac{N}{B}\alpha_m}.$$

Среднекластерное распределение включает в себя крупнокластерное и мелкокластерное распределения как предельные случаи. Коэффициент кластеризации этого распределения α внутри блока постоянен, но возрастает, когда рассматриваемая область включает в себя несколько блоков. Для определения размеров блока разработан ряд методов. Однако в [1] авторы констатируют, что в случае малых выборок (малого количества исследуемых пластин) даже сочетанием этих методов определить размер блока сложно.

Следует учитывать также, что размер блока итерационно определяется заново для каждого вида производства и разных типов ИС. Это определение в пределах пластины предполагает перебор различных сочетаний количества и расположения модулей, входящих в блок. Все варианты распределения выхода годных ИС чувствительны к шумовым измерениям при контроле по малым выборкам [1]. Поэтому в настоящей работе автором предложен метод, позволяющий формализовать процесс определения размеров блока для оценки структурной избыточности БИС с помощью среднекластерного распределения на базе помехоустойчивого мултистартового субградиентного итеративного метода кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования [5].

Оценка параметров среднекластерного распределения

Задача кластеризации состоит в разбиении множества образов объектов на группы (кластеры) с учетом сходства объектов, которое определяют через расстояния в признаковом пространстве. При отсутствии априорной информации о форме исследуемых кластеров и с учетом предполагаемой зашумленности выборки для решения задач оптимизации разработан помехоустойчивый субградиентный итеративный метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования [6]. Для повышения помехоустойчивости кластеризации на основе этого метода оптимизации разработан мултистартовый субградиентный итеративный метод кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования.

Экспериментальные исследования помехоустойчивости этого метода кластеризации показали, что относительная погрешность определения минимума тестовой функции составила 8,32% при величине отношения амплитуд сигнала и шума 1,17 [5].

Предлагается использовать этот метод кластеризации при оценке параметров среднекластерного рас-

пределения, поскольку при анализе выхода годных БИС, как правило, мал объем выборок (количество исследуемых пластин), что может привести к зашумленности выборки.

Для его реализации предлагается следующая процедура.

1. Полупроводниковые пластины разделяются на модули равной площади [1].

2. Определяется количество дефектов на модуле λ_m и коэффициент кластеризации для модуля α_m по методике [4]. Тогда

$$\hat{\lambda}_m = \bar{X} = \frac{1}{SW} \sum_{i=1}^{SW} X_i,$$

где $\hat{\lambda}_m$ — оценка λ_m ;

\bar{X} — среднее число дефектов на модуле;

S — количество пластин;

W — количество модулей на пластине;

X_i — число дефектов на i -м модуле ($i=1, \dots, SW$).

Оценка α_m проводится с учетом того, что число дефектов X имеет отрицательное биномиальное распределение с параметрами λ_m , α_m . Оценка дисперсии будет иметь вид

$$\hat{V}(X) = \frac{1}{SW} \sum_{i=1}^{SW} X_i^2 - \bar{X}^2,$$

а оценка коэффициента кластеризации для модуля

$$\hat{\alpha}_m = \frac{\bar{X}^2}{\hat{V}(X) - \bar{X}}.$$

Коэффициент кластеризации блока определяется как $\hat{\alpha}_b = \hat{\alpha}_m$ [1].

3. С заданной точностью θ определяется количество, центр, диаметр кластеров с помощью помехоустойчивого мултистартового метода кластеризации [5].

4. Для каждого из этих вариантов кластеров определяется максимальное целое число модулей, входящих в кластер.

5. Формируется вариационный ряд площадей кластеров, выраженных в модулях. Эти значения (I, J) принимаются как значения размеров блоков для первой итерации.

6. Определяется размер блока.

6.1. По методике [4] последовательно формируется матрица оценок коэффициентов кластеризации α для потенциальных размеров блока от 1×1 и до $I \times J$ модулей; отыскивается наибольший размер $I \times J$, для которого $\hat{\alpha}(I, J)$ меньше, чем $\hat{\alpha}(1, 1)$, который и принимается за размер блока.

По второму методу оценки размер блока $B_1 \times B_2$ определяется в два этапа (количество модулей по длине I и по ширине J кластера). Исследуемая пластина делится на блоки размером $(I \times J)$ модулей. Чтобы определить B_1 и B_2 , формируются две матрицы, содержащие результат проверки по критерию χ^2 статистической независимости между соседними блоками. Значения I и J , которые определяют выбор B_1 и B_2 , определяются по первой строке и столбцу соответствующих матриц, в которых значения χ^2 значительно ниже, чем в других.

6.2. Последовательно, начиная с минимального, сравниваются значения (I, J) из вариационных рядов, полученных в пп. 5 и 6.1. При совпадении результатов с заданной точностью ϕ принимается минимальный размер блока, который затем сравнивается с результатами экспериментальной оценки выхода годных.

Если оценки размеров блока в пп. 5 и 6.1 отличаются более чем на ϕ , рекомендуется повысить точность кластеризации (уменьшить θ) и повторить расчеты по пп. 3—6. Если различаются все три оценки размеров блока по пп. 5 и 6.1, выбирают тот размер блока, который при сравнении с результатами экспериментальной оценки выхода годных дает меньшую ошибку.

7. Определяется количество дефектов блока $\lambda_b = B\lambda_m$. Здесь $B = B_1 B_2$ — площадь блока.

Оценка структурной избыточности БИС

При оценке структурной избыточности рассчитывают выход годных ИС, содержащих N идентичных модулей, из которых только M — необходимые для функционирования, а $(N-M)$ — избыточные. Эти избыточные модули могут заменять любой из M модулей, если он дефектен.

Оценка структурной избыточности БИС проводится в такой последовательности.

1. По методике [4], с учетом того, что ИС не обязательно включает в себя целое число блоков (оценку размеров блока проводят для пластины), поверхность ИС разделяется на области, принадлежащие разным блокам. Общее число свободных от дефектов модулей ИС равно суммарному количеству таких модулей в ее частях. Так как эти области принадлежат различным блокам, распределение числа свободных от дефектов модулей $P_G(k)$ равно вероятности того, что ровно k из N модулей свободны от дефектов $a(k, N)$, т. е. определяется по формуле [3, 4]

$$P_G(k) = a(k, N) = C_N^k \sum_{l=0}^{N-k} (-1)^l C_{N-k}^l \left(1 + \frac{(k+l)\lambda_m}{\alpha_m} \right)^{-\alpha_m}.$$

2. Определяется количество и размеры указанных областей в блоках или модулях.

3. Определяются вероятности того, что ровно k_i модулей, свободных от дефектов, имеется в i -й области:

$$P(G_i = k_i) = a(k_i, A_i),$$

где A_i — площадь i -й области, содержащейся в одном блоке.

4. Определяются вероятности того, что ровно k_{is_i} модулей, свободных от дефектов, имеются в j -й части i -й области. Эти вероятности определяются посредством композиции [7] по k_i значений вероятностей $a(k_{i1}, A_i)$, $a(k_{i2}, A_i)$, ..., $a(k_{is_i}, A_i)$.

Здесь j — номер части области, $j=1, \dots, s_i$; k_{ij} — число бездефектных модулей в j -й части i -й области,

$$k_i = \sum_{j=1}^{s_i} k_{ij} \quad [4].$$

5. С учетом того, что число бездефектных модулей ИС G определяется как сумма числа бездефектных модулей z ее областей G_i [4]

$$G = \sum_{i=1}^z G_i,$$

вероятность $P_{(R_1, R_2)}(G=k)$ получения k бездефектных модулей будет определяться посредством композиции [7] значений вероятностей $P(G_1=k_1)$, $P(G_2=k_2)$, ..., $P(G_z=k_z)$.

Здесь $k = \sum_{j=1}^z k_{ij}$; R_1 и R_2 — расстояния по вер-

тикали и горизонтали между левым верхним углом ИС и соответствующими границами блока.

После учета всех возможных вариантов размещения, т. е. (R_1, R_2) , вычисляется среднее распределение

$$P_G(k) = \frac{1}{C_1 C_2} \sum_{R_1=1}^{C_1} \sum_{R_2=1}^{C_2} P_{(R_1, R_2)}(G=k).$$

6. Тогда выход годных ИС определяется [3, 4] как

$$Y_{IS} = \sum_{k=M}^N P_G(k).$$

Оценка выхода годных в случае, когда ИС включает в себя не только аналогичные модули, но и некоторые сопровождающие их подсистемы, предполагает расчет вероятности выхода годных с учетом этих подсистем [3].

7. Оценивается эквивалентный выход годных при определенных значениях количества дефектов λ_w , коэффициента кластеризации α_w для пластины и размерах блока B для различного числа избыточных модулей. Выбирается число избыточных модулей, которому соответствует максимальный эквивалентный выход годных Y .

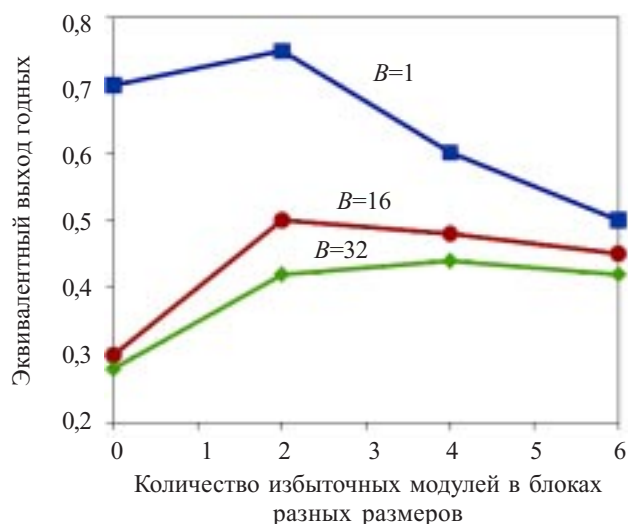
Коэффициент кластеризации для пластины определяется как [3, 4]

$$\alpha_w = \alpha_b \frac{W}{B},$$

где W — площадь пластины.

Эквивалентный выход годных Y определяется как частное от деления выхода годных Y_{IS} на отношение площади ИС с избыточными модулями к площади ИС без них.

Исследование влияния размера блока на количество дополнительных модулей было проведено посредством моделирования на ЭВМ пластины размером 24×24 модуля с ИС размером 2×3 модуля. Число дефектов задавалось в соответствии с отрицательным биномиальным распределением при $\lambda_w = 260$ и $\alpha_w = 8$. К ИС добавлялись избыточные модули, и оценивалась эквивалентная вероятность получения годных ИС для различных размеров блока $B = 1; 16$ и 32 . Оптимальная избыточность для данного набора параметров (число модулей, для которых эквивалентная вероятность получения годных ИС будет макси-



мальной) будет равна 2 для значений $B=1$ и $B=16$ и 4 для $B=32$ (см. рисунок).

Выводы

Таким образом, предложенный метод, основанный на оценке размеров блока среднеластерного отрицательного биномиального распределения с помощью помехоустойчивого метода кластеризации в простран-

стве вейвлет-преобразования позволяет выбирать количество избыточных элементов без неоправданного увеличения площади БИС при использовании на этапе исследования малых выборок данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Koren I., Koren Z., Stapper C. H. A statistical steady of defect maps of large area VLSI IC's // IEEE Transaction on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems.— 1994.— Vol. 2, N 2.— P. 249—256.
2. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Дзхунян В. Л. Статистические модели управления дефектностью и выходом годных в микроэлектронике // Микроэлектроника.— 2003.— Т. 32, № 1.— С. 62—76.
3. Koren I., Stapper C. H. Yield models for defect-tolerant VLSI circuits: a review // Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems.— 1988.— V. 1.— С. 1—21.
4. Koren I., Koren Z., Stapper C. H. A unified negative-binomial distribution for yield analysis of defect-tolerant circuits // IEEE Transaction on Computers.— 1993.— Vol. 42, N 6.— P. 724—734.
5. Щербакова Г. Ю., Крылов В. Н. Адаптивная кластеризация в пространстве вейвлет-преобразования // Радиоелектронні і комп'ютерні системи.— 2009.— № 6 (40).— С. 123—128.
6. Крилов В. Н., Щербакова Г. Ю. Субградієнтний ітеративний метод оптимізації в просторі вейвлет-перетворення // Збірн. наук. праць Військового інституту Київського нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка.— 2008.— Вип. 12.— С. 56—60.
7. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1.— М.: Мир, 1964.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Тихонов В. И., Шахтарин Б. И., Сизых В. В. Случайные процессы. Примеры и задачи. Оценка сигналов, их параметров и спектров. Основы теории информации. Т. 5.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 400 с.

В пятом томе задачника в первой части представлены задачи по оценке сигналов, их параметров и энергетических спектров. Рассмотрены задачи на вычисление границ Рао-Крамера для дисперсии оценок, на определение оценок методами максимального правдоподобия и байесовских критериев, а также задачи на оценивание случайных сигналов фильтрами Винера и Калмана, приведены примеры приложения теории нелинейного оценивания (метод Стратоновича) и задачи на оценивание спектра. Во второй части пособия даны задачи на вычисление энтропии распределений, а также задачи по кодированию и по оценке помехоустойчивости систем передачи сообщений.

В данном томе задачника собрано большинство тем, имеющих отношение к оценке сигналов, их параметров и энергетическому спектру. Для студентов, аспирантов и специалистов, заинтересованных в решении представленных задач.



К. т. н. М. Д. СКУБИЛИН, д. ф.-м. н. В. К. СТЕФАНЕНКО,
д. т. н. В. И. ФИНАЕВ

Россия, г. Таганрог, ТТИ ЮФУ
E-mail: scubilin@hotmail.ru.

Дата поступления в редакцию
19.08 2009 г.

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

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Анализируется возможность электронной оценки состояния автоматических и автоматизированных систем управления.

Для эффективной работы технической системы управления с человеком-оператором в контуре управления (эргатической системы) необходимо обеспечить должное состояние как ее технической, так и биологической составляющих. Своевременное обнаружение зарождающихся переходов системы из штатного состояния в нештатное — один из путей предупреждения и/или минимизации последствий нарушения штатного состояния системы управления.

Состояние (в смысле способности достижения цели управления) систем управления (СУ), как и их обобщенные характеристики, в общем случае определяется значениями n различных параметров, представляемых функциями одного или нескольких аргументов. К числу таких аргументов в зависимости от типа рассматриваемой СУ относят количество элементов, узлов или сборочных единиц.

При решении любой конкретной задачи учитываемые параметры СУ всегда образуют конечное множество параметров P_i ($i=1, 2, \dots, n$), причем индексация параметров не ставится в зависимость от степени их важности. Характер учета отдельных параметров и их групп в процессе решения задачи, как правило, различен. Поэтому множество P обычно разбивают на ряд подмножеств P^1, P^2, \dots, P^d в соответствии с используемыми признаками $d \leq n$, если n — количество учитываемых параметров. Разбиение производится по правилам:

$$P^\eta \cap P^\xi = 0, \quad f_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \\ \eta \in \{1, 2, \dots, d\}, \quad \xi \in \{1, 2, \dots, d\};$$

$$\bigcup P^\eta = P, \quad P^\eta \neq 0. \quad (1)$$

В отдельных случаях решения практических задач допустимо при соблюдении условий (1) трансформировать их к виду

$$P^\eta \cap P^\xi \neq 0.$$

Комплексный учет всех необходимых параметров при оценке состояния СУ практически перекрывает частные оценки, когда на базе одного или нескольких параметров строятся некоторые критерии рабо-

тоспособности. Такие частные оценки могут использоваться лишь при синтезе относительно несложных СУ и только в случаях, когда на значения их параметров не накладываются жесткие ограничения [1].

Когда все параметры P_i определяются значениями всех аргументов x_i ($i=1, 2, \dots, k$), при оценке состояния СУ рассматривается система функций

$$P_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Аргументы x_i могут быть как дискретными, так и непрерывными, что определяется их физической сущностью, а также условиями функционирования СУ. Для СУ аргументы часто являются дискретными, что определяет и дискретность функций f_i ($i=1, 2, \dots, n$). Так, например, если f_1 представляет вес узла СУ как ее параметр и зависит от принятой разрядности x_1 и типа используемых для синтеза элементов x_2 , тогда f_1 определена только на допустимых наборах аргументов x_1 и x_2 и является сугубо дискретной функцией.

Реальные СУ проектируются с учетом различных требований, накладываемых на значения параметров. В общем случае эти ограничения являются двухсторонними, поэтому система функций P_i дополняется следующей системой неравенств:

$$A_i \leq f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) \leq B_i, \quad (2)$$

где A_i и B_i ($i=1, 2, \dots, n$) — некоторые числа, определяющие соответственно нижний и верхний пределы допустимых значений i -го параметра.

Для различных параметров, используемых на практике, характер ограничений может не совпадать. Это учитывается при решении конкретных задач, в частности характер ограничений как один из признаков учитывается при разбиении множества параметров на подмножества в соответствии с (1).

Общий критерий состояния СУ формируется с учетом системы неравенств (2), которая выражает основные требования, предъявляемые к данной СУ. При этом используются допустимые значения параметров, удовлетворяющие условиям (2).

Структура СУ оптимальна в том случае, когда все ее параметры, учитываемые при синтезе, имеют оптимальные значения; в противном случае она относится к неоптимальным структурам. Таким образом,

$$S \in S_{\text{опт}}, \quad (3)$$

если $A_i \leq P_i \leq B_i$ для всех $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Соотношения (3) представляют собой признаки выявления оптимальной в принятом смысле структуры СУ. Эти признаки оказываются основными для формирования общего критерия состояния СУ и выявления условий существования оптимальной ее структуры.

Если все аргументы x_i берутся с тем или иным шагом дискретности, что отвечает реальным случаям постановки задачи выявления оптимальных структур, то множество возможных значений любого x_i конечно; множество N всех возможных наборов аргументов также конечно, а его мощность не превосходит некоторую величину H . Обозначим через $N^i \subset N$ множество наборов аргументов, на которых функция f_i , представляющая i -й параметр, принимает оптимальные значения. Тогда для любого i количество таких наборов практически всегда меньше величины H .

Структура СУ оптимальна, если существует хотя бы один набор аргументов, на котором все параметры, учитываемые при решении конкретной задачи и задаваемые функциями f_i , принимали бы оптимальные значения. С учетом введенных обозначений это условие существования оптимальной структуры записывается в виде

$$\bigcup_i N^i \neq \emptyset, i \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (4)$$

Таким образом, оптимальная структура СУ существует, если объединение всех пересечений множеств N^i , т. е. множеств наборов аргументов, на которых отдельные параметры принимают оптимальные значения, не является пустым множеством.

Условие (4) представляет собой и общий критерий работоспособности, т. к. позволяет разделить СУ или их структуры по степени пригодности в конкретных условиях. Кроме того, оно может служить критерием выявления оптимальных структур СУ — при синтезе и оптимизации его применение позволяет исключить из рассмотрения структуры, не отвечающие предъявляемым требованиям. Эффективность применения полученного критерия зависит от достоверности и полноты функциональных зависимостей для всех параметров. Большое значение имеет также конкретный реализуемый алгоритм, построенный на базе общего алгоритма выявления оптимальных структур, однако полученный общий критерий не обеспечивает непосредственного определения лучших из числа выявленных структур СУ.

Общий алгоритм выявления оптимальных структур, базирующийся на условии (4), строится для ограниченного числа учитываемых параметров, представляемых функциями нескольких аргументов (например, учитываются время реализации алгоритма, вес, габариты, энергоемкость, вероятность безотказной работы, рассчитываемые в зависимости от количества элементов, необходимых для синтеза различных структур СУ, и характеристик стандартных элементов, приемлемых для данных конкретных условий эксплуатации СУ). Он предусматривает: определение наборов аргументов N^i , на которых функции, представляющие параметры СУ, удовлетворяют условиям (2); кодирование множеств N^i для обеспече-

ния эффективного использования принимаемых методов решения задачи выявления оптимальных структур; выявление пересечений множества N^i , т. е. выявление оптимальных структур систем.

При реализации алгоритма необходимо находить значения функций на всех наборах аргументов и сравнивать их с их допустимыми величинами. Так, для вычисления одного значения функции f_i требуется выполнить G_i операций. Общее же количество операций, выполняемых при решении задачи с учетом односторонних ограничений, достигает значения

$$N_{\text{оп}} = H(n + \sum_{i=1}^n G_i), \quad (5)$$

тогда как при двухсторонних ограничениях для всех параметров оно оценивается по формуле

$$N_{\text{оп}} = H(2n + \sum_{i=1}^n G_i). \quad (6)$$

Решение задачи кодирования осуществляется путем присвоения наборам N^i условных номеров, формируемых из двух частей, одна из которых представляет собой признак функции, а другая — номер набора, на котором эта функция принимает оптимальное значение.

Выявление пересечений множеств N^i , т. е. реализация заключительной части алгоритма, сводится к сравнению кодов наборов, имеющих различные признаки.

Общий критерий состояния СУ не позволяет выявлять максимально приемлемые в конкретных условиях оптимальные структуры, поэтому приходится общие критерии дополнять частными, при формировании которых не обязателен учет всех возможных параметров СУ.

Использование частных критериев в качестве основных при оптимизации структур СУ допустимо в тех случаях, когда на значения отдельных параметров не накладываются жесткие ограничения, а указывается лишь направление желаемого их изменения. Кроме того, они могут использоваться для предварительной оценки состояния известных или возможных структур, а также при решении частных задач синтеза СУ. Примером частного критерия могут служить соотношения $P_i \leq P_{i\text{доп}}; P_{2\text{опт}} = P_{2\text{мин}}$, которые, в частности, отвечают случаю выявления структуры со временем реализации алгоритма, не большим допустимого, и с минимальным аппаратным составом [2].

К частным критериям во многих случаях решения практических задач относятся и функциональные критерии, которые при синтезе СУ используются как частные, позволяющие выявить лучшую из общептимальных структур, выявленных по общему критерию. Тогда система (6) трансформируется в

$$P_i \leq f_i^j(x), \quad (7)$$

где j — номер набора условий, изменяющихся одновременно для всех функций $f_i, j \in \{1, 2, \dots, r\}$;

r — количество наборов условий.

Функциональные критерии в общем случае вводятся для определения данной структуры СУ. Она

считается подходящей или лучшей, если функционал Φ_0 (который может быть линейным или нелинейным)

$$\Phi_0 = \Phi(W_1 f_1; W_2 f_2; \dots; W_n f_n), \quad (8)$$

(W_i — некоторые коэффициенты) имеет экстремум или отличается от некоторого значения не более чем на установленную величину. При использовании нелинейных функционалов и незначительном числе учитываемых параметров в большей степени учитывается взаимосвязь параметров системы.

При проведении сравнительных оценок различных структур СУ нелинейные функциональные критерии строятся без учета коэффициентов W_i при сложной размерности, определяемой размерностью учитываемых параметров и видом принимаемых зависимостей.

Линейный функциональный критерий рассчитывается с учетом нормированных значений функций f_i^j , взятых с определенными весовыми коэффициентами w_i , по формуле

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^n w_i F_{i0}^{-1} f_i^j(x), \quad (9)$$

где F_{i0} — нормирующий делитель.

Параметры СУ могут представляться полиномами m -й степени от x , тогда и функциональный критерий (9) представляется полиномом, степень которого определяется максимальной степенью исходных полиномов, например степенью m . Использование линейного критерия при оценке состояния СУ, т. е. и при определении строго оптимальных структур, в этих случаях сводится к решению линейных алгебраических уравнений $(m-1)$ -го порядка вида

$$\sum_{q=0}^{m-1} (q+1) a_{q+1} x^q = 0. \quad (10)$$

Одним из основных вопросов, решаемых при формировании критерия (9), является вопрос об определении или назначении величин весовых коэффициентов w_i и нормируемых делителей F_{i0} .

Если величина F_{i0} назначается только для получения безразмерных функциональных критериев без должного учета ограничений (3), то имеет место система зависимостей

$$C_i \geq f_i^j(x) / F_{i0} \geq C'_i,$$

где C_i и C'_i — некоторые постоянные величины, причем

$$C_1 \neq C_2 \neq \dots \neq C_i \neq \dots \neq C_n \text{ и } C'_1 \neq C'_2 \neq \dots \neq C'_i \neq \dots \neq C'_n.$$

Поэтому при формировании критерия (10) отдельные параметры «взвешиваются» дважды. Устранение двойного «взвешивания» может быть обеспечено назначением таких w_i , которые дополнительно учитывают значения уже выбранных или назначенных величин F_{i0} , а так как это не всегда возможно, значения w_i и F_{i0} определяются без использования дополнительных функциональных связей.

Учет требования необходимости приведения нормируемых функций f_i^j к определенному уровню приводит к определению значений нормирующих дели-

телей F_{i0} . При проведении расчетов по (10) принимаются во внимание только те значения функций, которые удовлетворяют условиям (4). Поэтому для их нормирования и приведения к определенному уровню необходимо выполнение условий

$$A_i \leq F_{i0} \leq B_i \quad (11)$$

при пропорциональной связи между F_{i0} и $A_i(B_i)$, выражаемой через

$$F_{i0} : F_{20} : \dots : F_{n0} = 0,5(A_1 + B_1) : 0,5(A_2 + B_2) : \dots : 0,5(A_n + B_n). \quad (12)$$

Если на параметры СУ накладываются односторонние ограничения, то принимается $A_i = 0$ или $B_i = 0$ при вычислениях по (12), а если на параметры накладываются двухсторонние ограничения, то значения F_{i0} определяются по (11) и (12).

Значения большинства параметров, характеризующих состояние (функциональную готовность) СУ, должны быть минимальными из всех возможных для оптимальных структур и при этом не должны отличаться от желаемых больше, чем на заданные величины, т. е.

$$(D_i - \Delta D_i) \leq f_i^j \leq (D_i + \Delta D_i), \quad (13)$$

где D_i — желаемое значение i -го параметра;

ΔD_i — допустимое отклонение значения i -го параметра от желаемого или заданного.

Для упрощения последующих действий целесообразно принять

$$F_{i0} = D_i \text{ и } \sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (14)$$

В реальных условиях функции f_i^j принимают оптимальные значения, равные D_i , при различных значениях аргумента x , но при условии, что относительные пределы изменения значений функционала не превосходят средние допустимые пределы составляющих его функций. Тогда

$$\Delta \Phi = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\Delta D_i / D_i), \quad (15)$$

$$(1 - \Delta \Phi) \leq |\Phi_{\text{опт}}| \leq (1 + \Delta \Phi). \quad (16)$$

Совокупность условий и ограничений (13)–(16) обеспечивает решение общей задачи выявления оптимальных структур СУ. Соответствующий алгоритм предусматривает такую последовательность действий:

а) определяют величины $\Delta \Phi$, исходные для расчета на последующих этапах, согласно (16) с заданием шага Δx , определяющего частоту получения решений;

б) формируют функционал вида (10) с учетом соотношений (13);

в) рассчитывают значения функционала (10) с шагом Δx и выявляют функционалы, удовлетворяющие условию (15), с фиксацией значений аргумента x_i , отвечающих выделенным значениям Φ ;

г) для каждого Φ_0 , удовлетворяющего условию (16), рассчитывают значения всех составляющих его функций f_i^j ;

д) все найденные наборы f_i^j проверяют на соответствие условиям (15);

е) выявляют случаи удовлетворения условиям (14) и (16), т. е. выявляют оптимальные g -е структуры СУ по

$$S_g \in S_{\text{опт}}, \text{ если } (1 - \Delta\Phi) \leq |\Phi_{\text{опт}}| \leq (1 + \Delta\Phi), \\ (D_i - \Delta D_i) \leq f_i^j \leq (D_i + \Delta D_i) \quad (17)$$

для всех $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Все части алгоритма последовательно реализуются для различных наборов условий j .

Если по (16) оптимальные структуры не выявлены, то при последовательном увеличении значений $\Delta\Phi$ допустимо выявление квазиоптимальных структур различных градаций.

Все вышесказанное применимо для систем автоматического управления, например летательного аппарата с управлением автопилотом. Однако состояние автоматизированных систем управления, т. е. систем с человеком-оператором в контуре управления, в силу значительного объема информации о состоянии человека пока еще оценить аналитически невозможно. Раздельная оценка состояния технической составляющей эргатической системы управления и ее биологической части позволяет минимизировать временные и инструментальные затраты (например, пилот при управлении летательным аппаратом быстро оценивает состояние системы инструментально). Это позволяет принять меры и предупредить выход системы из штатного состояния [2, 3]. Первые, пока

что локальные, проверки текущего состояния пилота при управлении летательным аппаратом уже подтвердили целесообразность такой оценки [4, 5].

Таким образом, оценка текущего состояния (функциональной готовности) интегрированной системы «техническое оборудование — человек-оператор» позволяет оперативно принять адекватные меры по недопущению и/или минимизации последствий перехода системы в нештатное состояние.

Предлагаемый метод является достаточно универсальным и может быть рекомендован для нормализации ситуаций на транспорте, преимущественно в авиации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шилейко А. В. Методика выбора оптимальной структуры цифровой модели // Автоматика и телемеханика. — 1961. — Т. XII. — № 1. — С. 16—18.
2. Пат. 23138276 России. Система сбора и регистрации полетной информации / М. Д. Скубилин. — 2007. — Бюл. № 36.
3. Пат. 2359609 России. Тонومتر / М. Д. Скубилин. — 2009. — Бюл. № 18.
4. Финаев В. И., Скубилин М. Д., Джавадов Н. Г. Программа оценки способности человека-оператора // Свидетельство RU 2009612572 о государственной регистрации программы для ЭВМ. 21.05 2009.
5. Скубилин М. Д., Спиридонов О. Б., Стефаненко В. К. Электронная техника, эргатические системы управления. — Таганрог: ЮФУ, 2009.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

Международный симпозиум

«НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО 2010»

24—31 мая 2010 г.
г. Пенза



Связь с Оргкомитетом

тел./факс +7(841-2) 56-43-46

тел. +7(841-2) 36-82-12

<http://www.nika-penza.ru>

E-mail: kipra@pnzgu.ru,

nika@nika-penza.ru

Основные направления работы симпозиума

- ✦ Информационные и коммуникационные технологии в образовании
- ✦ Основы экономической и правовой безопасности
- ✦ Информационные технологии в проектировании и производстве
- ✦ Физико-математические методы и модели обеспечения надежности и качества
- ✦ Безопасность жизнедеятельности и охрана труда
- ✦ Надежность и качество авиационной и космической техники
- ✦ Надежность и качество железнодорожной автоматики и телемеханики
- ✦ Информационные технологии испытаний и сертификации продукции и услуг
- ✦ Методологические проблемы обеспечения качества
- ✦ Научные основы системной безопасности
- ✦ Диагностика и контроль качества продукции
- ✦ Технологические проблемы повышения надежности и качества изделий
- ✦ Реновация средств и объектов материального производства
- ✦ Методы и средства измерений электрических и неэлектрических величин
- ✦ Автоматизированная обработка и анализ дефектоскопических и металлографических снимков
- ✦ Надежность биологических и экологических систем
- ✦ Проблемы информационной безопасности

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА,
А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ,
д. ф.-м. н. В. Т. МАСЛЮК, И. Г. МЕГЕЛА

Украина, г. Львов, Национальный университет «Львовская политехника»;
г. Ужгород, Институт электронной физики НАНУ
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
02.06 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. С. И. КОЗЛОВСКИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА КРЕМНИЕВЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ

Исследовано влияние облучения различными дозами электронов с энергий до 14 МэВ на характеристики полупроводниковых тензорезисторов на основе нитевидных кристаллов кремния р-типа в различных температурных диапазонах.

Необходимость создания радиационно стойких сенсоров для измерения механических величин (деформации, давления и др.) обусловлена потребностями ряда областей науки и техники. В связи с этим представляет интерес исследование влияния электронного облучения на характеристики полупроводниковых тензорезисторов на основе кремния. Следует отметить, что изучение влияния облучения на свойства полупроводников, в частности на кремний, проводилось, в основном, на высокоомном материале. Лишь недавно появились исследования [1, 2], выполненные на сильнолегированном кремнии, однако в них основное внимание было уделено образованию радиационных дефектов в кремнии и их влиянию на электрофизические параметры (электропроводность, концентрация носителей и др.). Отсутствие данных о влиянии электронного облучения на тензорезистивные характеристики кремния, которые являются основными для тензорезисторов, говорит об актуальности исследования радиационной стойкости кремниевых тензорезисторов.

В качестве объекта исследования использовались тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния [3], легированного бором, которые обладают высокой степенью структурного совершенства, что способствует повышению их радиационной стойкости.

Диапазон значений удельного сопротивления исследованных тензорезисторов составляет 0,006—0,030 Ом·см. Измерение параметров производилось в области температур от –196 до +100°C и от –269 до +20°C.

Облучение тензорезисторов электронами высоких энергий проводилось на импульсном ускорителе электронов типа микротрон М-30 (рис. 1) в Институте электронной физики. Тензорезисторы облучались электронами с энергией 4,2—14 МэВ дозами $\Phi = 5 \cdot 10^{16} — 1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² при средней плотности тока 10 мкА/см² и скважности 2000. Для проведения эксперимента тензорезисторы размещались в контейнере, который устанавливался в фокусе электронного пучка, а чтобы избежать радиационного нагрева во время облучения, осуществлялся их обдув парами жидкого азота.

Дефекты, образующиеся в кремнии при облучении электронами высоких энергий, весьма разнообразны и имеют различную температуру отжига [4, 5]. В наших исследованиях использовались тензорезисторы, которые после облучения подвергались изотер-

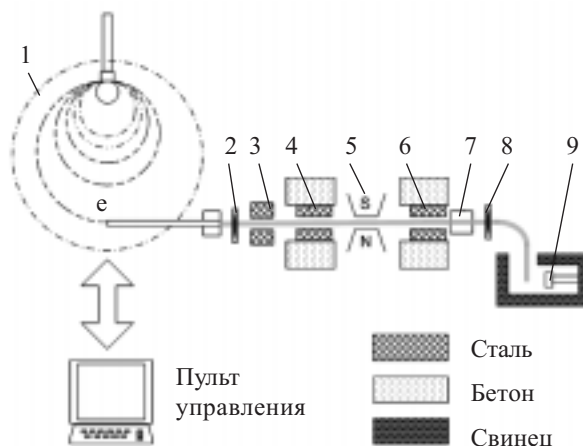
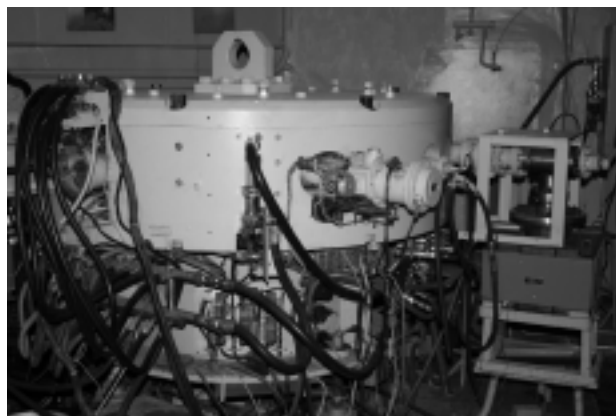


Рис. 1. Внешний вид и схема импульсного ускорителя электронов типа микротрон М-30:
1 — микротрон; 2 — тормозная мишень; 3, 4, 6 — система коллиматоров; 5 — магнит; 7 — проходная камера; 8 — исследуемые образцы; 9 — детектор

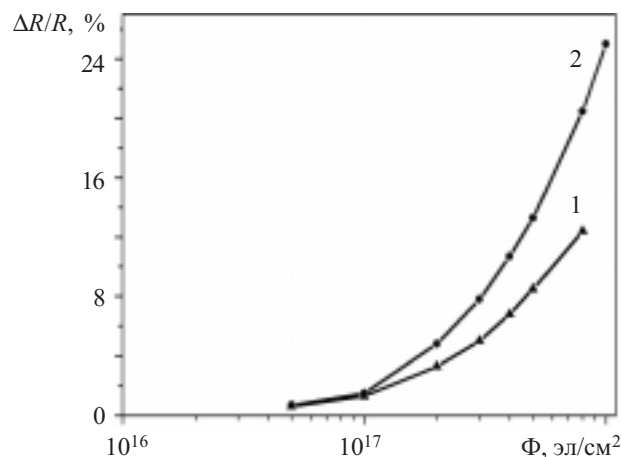


Рис. 2. Зависимость относительного изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов от дозы облучения электронами с энергией 4,2 МэВ (1) и 14 МэВ (2) ($\rho_{300\text{К}}=0,01\text{—}0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)

мическому отжигу при температуре 120°C в течение двух часов для закрепления радиационных дефектов в кремнии.

Вначале исследовалось влияние энергии и дозы электронов на сопротивление тензорезисторов при комнатной температуре. Как видно из приведенных на рис. 2 графиков, большее влияние на номинальное сопротивление тензорезисторов при комнатной температуре оказывает интегральная доза поглощенных электронов, чем их энергия. При дозах до $1\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ изменение сопротивления не превышает 1%, более значительные изменения сопротивления наблюдаются при $\Phi \geq 2\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$.

В диапазоне температур $-196\ldots+100^\circ\text{C}$ измерялись температурная зависимость сопротивления, деформационные характеристики, коэффициент тензочувствительности и температурная зависимость коэффициента тензочувствительности тензорезисторов до и после облучения.

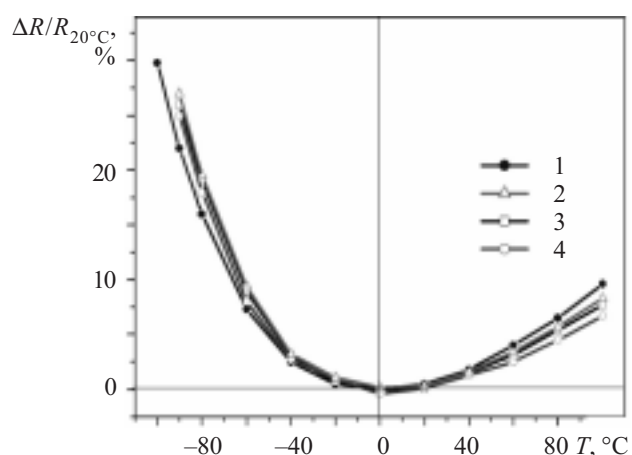


Рис. 3. Температурные зависимости относительного изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов до (1) и после (2—4) облучения электронами с энергией 4,2 МэВ разными дозами: 2 — $5\cdot 10^{16}$; 3 — $4\cdot 10^{17}$; 4 — $8\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ ($\rho_{300\text{К}}=0,01\text{—}0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)

Из представленных на рис. 3 данных видно, что в области отрицательных температур температурная зависимость изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов после облучения их электронами с энергией 4,2 МэВ при дозах $\Phi \leq 8\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ практически не изменяется. Значительное уменьшение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) после облучения наблюдается в интервале температур 40—100°C, а при $\Phi=8\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ и $T=100^\circ\text{C}$ ТКС уменьшается почти на 40%.

При увеличении энергии электронов до 10 МэВ и дозы до $1,25\cdot 10^{18} \text{ эл/см}^2$ зависимость сопротивления облученных тензорезисторов от T в области низких температур сильно возрастает (рис. 4), соответственно увеличивается и их ТКС. При $T>0^\circ\text{C}$ температурная зависимость сопротивления тензорезисторов значительно уменьшается после облучения, как и в случае облучения электронами с энергией 4,2 МэВ. При этом ТКС уменьшается почти в два раза, что весьма существенно для применения полупроводниковых тензорезисторов.

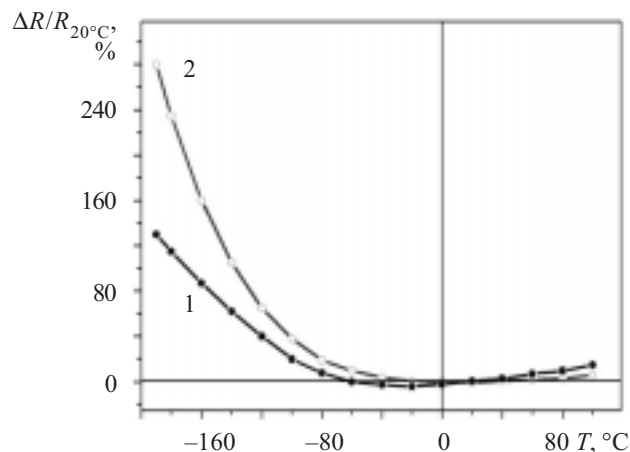


Рис. 4. Температурная зависимость относительного изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов до (1) и после (2) облучения электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25\cdot 10^{18} \text{ эл/см}^2$ ($\rho_{300\text{К}}=0,01\text{—}0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)

Деформационные характеристики кремниевых тензорезисторов до и после облучения исследовались в диапазоне деформаций $\epsilon=\pm 1,3\cdot 10^{-3}$ отн. ед. в различных температурных диапазонах при разных энергиях и дозах электронов.

Для измерения зависимости относительного изменения сопротивления тензорезисторов от деформации растяжения тензорезисторы наклеивались на градуировочные балки лаком ВЛ-931 с температурой полимеризации 180°C. Полученные результаты показали, что при температурах +20 и +100°C после облучения тензорезисторов электронами с энергией 4,2 МэВ дозой $4\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ коэффициент тензочувствительности практически не изменился (рис. 5).

Исследование влияния облучения на деформационные характеристики тензорезисторов в широком температурном диапазоне ($-196\ldots+100^\circ\text{C}$) проводилось на установке, смонтированной на базе гелиевого криостата КГ-100. Облученные и необлученные

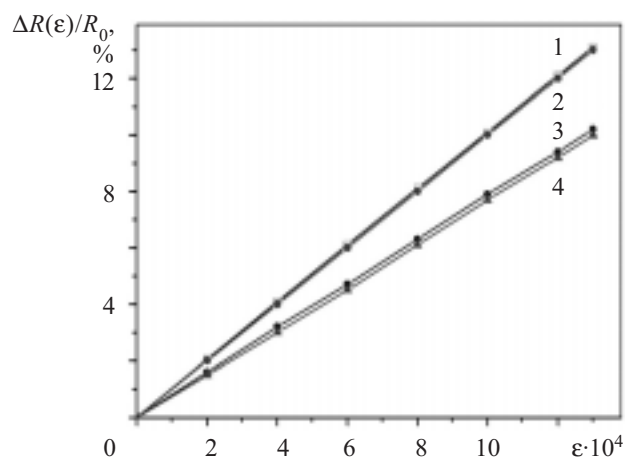


Рис. 5. Деформационная зависимость относительного изменения сопротивления тензорезисторов до (1, 3) и после (2, 4) облучения электронами с энергией 4,2 МэВ дозой $4 \cdot 10^{17}$ эл/см² при температуре 20°C (1, 2) и 100°C (3, 4)

тензорезисторы, взятые из одной партии, приклеивались на балку, изготовленную из сплава инвар с коэффициентом термического расширения (КТР), близким к КТР кремния при низких температурах, и подвергались деформации растяжения или сжатия при фиксированных температурах из указанного диапазона. На основании экспериментальных зависимостей относительного изменения сопротивления тензорезисторов от деформации $\Delta R(\epsilon)/R_0 = f(\epsilon)$ при различных температурах рассчитывали коэффициент тензочувствительности и его температурную зависимость при определенном уровне деформации. Как видно из приведенных на рис. 6 и 7 графиков, облучение тензорезисторов электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² приводит к изменению коэффициента тензочувствительности и практически не влияет на его температурную зависимость в области температур $-196 \dots +100^\circ\text{C}$. Это является весьма существен-

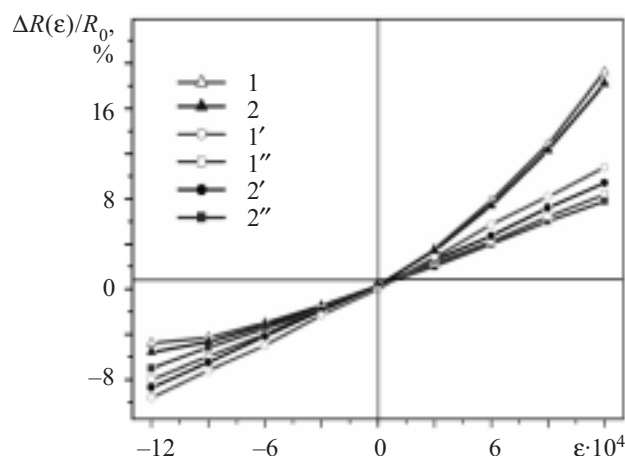


Рис. 6. Деформационные характеристики кремниевых тензорезисторов, облученных (1) электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² и необлученных (2), при температуре -196°C (1, 2); $+20^\circ\text{C}$ (1', 2'); $+100^\circ\text{C}$ (1'', 2'') ($\rho_{300\text{K}} = 0,01 \dots 0,03$ Ом·см)

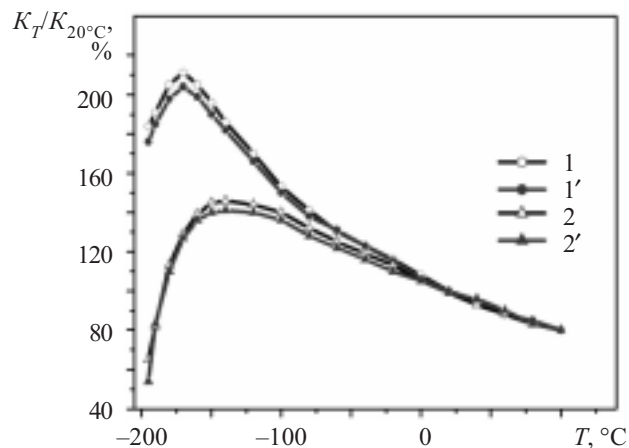


Рис. 7. Температурная зависимость коэффициента тензочувствительности кремниевых тензорезисторов, облученных (1, 2) электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² и необлученных (1', 2'): 1, 1' — при деформации растяжения $\epsilon = 1,2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.; 2, 2' — при деформации сжатия $\epsilon = -1,2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. ($\rho_{300\text{K}} = 0,01 \dots 0,03$ Ом·см)

ным как с точки зрения влияния радиационных дефектов и комплексов на деформационные процессы в сильнолегированном кремнии *p*-типа, так и для оценки радиационной стойкости и работоспособности кремниевых тензорезисторов после воздействия электронного облучения.

Проводилось также исследование влияния облучения электронами высоких энергий на характеристики тензорезисторов при криогенных температурах, вплоть до температуры жидкого гелия. В качестве чувствительных элементов этих тензорезисторов используются НК кремния, легированного бором с концентрацией, соответствующей области перехода «мет-

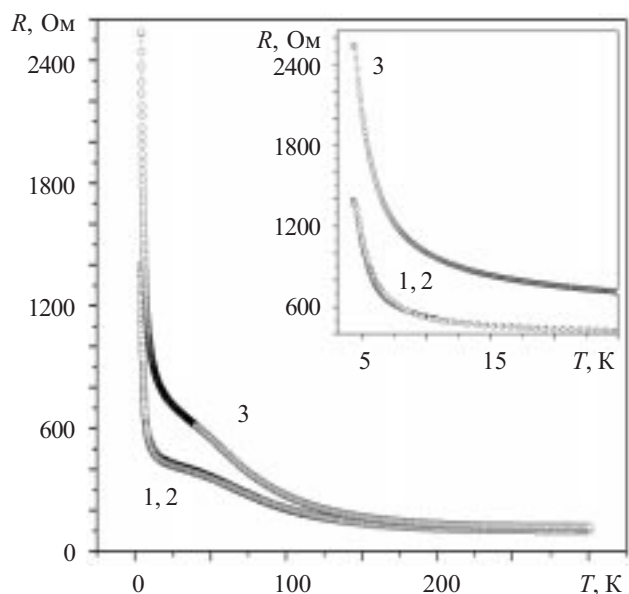


Рис. 8. Температурная зависимость сопротивления тензорезистора на основе НК кремния до (1) и после облучения электронами с энергией 10 МэВ дозами $1 \cdot 10^{17}$ эл/см² (2) и $1 \cdot 10^{18}$ эл/см² (3) ($\rho_{300\text{K}} = 0,0114$ Ом·см)

талл—диэлектрик» [6]. Как видно из **рис. 8**, облучение тензорезистора с $\rho_{300\text{K}}=0,0114 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ электронами с энергией 10 МэВ дозой $1\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ не приводит к изменению его сопротивления в диапазоне температур от $-296\dots+20^\circ\text{C}$ ($4,2\text{—}300 \text{ K}$). Удельное сопротивление всех исследованных тензорезисторов лежало в диапазоне $0,006\text{—}0,016 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. После облучения их потоком электронов с указанными параметрами изменение их сопротивления при температуре жидкого гелия ($4,2 \text{ K}$) не превышало $1,5\text{—}2\%$. Увеличение дозы облучения до $1\cdot 10^{18} \text{ эл/см}^2$ при той же энергии электронов привело к значительным изменениям сопротивления и коэффициента тензочувствительности при гелиевых температурах. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в [2].

Изменение сопротивления кремниевых тензорезисторов после облучения в области температур $4,2\text{—}300 \text{ K}$ можно объяснить, согласно концепции [2], изменением концентрации носителей тока в вырожденном кремнии p -типа, связанной с удалением носителей при образовании первичных радиационных дефектов — пар Френкеля.

Таким образом, исследования показали следующее.

1. При облучении электронами высоких энергий ($E=4,2\text{—}14 \text{ МэВ}$) и дозах $\Phi\leq 1\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ сопротивление Si-тензорезисторов при комнатной температуре практически не изменяется.

2. На сопротивление тензорезисторов большее влияние оказывает интегральная доза поглощенных электронов, чем их энергия.

3. Температурная зависимость сопротивления тензорезисторов после облучения потоком электронов с $E=4,2 \text{ МэВ}$ при $\Phi\leq 8\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ практически не меняется в области отрицательных температур и значительно снижается в интервале температур $20\text{—}100^\circ\text{C}$. При увеличении энергии до 10 МэВ и дозы электро-

нов до $1,25\cdot 10^{18} \text{ эл/см}^2$ температурная зависимость сопротивления облученных тензорезисторов сильно возрастает в области температур от -196 до 0°C .

4. Облучение тензорезисторов потоком электронов с $E=4,2 \text{ МэВ}$ и $\Phi=4\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ не приводит к изменению деформационных характеристик тензорезисторов и коэффициента тензочувствительности в диапазоне температур $20\text{—}100^\circ\text{C}$. После облучения при $E=10 \text{ МэВ}$ и $\Phi=1\cdot 10^{18} \text{ эл/см}^2$ в области температур от -196 до $+100^\circ\text{C}$ наблюдается небольшое изменение коэффициента тензочувствительности тензорезисторов, в то время как температурный коэффициент тензочувствительности практически не изменяется.

5. Исследованные тензорезисторы могут использоваться для работы в области криогенных температур, вплоть до температуры жидкого гелия, в условиях облучения электронами с энергией $E\leq 10 \text{ МэВ}$ и дозой $1\cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Emtsev V. V., Ehrhart P., Poloskin D. S., Dedek U. Electron irradiation of heavily doped silicon: group-III impurity ion pairs // *Physica B: Condensed Matter*.— 1999.— Vol. 273—274.— P. 287—290.
2. Emtsev V. V., Ehrhart P., Poloskin D. S., Emtsev K. V. Comparative studies of defect production in heavily doped silicon under fast electron irradiation at different temperatures // *J. Mater.Sci.: Mater Electron*.— 2007.— Vol. 18.— P. 711—714
3. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // *Датчики и системы*.— 2001.— № 6.— С. 2—7.
4. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі міждефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології.— Київ—Луцьк: Вид-во Луцького ДТУ, 2006.
5. Пагава Т. А. Особенности отжига радиационных дефектов в облученных кристаллах p -Si // *ФТП*.— 2007.— Т. 41, Вып. 6.— С. 651—653.
6. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В. Тензорезисторы для низких температур на основе нитевидных кристаллов кремния // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2008.— № 4.— С. 26—30.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Фудзисава Ю. 32-битные микропроцессоры и микроконтроллеры SuperH.— М.: Додока-21, 2009.— 360 с.

В книге описывается семейство SuperH — группа встраиваемых процессоров с оригинальной RISC-архитектурой, ориентированных на использование как в качестве микроконтроллеров (SH-1/SH-2), так и микропроцессоров (SH-3/SH-4), причем основное внимание уделяется последним. Описывается архитектура процессоров, приводятся примеры программ, задействующих различные их узлы, а также даются описания программных средств и примеры их использования при проектировании устройств на базе SuperH. Рассмотрены принципы работы MMU, кэш-памяти SDRAM и то, как они влияют на производительность системы. Предназначена для инженеров-разработчиков, будет полезна студентам соответствующих специальностей, а также широкому кругу читателей, которые хотят узнать о микропроцессорах семейства SuperH.



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

Украина, г. Черновцы, ЧНУ им. Ю. Федьковича, ИТЭ НАНУ, ОАО «КВАРЦ»
E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
12.11.2009 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

ВИХРЕТОКОВЫЙ АНИЗОТРОПНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПЕРВИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛУЧИСТОГО ПОТОКА

Представлена оригинальная конструкция первичного преобразователя лучистого потока, который может служить основой для создания приемника неселективного излучения с повышенной чувствительностью.

В настоящее время актуальной остается проблема контроля лучистых потоков, решаемая различными устройствами [1], в том числе и термоэлектрическими приемниками [2]. Величина выходного сигнала в последнем случае определяется, в основном, методами постоянного тока. Повышение величины чувствительности (например, мощности эквивалентного шума — МЭШ) достигается модуляцией лучистых потоков, значительно усложняющей соответствующее аппаратное обеспечение и ведущей к уменьшению ее эксплуатационной надежности [3].

Результаты исследований метода вихретокового контроля [4–6] позволили предложить ряд оригинальных устройств [7–9], в том числе и оригинальные термоэлектрические приемники неселективного излучения [10, 11], выходной электрический сигнал синусоидальной формы которых однозначно связан с плотностью контролируемых лучистых потоков. В качестве основного метрологического параметра в этом случае выступает электрическая добротность Q измерительного колебательного контура с термоэлектрическим преобразователем.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения первичных вихретоковых анизотропных термоэлектрических преобразователей для регистрации неселективных лучистых потоков.

На рис. 1 представлена схематическая конструкция одного из типовых вариантов такого преобразователя. Он состоит из термоэлектрической батареи 2, верхняя торцевая грань которой содержит неселективный поглощающий слой 1. Нижняя грань этой батареи через диэлектрический слой 3 высокой теплопроводности находится в тепловом контакте с теплоотводом 4 из диамагнитного материала с высокими значениями электропроводности и теплопроводности. Боковые грани теплоотвода 4 находятся в тепловом контакте с внутренней торцевой поверхностью ферродиэлектрического кольцевого манитопровода 5, содержащего индуктивности L_1 7 с электровыводами 8. Нижняя грань теплоотвода 4 находится в тепло-

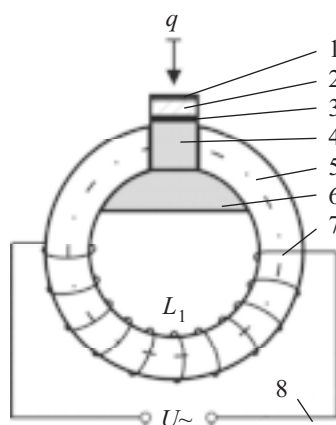


Рис. 1. Схема вихревого термоэлектрического преобразователя

вом контакте с термостатом 6 из диэлектрического материала. В качестве термоэлектрической батареи 2 применялись модули на основе тонкопленочных термопар ($n\text{-Bi}_2\text{Te}_3$ и $p\text{-CdSb}$) либо анизотропных оптикотермоэлементов [12] из монокристаллов Bi.

Предложенное устройство работает следующим образом. Лучистый поток q , поглощенный слоем 1, вызывает появление разности температур между рабочими гранями батареи 2. Это ведет к генерации термо-эдс, возникновению вихревых термоэлектрических токов и пропорциональному изменению электрической добротности измерительного колебательного контура, через который протекает заданный электрический ток I .

Вольт-ваттная чувствительность S такого преобразователя, например, на основе поперечных анизотропных оптико-термоэлементов внешнего оптического поглощения [12] представляется следующим выражением:

$$S = \frac{2m_1\xi_0\omega Llb}{acn\chi T} \frac{(Q_1 - Q_3)(Q_2 - Q_3)}{(Q_1 - Q_2)Q_2Q_3}. \quad (1)$$

В случае выбора рабочей частоты ω_0 измерительного колебательного контура преобразователя в спектральном диапазоне, отвечающему области теплового шума Найквиста ($\omega_1 < \omega_0 < \omega_2$) [2, 3], выражение для МЭШ имеет вид

$$\text{МЭШ} = m_2 k T \Delta f, \quad (2)$$

а его тепловая постоянная времени

$$\tau = m_3 b^2 / a_0. \quad (3)$$

В представленные формулы входят следующие величины:

- Q_1, Q_2, Q_3 — электрическая добротность измерительного колебательного контура при отсутствии термоэлектрической батареи 2, с необлученной и облученной батареей 2, соответственно;
- ξ_0 — коэффициент оптического поглощения слоя 1;
- a, b, c, n — соответственно длина, высота и ширина анизотропных оптикотермоэлементов, из которых состоит термоэлектрическая батарея 2, и их количество;
- a_0 — температуропроводимость материала анизотропного оптикотермоэлемента;
- T — абсолютная температура;
- k — постоянная Больцмана;
- Δf — полоса пропускания;
- m_1, m_2, m_3 — коэффициенты пропорциональности, определяемые экспериментальным путем.

Таким образом, определяя соответствующие значения электрической добротности измерительного колебательного контура до и после облучения, можно найти значение плотности лучистой энергии q_0 , поглощенной слоем 1. При этом следует отметить, что вольт-ваттная чувствительность рассматриваемого приемника определяется не только геометрическими размерами анизотропных оптико-термоэлементов и параметрами используемого материала, но и величинами тока I , его круговой частоты ω_0 и индуктивности L измерительного колебательного контура. Подбирая соответствующие величины I , ω_0 и L , можно получить необходимое значение S , а также других параметров предложенного устройства. Повышение вольт-ваттной чувствительности S обусловлено тем, что к тепловым потерям Джоуля, определяемым замкнутыми токами Фуко, добавляются дополнительные теплотери Пельтье, пропорциональные величине замкнутого термоэлектрического тока [13].

При одновременном использовании двух включенных в дифференциальную схему контуров (рис. 2) введение дополнительной катушки индуктивности L_2 таким образом, чтобы индуктивности L_1 и L'_1 были соединены электрически последовательно-согласно, а индуктивности L_2 и L'_2 — последовательно-встречно, позволит повысить вольт-ваттную чувствитель-

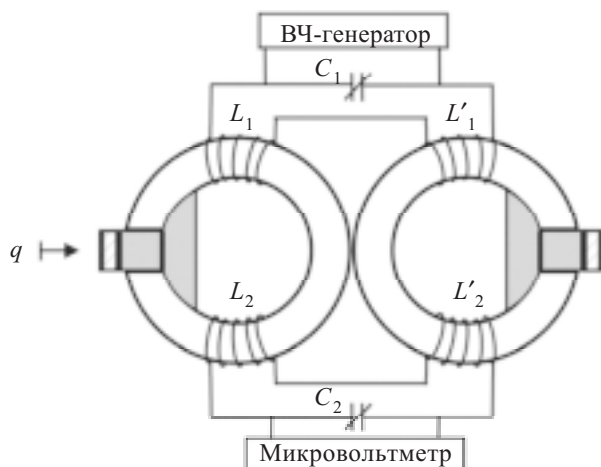


Рис. 2. Схема включения вихревых термоэлектрических преобразователей в дифференциальную схему

ность такого устройства за счет эффекта трансформации при снижении его температурной зависимости.

Отсутствие электрических контактов термоэлектрической батареи 2 существенно снижает собственные шумы рассматриваемого устройства. Электрическая добротность определяется в высокочастотном диапазоне длин волн при малой полосе частот пропускания измерительного усилителя или вольтметра, поэтому величина МЭШ преобразователя значительно уменьшается по сравнению с методами постоянного тока, а использование высокочастотных методов регистрации выходного сигнала уменьшает его нулевой дрейф.

Апробация макетного образца предложенного преобразователя на основе модуля из монокристаллов Bi с площадью рабочей грани $0,1\text{--}1\text{ см}^2$ при величине несущей частоты $f=1,2\text{ МГц}$ и полосе пропускания $\Delta f=10^2\text{ Гц}$ показали, что значение чувствительности улучшилось почти на порядок ($\text{МЭШ}_{\text{пост}}=3,2\cdot 10^{-9}\text{ Вт}$, $\text{МЭШ}_{\text{пер}}=3,6\cdot 10^{-10}\text{ Вт}$).

Таким образом, на основе предложенной конструкции первичного преобразователя лучистого потока возможно создание вихретокового анизотропного термоэлектрического приемника неселективного излучения, выходной электрический сигнал которого регистрируется методами переменного тока.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шоль Ж., Марфан И., Мюкш М. Приемники инфракрасного излучения. — М.: Мир, 1969.
2. Круз П., Макглоулин Л., Макквисктан Р. Основы инфракрасной техники. — М.: Воениздат МО СССР, 1964.
3. Ван дер Зил А. Шум. Источники, описание, измерение. — М.: Сов. радио, 1973.
4. Ашеулов А. А., Бучковский И. А., Романюк И. С., Величук Д. Д. Автогенераторные датчики // Матер. НПК «Сенсор-2008». — Одесса, Украина. — 2008. — С. 12—13.
5. Ашеулов А. А., Бучковский И. А., Романюк И. С., Величук Д. Д. Прибор на основе автогенераторных датчиков бесконтактного контроля электропроводности термоэлектрических материалов // Термоэлектричество. — 2008. — № 4. — С. 78—84.
6. Ашеулов А. А., Романюк И. С., Величук Д. Д. Частотная зависимость электропроводности Bi-Te-Se-Sb в случае применения вихретоковых датчиков // Материалы НПК «Сенсор-2009». — Одесса, Украина. — 2009. — С. 53—55.
7. Ашеулов А. А. Бесконтактный метод определения эффективности термоэлектрических материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 43—45.
8. Пат. 41743 України. Дача для безконтактного визначення електропровідності термоелектричних матеріалів / Ашеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д. — 10.06.09.
9. Пат. 41769 України. Пристрій для безконтактного визначення добротності термоелектричних матеріалів / Ашеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д. — 10.06.09.
10. Ашеулов А. А. Вихретоковий термоелектричний прийомник // Материалы НПК «Сенсор-2009». — Одесса, Украина. — 2009. — С. 21—22.
11. Пат. 39836 України. Термоелектричний прийомач промєневих потоків / Ашеулов А. А. — 10.03.09.
12. Ашеулов А. А., Гуцул И. В. Исследование анизотропных оптикотермоэлементов в случае различных тепловых и оптических режимов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 4. — С. 10—19.
13. Самойлович А. Г. Термоэлектрические и термомангнитные методы превращения энергии. — Черновцы: Рута, 2006.

К. т. н. Н. М. ВАКИВ

Украина, г. Львов, НПП «Карат»
E-mail: vakiv@ipm.lviv.uaДата поступления в редакцию
28.12.2009 г.Оппонент к. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ-МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ
И ВЛАЖНОСТИ СРЕДЫ
НА ОСНОВЕ ТОЛСТЫХ ПЛЕНОК ОКСИШПИНЕЛЕЙ

Проанализирована возможность использования многослойных толсто- и тонкопленочных структур планарного типа на основе манганатной и алюминатной шпинельной оксидной керамики в качестве интегральных сенсоров влажности и температуры.

Оксишпинельная керамика на основе смешанных манганатов и алюминатов широко используется в современных системах контроля и мониторинга температуры и влажности окружающей среды, ограничения пусковых токов, измерения и идентификации газовых потоков и т. п. [1–3]. В последнее время в связи с требованиями миниатюризации особую актуальность приобрели разработки электронных средств в толсто- и тонкопленочном исполнении [4–9]. В предыдущих работах [10–12] нами были рассмотрены возможности применения традиционной технологии сеткотрафаретной печати с целью получения термочувствительных толсто- и тонкопленочных структур на основе оксишпинельной керамики системы переходных металлов NiMn_2O_4 – CuMn_2O_4 – MnCo_2O_4 , в том числе не содержащих экологически вредных технологических добавок [12].

В настоящей работе обоснована возможность расширения номенклатуры толсто- и тонкопленочных элементов оксишпинельных соединений для получения интегральных средств мониторинга температуры и влажности окружающей среды. Особенно актуальны такие разработки в связи с необходимостью внедрения систем эффективного контроля из-за постоянно происходящих изменений климата как отдельных географических регионов, так и в масштабах экосистемы всей планеты [13].

До настоящего времени для получения интегральных толсто- и тонкопленочных сенсоров температуры и влажности резистивного типа предлагалось два принципиально различных подхода — использование температурных зависимостей электросопротивления влажочувствительных слоев или же построение зависимостей электросопротивления от влажности окружающей среды для некоторых термочувствительных пленок. Первый подход реализуется, главным обра-

зом, в толстых пленках ряда соединений со структурой перовскитов, в первую очередь BaTiO_3 [14]. Второй подход достаточно хорошо апробирован для ряда толсто- и тонкопленочных шпинелей смешанной системы Mn-Co-Ni с добавками RuO_2 , что позволяет достичь хорошую временную стабильность созданных элементов [15]. Однако в обоих случаях смежная чувствительность толсто- и тонкопленочных сенсоров оказалась существенно ограниченной неидеальностью структуры внутренних влаготранспортирующих пор и базовой шпинели.

Более совершенным представляется альтернативный подход, заключающийся в размежевании функций термо- и влажочувствительности в двух различных пленках одного структурно-химического типа — оксишпинельного. Толсто- и тонкопленочное исполнение шпинелей смешанной системы NiMn_2O_4 – CuMn_2O_4 – MnCo_2O_4 имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими видами функциональной электрокерамики. Так, в частности, в рамках данной системы достаточно легко получить слои, обладающие принципиально различной проводимостью от p - (в случае Co -обогащенных составов, таких как $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$) до n -типа (в случае Ni -обогащенных составов, таких как $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$). Поэтому открывается возможность получения термочувствительных диодных p – n -структур, выполняющих дополнительно роль токовых ограничителей, в комбинации со слоями диэлектрической керамики MgAl_2O_4 , чувствительной к воздействию влаги окружающей среды.

В настоящей работе проанализированы возможности применения толсто- и тонкопленочных слоев оксишпинельной керамики смешанного p – n – d -типа с целью раздельного контроля влажности и температуры окружающей среды.

Образцы объемной термочувствительной керамики состава $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$ (I) и керамики состава $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$ (II) получали традиционным методом высокотемпературного спекания, используя исходные реагенты в форме соответствующих гидрокарбонатов, как это описано в [16–17]. Максимальная температура синтеза керамики I составляла 1040°C , что позволяло при четырехчасовом спекании получить образцы практически однофазной шпинели, не содержащие дополнительной солевой фазы. Такая керамика обладает достаточно хорошей термочувствительностью с характерным значением тепловой постоянной B , определенной по измерени-

Автор выражает благодарность к. х. н. П. Ю. Демченко за помощь в рентгеноструктурной характеристике образцов базовой оксишпинельной керамики и толстых пленок.

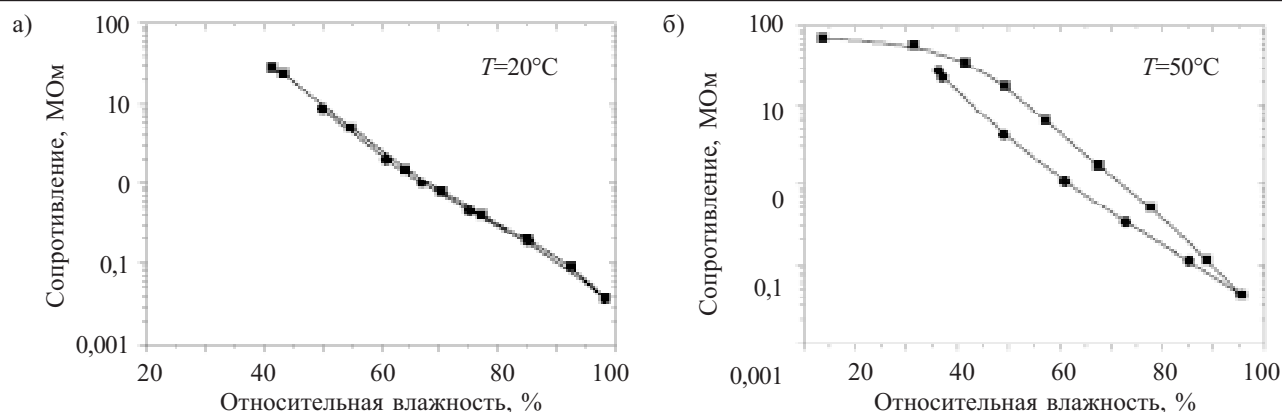


Рис. 1. Типичные эксплуатационные характеристики влажочувствительности толстых пленок MgAl_2O_4 при температуре 20 (а) и 50°C (б), полученные при увеличении (■) и уменьшении (●) относительной влажности

ям электрического сопротивления при 25 и 85°C , на уровне 3500 К. Ni-обогащенную керамику II системы $\text{NiMn}_2\text{O}_4\text{--CuMn}_2\text{O}_4\text{--MnCo}_2\text{O}_4$ получали в результате одночасового спекания при 1200°C с соответствующим этапом предварительной и последующей выдержки в условиях стабилизации базовой шпинели NiMn_2O_4 (920°C) [1]. Для такой керамики, содержащей достаточно стабильную фазу шпинели и около 12% оксида NiO, характерное значение B составляет около 3400 К. Объемную диэлектрическую керамику MgAl_2O_4 спекали на протяжении пяти часов при 1300°C [18, 19], в результате чего она приобрела характерную тримодальную топологию внутренних пор с общей плотностью поверхности около $6,9\text{ м}^3/\text{г}$ и характерными выделенными максимумами около 2,5, 85 и 450 нм, что обеспечивало необходимый уровень влажочувствительности (изменение электрического сопротивления составляло 4—4,5 порядка) в диапазоне от 30 до 100%.

В состав паст для получения толстых пленок помимо основной составляющей (порошок базовой оксиманганатной или оксиалюминатной шпинели) и органической связки входили добавки экологически чистого (т. е. бессвинцового) стекла (3% для манганатной и 8% для алюминатной шпинели), а также оксид Bi_2O_3 (около 3—4%).

Далее полученную пасту наносили методом трафаретной печати на подложки типа RUBALIT 708S (96% Al_2O_3) с предварительно подготовленной разводкой из серебра. Для получения пленок различной толщины применяли одно- и двукратную печать. Просушенные толсто пленочные слои, формирующие типичную смешанную планарную $p\text{--}n\text{--}d$ -конфигурацию [20, 21], спекали в печи РЕО-601-084 при 850°C . Толщина полученных p -проводящих слоев керамики I составляла 55—60 мкм, n -проводящих слоев керамики II — 65—70 мкм, диэлектрических слоев MgAl_2O_4 — 50—55 мкм. Измерения электрического сопротивления проводили для каждого из слоев в планарной конфигурации.

Фазовый состав и кристаллическую структуру пленок изучали с использованием рентгенодифрактометра HZG-4a (FeK α -излучение), а их микроструктуру — с помощью электронного микроскопа LEO 982. Электрическое сопротивление пленок измеряли

в температурном диапазоне от -30 до $+170^\circ\text{C}$ с помощью цифровых вольтметров, используя климатические камеры MINI SABZERO (модель MC-71) и HPS 222. Влажочувствительность толстых пленок MgAl_2O_4 рассчитывали на основании зависимостей их электросопротивления от относительной влажности окружающей среды, полученных при 20 и 50°C и частоте электрического тока 500 Гц при увеличении и последующем уменьшении относительной влажности.

Электрическое сопротивление термочувствительных толсто пленочных элементов измерялось в нормальной атмосфере в диапазоне $25\text{--}85^\circ\text{C}$ с шагом 10°C при строго контролируемой температуре среды в момент проведения измерения (погрешность измерения температуры не превышала $\pm 0,1^\circ\text{C}$).

На рис. 1 показаны типичные зависимости электросопротивления толстых пленок алюминатной оксишпинели MgAl_2O_4 d -типа от величины относительной влажности окружающей среды при различных температурах (в этой конфигурации толстые пленки оксиманганатной керамики p - и n -типа выполняли роль подложки). Здесь хорошо прослеживается четкая линейность зависимости при $T=20^\circ\text{C}$, которая несколько ухудшается по мере роста температуры. Так, в частности, при 50°C пропадает чувствительность пленок MgAl_2O_4 к низким уровням относительной влажности (примерно до 50%) и появляется ощутимый гистерезис рабочего цикла при ее повышении и понижении. То есть можно констатировать, что рабочие характеристики толстых пленок алюминатной оксишпинели, нанесенные на слой оксиманганатной керамики, практически не ухудшились по сравнению с характеристиками толстых пленок, полученных непосредственно на самих подложках [20].

Измерения электросопротивления толстых пленок керамики $\text{NiMn}_2\text{O}_4\text{--CuMn}_2\text{O}_4\text{--MnCo}_2\text{O}_4$ показали, что их термочувствительность также не нарушилась (см. рис. 2). Как p -, так и n -слои демонстрировали практически идеальную линейность зависимости сопротивления от температуры в диапазоне $25\text{--}170^\circ\text{C}$, т. е. электросопротивление толстых пленок в исследованном температурном диапазоне описывается по экспоненциальному закону с характерными значениями $B_{25/85}$ от 3000 до 3700 К в зависимости от состава керамики (что даже несколько превышает соответствующие значения $B_{25/85}$ для объемной керамики).

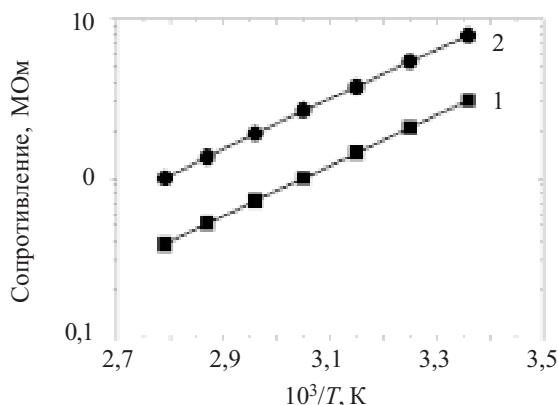


Рис. 2. Типичные эксплуатационные характеристики термочувствительности толстых пленок оксиманганатной керамики:

1 — *p*-типа ($\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$);
2 — *n*-типа ($\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{1,9}\text{O}_4$)

Удельное объемное электросопротивление исследуемых пленок керамики I и II составляет 33 и 29 Ом·м, соответственно, причем эти значения намного выше, чем в объемных образцах того же состава (примерно на уровне 2—3 Ом·м). Другими словами, электрические свойства толстых пленок оксипинелей определяются свойствами не только поликристаллической фазы полупроводника, в данном случае шпинели различного состава, но и стеклофазы. Порошок стекла в составе терморезистивной пасты в процессе спекания обволакивает поликристаллы шпинели и формирует диэлектрические прослойки стеклофазы между керамическими зернами и, тем самым, препятствует процессам электропереноса в толстой пленке. Как результат, наблюдается существенное увеличение электросопротивления пленочных структур по сравнению с объемными образцами.

При изучении фазового состава объемной оксипинельной керамики и полученных на ее основе толстых пленок не были обнаружены смешанные оксипинельные структуры, несмотря на большую контактирующую поверхность разнородных слоев толстых пленок. Толстые пленки Со-обогащенной керамики I содержат одну кристаллическую фазу — кубическую шпинель с пространственной группой $Fd\bar{3}m$ и параметром решетки $a=0,830130(9)$ нм. Пленки Ni-обогащенной керамики II, наряду с основной фазой шпинели ($Fd\bar{3}m$, $a=0,83794(1)$ нм), содержат следы дополнительной фазы — оксида никеля NiO ($Fm\bar{3}m$, $a=0,41961(3)$ нм). Толстые пленки диэлектрической керамики MgAl_2O_4 содержат основную кристаллическую фазу шпинели с пространственной группой $Fd\bar{3}m$ и параметром решетки $a=0,808191(6)$ нм, а также следы (весовая доля до 0,2%) дополнительной фазы оксида магния MgO ($Fm\bar{3}m$, $a=0,4210(1)$ нм). Необходимо также отметить, что рентгенодифрактограммы всех исследованных пленок проявляют рефлексы и от материала подложки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о хорошей совместимости всех элементов оксипинельных толстополеночных структур (*p*-, *n*- и *d*-типа), эксплуатируемых в планарной конфигурации,

что позволяет проводить с их помощью независимые и одновременные измерения влажности и температуры окружающей среды при формировании соответствующих электродов к температурно- и влажочувствительным слоям.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шефтель И. Т. Терморезисторы. — М.: Наука, 1973.
2. Пат. 47534 UA. Терморезистивный материал / М. М. Ваків, І. В. Гадзаман, А. П. Ковальський та ін. — 2002. — Бюл. № 7.
3. Ikegami A., Arima H., Tosaki H. et al. Thick-film thermistor and its applications // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. — 1980. — Vol. CHMT-3, N 4. — P. 541—550.
4. Qu W., Green R., Austin M. Development of multi-functional sensors in thick-film and thin-film technology // Meas. Sci. Technol. — 2000. — Vol. 11. — P. 1111—1115.
5. White N. W., Turner J. D. Thick-film sensors: past, present and future // Meas. Sci. Technol. — 1997. — Vol. 8. — P. 1—4.
6. Dziedzic A., Golonka L. I., Kozłowski J. et al. Thick-film resistive temperature sensors // Meas. Sci. Technol. — 1997. — Vol. 8. — P. 78—81.
7. Захаров В. И., Олеск А. О. Материалы и технология изготовления толстополеночных терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления // Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1989. — Вып. 64, № 3. — С. 30—34.
8. Захаров В. И., Олеск А. О., Ситников Б. И., Шефтель И. Т. Толстополеночные терморезисторы // Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1984. — Вып. 54, № 1. — С. 16—19.
9. Schmidt R., Stiegelschmitt A., Roosen A., Brinkman A. W. Preparation and performance of thick film NTC thermistors // Key Engineering Materials. — 2002. — Vols. 206—213. — P. 1417—1420.
10. Шпотюк О. И., Гадзаман І. В., Охримович Р. В. и др. Использование керамики на основе твердых растворов $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{O}_4$ для толстополеночных терморезисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 4—5. — С. 55—57.
11. Гадзаман І. В., Мруз О. Я., Шпотюк О. И., Брунец И. М. Зависимость свойств толстополеночных терморезисторов от состава базовой шпинели // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 5. — С. 62—64.
12. Ваків Н. М., Гадзаман І. В., Мруз О. Я., Немеш В. Г. Применение безсвинцового стекла в толстополеночных терморезистивных материалах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 2. — С. 52—55.
13. Goede A. P. H., Burrows J. P. Energy and Environment. «The intimate link» // EuroPhysics News. — 2009. Vol. 40, N 4. — P. 4—6.
14. Holc J. Temperature characteristics of electrical properties of $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ thick-film, humidity sensors // Sensors and Actuators. — 1995. — Vol. B 26/27. — P. 99—102.
15. Huang J. Preparation and characteristic of the thermistor materials in the thick-film integrated temperature-humidity sensor // Mat. Sci. Eng. — 2003. — Vol. B 99. — P. 523—526.
16. Бодак О. І., Аксельруд Л. Г., Котур Б. Я. та ін. Кристалічна структура та електричні властивості кераміки $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$ // Укр. хімічний журнал. — 2003. — Т. 67, № 4. — С. 89—91.
17. Mrooz O., Hadzaman I., Shpotyuk O. et al. Technological modification of $\text{Cu}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{Co}_{1,6}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_4$ spinel-based ceramics // Вісник Львів. ун-ту. Сер. Хім. — 2002. — Vol. B. 41. — С. 107—114.
18. Vynnyk I., Hadzaman I., Klym H. et al. Obtaining of magnesium aluminate ceramics with the improved humidity sensitivity characteristics // Technology and Design in Electronics. — 2006. — N 2. — P. 60—62.
19. Shpotyuk O., Ingram A., Klym H. et al. PAL spectroscopy in application to humidity-sensitive MgAl_2O_4 ceramics // J. Europ. Ceram. Soc. — 2005. — Vol. 25. — P. 2981—2984.
20. Klym H., Hadzaman I., Shpotyuk O. et al. Multifunctional spinel-type ceramics for environment sensors // Вісник Львів. ун-ту. Сер. Фіз. — 2009. — N 43. — P. 185—191.
21. Hadzaman I., Klym H., Shpotyuk O., Brunner M. Temperature sensitive spinel-type ceramics in thick-film multilayer performance for environment sensors // Acta Physica Polonica A. — 2010. — Vol. 117, N 1. — P. 233—236.
22. Klym H. I., Balitska V. O., Vakiv M. M. et al. Peculiarities of thermodegradational effects in thick film of mixed transition-metal oximanganites // Bull. Lviv Polytechnic National University, Solid-state electronics: theory, devices and application. — 2004. — N 510. — P. 98—102.

К. ф.-м. н. В. М. ПОПОВ, А. С. КЛИМЕНКО,
А. П. ПОКАНЕВИЧ, Ю. М. ШУСТОВ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов
E-mail: popovmc@i.kiev.ua, microic@voliacable.com

Дата поступления в редакцию
06.11 2009 г.

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

РТУТНЫЙ МИКРОЗОНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

С помощью ртутного микрозонда предложена конструкция исследования локальные электрофизические свойства структур Si-SiO₂ с тонким слоем оксида в области электрически активных дефектов с локальностью 5—25 мкм.

Возрастание степени интеграции изделий микроэлектроники неразрывно связано с неуклонным сокращением геометрических характеристик их активных элементов. В результате размеры активных элементов полупроводниковых приборов становятся соизмеримыми с размерами областей, где проявляется неоднородность электрофизических свойств материалов и технологических структур, и влияние неоднородности на параметры и надежность изделий существенно повышается. Как следствие, растет потребность в разработке методик и измерительных средств, позволяющих достоверно и с необходимым уровнем локальности проводить анализ свойств материалов и структур на различных этапах изготовления приборов. С помощью таких методик можно получать информацию для эффективного управления технологическими процессами изготовления таких важнейших структур как диэлектрик-полупроводник (ДП) и металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) с целью снижения концентрации электрически активных дефектов, понижения уровня флуктуаций электрофизических параметров и повышения качества изделий микроэлектроники.

Одним из распространенных средств при исследовании полупроводниковых материалов (Si, GaAs, SiGe и др.) и ДП-, МДП-структур является ртутный зонд, позволяющий экономично, экспрессно и без нарушения поверхности формировать контакт к исследуемым структурам [1, 2]. При этом контакт большинства широко применяемых полупроводниковых материалов с ртутью образует диод Шоттки, являющийся эффективным средством исследования свойств полупроводников. В настоящее время наибольшее распространение в микроэлектронике нашли ртутные зонды с диаметром контакта 0,1—1 мм. В большинстве случаев площадь контакта имеет фиксированное значение и определяется диаметром цилиндра, по которому ртуть поступает из резервуара снизу вверх и прижимается к исследуемой поверхности под действием вакуума, создаваемого мини-

атурным насосом. Общим недостатком таких зондов является расположение исследуемой полупроводниковой пластины над ртутным контактом и, соответственно, невозможность наблюдения и точного выбора области формирования контакта. Кроме того, и это главное, достаточно большие размеры ртутного контакта позволяют исследовать только интегральные (усредненные) электрофизические параметры структур. В конструкциях зондов, где для уменьшения площади ртутного контакта используются капилляры, также отсутствует возможность наблюдения места контакта, а для поддержания постоянства его площади требуется термостатирование зонда, что усложняет проведение многократных измерений.

Авторами разработана конструкция ртутного зонда, обеспечивающего формирование контакта малого диаметра (5—25 мкм) к визуализируемому участку исследуемой структуры. В сочетании с наиболее информативными методами определения электрофизических параметров и с высокочувствительными средствами их измерения микрозонд позволяет исследовать локальные структурно-примесные неоднородности в структурах ДП на различных полупроводниковых материалах.

Конструкция ртутного микрозонда

При реализации процесса локальных измерений с применением ртутного микрозонда основной целью была визуализация области контактирования, создание контакта малой площади и возможность точного регулирования ее величины под наблюдением.

Предложена следующая конструкция микрозонда. Носителем ртутного контакта является тонкая прозрачная стеклянная пластина прямоугольной или квадратной формы, на нижнюю грань которой нанесен круглый прозрачный электрод (SnO₂ или In₂O₃). Электрод располагается в центре пластины, от него на боковую грань пластины выведена узкая проводящая дорожка для создания контакта с держателем, представляющим собой иглообразный зонд. Последний с помощью токопроводящего клея закрепляется на одной из граней пластины под некоторым углом. Пластины помещают на чистую полированную поверхность полупроводниковой структуры прозрачным электродом вниз, ее держатель фиксируется в гнезде прецизионного микроманипулятора, имеющего три степени свободы и способного поднимать и опускать пластину параллельно поверхности. Развернув пластину

в микроманипуляторе прозрачным электродом вверх, в ее центральной части располагают микрокаплю чистой ртути (диаметром менее 100 мкм), которая за счет эффекта смачивания материала электрода создает контакт с ним. Следует отметить, что в ряде случаев после создания на стеклянной пластине прозрачного круглого электрода в его центре дополнительно наносят полупрозрачный слой золота толщиной 150—300 Å. При контактировании с этим слоем ртутной капли формируется амальгама, за счет которой создается более эффективное сцепление с электродом и повышается надежность микрозонда при многократных измерениях.

После этого поворачивают стеклянную пластину микрокаплей вниз и помещают над столиком с исследуемым образцом под длиннофокусный объектив микроскопа с высоким оптическим разрешением. Регулируя прижим микрокапли ртути к исследуемой поверхности, изменяют диаметр контактной площадки (рис. 1).

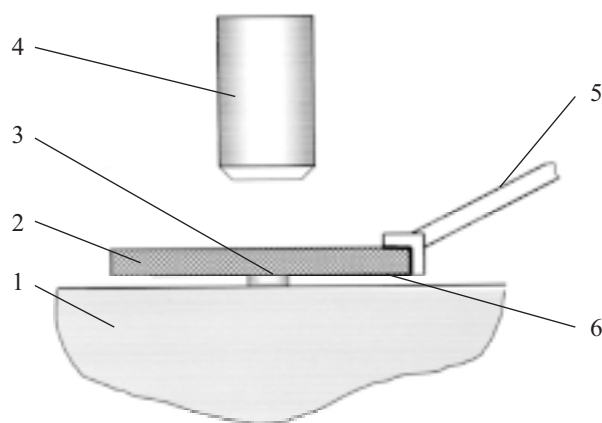


Рис. 1. Конструкция ртутного микрозонда:

1 — полупроводниковая структура; 2 — прозрачная стеклянная пластина; 3 — капля ртути; 4 — длиннофокусный объектив микроскопа; 5 — держатель пластины, установленный в микроманипуляторе; 6 — прозрачный электрод

Помимо описанной конструкции микрозонда на основе стеклянной пластины в форме параллелепипеда была реализована и успешно опробована конструкция микрозонда на основе стеклянного цилиндра диаметром менее 1 мм.

Установлено, что в определенном диапазоне значений диаметра ртутного контакта к прозрачному электроду его площадь, наблюдаемая сверху, практически равна площади контакта ртути к исследуемой поверхности. На основании точных измерений диаметра электрода рассчитывают его площадь. Воспроизводимость площади ртутного контакта при измерениях достигается благодаря применению микроманипуляторов с высокой точностью вертикального перемещения зонда (± 1 мкм) при использовании микроскопа с увеличением в 1000 крат и выше. При диаметре ртутного контакта 10—15 мкм воспроизводимость его площади такова, что разброс ее значений составляет около 10%.

Вывод от держателя зонда в микроманипуляторе соединен с коаксиальным (экранированным) кабелем,

подключенным к измерительному комплексу. Второй коаксиальный кабель измерителя соединяется со столиком, на котором расположен исследуемый образец.

Разработанный ртутный микрозонд был установлен на аналитической зондовой станции MM 7000 фирмы “Micromanipulator” с микроскопом “Micro Zoom II” фирмы “Bausch and Lomb”, имеющим длиннофокусные объективы и максимальное увеличение свыше 1000 крат. Специальный микроманипулятор осуществлял перемещение зонда по трем координатам с точностью ± 1 мкм.

Исследования электрофизических свойств полупроводниковых материалов, ДП- и МДП-структур проводились с помощью автоматизированного комплекса HP4061A фирмы “Hewlett Packard” с минимальным значением измеряемой емкости $1 \cdot 10^{-15}$ Ф.

Образцы и методика исследований

Исследовались структуры Si-SiO₂ с тонкими (50—120 Å) и толстыми (250—270 Å) оксидными пленками, полученными при термическом окислении кремния *n*-типа КЭФ-4,5 и кремния *p*-типа КДБ-10 с удельным сопротивлением 4,5 и 10 Ом·см, соответственно, и концентрацией легирующих примесей $N_D = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³. В случае исследования структур Si-SiO₂ с толстой оксидной пленкой (порядка 260 Å) формировались алюминиевые электроды в форме квадратов со сторонами 100—250 мкм толщиной 1,2 мкм. Толщина оксида контролировалась на эллипсометре с точностью 5—7 Å.

Определялись высокочастотные вольт-фарадные характеристики (ВЧ ВФХ) структур Hg-SiO₂-Si, сформированных локальным микрозондом на поверхности образцов. Исследования проводились на частоте тестового сигнала 1 МГц. Диаметр ртутного контакта составлял 5—10 мкм. До начала измерений непосредственно перед созданием контакта микрозонда с поверхностью проводилась компенсация распределенной емкости измерительной системы. После формирования контакта измеренные значения высокочастотной емкости корректировались на величину распределенной (паразитной) емкости ртутного микрозонда. Ее величина зависела от прижима ртутной капли (площади контакта) и для исследуемых образцов рассчитывалась на основании измеренных и предварительно рассчитанных ВЧ ВФХ структур Si-SiO₂ с точно известными значениями толщины оксидной пленки и концентрации легирующей примеси в кремнии. При изменении параметров исследуемых структур Si-SiO₂ описанная процедура расчета паразитной емкости для используемой площади контакта повторяется.

В первой серии экспериментов исследовались локальные электрофизические свойства электрически активных дефектов (ЭАД). В целях выявления ЭАД на поверхности кремния в структурах Si-SiO₂ их визуализации и точного определения координат был использован ранее разработанный авторами метод нематических жидких кристаллов (НЖК), позволяющий визуализировать структурно-примесные дефекты на поверхности полупроводника, в области которых происходит локальное изменение поверхностного потенциала [3].

После определения координат ЭАД и их привязки к специально созданным реперным знакам на пластинах НЖК удалялся. После стандартной химической обработки поверхности проводился анализ локальных ВЧ ВФХ структур $\text{Hg-SiO}_2\text{-Si}$ вдоль линий, пересекающих области расположения дефектов. На основании ВЧ ВФХ рассчитывались значения плотности эффективного фиксированного заряда в оксиде кремния N_{SS} . По форме характеристик, в частности по отношению минимальной емкости в области инверсии к емкости оксида, оценивались эффективные значения концентрации легирующей примеси на поверхности N_D .

Во второй серии экспериментов исследовалось влияние термоупругих напряжений, существующих в системах Si-SiO_2 вблизи края электродов структур $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$, на локальные электрофизические свойства оксида и границы раздела «диэлектрик—полупроводник». Эти напряжения возникают вследствие различия термических коэффициентов расширения алюминия и кремния. В этом случае анализировались локальные ВЧ ВФХ при сканировании ртутным микронзондом поверхности оксида кремния перпендикулярно краю алюминиевого электрода. Измерения проводились на расстоянии до 25 мкм от края электрода.

Результаты и обсуждение

Выявленные методом НЖК [3] ЭАД на поверхности кремния в структурах Si-SiO_2 , в основном, имели вид линейных дислокаций и отдельных точечных дефектов, обусловленных, по-видимому, образованием дефектов упаковки при термическом окислении. На краях пластин кремния в ряде случаев наблюдались скопления линейных дислокаций, расположенных под углом 60° друг к другу и имеющих вид линий скольжения. Это свидетельствовало о том, что причиной их появления служили термомеханические напряжения, возникшие на краях пластин в результате высокотемпературных термических про-

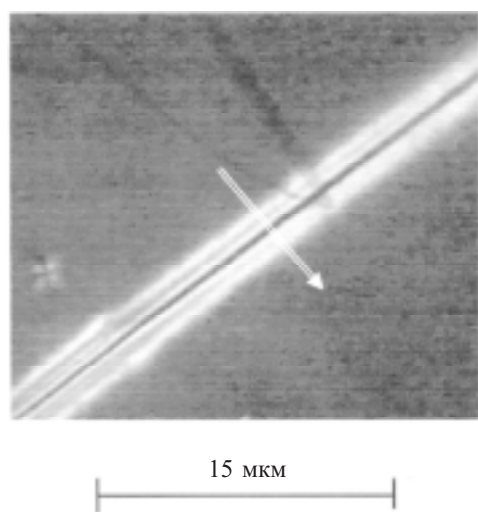


Рис. 2. Визуализация ЭАД на поверхности полупроводника в структуре Si-SiO_2 с толщиной оксидной пленки 117 \AA методом нематических жидких кристаллов (стрелкой указана линия анализа локальных электрофизических свойств)

цессов. Один из типичных линейных дефектов, сформировавшихся вблизи края окисленной пластины кремния, представлен на рис. 2. Изображение ЭАД, выявленного методом НЖК, имеет вид полосы, состоящей из центральной темной линии и двух симметрично расположенных светлых полос, которые согласно модели линейной дислокации [4] соответствуют ядру дислокации и окружающим его областям пространственного заряда.

В результате измерения локальных ВЧ ВФХ в области линейных ЭАД и вне дефектов было определено, что на бездефектных участках локальные свойства структур близки к интегральным, измеренным ртутным зондом большого диаметра (500 мкм). Небольшой разброс величины N_{SS} (менее 10%), по-видимому, отражает свойственный данной структуре уровень флуктуаций фиксированного заряда в оксиде. На участках с дефектами ВЧ ВФХ претерпевает определенные изменения. На основании статистического усреднения полученных результатов установлено, что наиболее типичными для этих участков являются характеристики 1 и 2 на рис. 3, которые существенно отличаются от характеристик, свойственных бездефектным областям (кривая 3). Наблюдаются заметные сдвиги ВЧ ВФХ по оси напряжений (до 0,5 В), которые соответствуют локальному увеличению плотности фиксированного заряда на $(7-8) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При этом также были отмечены и случаи уменьшения N_{SS} и изменения знака заряда. На начальной стадии формирования инверсии наблюдается небольшой подъем на ВЧ ВФХ (кривая 1 на рис. 3). Такое поведение указывает на аномально высокую скорость генерации неосновных носителей заряда вследствие появления инверсионного слоя на поверхности кремния при отрицательных значениях N_{SS} в оксиде на кремнии n -типа. Кроме того, сам дефект может иметь низкое значение локального эффективного генерационного времени жизни неосновных носителей. Зарегистрированы изменения локальных значений уровня N_D в ЭАД. Для дислокации это может быть обусловлено присутствием пространственного заряда вдоль

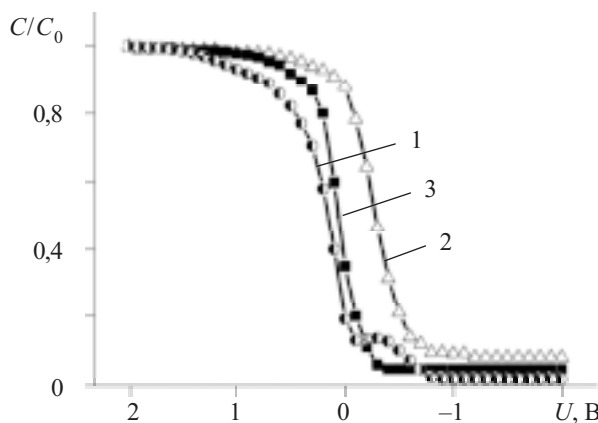


Рис. 3. Локальные нормированные ВЧ ВФХ структур $\text{Hg-SiO}_2\text{-Si}$ на кремнии КЭФ-4,5 со сверхтонким оксидом (толщина SiO_2 — 117 \AA) в области ЭАД (1, 2) и вне дефекта (3) ($C_0 = 63 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$, диаметр ртутного контакта — 5 мкм)

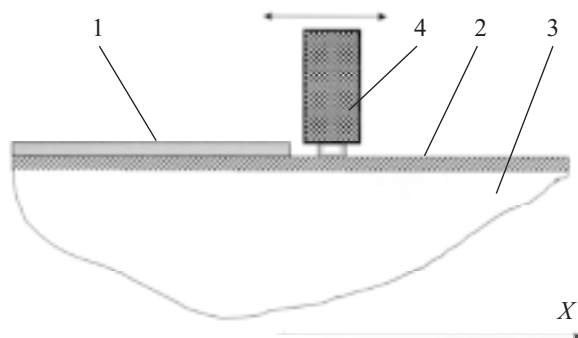


Рис. 4. Схема сканирования МДП-структуры ртутным микрозондом перпендикулярно краю электрода: 1 — электрод; 2 — диэлектрик; 3 — полупроводник; 4 — микрозонд

ее центральной линии. Возможно, что в некоторых случаях имеет место влияние так называемых «примесных атмосфер», образующихся вблизи структурных дефектов в кремнии.

Обращает на себя внимание и форма локальных ВЧ ВФХ на участках слабого обогащения поверхности полупроводника основными носителями (в начале спада кривых, рис. 3). На кривой 3, полученной на бездефектном участке, производная емкости по напряжению dC/dV , служащая качественной мерой неоднородности плотности поверхностного заряда [5], при значениях $C/C_0=0,75$ максимальна и составляет $1,25 \text{ В}^{-1}$. На кривых 1 и 2, характерных для участков с ЭАД, значения производных меньше и равны соответственно $0,65$ и $1,02 \text{ В}^{-1}$. Следовательно, в областях ЭАД в структурах Si-SiO₂ неоднородность плотности поверхностного заряда повышается.

Необходимо учитывать, что поскольку диаметр ртутного контакта превышает размеры ЭАД, реальные изменения величин N_{SS} и N_D в самих дефектах будут еще выше. В рассмотренном случае ширина слоя пространственного заряда вокруг линейной дислокации для кремния с $N_D=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ составляла приблизительно 2 мкм, в то время как диаметр ртутного контакта равнялся 5 мкм.

Исследования влияния механических напряжений в непосредственной близости к краю электродов МДП-структур на поведение локальных ВЧ ВФХ систем Si-SiO₂ проведены с помощью ртутного микрозонда со средним диаметром контакта порядка 7,5 мкм и шагом перемещения 2,5—3 мкм (рис. 4). Установлено, что по мере приближения к краю алюминиевого электрода происходит сдвиг локальных ВЧ ВФХ в сторону более высоких напряжений инверсии вследствие увеличения плотности фиксированного заряда в оксиде N_{SS} . Изменения наблюдаются начиная с 10 мкм от края и резко увеличиваются по мере приближения к электроду. Наибольшие изменения локальных ВЧ ВФХ и, соответственно, величины N_{SS} зарегистрированы на минимально возможном для измерений расстоянии от центра микрозонда до края электрода, равном 5 мкм (рис. 5). При этом локальные значения N_{SS} возросли на $3,6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Поскольку концентратором механических напряжений в МДП-структуре является край электрода, можно предпо-

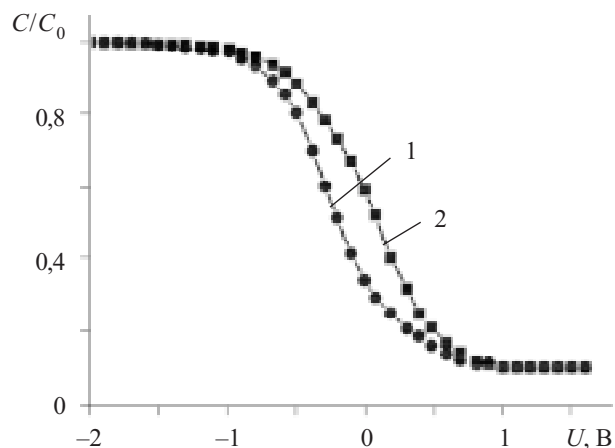


Рис. 5. Локальные нормированные ВЧ ВФХ структуры Hg-SiO₂-Si на кремнии КЭФ-4,5 с толщиной SiO₂ — 259 Å на удалении 10 (1) и 5 мкм (2) от края электрода ($C_0=70,5 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$, диаметр ртутного контакта — 7,5 мкм)

ложить, что в непосредственной близости к краю эти изменения значительно выше. Полученные данные качественно согласуются с известными результатами измерений, выполненных методами рентгеновской топографии [6] и спектроскопии Рамана [7], показывающими характер распределения механических напряжений в полупроводниковых подложках вблизи краев технологических структур.

Таким образом, ртутный микрозонд предложенной конструкции с диаметром контакта 5—25 мкм можно успешно применять для контроля однородности локальных электрофизических свойств технологических структур в изделиях микроэлектроники и для исследования локальных свойств электрически активных дефектов в системах Si-SiO₂ со сверхтонкой пленкой оксида.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Severin P. J., Poodt G. J. Capacitance – voltage measurements with a mercury – silicon diode // J. Electrochem. Soc.— 1972.— Vol. 119.— P. 1384.
2. Binet M. Fast and nondestructive method of C(V) profiling of thin semiconductor layers on an insulating substrate // Electronics Lett.— 1975.— Vol. 11.— P. 580.
3. Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P. Imaging and investigation of non-uniform distributions of electrophysical properties of insulator-semiconductor structures with thin oxides // Mater. Science and Engineering.— 2005.— Vol. 118.— P. 170.
4. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках.— М.: Мир, 1974.
5. Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник.— Киев.: Наукова думка, 1978.
6. Доброхотов В. Г., Приходько А. В. Деформации в кремнии, создаваемые несплошными диэлектрическими пленками // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.— 1990.— № 4 (138).— С. 139.
7. De Wolf I. Micro-Raman spectroscopy to study local mechanical stress in silicon integrated circuits // Semicond. Sci. Technol.— 1996.— Vol. 11.— P. 139.

К. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ, А. Н. НАУМОВА, А. Н. ВОВКОГОН

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: kravetz_kpi@ukr.netДата поступления в редакцию
18.09 2009 г.Оппонент к. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕПЛООБМЕНА В ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ

Представлена конструкция пульсационной тепловой трубы, схема измерений и данные по термическому сопротивлению. Показаны особенности процессов теплообмена внутри пульсационной тепловой трубы.

В настоящее время все больший интерес вызывают системы охлаждения на основе пульсационных тепловых труб (ПТТ), в которых движение теплоносителя осуществляется не только за счет капиллярных сил, сил инерции и гравитации, но и механического воздействия растущих паровых пузырей. В первом упоминании о ПТТ в [1] была показана возможность переноса тепловой энергии теплоносителем за счет инерционных сил. Затем были представлены реальные конструкции ПТТ [2–4]. В дальнейшем изучение физических процессов, происходящих в ПТТ, нашло свое отражение в работах [5, 6] и др. Несмотря на широкий интерес к ПТТ и большое количество разнообразных конструкций, в настоящее время нельзя однозначно ответить на вопрос о влиянии различных факторов на их теплопередающие характеристики, в частности на термическое сопротивление. Это связано с тем, что при передаче тепловой энергии из зоны нагрева в зону конденсации одновременно происходят разные физические процессы (конвекция, процесс парообразования, конденсация, массоперенос), каждый из которых требует отдельного изучения.

ПТТ очень просты в изготовлении. Они не содержат ни капиллярно-пористой структуры, ни клапанов, ни других элементов для перемещения теплоносителя из зоны нагрева в зону конденсации и при этом могут функционировать при любой ориентации в пространстве [6, 7]. Поэтому ПТТ являются одними из наиболее эффективных и перспективных устройств для охлаждения теплонагруженных элементов.

Целью настоящей работы было изучение процессов, происходящих внутри ПТТ (начало действия центров парообразования и, как следствие, изменение термического сопротивления), в зависимости от различных факторов (величины теплового потока, температуры и расхода охлаждающей жидкости).

Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Экспериментальная ПТТ была изготовлена из медной трубки с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 1$ мм

и наружным диаметром $d_{\text{нар}} = 2$ мм. Трубка длиной 1865 мм была изогнута в змеевик из семи петель, замкнутых в единый объем (рис. 1). Высота конструкции составляла 110 мм, при этом высота зоны нагрева — 50 мм, зоны транспорта — 35 мм, а зоны конденсации — 45 мм.

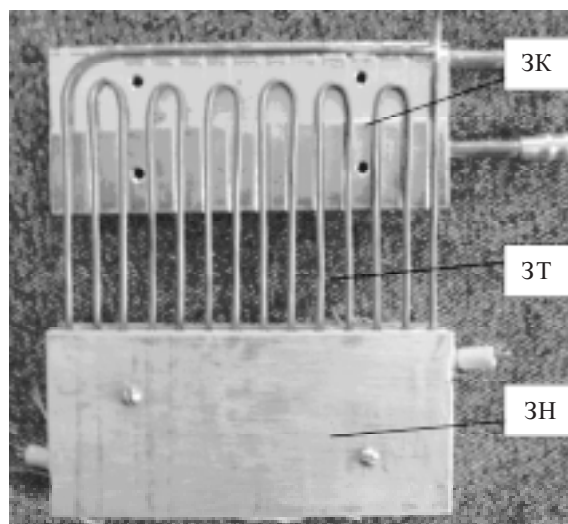


Рис. 1. Конструкция экспериментальной ПТТ:
ЗН — зона нагрева; ЗТ — зона транспорта; ЗК — зона конденсации

Температурное поле ПТТ измерялось медь-константановыми термопарами, показания которых в режиме реального времени выводились на экран персонального компьютера через аналогово-цифровой преобразователь. Такое устройство позволяло непрерывно в течение всего эксперимента наблюдать изменение температурного поля ПТТ, а также четко фиксировать момент начала пульсаций температуры.

Перед началом исследований внутренняя полость ПТТ очищалась и дегазировалась с последующей проверкой на герметичность. После этого ПТТ вакуумировалась с помощью специально оборудованного вакуумного стенда [8]. Заправка ПТТ теплоносителем производилась на этом же стенде, степень заполнения составляла 50% от внутреннего объема ПТТ. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная деаэрированная вода.

На рис. 2 представлена схема установки для исследования теплопередающих характеристик ПТТ. Подвод теплоты к зоне нагрева осуществлялся с по-

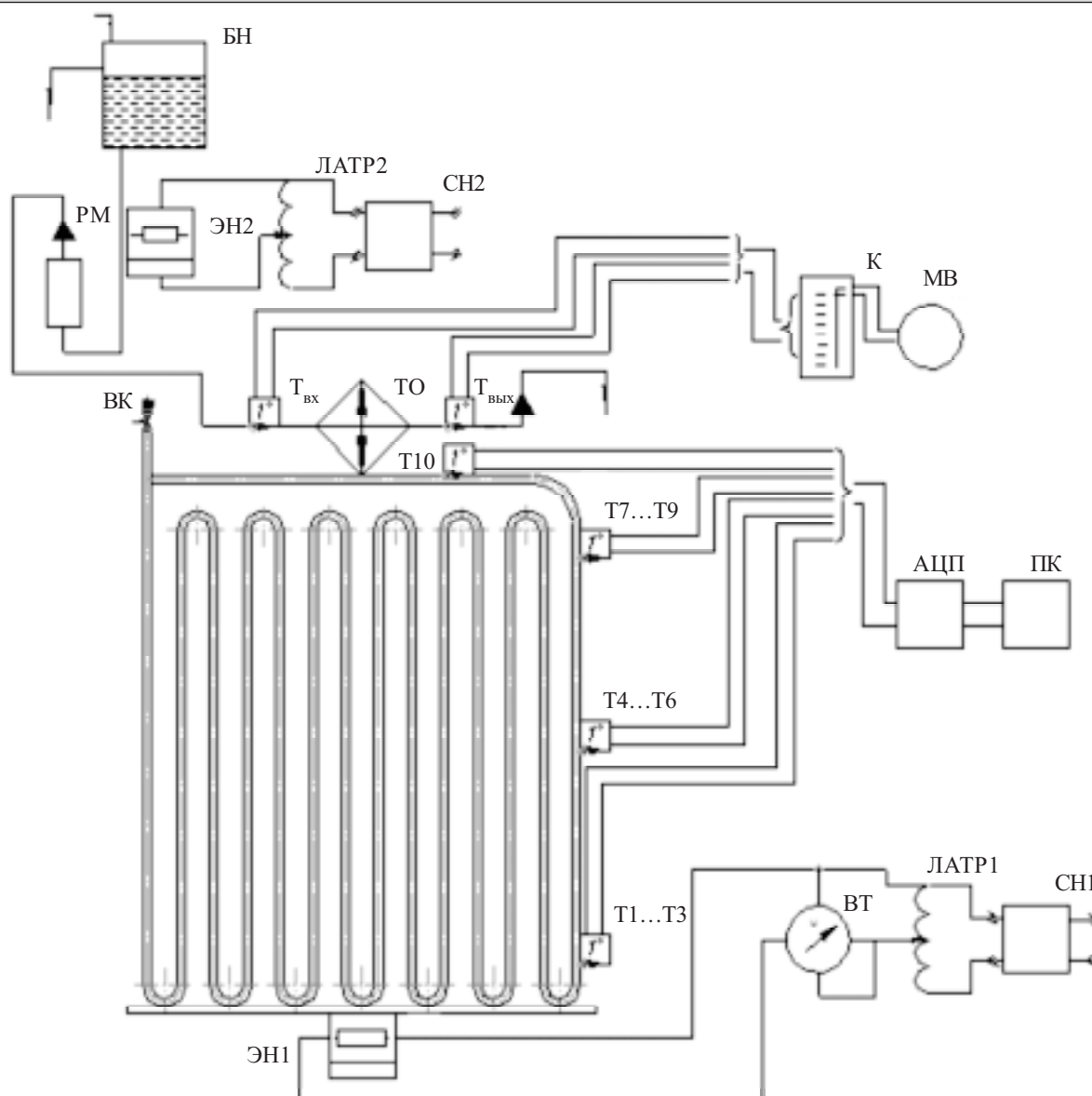


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

ВК — вакуумный кран; ВТ — ваттметр; БН — напорный бак; К — коммутатор; ПК — персональный компьютер; ЛАТР — лабораторный автотрансформатор; ЭН — электронагреватель; МВ — милливольтметр; РМ — ротаметр; СН — стабилизатор напряжения; T1...T10 — медь-константановые термопары; T_{вх}, T_{вых} — хромель-алюмелевые термопары; ТО — теплообменник; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь

мощью нагревателя специальной конструкции, состоящего из двух частей, между которыми располагалась ПТТ. Зона конденсации также представляла собой конструкцию из двух отдельных пластин с припаянными трубками, по которым подавалась охлаждающая вода из напорного бака. Для уменьшения термического сопротивления между ПТТ и электронагревателем, а также между ПТТ и конденсатором, наносилась теплопроводная паста КПТ-8. Подача теплового потока на электронагреватель производилась с помощью ЛАТРа РНО-250-2-М и измерялась ваттметром Д5088 с классом точности 0,2.

Температура воды на входе в конденсатор поддерживалась постоянной (в интервале от 20 до 40°C) с помощью нихромового нагревателя, намотанного на

подводящую трубку. Расход охлаждающей жидкости G фиксировался расходомером, который был предварительно оттарирован. Температура охлаждающей жидкости на входе в конденсатор ($t_{вх}$) и на выходе из него ($t_{вых}$) измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. Величина реально отводимого теплового потока рассчитывалась как

$$Q_{отв} = G C_p (t_{вых} - t_{вх}), \quad (1)$$

где C_p — теплоемкость воды для данного диапазона температуры.

С целью минимизации тепловых потерь в окружающую среду рабочий участок теплоизолировался базальтовым волокном.

По показаниям термопар, установленных в различных зонах, рассчитывались средние значения тем-

пературы в зонах нагрева ($\bar{t}_{\text{зн}}$) и конденсации ($\bar{t}_{\text{зк}}$), после чего рассчитывалось термическое сопротивление

$$R_{\text{ПТТ}} = \frac{\Delta t}{Q_{\text{отв}}} = \frac{\bar{t}_{\text{зн}} - \bar{t}_{\text{зк}}}{Q_{\text{отв}}} \quad (2)$$

Результаты исследований

Проведенные исследования показали, что начало эффективной работы ПТТ наступало только когда подводимый тепловой поток Q был не меньше некоторой минимальной величины Q_{min} , при которой могли активироваться центры парообразования в зоне нагрева. При $Q < Q_{\text{min}}$ температура зоны нагрева ПТТ монотонно повышалась до установления стационарного состояния (рис. 3, а).

При небольших тепловых нагрузках стационарный режим достигался за 30—40 мин и характеризовался значительными перепадами температуры между зонами нагрева и конденсации (до 180°C). После начала активации первых центров парообразования в результате выталкивания части теплоносителя в зону конденсации перепад температур между зонами теплообмена резко снижался примерно в три раза. Время выхода на стационарный режим было минимальным и не превышало двух минут (рис. 3, б).

В пульсационной тепловой трубе можно выделить на два режима теплопередачи (рис. 4). Первый режим соответствует низким тепловым потокам и характеризуется теплопереносом за счет, в основном, теплопроводности стенки и конвекции паровой и жидкой фаз. В этом режиме при небольших тепловых нагрузках иногда наблюдались небольшие колебания температуры в зоне транспорта, обусловленные, вероятно, расширением паровой фазы и вытеснением теплых столбиков жидкости из зоны нагрева в зону транспорта. В зонах нагрева и транспорта температура монотонно возрастала, в то время как в зоне конденсации она оставалась практически постоянной, что хорошо видно на рис. 4 в области первого режима. При этом интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева была сравнительно низкой ($< 200 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$), и ПТТ практически не передавала тепловую энергию.

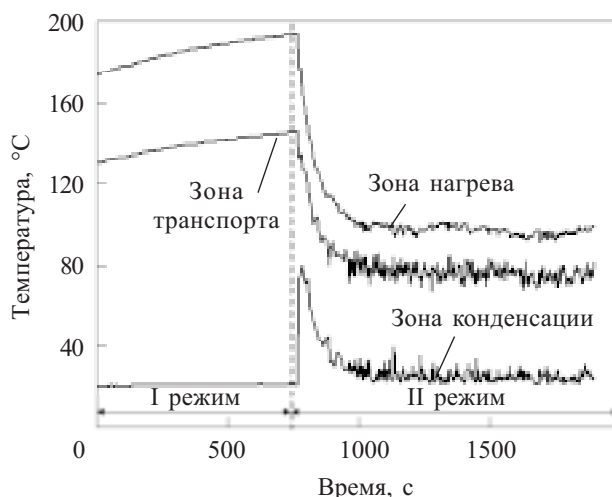


Рис. 4. Зависимость температуры ПТТ от времени

Начало второго режима характеризовалось резким снижением температуры зон нагрева и транспорта с одновременным скачком температуры в зоне конденсации. Интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева резко возрастала примерно в пять раз. При этом появлялись пульсации температуры во всех зонах ПТТ, что свидетельствовало об активации центров парообразования в зоне нагрева. В результате роста парового пузыря возникала движущая инерционная сила, которая выталкивала нагретую жидкость в зону конденсации, где часть паровой фазы конденсировалась. Поскольку ПТТ является замкнутой системой, холодная жидкость из зоны конденсации перемещалась в зону нагрева соседней петли. Такие процессы периодически повторялись при изменении плотности теплового потока и интенсивности охлаждения зоны конденсации.

Переход от первого режима работы ко второму сопровождался нестабильной работой ПТТ (рис. 5). Рассмотрим процесс такого перехода.

Температура стенки в зоне нагрева существенно превышала температуру насыщения, которая определялась по давлению внутри ПТТ. Давление в тепловых трубах общепринято определять по среднему значению температуры в адиабатной зоне. Для пульсиру-

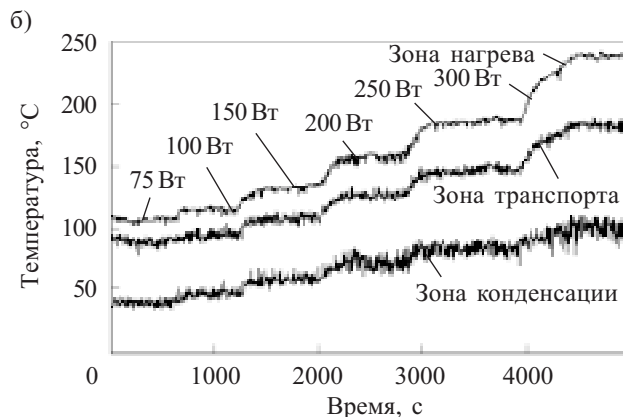
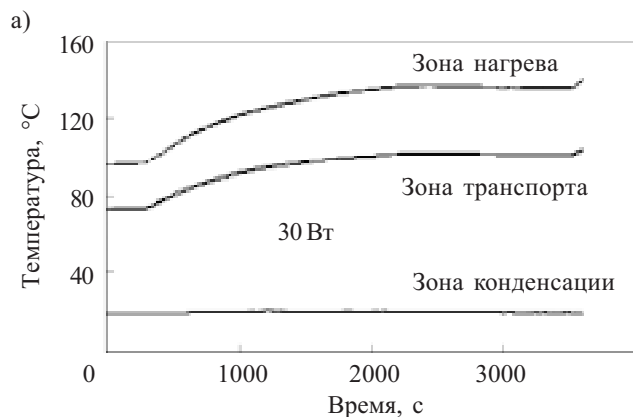


Рис. 3. Изменение температуры при выходе ПТТ на стационарный режим: а — до начала пульсаций ($Q < Q_{\text{min}}$); б — после начала пульсаций ($Q \geq Q_{\text{min}}$)

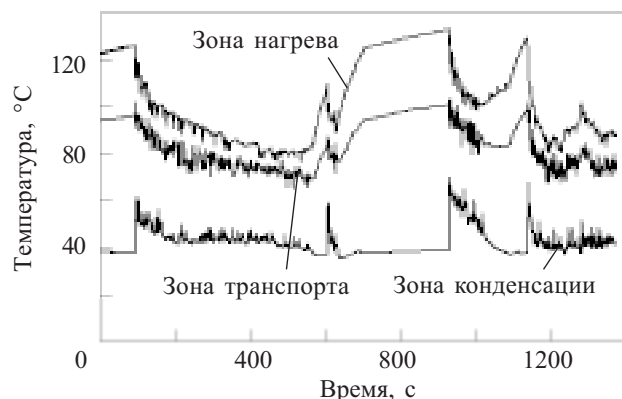


Рис. 5. Характерная картина переходов от одного режима работы к другому

ющих тепловых труб это также правомерно, в данном случае это зона транспорта. Давление насыщения в ПТТ при температуре 20°C не превышает $2,3 \cdot 10^3$ Па, что на два порядка ниже атмосферного, и по мере увеличения теплового потока оно возрастает.

Для активации центра парообразования на внутренней теплоотдающей поверхности зоны нагрева ПТТ необходимо создать некоторый перегрев жидкости по сравнению с температурой насыщения. В перегретом пограничном слое зарождение и начало роста парового пузыря происходит при некоторой минимальной разности между температурой поверхности нагрева $T_{ст}$ и температурой насыщения жидкости T_s . Связь перепада температуры начала кипения с критическим радиусом зародыша R_k описывается следующей зависимостью [9, с. 35; 10]:

$$\Delta T_{ст} = T_{ст} - T_s = \frac{2\sigma T_s}{r\rho'' R_k}, \quad (5)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения;
 r — теплота парообразования;
 ρ'' — плотность пара;
 R_k — критический радиус парового пузыря.

Обычно критический радиус парового пузыря принимается равным размеру впадины на шероховатой поверхности. Чем ниже уровень шероховатости, тем больший перегрев необходимо создать, чтобы активировался центр парообразования и режим из конвективного, с низкой интенсивностью теплообмена, перешел в пузырьковый с высокими коэффициентами теплоотдачи.

Зависимость (5) справедлива лишь для равномерно перегретой жидкости и по сравнению с реальным процессом кипения жидкости на поверхности нагрева дает заниженные результаты. Процесс зарождения парового пузыря в стесненных условиях, которые имеют место в ПТТ, отличается от условий кипения в большом объеме. К наиболее существенным отличиям также можно отнести то, что зона нагрева лишь частично заполнена жидкой фазой. В зависимости от степени заправки системы теплоносителем длина участков жидкой и паровой фаз внутри ПТТ может быть различной. Паровая фаза в зоне нагрева, по всей вероятности, может занимать больший объем, чем жидкая. Поскольку в паре «медь—вода» смачивание близ-

ко к идеальному, на участках с паровой фазой можно предполагать существование тонкого микрослоя жидкости, с которого интенсивно испаряется теплоноситель. Согласно закону Фурье, количество теплоты Q , передаваемое в паровую фазу через тонкий микрослой жидкости, определяется следующей зависимостью:

$$Q = \frac{\lambda_{ж}}{\delta_{мс}} F \Delta t, \quad (6)$$

где $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности микрослоя жидкости;
 $\delta_{мс}$ — толщина микрослоя жидкости;
 F — площадь поверхности теплообмена;
 Δt — перепад температуры по толщине микрослоя.

Так как толщина микрослоя жидкости небольшая (от единиц до десятков микрон), эти участки с паровой фазой могут отводить достаточно большие тепловые потоки. При этом происходит как бы переток теплоносителя из участка с жидкой фазой в паровое пространство, что затрудняет формирование условий возникновения центров парообразования в жидкости. Наличие таких условий теплообмена, а также пониженного давления и действия капиллярных сил, приводит к увеличению перепада температуры начала кипения $\Delta T_{ст}$. Действительно, на рис. 5 видно, что начало активации первых центров парообразования произошло при $\Delta T_{ст} \approx 30^\circ\text{C}$. Далее пульсирующий характер работы ПТТ сопровождался монотонным снижением средних температур зон нагрева и транспорта, в то время как в зоне конденсации средняя температура оставалась примерно на одном уровне. Давление внутри ПТТ снижалось, это приводило к прекращению действия центров парообразования, условия передачи тепловой энергии по длине ПТТ ухудшались, а температура в зоне нагрева начинала повышаться. При достижении перегрева $\Delta T_{ст}$ опять возникал паровый пузырь. Такие периодические изменения характера теплообмена продолжались во время переходного режима. Увеличение теплового потока вплоть до максимального значения приводило к стабильному переходу во второй режим работы ПТТ, когда пульсации температуры наблюдались во всех зонах.

В результате расчетов были получены зависимости термического сопротивления ПТТ от величины передаваемого теплового потока, представленные на рис. 6. Из рисунка видно, что при высоких значениях передаваемого теплового потока изменение температуры воды на входе в конденсатор $t_{вх}$ и ее расхода G не оказывало какого-либо существенного влияния на величину и характер зависимости. Это соответствовало второму режиму работы ПТТ. Значение термического сопротивления в этом режиме монотонно снижалось при увеличении тепловых потоков вплоть до максимальных и не превышало $0,4^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

При небольших тепловых потоках наблюдались высокие значения термического сопротивления, что соответствовало первому режиму работы ПТТ. Условия перехода от первого режима ко второму зависят от режимных параметров G и $t_{вх}$. Увеличение температуры воды способствовало переходу работы ПТТ из режима конвекции к пульсирующему при мень-

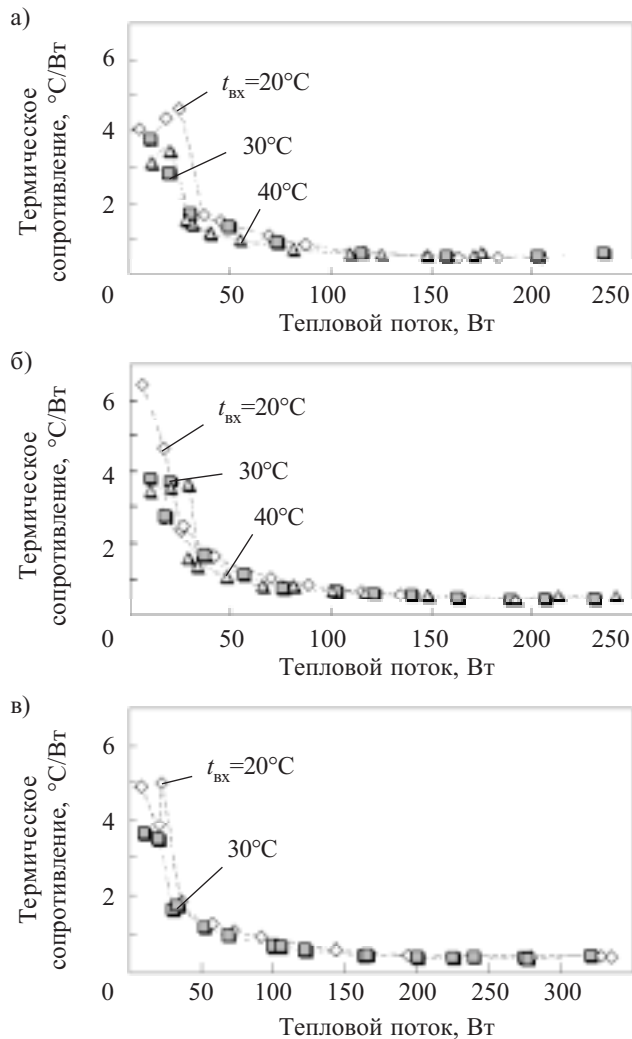


Рис. 6. Зависимость термического сопротивления ПТТ от величины передаваемого теплового потока для различных значений температуры воды $t_{\text{вх}}$ и ее расхода G : а — $1,7 \cdot 10^{-3}$; б — $2,6 \cdot 10^{-3}$; в — $4,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с

ших тепловых потоках. Это связано с тем, что увеличение температуры в зоне конденсации приводит к повышению давления насыщения в ПТТ и, соответственно, к снижению $\Delta T_{\text{ст}}$, т. е. к активации центров парообразования уже при меньших тепловых потоках. Такое же влияние оказывало и увеличение расхода охлаждающей жидкости.

Помимо режимных факторов на величину термического сопротивления также влияют внутренний диаметр ПТТ $d_{\text{вн}}$ и количество петель змеевика при одинаковой длине [7, 11]. Для сопоставления результатов настоящего исследования с известными на рис. 7 представлены данные из [6, 12, 13], полученные для ПТТ с приблизительно одинаковыми внутренними диаметрами. Здесь видно, что в целом характер зависимостей термического сопротивления от передаваемого теплового потока, полученных в настоящей работе, хорошо согласуется с литературными данными, а имеющийся разброс значений может быть следствием различия в конструкциях ПТТ и особенностями в проведении экспериментов.

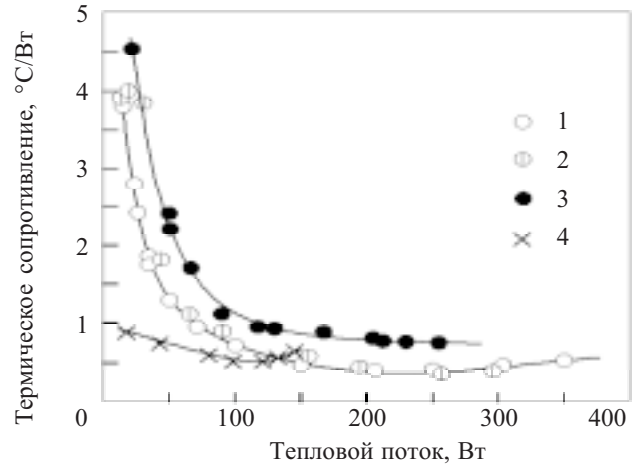


Рис. 7. Зависимость термического сопротивления от передаваемого теплового потока: 1, 2 — данные эксперимента (7 петель, $d_{\text{вн}} = 1 \cdot 10^{-3}$ м); 3 — [6, 9] (4 петли, $d_{\text{вн}} = 0,96 \cdot 10^{-3}$ м); 4 — [13] (5 петель, $d_{\text{вн}} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ м)

Таким образом, ПТТ может функционировать в двух характерных режимах:

- конвективного теплообмена, при котором отсутствуют пульсации температуры в зонах подвода и отвода теплоты;
- пульсационном, при котором передача тепловой энергии происходит за счет действия центров парообразования.

Величина термического сопротивления напрямую зависит от режима работы ПТТ. Для эффективной работы системы охлаждения с ПТТ целесообразно создавать условия, соответствующие пульсационному режиму передачи тепловой энергии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А. с. 504065 СССР. Пульсирующая тепловая труба / Г. Ф. Смирнов, Г. А. Савченков.— 1971.
2. Pat. 4921041 US. Structure of a heat pipe / Akachi H.— 1990.
3. Pat. 5219020 US. Structure of micro-heat pipe / Akachi H.— 1993.
4. Pat. 5490558 US. L-type heat pipe / Akachi H.— 1996.
5. Khandekar S., Cui X., Groll M. Thermal performance modeling of pulsating heat pipes by artificial neural network // 12th Int. Heat Pipe Conf.— Moscow—Kostroma—Moscow.— 2002.— P. 215—219.
6. Кузнецов И. О., Смирнов Г. Ф. Экспериментальное и математическое моделирование характеристик пульсационных тепловых труб (ПТТ) // Холодильна техніка і технологія.— 2005.— № 5.— С. 61—69.
7. Кузнецов И. О. Экспериментальні дослідження та математичне моделювання теплопередавальних характеристик пульсуючих теплових труб / Автореф. дис... канд. техн. наук.— Одеса, ОДАХ.— 2006.
8. Наумова А. Н., Кравец В. Ю. Технологические аспекты изготовления плоской пульсационной тепловой трубы // Збірник наукових праць СевНУЯЕтаП.— 2009.— № 1.— С. 120—127.
9. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении.— К.: Наук. думка, 1980.
10. Гриффитс А., Уоллис Дж. Роль состояния поверхности при пузырьчатом кипении // В кн.: Вопросы физики кипения.— М.: Мир, 1974.— С. 99—137.
11. Yang Honghai, Khandekar S., Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes // Applied Thermal Engineering.— 2008.— № 28.— P. 49—59.
12. Кузнецов И. О., Смирнов Г. Ф. Экспериментальное изучение характеристик пульсационных тепловых труб // Холодильна техніка і технологія.— 2005.— № 6.— С. 50—54.
13. Cao X., Cheng P. A novel design of pulsating heat pipes with improved performance // 13th Int. Heat Pipe Conf.— China.— 2004.— P. 302—307.

Д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШЕВ, Т. И. ЛАВРЕНОВА,
Т. Н. БУГАЁВА

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: kurm@mail.css.od.ua

Дата поступления в редакцию
22.09 2009 г.

Оппонент к. т. н. Л. И. ПАНОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

МЕТОД ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ РАСПЛАВЛЕННОГО ПРИПОЯ ОТ ОКИСЛЕНИЯ

Разработаны смеси для защиты поверхности расплава припоя от окисления на основе глицерина, мочевины, порошков оксидов, карбидов (Al_2O_3 , TiO_2 , SiC), графита.

В процессе низкотемпературной пайки элементов радиоэлектронной аппаратуры, особенно при пайке плат печатного монтажа и при лужении через защитный слой в стационарных ваннах, значительную актуальность приобретают смеси для защиты жидкого припоя от окисления.

При эксплуатации расплава припоя на его поверхности образуется пленка тугоплавких оксидов металлов, входящих в состав припоя. Толщина пленки растет с увеличением температуры и времени использования расплава. Указанная пленка ухудшает реологические характеристики припоя (растекаемость и смачивающую способность), налипает на поверхности паяных узлов, образуя перемычки между токоведущими цепями. Это требует периодического удаления окисленного припоя с поверхности, что приводит к большому его расходу. В связи с этим возникает необходимость защиты поверхности расплавленного припоя от окисления.

Целью данной работы является разработка методов защиты зеркала припоя в процессе низкотемпературной пайки и лужения в стационарных ваннах.

Проанализируем известные методы.

В промышленном производстве из-за интенсивного окисления расплавленного припоя вынужденно используют высокоактивные флюсы на основе хлористых соединений [1, с. 134]. Однако они вызывают коррозию и неприемлемы для пайки изделий с высокой плотностью печатного монтажа. При горячем лужении медной проволоки с диффузионным барьерным слоем никеля используют флюс на основе хлоридов цинка и аммония. В результате взаимодействия активных составляющих флюса с компонентами припоя к атмосферной коррозии добавляется интенсивная химическая коррозия, из-за чего поверхность расплава покрывается массивным слоем солей, которые практически не поддаются восстановлению. Возникает необходимость периодического удаления окисленного припоя с поверхности. Кроме того, такие флюсы способствуют внесению в припой коррозионно-активных соединений хлора, которые при кри-

сталлизации расплава сегрегируются по границам зерен, вызывая охрупчивание и межзеренное разрушение структуры [2].

Исследования показали, что использование флюса, содержащего, например, до 200 г хлоридов ($ZnCl_2$, NH_4Cl) на литр, приводит к тому, что на поверхности расплава припоя постоянно находится слой хлористых соединений толщиной 1—2 см [1, с. 247]. После эксплуатации ванны с 3-я литрами расплава припоя с таким флюсом за 24 часа на его поверхности выделяется до 600 г хлоридов. Наличие их на поверхности расплава нежелательно, т. к. основную роль при горячем лужении проволоки играют именно приповерхностные слои припоя. Применение смеси какого-либо состава для восстановления окисленной поверхности расплава возможно лишь при периодической очистке зеркала припоя от остатков флюса.

Снижение окисляемости расплава припоя достигается введением в него галлия и фосфора [3, с. 79]. Однако эти добавки не обеспечивают полной защиты от окисления, т. к. их действие кратковременно. Кроме того, как показали исследования, в процессе работы с расплавом припоя происходит выделение добавок на поверхности расплава, где содержание фосфора достигает иногда 2%, что в дальнейшем может препятствовать пайке вследствие плохой смачиваемости металлов при повышенном содержании фосфора.

Известны попытки предотвращения окисления припоя с помощью создания над поверхностью расплава безокислительной атмосферы проточного газа [4, с. 115].

В качестве химических методов защиты предлагаются смеси, содержащие различные виды высокотемпературных масел [5—7]. Например, предлагается использовать смесь, включающую плавный янтарь, хлористый метилен, ионол, закалочное масло [5]. Основным недостатком таких смесей является необходимость отмывки изделий органическими растворителями.

Для защиты расплавленных припоев от окисления применяются смеси на основе полиметилфенилсилоксановых жидкостей [8, 9], хотя большинство кремнийорганических соединений взрывоопасны и ядовиты и это затрудняет их применение. Также применяют силоксановые соединения в сочетании с полимерами, например алкилфениламинной смолой [9].

Однако применение таких смесей осложняется не только недостатками, присущими кремнийорганическим жидкостям, но и наличием на паяемых деталях трудноудаляемых остатков полимерных соединений.

Рекомендуются также смеси на основе монофосфатов щелочных и щелочноземельных металлов [10]. Их недостатком является растворение компонентов в расплаве припоя.

Известен также состав на основе простых олигоэфиров, содержащий тиодифениламин и триэтанолламин [11]. Недостатками такого состава является низкая термическая устойчивость и необходимость дополнительной отмывки изделий органическими растворителями.

В [12] предложена защитная жидкость для предотвращения окисления зеркала припоя, содержащая глицерин и натриевые соли жирных кислот. Такая смесь, кроме неудовлетворительной растворимости в воде, отличается низкой термической стабильностью и высокой испаряемостью. Это ограничивает время ее эксплуатации (в среднем 2—3 часа) и требует частой замены и отмывки паяных узлов и ванны от продуктов осмоления. Температура вспышки смеси — 447 К. Эту защитную жидкость можно использовать при пайке и лужении лишь тогда, когда температура расплава не превышает 453 К. Применение жидкости при температуре выше 453 К невозможно вследствие опасности вспышки, высокого осмоления и больших потерь жидкости. Между тем, при пайке требуется температура нагрева выше 503 К.

Таким образом, применяемые и предлагаемые к применению в электронной промышленности смеси и методы защиты зеркала припоя от окисления мало пригодны для использования и обладают различными недостатками.

Выбор оптимального защитного состава усложняется тем, что предлагаемые неорганические материалы вносят в припой нежелательные примеси, неэффективно защищают расплав от окисления, а органические — не выдерживают температурных режимов пайки. Высокотемпературная органика практически не смывается водой.

Авторами разработан ряд опытных составов для защиты припоя от окисления на основе смеси глицерина, мочевины и порошков тугоплавких оксидов, карбидов (Al_2O_3 , TiO_2 , SiC) и графита. Было изготовлено 4 типа составов на основе смеси глицерина и мочевины (в соотношении 2:1), массовая доля которой составляла 10—25%, остальное — ингредиенты-наполнители: Al_2O_3 (состав 1), TiO_2 (состав 2), SiC (состав 3), TiO_2 и графит (5—15%) (состав 4). Составы готовились следующим образом. Мочевина растворялась в глицерине в соотношении 1:2. Далее полученный раствор смешивался с окислом или карбидом металла. После перемешивания состав выливался на поверхность расплавленного припоя. Смеси наносились на припой и выдерживались на поверхности расплава при температуре 447—573 К в течение 30 ч. Количественный рентгеноспектральный анализ проб припоя, защищенного разработанными составами, после 30 часов испытаний показал полное

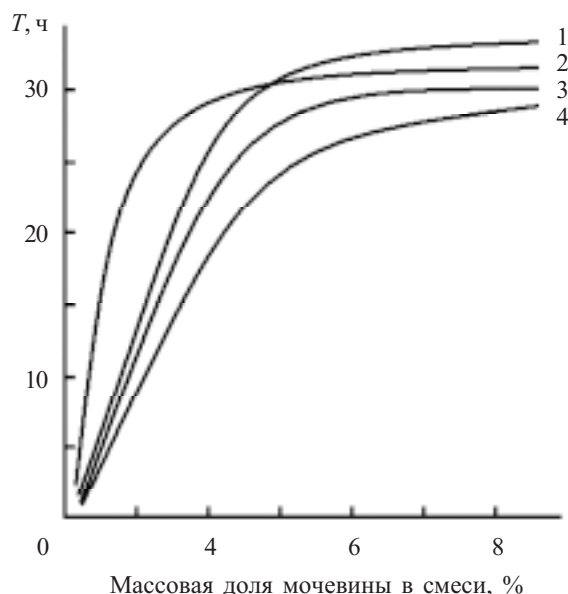
отсутствие растворения Al_2O_3 , TiO_2 , SiC и графита в припое и на поверхности паяных соединений.

Порошки Al_2O_3 , TiO_2 , SiC и графита легче компонентов припоя и находятся на поверхности расплава. Они тугоплавкие, химически стойкие и способствуют механической защите расплава от окисления, препятствуя доступу кислорода. В качестве органического восстановителя окислов припоя используют раствор глицерина и мочевины, которые в процессе эксплуатации расплава частично (10%) выгорают и осмоляются. Соотношение массовых долей мочевины и глицерина 1:2 выбрано с учетом максимальной растворимости мочевины в глицерине.

Оставшиеся продукты органики собираются на частицах Al_2O_3 , TiO_2 , SiC и графита и образуют на поверхности расплава твердую однородную пленку, которая легко удаляется (при необходимости). Такая пленка легко растворяется в воде и глицерине и пригодна для дальнейшего использования. Особенностью предлагаемых составов является то, что тугоплавкие частицы порошков играют две роли — защиты расплава припоя от доступа кислорода и удаления остатков органики. Кроме того, защитный слой собирает также остатки флюсов, которые используются при пайке или лужении.

Оптимальные количественные соотношения компонентов подобраны исходя из того, что минимальная концентрация раствора мочевины в глицерине должна обеспечивать восстанавливающие (флюсующие) свойства защитной смеси. Максимальная концентрация активных компонентов не должна приводить к сильному загрязнению зеркала припоя продуктами осмоления органики. Следует отметить, что концентрация флюсующих компонентов, которые осмоляются, в предлагаемой смеси уменьшена в несколько раз за счет введения тугоплавких оксидов (карбидов) металлов. Это уменьшает количество продуктов осмоления, не поддающихся отмывке. Кроме того, такое уменьшение концентрации органических компонентов при наличии тугоплавких оксидов и карбидов металлов препятствует воспламенению и выгоранию органики, что увеличивает допустимую температуру и длительность эксплуатации защитной смеси. Результаты испытаний предлагаемых смесей показали следующее. Для разработанных нами составов возгорания не происходит при увеличении температуры до 574 К. Допустимое время эксплуатации — до 30 ч. Не требуется очистки расплава. Защитная пленка сплошным слоем легко снимается с поверхности расплава вместе с остатками флюса, который используется при пайке или лужении. Поверхность расплава остается чистой и не требует отмывки (очистки). Наиболее близкие к ним известные составы [5, 12] имеют температуру воспламенения 447 К, допустимое время эксплуатации — 2—5 ч, требуют отмывки смесью органических растворителей и механической очистки.

На рисунке показана зависимость времени эксплуатации защитной смеси от соотношения восстанавливающих компонентов (глицерин и мочевина) и разных типов наполнителя. Видно, что время эксплуата-



Зависимость времени эксплуатации защитной смеси от соотношения восстанавливающих компонентов (мочевина и глицерин) и разных наполнителей
1 — Al_2O_3 ; 2 — TiO_2 ; 3 — SiC , 4 — TiO_2 и графит

ции состава с ростом концентрации мочевины увеличивается.

Указанные составы для защиты поверхности припоя от окисления дают возможность проводить «скелетную» пайку. Образования «сосулек» и «наплывов» припоя, связанного с наличием на поверхности расплава припоя тугоплавких оксидов его компонентов, не происходит, поскольку предлагаемые составы препятствуют окислению припоя. Паяные соединения сохраняют блеск, белый налет после пайки не появляется. Глицерин на поверхности контактных площадок и выводах не конденсируется. Предлагаемые составы для защиты припоя от окисления не изменяют сопротивления изоляции печатных плат.

Предлагаемые составы могут быть использованы для защиты расплава припоя от окисления в процессе низкотемпературной пайки и лужения проводников, а также электрических выводов элементов радиоэлектронной аппаратуры методом погружения в стационарных ваннах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина.— М.: Машиностроение, 2003.
2. Курмашев Ш. Д., Садова Н. Н. Лавренова Т. И., Бугаева Т. Н. Влияние легирующих добавок на структурно-фазовые превращения систем Sn-Pb// Тр. XXIII научн. конф. стран СНГ «Дисперсные системы».— Одесса.— 2008.— С. 253—254.
3. Джюд М., Бридли К. Пайка при сборке электронных модулей.— М.: Наука и технологии, 2006.
4. Линь М. Сварка, резка и пайка металлов.— М.: Аделант, 2004.
5. А. с. 1082596А СССР. Состав для защиты припоя от окисления / А. И. Алексеева, О. М. Мирсаитов, В. П. Хан, В. И. Ившин.— 1984.— Бюл. № 12.
6. А. с. 1399045 СССР. Жидкость для защиты расплавленного припоя от окисления / В. Л. Пазынин, Л. М. Захарова, В. С. Шайдулов и др.— 1988.— Бюл. № 20.
7. А. с. 531695 СССР. Жидкость для защиты припоя от окисления / Л. Г. Зинько, Н. И. Бавыкин, Д. И. Новикова и др.— 1976.— Бюл. № 38.
8. А. с. 10161123А СССР. Состав жидкости для защиты расплава припоя от окисления / Л. Г. Зинько, М. Ф. Кривонос А. Г. Шульженко и др.— 1983.— Бюл. № 17.
9. А. с. 664794 СССР. Состав для защиты припоя от окисления / Л. Г. Зинько, А. Г. Шульженко, М. Ф. Кривонос.— 1979.— Бюл. № 20.
10. А. с. 1219300 СССР. Состав для защиты припоя от окисления / Б. А. Пиляев.— 1986.— Бюл. № 11.
11. А. с. 1013179 СССР. Состав для защиты припоя от окисления / И. Ф. Образцов, М. Г. Черный, К. М. Резников и др.— 1983.— Бюл. № 15.
12. А. с. 431978 СССР. Состав для защиты расплава припоя от окисления / А. С. Петров.— 1972.— Бюл. № 20.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов.— М.: ДМК, 2009.— 384 с.

В книге описано современное состояние техники генерации сигналов различной формы (синусоидальных и импульсных) в широком диапазоне частот (от инфранизких до десятков ГГц) и амплитуд. Особое внимание уделено описанию серийных генераторов синусоидальных и импульсных сигналов, функциональных генераторов, генераторов с цифровым синтезом формы сигналов и генераторов сигналов произвольной формы. Приведено много примеров применения генераторов сигналов в исследовании, тестировании и отладке современной телекоммуникационной, связанной и радиолокационной аппаратуры, а также в технике физического эксперимента.



Д. т. н. Ю. А. ЗАГОРУЙКО, к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРЕНКО,
к. ф.-м. н. Н. О. КОВАЛЕНКО, Е. А. КУЗЬМИНОВ,
П. В. МАТЕЙЧЕНКО

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

Дата поступления в редакцию
01.10 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. СТРОНСКИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ОКСИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРОВ ИК-ДИАПАЗОНА

На поверхности активных элементов ZnSe:Cr²⁺-лазеров получены прозрачные в видимом и инфракрасном диапазоне спектра прочные термостабильные просветляющие ZnO-покрытия. Исследованы оптические и механические свойства полученных покрытий.

Легированные кристаллы селенида цинка (ZnSe:Cr²⁺) используются в качестве активной среды при изготовлении лазерных излучателей, перестраиваемых в диапазоне волн длиной 2,1—2,9 мкм. Такие лазеры характеризуются высоким КПД как в непрерывном, так и в импульсном режимах генерации — 70 и 66%, соответственно [1, 2]. Одним из путей снижения потерь излучения при накачке лазерных излучателей, изготовленных на основе кристаллов ZnSe:Cr²⁺, является нанесение качественных термостабильных просветляющих покрытий на их поверхность.

Ранее нами была изучена кинетика фотостимулированного окисления кристаллических соединений A^{II}B^{VI}, на основании чего были установлены оптимальные режимы получения структурно-совершенных гомогенных пленок ZnO оптического качества на подложках ZnSe и показана возможность использования оксидных слоев в качестве интерференционных покрытий оптических элементов ИК-диапазона [3, 4].

Целью данной работы являлось получение методом фототермического окисления оксидных интерференционных покрытий оптических элементов, изготовленных из легированных кристаллов селенида цинка (ZnSe:Cr²⁺), и исследование оптических характеристик полученных покрытий в широком интервале температур.

Методика эксперимента

Исследования проводили на образцах кристаллов ZnSe:Cr²⁺, выращенных вертикальным методом Бриджмена в графитовых тиглях под избыточным давлением инертного газа. Оксидные покрытия были получены методом фототермического окисления на разработанной нами установке [5].

Оптические характеристики покрытий (спектры пропускания, температурные зависимости оптического пропускания) измеряли при помощи спектрофотометра СФ-58 и монохроматоров МДР-2 и МДР-4. Температурную зависимость оптического пропускания покрытия определяли в диапазоне 20—250°С по

изменению интенсивности излучения волн различной длины (1,0; 1,8 и 2,3 мкм), проходящих через исследуемый образец.

Морфологический анализ полученных оксидных покрытий проводили при помощи электронного сканирующего микроскопа JSM-820 с системой рентгеновского микроанализа LINK AN10859.

Механические свойства оксидных пленок на образцах кристаллов ZnSe:Cr исследовали методом определения микротвердости на приборе ПМТ-3 по стандартной методике [6]. Индентором служила алмазная пирамида Виккерса, нагрузка на индентор составляла 10—50 г. Для корректности применения метода сосредоточенной нагрузки толщина исследуемой пленки должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз. Поскольку глубина проникновения индентора в поверхность образцов ZnSe:Cr при используемых нагрузках составляет единицы микрометров, толщина исследуемой оксидной пленки должна быть не менее 50 мкм. Ее получали при облучении одной из поверхностей образца ультрафиолетовым излучением, а необлученная оксидная пленка на противоположной стороне образца служила контрольной.

Результаты измерений

Электронная микрофотография скола образца ZnSe:Cr²⁺ с оксидной пленкой, проходящего через границу раздела фаз под прямым углом к исследуемым граням, приведена на рис. 1. Здесь видно, что даже при большой толщине пленки граница раздела фаз (полупроводник—оксид) достаточно резкая. Следует отметить, что для просветляющих ZnO-покры-

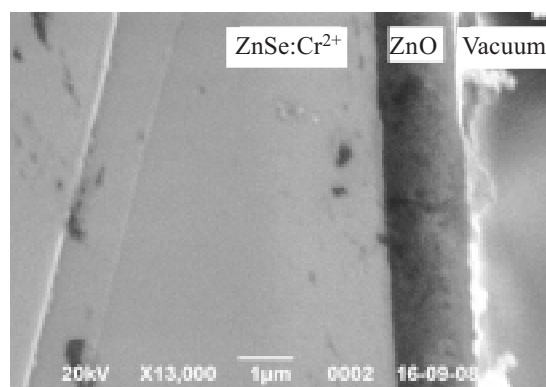


Рис. 1. Оксидная пленка на поверхности кристаллического образца ZnSe:Cr²⁺

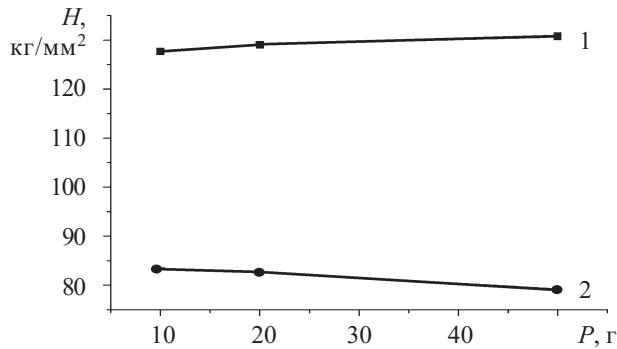


Рис. 2. Зависимость микротвердости образца ZnSe:Cr^{2+} с облученной (1) и необлученной (2) оксидной пленкой от нагрузки на индентор

тий на оптических элементах, предназначенных для работы в диапазоне волн 2—3 мкм, получали оксидные пленки толщиной менее 1 мкм.

Экспериментальные результаты исследования механических свойств оксидной пленки указывают, что полученная пленка представляет собой прочное покрытие, выдерживающее без отслаивания механические испытания как на вдавливание, так и на царапание. Величина микротвердости поверхности с оксидной пленкой составляет 128—130 кг/мм², что значительно выше микротвердости на противоположной стороне образца (рис. 2).

Такой результат объясняется тем, что под влиянием УФ-излучения образуется более совершенная и прочная пленка. Следует отметить, что в данном интервале нагрузок величина микротвердости поверхности с оксидной пленкой практически постоянна (кривая 1). Микротвердость же монокристаллических образцов ZnSe и ZnSe:Cr увеличивается с уменьшением нагрузки на индентор. Такое отличие, по-видимому, вызвано тем, что оксидная пленка представляет собой текстурированный поликристалл, а на поликристаллических образцах, в отличие от монокристаллических (когда индентор охватывает несколько кристаллических зерен), твердость не зависит от нагрузки [7].

Исследование оптических свойств полученных покрытий показало, что подбор оптимальных параметров процесса фототермического окисления позволяет получить просветленные образцы с коэффициентом пропускания до 95% (рис. 3) в требуемом спектральном диапазоне 2—3 мкм (полоса генерации ионов Cr^{2+}). Кристаллы ZnSe:Cr с просветляющими

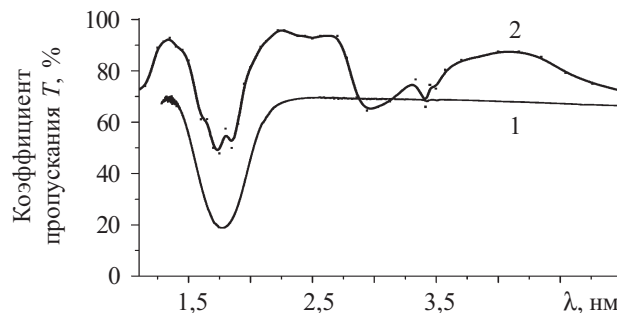


Рис. 3. Спектр пропускания активных элементов на основе монокристалла ZnSe:Cr^{2+} :

1 — непросветленный образец; 2 — просветленный образец

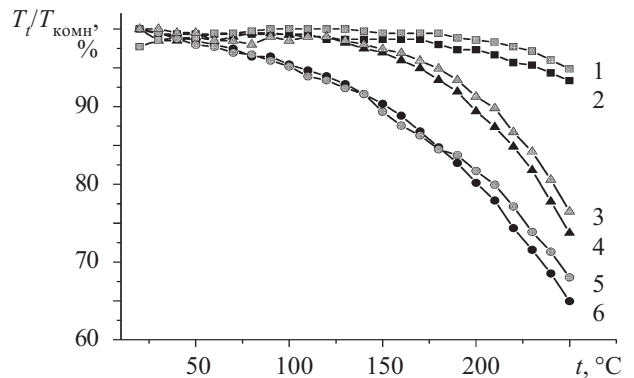


Рис. 4. Температурная зависимость нормированного коэффициента пропускания просветленных (1, 3, 5) и непросветленных (2, 4, 6) образцов после термоциклирования при облучении волнами различной длины: 1, 2 — $\lambda=1,06$ мкм; 3, 4 — $\lambda=1,8$ мкм; 5, 6 — $\lambda=2,3$ мкм

оксидными покрытиями характеризуются достаточно высокой стабильностью оптического пропускания в интервале температур 20—150°C (рис. 4). Температурная стабильность пропускания просветленных образцов совпадает в пределах погрешности со стабильностью непросветленных образцов, что позволяет судить об отсутствии влияния оксидных покрытий на оптическое пропускание с ростом температуры.

Установлено также, что спектры оптического пропускания кристаллических образцов ZnSe:Cr^{2+} с просветляющими оксидными покрытиями практически не изменяются после выдерживания их в течение 6 часов при температуре 120°C. Такие образцы выдерживают (без отслоения покрытий) многократное термоциклирование (20°C ↔ 250°C) при скорости изменения температуры ≥ 5 °C/c.

Таким образом, получены прозрачные в видимом и инфракрасном диапазоне спектра термостабильные оксидные интерференционные покрытия, имеющие высокую прочность сцепления с поверхностью кристаллических образцов ZnSe:Cr^{2+} не только при комнатной, но и при повышенной температуре. Это позволяет изготавливать на основе таких структур просветленные активные элементы для перестраиваемых лазеров среднего ИК-диапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Doroshenko M. E., Koranda P., Jelinkova H. et al. Cr:ZnSe prism for broadly tunable mid-infrared laser radiation generation // *Laser Phys. Lett.* — Vol. 4. — 2007. — Iss. 7. — P. 503—506.
2. Jelinkova H., Koranda P., Doroshenko M. E. et al. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser pumped by 1.66 μm or 1.97 μm radiations // *Laser Phys. Lett.* — Vol. 4. — 2007. — Iss. 1. — P. 23—29.
3. Пат. 1349543 РФ. Способ просветления оптических элементов из селенида цинка / Ю. А. Загоруйко, В. К. Комарь, В. Ю. Росторгуева, В. Н. Кривошеин. — 15.03 1993.
4. Загоруйко Ю. А., Пузиков В. М., Федоренко О. А., Коваленко Н. О. Модификация физических свойств широкозонных полупроводников $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. — Харьков: Институт монокристаллов, 2006.
5. Пат. 52083 А України. Спосіб вивчення кінетики процесу окислення напівпровідникових елементів і пристрій для його здійснення / Ю. А. Загоруйко, Н. О. Коваленко, О. О. Федоренко. 2002. — Бюл. № 12.
6. Мотт Б. В. Испытание на твердость микровдавливанием. — М.: Металлургиздат, 1960.
7. Упит Г. П., Варченко С. А. Металлы // *Изв. АН СССР.* — 1969. — № 12. — С. 137.

К. ф.-м. н. Н. В. ЧЕРНЕГА, к. ф.-м. н. А. Д. КУДРЯВЦЕВА,
 д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ, д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН,
 к. з.-м. н. С. М. КЛЕЩЕВА

Россия, г. Москва, Физический институт РАН, ЦНИТИ «Техномаш»
 E-mail: samoylovich@technomash.ru

Дата поступления в редакцию
 16.11 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
 (ДонНУ, г. Донецк)

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В РЕШЕТЧАТЫХ УПАКОВКАХ (ОПАЛОВЫЕ МАТРИЦЫ КАК МЕТАМАТЕРИАЛ)

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований фотон-фононного взаимодействия в правильных упаковках наносфер кремнезема (опаловых матрицах) и в нанокмпози-тах на их основе.

Материалы, обладающие периодически изменяющимися диэлектрической проницаемостью и упругими характеристиками с периодом изменений порядка длины волны света, получившие название метаматериалов, с запрещенными фотонными или фононными зонами [1—5] являются в настоящее время объектом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований. Для практических приложений наиболее интересны трехмерные нанокмпози-ты — опаловые матрицы, представляющие собой искусственный материал, образованный решетчатой упаковкой моносфер наносфер рентгеноаморфного кремнезема (SiO_2) с пространственной модуляцией как оптических (диэлектрической проницаемости), так и акустических свойств с масштабом в несколько сотен нанометров.

Благодаря субмикронным размерам наносфер SiO_2 опаловая матрица имеет оптические стоп-зоны (диапазон частот, в котором распространение электромагнитного излучения запрещено для определенного набора волновых векторов) в видимом спектральном диапазоне. Полная запрещенная фотонная зона, у которой величина плотности фотонных состояний близка к нулю, в опаловых матрицах не существует, главным образом, из-за небольшого показателя преломления n кремнезема, так что полная запрещенная фотонная зона может быть реализована в инвертированных опаловых матрицах с контрастом показателей преломления больше чем 2,85 (в инвертированном образце межсферические нанополости заполнены веществом с большим n , а сферы SiO_2 удалены).

Тем не менее, опаловые матрицы удобно использовать для исследований нелинейного взаимодействия светового излучения с веществом, поскольку они

позволяют определять положения стоп-зон и управлять их параметрами. Полости между наносферами в опаловых матрицах имеют октаэдрическую и тетраэдрическую форму. Заполняя такие нанополости жидкостями с различными показателями преломления или используя матрицы с различными размерами наносфер, можно эффективно управлять такими параметрами стоп-зоны как ее положение в спектре и контраст. При этом вследствие изменения плотности фотонных состояний вблизи края запрещенной зоны порог нелинейных процессов может понижаться, увеличивая их эффективность, а также могут возникать новые, неизвестные ранее, нелинейные эффекты.

Исследование нелинейно-оптических эффектов в опаловых матрицах, в частности, таких как вынужденное рассеяние света на наносферах (ВР) [6] и вынужденное комбинационное рассеяние света (КР) в наноструктурированных средах [7], генерация акустических колебаний в гигагерцевой области, необычно интенсивная и длительная акустолюминесценция, названная эффектом фотонного пламени [8, 9], может дать важную информацию об особенностях фотон-фононного взаимодействия в фотонных кристаллах. В последние годы были начаты теоретические и экспериментальные работы по получению и изучению метаматериалов, получивших по аналогии с фотонными название фононных кристаллов. Действительно, независимо от природы волн групповая скорость не обязательно совпадает с направлением волнового вектора, например в изотропной среде частота колебаний определяется модулем волнового вектора k , а следовательно, групповая скорость волнового пакета может быть направлена по k или по $-k$ в зависимости от знака производной частоты от волнового вектора. Это относится и к акустическим колебаниям в метаматериалах, где поведение функции состояний для различных зон в фононных материалах (содержащих разрешенные и запрещенные фононные зоны) будет определяться особенностями групповой скорости в определенном диапазоне частот, задаваемом собственно наноструктурой метаматериала. При определенных условиях в системе могут возникать состояния с отрицательными значениями соответствующих коэффициентов с формированием режима полного внутреннего отражения для акустических волн в определенном диапазоне частот. Однако расчеты показывают, что наиболее важными как

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку (гранты: № 07-02-00873, 08-02-13500-офи_ц, 09-02-13531-офи_ц и № 08-02-90020-Бел_а).

для понимания физики процессов в метаматериалах, так и для их практического применения являются материалы, относящиеся одновременно к фотонным и фоновым системам.

Особый интерес представляет возбуждение акустических колебаний в метаматериалах с использованием оптических лазеров, когда заметную роль играют эффекты возникновения автоколебательных состояний и особенности взаимодействия фоновой и фотонной подсистем (зон). Если в системе имеется источник энергии, тогда потери, вызванные диссипацией, будут компенсироваться за счет поступающей энергии (не обязательно периодической или непрерывной) или будет отмечаться эффект отрицательного трения. Такая система [10] может относиться к автоколебательным для случаев, когда ее положение равновесия перестает быть устойчивым и в системе возникают движения, переводящие ее в режим стационарных периодических колебаний с постоянными амплитудой и фазой. Условием для подобного поведения [10] является наличие в системе трех составляющих — собственно колебательной подсистемы, источника энергии, воздействие которого на колебательную систему делает положение равновесия неустойчивым, и некоторого нелинейного «ограничителя», переводящего нарастающие (как правило, экспоненциально) колебания в стационарное состояние. Поскольку в таких системах важной составляющей должны быть процессы теплообмена между элементами метаматериала, в частности между наносферами (при использовании опаловых матриц), соотношения длительности релаксации процесса теплопереноса и периодов колебаний в них значительно отличаются от аналогичных параметров в сплошных (кристаллических) средах, что приводит к существенно иным частотным зависимостям коэффициентов затухания звука. В отличие от кристаллических материалов, в метаматериалах длина волны акустических колебаний рассматриваемого типа определяется его внутренним строением, например периодичностью или диаметром D наносфер в опаловых матрицах, а за счет наличия акустических каналов в опаловых матрицах длина пробега фононов становится порядка величины D . Таким образом, диапазон частот с «благоприятными» (для опаловых матриц) условиями затухания должен определяться в области от единиц до десятка гигагерц с характерными зависимостями от размера наносфер опаловых матриц и механических свойств контактных зон между ними.

Настоящая работа посвящена исследованию преобразования излучения мощных твердотельных лазеров в акустические колебания наносфер SiO_2 . В эксперименте этот эффект проявляется в возникновении в спектре прошедшего образца и отраженного от образца излучения линий ВР, расположенных в стоковой области и имеющих смещение относительно возбуждающего излучения порядка нескольких десятых долей см^{-1} , что соответствует собственным частотам колебаний наносфер, лежащих в гигагерцевом диапазоне. Также проводилось изучение особенностей возбуждения вынужденного рассеяния и акустических колебаний в опаловых матрицах и нано-

композитах на их основе в зависимости от положения запрещенной фотонной зоны (диаметра наносфер).

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника возбуждения нелинейных эффектов использовался рубиновый лазер 1 с модулированной добротностью (длина волны генерации $\lambda=694,3$ нм, длительность импульса $\tau=20$ нс; максимальная энергия в импульсе $E_{\text{max}}=0,3$ Дж, расходимость $3,5 \cdot 10^{-4}$ рад, ширина линии генерации $0,015 \text{ см}^{-1}$).

Возбуждающее излучение фокусировалось в образец 5 линзами 4. Полупрозрачные стеклянные пластины 2, 3, 6 использовались для направления световых пучков на регистрирующие системы. Система 10 использовалась для контроля энергетических, пространственных и временных параметров возбуждающего лазерного излучения. Энергия рассеянного излучения измерялась с использованием калиброванных светодиодов 8 и 9. Системы 7 использовались для регистрации спектрального состава рассеянного излучения. Спектры КР регистрировались мини-спектрометрами FSD-8 с волоконно-оптическим входом (диапазон 240—1000 нм, спектральное разрешение 6 нм), спектры ВР — с использованием интерферометров Фабри–Перо с переменной базой, что позволяло варьировать область дисперсии в широких пределах — от 0,42 до $1,67 \text{ см}^{-1}$.

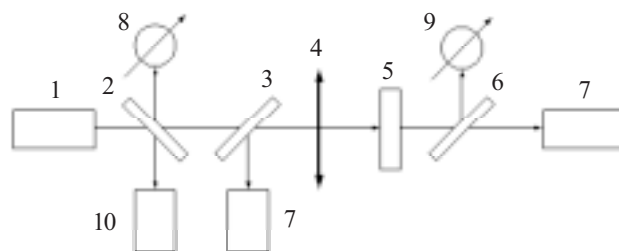


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Измерения проводились для линз с фокусными расстояниями 50, 90 и 150 мм при различных положениях исследуемого образца относительно фокусирующей оптики и для используемых энергий возбуждающего излучения. Последнее позволяло проводить измерения для указанных значений плотности мощности на входе в исследуемый образец и для используемых распределений поля внутри образца. Образцы опаловых матриц имели размеры $1 \times 5 \times 5$ мм и были вырезаны параллельно плоскости (111). Угол падения пучка возбуждающего лазерного излучения на плоскость (111) варьировался от 0 до 60° .

Исследовались опаловые матрицы, состоящие из плотно упакованных наносфер SiO_2 с диаметрами 200, 230, 260, 300 и 320 нм, и нанокомпозиты (опаловые матрицы, межсферические нанополости которых заполнены различными нелинейными жидкостями, активными в комбинационном рассеянии). Для заполнения межсферических полостей образцов использовались ацетон (CH_3COCH_3), бензол (C_6H_6), нитробензол ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$), этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), вода (H_2O) и

Таблица 1

Параметры исследованных нелинейных сред

Нелинейная жидкость	$\Delta\nu$, см ⁻¹	n	g , 10 ⁻² см/МВт
Ацетон	2925	1,362	0,14
Бензол	992	1,504	0,25
Этанол	2921	1,362	0,51
Вода	3300	1,33	0,07
Нитробензол	1345	1,553	0,21
Четыреххлористый углерод	459	1,464	0,13

четыреххлористый углерод (CCl₄). Коэффициенты усиления комбинационного рассеяния g , показатели преломления n , частотные сдвиги $\Delta\nu$ первой стоксовой компоненты КР для исследованных сред представлены в табл. 1.

Экспериментальные результаты

Эксперименты показали, что под действием мощного лазерного излучения в опаловых матрицах возбуждаются акустические колебания с частотами, лежащими в гигагерцевом диапазоне, с высокой эффективностью преобразования. Частота колебаний определяется размерами наносфер SiO₂, образующих опаловую матрицу. В результате рассеяния лазерного возбуждающего излучения на гиперзвуковых колебаниях возникает ВР со смещением относительно частоты накачки порядка нескольких десятых долей см⁻¹. Коэффициент преобразования возбуждающего лазерного излучения в ВР может достигать 50%. Расходимость пучка ВР близка к расходимости пучка накачки. Порог возникновения эффекта и число линий, а также их относительная интенсивность, зависят от типа наполнителя.

При заполнении межсферических нанополостей опаловой матрицы жидкостью с n , близким к n плавленого кварца, образец становится прозрачным. В данном случае можно наблюдать ВР как в направлении «назад» (ВР_н), так и в направлении «вперед»

(ВР_в). На рис. 2 представлены интерферограммы ВР в опаловой матрице, межсферические нанопоры которой заполнены ацетоном (наноккомпозит), при различной плотности мощности возбуждающего излучения.

Были проведены измерения частотных сдвигов стоксовых компонент ВР в опаловых матрицах и наноккомпозитах на их основе для различных составов и температуры образцов. Представляло интерес сравнить полученные в стандартном приближении величины частот ВР с частотами собственных колебаний наносфер SiO₂. Колебания упругого сферического тела рассматривались в [10]. Авторы [11, 12] вычислили частоты ν наносфер из плавленого кварца, принимая величины продольной и поперечной скоростей акустической моды $c_l=5279$ м/с и $c_t=3344$ м/с. Вычисленные частоты (в ГГц) равны следующим величинам:

$$\begin{aligned} \nu_{10}&=2,617/D, \quad \nu_{12}=2,796/D, \quad \nu_{20}=4,017/D, \\ \nu_{30}&=6,343/D, \end{aligned} \quad (1)$$

где диаметр наносфер D — в нанометрах.

В действительности замеренные значения скорости распространения звука (продольные колебания) в опаловых матрицах для различных образцов находятся в интервале 2,1—3,3 км/с (300 К, 50—15 МГц), в поперечном направлении — в интервале 1,66—1,96 км/с и сильно зависят от типа упрочнения образцов и D наносфер, играющих роль метаатомов (метаатом — объединение атомов, характерное для метаматериалов, с обязательным поведением как «большого» атома в определенных процессах). Поскольку с изменением диаметра наносфер SiO₂ и особенностей упрочнения изменяется плотность образцов, возможно, именно плотность в значительной степени определяет особенности скорости распространения звука и наблюдаемую зависимость частоты от D . Реальные опаловые матрицы и, как правило, все метаматериалы на основе агрегатов (метаатомов) не обладают трансляционной инвариантностью в кристаллографическом понимании данного термина даже для решетчатых упаковок, когда данное определение можно распространить на центры наносфер, образующих упаковку. Поэтому стандартное рассмотрение с использованием плоских монохроматических волн невозможно [13, 14].

Для акустических колебаний описание распространения таких волн в рамках стандартного аппарата механики сплошных сред просто неверно, поскольку необходимо использовать функцию отклика материала, учитывающую (через координатную зависимость) пространственную дисперсию в распределении вещества. При рассмотрении функциональной зависимости частоты ω от k в метаматериалах необходимо учитывать вклад, обусловленный наличием пространственной дисперсии, который может быть значительно больше, чем величина собственно зависимости без его учета.

В проведенных экспериментах в зависимости от условий возбуждения регистрировалось до трех стоксовых компонент (табл. 2). Понижение температуры образцов до температуры жидкого азота приводит

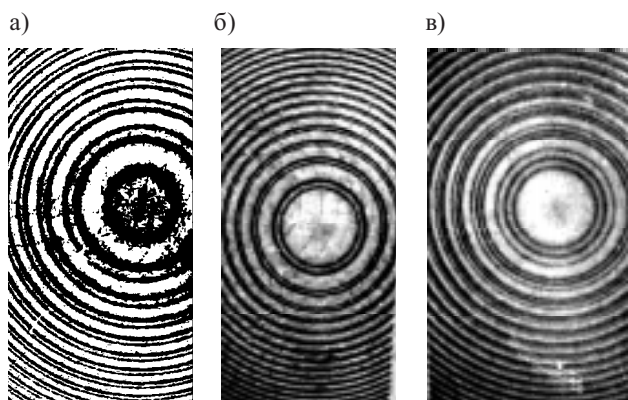


Рис. 2. Спектры ВР_н опаловой матрицы, межсферические нанополости которой заполнены ацетоном (Область дисперсии интерферометра Фабри-Перо:

a — 0,833 см⁻¹; $б$, $в$ — 1,67 см⁻¹

Плотность мощности накачки:

a , $б$ — 0,12 ГВт/см²; $в$ — 0,21 ГВт/см²)

Таблица 2
Частотный сдвиг компонент ВР образцов нанокон-
позитов

Вещество, заполняющее матрицу	Вид рассеяния	T, К	Частота, ГГц	
			Расчет	Эксперимент
Ацетон	ВР _н	295	8,8 13,6	8,0 13,0
	ВР _в	295	8,8	8,0
Этанол	ВР _н	295	8,8 13,6	7,8 12,6
			8,8	7,4
	ВР _в	80	8,8 13,6 21,4	8,0 15,7 22,6

ло к существенному повышению эффективности преобразования волны накачки в рассеянную волну и понижению порога ВР. Частоты компонент ВР, измеренные для различных образцов при комнатной температуре и при температурах в области 80 К, а также вычисленные собственные частоты наносфер SiO₂, представлены в табл. 2.

Отличия экспериментальных и рассчитанных значений частоты могут быть объяснены, прежде всего, двумя факторами: в реальном образце наносферы SiO₂ не свободны; форма наносфер может несколько отличаться от идеальной сферической. Измерения зависимости частотного сдвига рассеянного излучения относительно частоты лазерного излучения от диаметра наносфер (см. табл. 3) показали, что данная зависимость существенно отличается от той, что задается выражениями (1).

Измерения параметров стоп-зоны, выполненные для тех же образцов, демонстрируют линейную зависимость положения максимума в спектре отражения от D . Такие данные были получены при использовании неполяризованного белого света для случая нормального падения на плоскость (111) гранецентрированной кубической решетчатой упаковки исследуемых образцов (отражающая поверхность образца совпадала с его плоскостью формирования). Экспериментально наблюдается линейная зависимость частотного сдвига излучения ВР_в относительно частоты возбуждающего лазерного излучения от D^{-3} (рис. 3).

Изменение угла падения приводит к смещению стоп-зоны в соответствии с условиями брэгговского

Таблица 3
Частотный сдвиг излучения ВР_в и положение максимума в спектре отражения (λ) наноконпозита (этанол) в зависимости от диаметра наносфер SiO₂ (эксперимент)

ν , ГГц	$(D \pm 5)$ нм*	λ , нм
5,1	315	656
6,6	290	628
7,8	270	575
11,1	245	540

* Данные электронной микроскопии

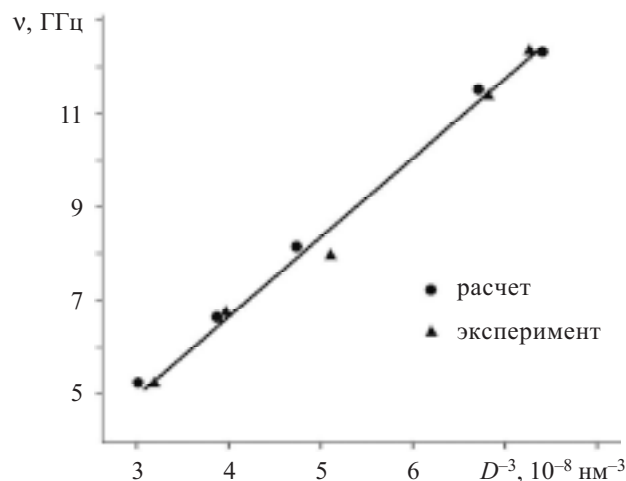


Рис. 3. Зависимость частотного сдвига излучения ВР_в относительно частоты возбуждающего лазерного излучения от диаметра наносфер опаловой матрицы, заполненной этанолом

отражения. При аналогичных изменениях условий освещения образца (то есть при изменении угла падения) частотные сдвиги излучения ВР_в остаются без изменений. Возбуждение в исследуемых средах ВР с высоким коэффициентом преобразования однозначно указывает на эффективную генерацию акустических колебаний, лежащих в области гиперзвука в среде. Частотный диапазон данного возбуждения определяется как геометрическими размерами наносфер SiO₂ опаловых матриц, так и акустическими характеристиками сред, используемых для заполнения межсферических полостей. Увеличение эффективности преобразования волны накачки в рассеянную волну и существенное понижение порога возбуждения ВР при переходе от комнатных температур к температуре жидкого азота, наблюдаемое в эксперименте, связано с сильным уменьшением величины затухания гиперзвука при таком понижении температуры образцов.

При исследовании спектрального состава рассеянного излучения для образцов наноконпозитов различного состава были реализованы условия генерации вынужденного комбинационного рассеяния (КР). В случае заполнения межсферических полостей опаловой матрицы нитробензолом (контраст показателя преломления — отношение n среды, заполняющей нанополости опаловой матрицы, к значению n плавленого кварца — $n/n_{\text{SiO}_2}=1,06$) в образце возбуждалось КР в направлении «назад» с высокой эффективностью преобразования лазерного излучения в КР. В наноконпозите с нитробензолом порог возникновения КР был в 20 раз ниже, чем в чистом нитробензоле. Высокая эффективность КР в жидкости в нанополостях обусловлена свойствами запрещенной фотонной зоны. Другой причиной усиления КР в данном случае может быть эффективная генерация ВР_н, которая может служить накачкой для КР в направлении «назад».

Для выяснения влияния запрещенной фотонной зоны на генерацию ВР и КР были проведены иссле-

дования возникновения этих видов рассеяния в различных образцах.

Свойства запрещенной фотонной зоны зависят от диаметра наносфер, образующих опаловую матрицу, и от состава образца (от вещества, заполняющего межсферические нанополости). Положение центра фотонной запрещенной зоны определяется как

$$\Lambda_{\text{pbg}} = 2D\sqrt{2/3}n_{\text{эфф}} \cos \theta, \quad (2)$$

$$n_{\text{эфф}} = \sqrt{(1-f)n_{\text{SiO}_2}^2 + fn^2}, \quad (3)$$

где θ — угол падения лазерного пучка на объект (относительно нормали к поверхности образца, в условиях нашего эксперимента $\theta=0$);

$n_{\text{эфф}}$ — эффективное значение показателя преломления;
 f — коэффициент, определяющий какая часть объема матрицы заполнена нелинейной средой (в нашем случае $f=0,26$).

Во всех исследованных образцах наблюдалось ВР_н с высокой эффективностью преобразования (табл. 4, где Λ — длина волны первой стоксовой компоненты КР, соответствующей среде, заполняю-

щей образец), при этом ВР в различных образцах отличалось по величине преобразования и числу линий в спектре. Отсутствие ВР_в в опаловых матрицах с нитробензолом, бензолом, в опаловых матрицах без заполнения и в некоторых образцах, заполненных ацетоном и водой, может быть объяснено следующим образом. Образцы освещались сфокусированным пучком лазерного излучения; диаметр фокальной перетяжки на поверхности образца составлял 0,1 мм — такой величиной определялась интенсивность возбуждающего излучения на входе в активную среду. Толщина образца составляла 1 мм, при этом внутри образца имеет место значительное ослабление лазерного излучения, которое происходит по двум причинам.

Для случаев, когда длина волны лазерного излучения лежит далеко от запрещенной фотонной зоны, главной причиной такого ослабления является некогерентное рассеяние света на различных дефектах структуры. Основным параметр, характеризующий этот процесс, — длина свободного пробега фотона l , равная приблизительно 15 мкм, что много меньше

Таблица 4

Параметры образцов нанокомпозитов и виды вынужденного рассеяния

Вещество, заполняющее матрицу	n/n_{SiO_2}	$n_{\text{эфф}}$	Λ , нм	Λ_{pbg} , нм	D , нм	Вид ВР
Нитробензол	1,07	1,48	765,8	483,07	200	ВР _н
				555,5	230	ВР _н
				627,99	260	ВР _н
				724,605	300	КР, ВР_н
				772,95	320	ВР _н
Ацетон	0,93	1,429	871,3	466,42	200	ВР _н , ВР _в
				536,38	230	ВР _н , ВР _в
				606,37	260	ВР _н , ВР _в
				699,63	300	ВР _н
				746,27	320	ВР _н , ВР _в
Бензол	1,04	1,465	745,6	476,5	200	ВР _н
				547,98	230	ВР _н
				619,45	260	ВР _н
				714,75	300	ВР _н
				762,4	320	ВР _н
Этанол	0,93	1,43	871,1	466,75	200	ВР _н , ВР _в
				536,8	230	ВР _н , ВР _в
				606,78	260	ВР _н , ВР _в
				700,125	300	ВР _н , ВР _в
				746,8	320	ВР _н , ВР _в
Вода	0,917	1,42	906,7	463,5	200	ВР _н , ВР _в
				533,03	230	ВР _н , ВР _в
				602,55	260	ВР _н , ВР _в
				695,25	300	ВР _н
				741,6	320	ВР _н , ВР _в
Четыреххлористый углерод	1,01	1,455	717,2	474,9	200	ВР _н
				546,13	230	ВР _н
				617,37	260	ВР _н
				712,35	300	ВР _н
				759,84	320	ВР _н
— (без заполнения)	0,69	1,35	715,2	440,64	200	ВР _н
				506,74	230	ВР _н
				572,83	260	ВР _н
				660,96	300	ВР _н
				705,024	320	ВР _н

толщины образца. Средняя длина свободного пробега фотона определяется различием показателей преломления SiO_2 и вещества, которым заполнены межсферические нанополости опаловой матрицы. В случае заполнения матрицы ацетоном, этанолом или водой длина свободного пробега l больше, чем в других случаях, что приводит к уменьшению энергетических потерь внутри образца.

В опаловых матрицах, заполненных нитробензолом, бензолом, четыреххлористым углеродом, и незаполненных существенное ослабление лазерного излучения вследствие малой величины l является причиной отсутствия ВР в направлении «вперед». При заполнении матрицы ацетоном и водой ВР отсутствует, когда длина волны лазерного излучения лежит внутри запрещенной фотонной зоны (см. табл. 4). В этом случае лазерное излучение экспоненциально ослабляется с увеличением толщины образца из-за брэгговского отражения, что делает невозможным возбуждение ВР. Во всех исследованных образцах КР могло возбуждаться только в том случае, когда частота возбуждающего лазерного излучения располагалась вблизи высокочастотного края запрещенной зоны, а частота первой стоксовой компоненты — вблизи низкочастотного края. В данном случае длина волны, соответствующая центру запрещенной фотонной зоны, расположена между величинами длины волны лазерного излучения и первой стоксовой компоненты КР.

Экспериментальные результаты, полученные при исследовании интенсивной и продолжительной акустолюминисценции, названной эффектом фотонного пламени [8, 9], также являются свидетельством возбуждения в опаловой матрице интенсивных акустических колебаний. Эффект заключается в возникновении на поверхности опаловой матрицы свечения в сине-зеленой области спектра длительностью несколько секунд при облучении образца лазерными импульсами наносекундной длительности, что наблюдалось при температуре жидкого азота как в незаполненных опаловых матрицах, так и в наноккомпозитах. Пороговое значение плотности мощности накачки определялось типом нелинейной среды, заполняющей межсферические нанополости опаловых матриц. Для незаполненного образца эта величина составляла $0,12 \text{ ГВт/см}^2$, для опаловой матрицы, заполненной этанолом — $0,05 \text{ ГВт/см}^2$, ацетоном — $0,03 \text{ ГВт/см}^2$. Возбуждение передавалось от образца, облученного лазерным импульсом, к другим образцам, расположенным на той же подложке. Расстояние между образцами могло составлять несколько сантиметров.

Был исследован спектральный состав свечения, возникающего при акустолюминисценции. Спектр свечения расположен, в основном, в сине-зеленой области (антистоксовая область при возбуждении рубиновым лазером), при значительном превышении порога наблюдаются также линии в стоксовой области. На **рис. 4** представлен спектр свечения в опаловой матрице, заполненной глицерином. Увеличение интенсивности возбуждающего излучения приводит к возрастанию интенсивности свечения и к появлению дополнительных компонент в антистоксовой об-

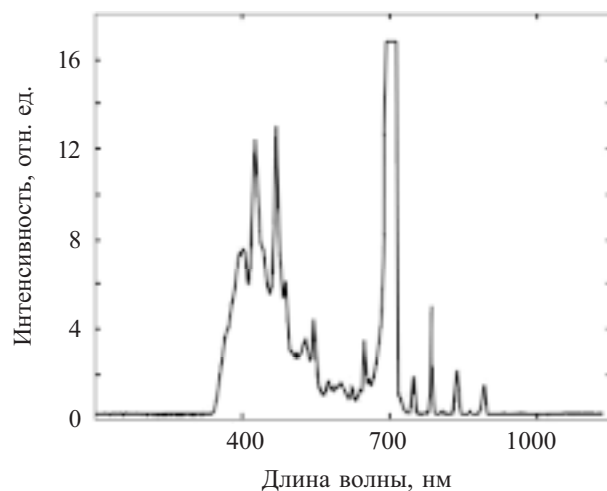


Рис. 4. Спектр свечения опаловой матрицы, заполненной глицерином

ласти спектра. Порог возникновения компонент в стоксовой области гораздо выше, чем в антистоксовой. Заполнение межсферических нанополостей опаловых матриц жидкостью не приводит к изменению спектрального распределения, но может влиять на порог эффекта. Так, заполнение матриц жидкостью с показателем преломления большим, чем показатель преломления кварца, понижает порог возникновения линий в стоксовой области спектра. Значения длины волны наиболее характерных линий в спектре излучения при эффекте фотонного пламени в антистоксовой области составляют 398, 408, 429, 440, 453, 464, 483, 500, 518 и 660 нм; в стоксовой области — 747, 777, 796, 824, 846, 930 и 1013 нм. Происходящие при этом процессы имеют много общего с триболоминисценцией. Возникающие в образцах под действием световых импульсов напряжения настолько велики, что в некоторых случаях образцы перемещаются на большое расстояние, иногда раскалываются, причем образовавшиеся осколки продолжают светиться.

Акустолюминисценция в рассматриваемом случае относится к оптоакустическим эффектам, обусловленным воздействием интенсивного излучения оптического диапазона на акустические характеристики среды, включая так называемый фотоакустический эффект, связанный с модуляцией светового потока в области частот, характеризующих его взаимодействие со средой, что приводит к возбуждению акустических колебаний. Следует отметить, что наряду с акустолюминисценцией, обусловленной наличием в материалах различных типов структурных дефектов, различают триболоминисценцию, возникающую при механических нагрузках, близких или превышающих реальные пределы прочности среды, когда имеет место накопление дефектов и электрического заряда в областях частичного нарушения сплошности с последующим образованием микротрещин и внутренним пробоем.

О возбуждении гиперзвука свидетельствуют не только результаты по передаче акустических колебаний (с возбуждением акустолюминисценции) от опа-

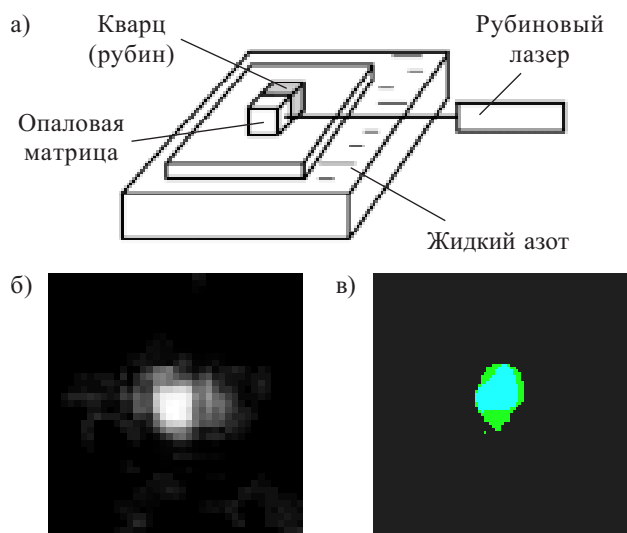


Рис. 5. Схема опыта (а) и фотографии свечения (через 2—3 с после выключения лазера) кварца (б) и рубина (в) при возбуждении опаловой матрицы

ловой матрицы к другим материалам (рис. 5), но и данные экспериментов, проведенных с одновременным использованием кристаллов (в виде плоских пластин заданной ориентации) сильного (SBN — барий-стронций-ниобат) и слабого (кварц) пьезоэлектриков. Наличие опаловой матрицы, возбуждаемой лазерным лучом, между параллельно расположенными пластинами приводило к большой разнице между величинами заряда на поверхностях сильного и слабого пьезоэлектриков, вплоть до искрения и пробоя, при расстояниях между пластинами до 3 мм. Последнее подтверждает возникновение гиперзвуковых колебаний, без воздействия которых пробой в пьезоэлектриках невозможен.

Обсуждение результатов

Как следует из приведенных результатов, в процессах, возникающих при взаимодействии мощного лазерного излучения с опаловыми матрицами, существенную роль играет акустическое возбуждение исследуемых сред. Именно возбуждение гиперзвука является причиной возникновения описанных нелинейно-оптических эффектов. Следовательно, опаловые матрицы могут быть использованы для генерации гиперзвука в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков гигагерц [4, 5].

Качественно картина преобразования такого оптического воздействия лазера в акустические колебания может быть рассмотрена в следующем виде. Роль нелинейного ограничителя, устанавливающего стационарный режим периодических колебаний, выполняет собственно опаловая матрица как фотонный и фононный кристалл, в котором вследствие эффекта «накачки» возникает режим, характерный для состояний с отрицательным коэффициентом преломления, присущий, в общем случае, всем метаматериалам. Возникающая в определенном диапазоне акустических волн среда переводит режим (можно сказать, катастрофический) нарастания амплитуды колебаний в ста-

ционарный. Длительность этого процесса определяется затуханием — потерями запасенной энергии, переведенной (до 50—60%) нелинейными свойствами системы в энергию периодических акустических колебаний. Частота колебаний определяется периодичностью структуры вещества, особенностями скорости распространения акустических колебаний в среде и упругими характеристиками опаловых матриц. Рассмотренные эффекты длительной акустолуминесценции могут быть исследованы в классе фотонно-фононных метаматериалов, к которым относятся опаловые матрицы, при условии установления в таких средах определенного режима колебаний за счет взаимодействий между фотонной и фононной подсистемами (как это имеет место в рассматриваемом случае).

При любом сценарии перекачки энергии оптического импульса в энергию акустических колебаний существенным фактором является фиксированность длины таких волн в зависимости от размера наносфер (или, возможно, от связанной с ней периодичностью в такой решетчатой упаковке). При этом скорость распространения фононов будет определяться материалом наносфер, а также упругостью и неупругостью контактов между ними. Действительно, необходимо учитывать, что наносферы (каждая из них окружена 12-ю подобными, а межсферические полости двух типов образуют подрешетки полостей) в опаловых матрицах имеют подструктуру, так что каждая крупная наносфера SiO_2 состоит из нескольких сотен более мелких диаметрами 5—10 нм (рис. 6). Роль межсферической области выполняют небольшие площадки, по которым наносферы скрепляются между собой в опаловых матрицах при операциях упрочнения, когда происходит срастание наносфер (при их полигонизации с образованием площадок небольших размеров) без существенного изменения их первоначального размера, а само упрочнение опалового материала возникает при переносе кремнезема в зону контакта с образованием прочных силоксановых связей.

В книге Л. Д. Ландау и И. М. Лифшица «Электродинамика сплошных сред» отмечается, что формально закон возрастания энтропии при действии элект-

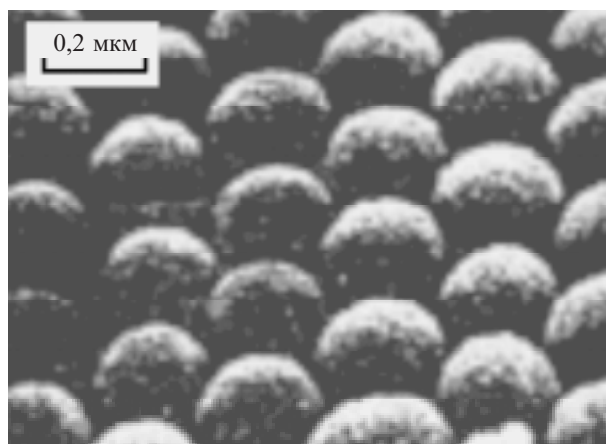


Рис. 6. Поверхность {111} образца опаловой матрицы (растровая электронная микроскопия, снимок сделан под углом 45° к поверхности)

ромагнитного поля в условиях термодинамической неравновесности может реализовываться не только под действием электромагнитного излучения, но и через возбужденные состояния элементов, образующих среду. Показано, что в условиях, когда реальная часть диэлектрической проницаемости $\epsilon < 0$, может иметь место «неистинная» диссипация (не связанная с поглощением излучения), обусловленная наличием возбужденных состояний, не относящихся к электромагнитным модам. Поскольку нестационарные процессы всегда относятся (в различной степени) к термодинамически необратимым процессам, наличие произвольной дисперсии делает невозможным последовательное задание электромагнитной энергии как термодинамической величины [15]. Косвенным подтверждением наличия подобного механизма является рассматриваемая ниже высокая лучевая прочность опаловых матриц, выдерживающих импульсное оптическое воздействие с большой интенсивностью (мощностью).

Поскольку опаловые матрицы относятся к новому классу некристаллических нанокомпозитов, а именно к метаматериалам (которые по аналогии можно назвать фотонно-фононными кристаллами), являющимися одновременно материалами с запрещенными (и разрешенными) фотонными и фононными зонами, представляло особый интерес изучить особенности механизма лучевой прочности таких материалов. Многие характерные их свойства обусловлены как наличием периодичности наноразмерного масштаба, так и особенностями статистики Бозе–Эйнштейна (например, возможностью получения 100%-ной инверсии в двухуровневых системах), которой подчиняются указанные квазичастицы (фотоны и фононы). Для исследования лучевой прочности (при комнатной температуре) кристаллических материалов (кварц, рубин), плавленого кварца и опаловых матриц (упорядоченных, а именно решетчатых упаковок наносфер SiO_2) в качестве источника возбуждающего излучения использовался твердотельный лазер на рубине ($\lambda = 694,3$ нм, $E_{\text{max}} = 0,4\text{—}0,5$ Дж), позволяющий получить без фокусировки до 2 ГВт/см², а при использовании фокусировки — до 1000 ГВт/см² (при площади пятна пучка $0,2$ мм²).

Оказалось, что при использовании кристаллических материалов или плавленого кварца разрушение образцов, в том числе в виде прожигания отверстий или внутреннего пробоя, в зависимости от качества материала имело место при величине мощности $15\text{—}40$ ГВт/см², а с применением фокусировки на поверхности — при $5\text{—}20$ ГВт/см² при воздействии одним импульсом или $1\text{—}5$ ГВт/см² при $5\text{—}10$ импульсах. В случае опаловых матриц (при аналогичных размерах и условиях воздействия лазерного излучения) параметры разрушающего воздействия следующие: $20\text{—}40$ импульсов при мощности $40\text{—}20$ ГВт/см², не менее 100 импульсов при мощности 5 ГВт/см² и выше $450\text{—}800$ ГВт/см² (в зависимости от качества образца) при воздействии одним импульсом.

Заключение

Рассматриваемые системы в общем случае относятся к ангармоническим (нелинейным) решеткам, характеризующимся нелинейным взаимодействием нормальных мод гармонических осцилляторов. Для подобных неэргодических систем нормальные моды определяются как движение с почти постоянной амплитудой и с заданной частотой для каждого осциллятора. Подобные нелинейные моды как периодические решения для нелинейных систем возможны различных типов, в частности в форме солитонов, например, для одномерных цепочек [16, 17]. Неэргодичность систем означает, что функция распределения вдоль фазовой траектории непостоянна, а следовательно соотношение энергии и статистического состояния становится неоднозначным [15]. Наличие в системе областей с различными акустическими характеристиками приводит к состоянию неполного равновесия [15], когда каждая «малая» подсистема описывается своей функцией распределения, а термодинамические функции не обязательно являются аддитивными интегралами движения. Как и в случае вырожденных состояний, энергия не составляет в отдельности полной системы физических величин, а произвольно выбранные собственные функции вырожденного уровня энергии не обязательно образуют ортогональную систему.

Акустические метаматериалы достаточно условно разделяются на три класса [1, 18], а именно: фотонные кристаллы — регулярно упорядоченные материалы с запрещенными фотонными зонами; упорядоченные материалы, чьи акустические характеристики определяются внутренним дизайном (intrinsic); так называемые inertial-материалы, образованные локальными резонансными «составными» или композитными элементами с существенно различными акустическими свойствами (плотностью или фазовыми скоростями). Для акустических метаматериалов можно ввести условные акустические характеристики (по аналогии с фотонными кристаллами [1, 18]):

а) отрицательные объемные модули (B), когда частота локального резонанса выше формальной собственной частоты элементов (обычно тело объемом V сжимается под действием приложенного давления и $B = -V \partial p / \partial V$, но локально может и расширяться, с учетом, что в среднем по телу $B > 0$);

б) отрицательная плотность (массовая) — направления действия силы и ускорения противоположны (аналог отрицательной групповой скорости);

в) формальный коэффициент (индекс) преломления как $n = (B_0 \rho / B \rho_0)^{1/2}$, где B и B_0 , ρ и ρ_0 — объемные модули и плотности различных фаз, соответственно.

Для описания свойств акустических метаматериалов также удобно использовать такой параметр как акустический импеданс $Z = \rho c / \cos \theta'$, где θ' — угол между волновым вектором и нормалью к слоям (поверхностям раздела), представляющим материалы с разными скоростями (c) акустических волн (одного типа) [1, 18]. Таким образом, акустические метаматериалы определяются как материалы с пространственной дисперсией импеданса.

Результаты, полученные в настоящей работе, демонстрируют возможность эффективного преобразования энергии импульсного светового излучения в акустические колебания наносфер, образующих опаловую матрицу, с частотами, расположенными в гигагерцевом диапазоне. Частоту колебаний можно целенаправленно изменять, варьируя свойства образцов (например, меняя диаметр наносфер, образующих матрицу, заполняя межсферические нанополости различными веществами). Заполняя полости различными нелинейными жидкостями и материалами, активными в КР, и подбирая таким образом положение запрещенной фотонной зоны, можно получать в нанокompозите на основе опаловой матрицы вынужденное рассеяние во много раз более эффективное, чем в сплошной среде, что открывает перспективы использования опаловых матриц и разнообразных наноматериалов на их основе (см. также [19, 20], в которых рассмотрены оптические эффекты в наноматериалах) в оптоакустических устройствах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Lee Fok, Muralidhar Ambati, Xiang Zhang. Acoustic metamaterials // *MRS Bulletin*.— 2008.— Vol. 33.— P. 931.
2. Богомолов В. Н., Парфеньева Л. С., Смирнов И. А. и др. Прохождение фононов через фотонные кристаллы — среды с пространственной модуляцией акустических свойств. ФТТ.— 2002.— Т. 44, вып. 1.— С. 175—170.
3. Astratov V. N., Bogomolov V. N., Kaplyanskii A. A. et al. Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: quantum confinement and photonic band gap effects // *Nuovo Cimento, D*.— 1995.— Vol. 17.— P. 1349—1356.
4. Кудрявцева А. Д., Самойлович М. И., Чернега Н. В. Оптико-акустические эффекты в фотонных кристаллах (опаловые матрицы как метаматериал) // Матер. XV Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России».— М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана.— 2009.— С. 91—101.
5. Чернега Н. В., Самойлович М. И., Кудрявцева А. Д. и др. Морфологически зависимый акустический резонанс в тонких пленках: лазерная генерация акустических колебаний // Там же.— С. 376—382.
6. Горелик В. С., Кудрявцева А. Д., Тареева М. В., Чернега Н. В. Спектральные характеристики излучения кристаллов искусственного опала при эффекте фотонного пламени // Письма в ЖЭТФ.— 2006.— Т. 84.— Вып. 9.— С. 575—578.
7. Gorelik V. S., Kudryavtseva A. D., Tcherniega N. V. Stimulated Raman scattering in three-dimensional photonic crystals // *JRLR*.— 2008.— V. 29.— № 6.— P. 551—557.
8. Tcherniega N. V., Kudryavtseva A. D. Photonic flame effect // *Journal of Russian Laser Research*.— 2006.— V. 27.— № 5.— P. 400—409.
9. Кудрявцева А. Д., Самойлович М. И., Чернега Н. В. Фотонные кристаллы — новые материалы для нелинейной оптики и фотоники // Матер. XV Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России».— М.: ЦНИТИ «Техномаш».— 2008.— С. 44—49.
10. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний.— М.: ГИФМЛ, 1958.
11. Tamura A., Higeta K., Ichinokawa T. Lattice vibrations and specific heat of a small particle // *J. Phys. C: Solid State Phys.*— 1982.— V. 15.— P. 4975—4991.
12. Kuok M. H., Lim H. S., Ng S. C. et al. Brillouine study of the quantization of acoustic modes in nanospheres // *Phys. Rev. Lett.*— 2003.— Vol. 90.— P. 255502-1 — 255502-4.
13. Nanophotonics with surface plasmons (*Advances in nanophotonics and nano-photonics*) / Editors Shalaev V. M., Kawata S.— Elsevier, 2007.
14. Shalaev V. M. Nonlinear optics of random media: fractal composites and metal-dielectric films // *Springer Tracts in Modern Physics*. V.158.— Springer, Berlin Heidelberg, 2000.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц И. М. Электродинамика сплошных сред.— М.: Наука. 1964.
16. Солитоны. Коллективная монография / Под ред. С. П. Новикова.— Новокузнецк: НФМИ, 1999.
17. Дубровин Б. Л., Новиков С. П., Фоменко А. Т. Современная геометрия. Т. 2.— М.: Эдиториал УРСС, 2001.
18. Vladimir Fokin, Muralidhar Ambati, Cheng Sun, Xiang Zhang. Method for retrieving effective properties of locally resonant acoustic meta-materials // *Physical Review B*.— 2007.— 76.— 144302.
19. Sarychev A. K., Shalaev V. N. *Electrodynamics of metamaterials*.— Word Scientific, 2007.
20. Наноматериалы. III. Фотонные кристаллы и нанокompозиты на основе опаловых матриц / Ред. М. И. Самойлович.— М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2007.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Петухов В. М. Взаимозаменяемые транзисторы. Справочник.— М.: РадиоСофт, 2009.— 384 с.

Книга представляет собой исправленное и расширенное издание справочника «Аналоги отечественных и зарубежных транзисторов». Для удобства работы с изданием приводится прямой (отечественный прибор — зарубежный аналог) и обратный (зарубежный прибор — отечественный аналог) перечни приборов, построенные в алфавитно-цифровой последовательности.

Для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры.

Лялин К. С., Приходько Д. В. Электродинамика СВЧ.— М.: МИЭТ, 2009.— 192 с.

В учебном пособии изложены основы классической электродинамики сплошных сред и распространения радиоволн в природных условиях, электродинамики линий передачи, даны азы теории СВЧ-цепей.



Д. В. КУЗЕНКО, д. ф.-м. н. А. И. БАЖИН, В. В. ДОРОФЕЕВА,
к. х. н. Л. Г. ГУСАКОВА, д. ф.-м. н. В. М. ИЩУК,
Н. А. СПИРИДОНОВ

Украина, г. Донецк, НТЦ «Реактивэлектрон» НАНУ,
Донецкий национальный университет
E-mail: danil.kuzenko@gmail.com

Дата поступления в редакцию
26.05 2009 г.

Оппонент к. т. н. В. П. МАСЛОВ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

СТАБИЛЬНОСТЬ СВОЙСТВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Исследовано влияние возбуждающих электрических полей, механического одноосного нагружения и температуры на стабильность рабочих параметров пьезокерамических элементов. Показано, что после снятия возбуждения наблюдается длительная релаксация свойств по закону, близкому к логарифмическому.

Сегнетоэлектрические материалы занимают важное место как в фундаментальном материаловедении, так и в практической области применения науки и техники. Число устройств на их основе велико: пьезодвигатели, пьезотрансформаторы, источники УЗ-волн, фильтры, акустоэлектронные и оптоэлектронные устройства [1]. Невозможность проведения современных практических и фундаментальных исследований без этого класса функциональных материалов очевидна. Достаточно отметить хотя бы основу растровой электронной микроскопии — кантилеверы, которые с помощью пьезоэлектрических трубок осуществляют перемещение на десятки ангстрем.

Ввиду относительной простоты производства широкое распространение получила сегнетоэлектрическая керамика. Используя особые технологические приемы, удастся получить керамику со свойствами, близкими к свойствам монокристаллов. Однако при этом от некоторых недостатков, присущих сугубо керамическим материалам, избавиться не удастся. Таким недостатком является сильная зависимость свойств пьезокерамических элементов (ПКЭ) от внешних условий. Если в монокристаллах удастся стабилизировать некоторые параметры путем выбора определенного направления (среза), то в керамике такая стабилизация невозможна. Из этого следует необходимость поиска других способов стабилизации свойств. Такие способы известны — это, например, выбор специальных режимов поляризации (на стадии изготовления ПКЭ) и принудительное старение уже поляризованных ПКЭ [2]. Частично решить эту проблему можно также с помощью технологии изготовления композиционных материалов в производстве керамики. Однако многочисленные публикации по данному вопросу нередко противоречивы и не дают исчерпывающих ответов.

Как и при решении любой материаловедческой задачи, решению вопроса о стабилизации свойств пьезокерамических элементов должно предшествовать

установление причины сильной зависимости свойств сегнетоэлектрической пьезокерамики от внешних условий. Этому вопросу и посвящена данная работа.

Для аппаратуры на основе ПКЭ важными являются следующие параметры: механическая добротность Q_m , частота собственных механических колебаний f_r , относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_0 , тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, пьезочувствительность g_{ij} , пьезоэлектрический модуль d_{ij} , коэффициент электромеханической связи k_{ij} , резонансный промежуток Δf , точка Кюри T_c , сопротивление R_r в резонансе [3].

Так как на практике одним из основных факторов, приводящих к изменению свойств ПКЭ, является температура [4], то в качестве характеристики ПКЭ вводятся температурные коэффициенты ТК (например, ТКЧ — температурный коэффициент частоты). Величина ТК для различных параметров может принимать значения от нескольких процентов (например, относительное изменение частоты собственных механических колебаний) до нескольких сот процентов (например, относительное изменение механической добротности и сопротивления ПКЭ на резонансной частоте). Соответственно, влияние изменения температуры ПКЭ на стабильную работу устройства в целом будет разным в зависимости от влияющего параметра ($Q_m, f_r, \epsilon_0 \dots$).

Так, в устройствах ультразвукового неразрушающего контроля важным параметром является механическая добротность Q_m , низкое значение которой обуславливает быстрое затухание ультразвуковых волн, а следовательно, и быстрое переключение между режимами излучения и приема [5]. Это приводит к увеличению разрешения по глубине. Изменение же механической добротности будет приводить к нарушению рабочего режима устройства.

Другим примером являются пьезодвигатели. Здесь при увеличении возбуждающего напряжения выше некоторого значения наблюдается отклонение от линейности зависимости «напряжение — деформация» [6].

Проведение эксперимента

Для проведения экспериментов были изготовлены по традиционной «керамической» технологии дисковые ($d=10$ мм, $h=1$ мм) пьезоэлементы различной сегнетожесткости: сегнетомягкие из материалов ЦТСтБС-3/1 и ЦТСС-2 ($Q_m < 400$); сегнетожесткие из

ЦТСС-3 и модельного твердого раствора $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$, легированного MnO_2 ($Q_m > 400$).

Методом резонанса-антрезонанса по стандартной методике [3] определялись: частота собственных радиальных механических колебаний (частота резонанса f_r), частота антрезонанса (f_a), частота 3-й гармоники основной резонансной частоты (f_{r3}), сопротивление ПКЭ на частоте резонанса (R_r). Статическая электрическая емкость ПКЭ (C_0) определялась мостовым методом (мост Е7-8) на частоте 1 кГц. Механическая добротность определялась по формуле

$$Q_m = A \left[R_r C_0 f_r (1 - f_r^2 / f_a^2) \right]^{-1},$$

где A — постоянная.

Температура образцов контролировалась хромель-алюмелевой микротермопарой с точностью $\pm 0,05^\circ\text{C}$.

Поскольку определение механической добротности ПКЭ связано с измерением его резонансных характеристик (f_r, f_a), было исследовано влияние возбуждающего напряжения резонансных частот (f_r, f_a, f_{r3}) на стабильность частоты и на разогрев ПКЭ при этом. Образцами служили ПКЭ из материала ЦТСС-3, который обладает высокими добротностью ($Q_m \approx 800$) и точкой Кюри ($T_c \approx 290^\circ\text{C}$). Результаты этого эксперимента приведены на **рис. 1**. Так как толщина образцов составляла 1 мм, значения возбуждающего напряжения совпадали со значениями напряженности электрического поля.

Влияние напряженности возбуждающего электрического поля резонансной частоты на величину механической добротности исследовалось для ПКЭ из двух сегнетомягких пьезоматериалов. Из **рис. 2** видно, что увеличение амплитуды приводит к снижению механической добротности ПКЭ в обоих случаях. Однако для разных материалов степень снижения Q_m различна, что является важным для практического применения. Так, добротность ПКЭ из материала ЦТСС-2, изначально более высокая, снижается более резко и при рабочем значении напряженности около 5 В/мм становится значительно ниже, чем у ПКЭ из ЦТСТБС-3/1.

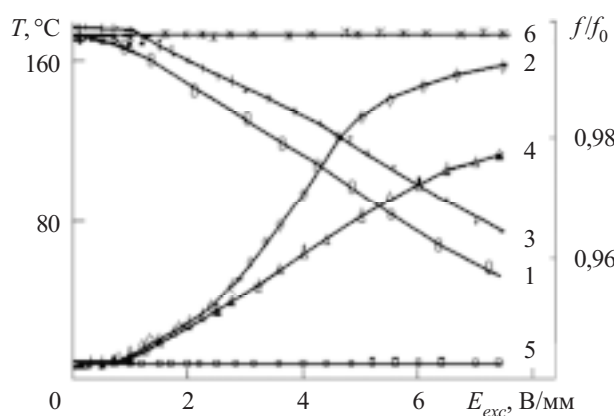


Рис. 1. Влияние напряженности возбуждающего электрического поля на резонансных частотах на стабильность частоты (1, 3, 6) и разогрев ПЭ при резонансе (2, 4, 5): 1, 2 — на частоте f_r ; 3, 4 — на частоте f_{r3} ; 5, 6 — на частоте f_a

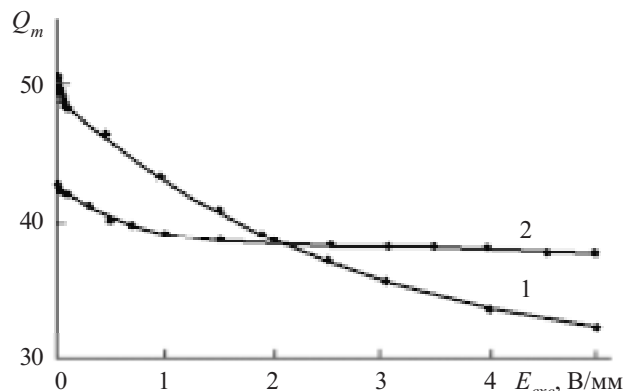


Рис. 2. Влияние напряженности возбуждающего электрического поля резонансной частоты на добротность ПКЭ из различных материалов: 1 — ЦТСС-2; 2 — ЦТСТБС-3/1

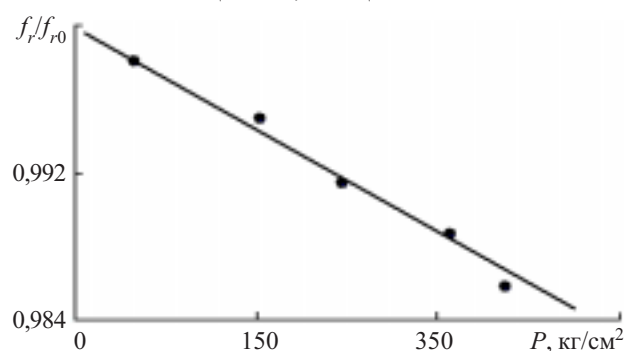


Рис. 3. Зависимость относительной резонансной частоты от величины одноосного механического нагружения

Кроме температуры, важным для работы ПКЭ параметром является давление (одноосное, гидростатическое). Как правило, устройства на основе ПКЭ работают при атмосферном давлении, и незначительное его изменение не приводит к сколько-нибудь заметному изменению свойств ПКЭ. Однако, как известно [1], в ряде устройств при закреплении ПКЭ прилагают достаточно высокие сжимающие усилия (как правило, в излучателях интенсивных ультразвуковых волн и различных датчиках). Это приводит к изменению резонансной частоты (**рис. 3**).

Для изучения причин, приводящих к подобным изменениям, были проведены дополнительные исследования. Эксперимент состоял из четырех частей.

В первой части эксперимента ПКЭ из материалов ЦТСС-3 и смеси $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$ с MnO_2 (с молярной долей 0,7%) возбуждались электрическим напряжением резонансной частоты, которое изменялось в пределах от 0 до 2,5; до 5,0 и до 7,5 В с шагом 0,05 В. В каждой точке образец выдерживался не более 1 мин, при этом фиксировались его резонансная частота, значение выходного напряжения и температура. Поскольку возбужденный ПКЭ нагревался, после снятия возбуждения его температура понижалась до комнатной в течение не более двух минут. Вслед за этим фиксировались его резонансные характеристики в течение 10 часов. Результаты для ПКЭ из материала ЦТСС-3 приведены на **рис. 4**, поведение второго образца было аналогичным.

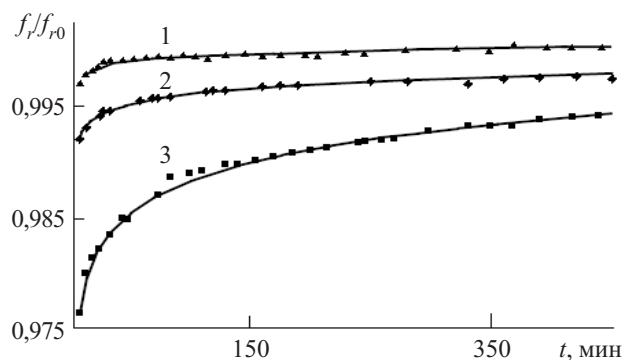


Рис. 4. Зависимость относительной резонансной частоты от времени после возбуждения пьезоэлемента на резонансной частоте напряжением U_{exc} , В:
1 — 2,5; 2 — 5,0; 3 — 7,5

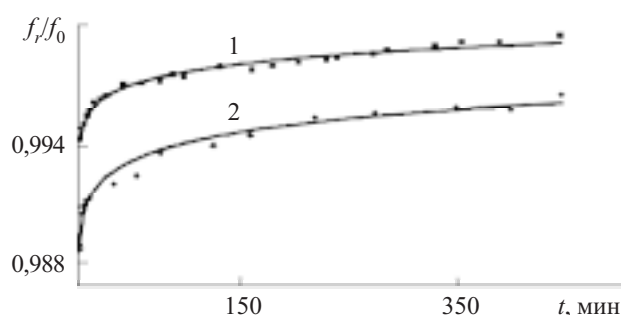


Рис. 5. Зависимость относительной резонансной частоты от времени после разогрева пьезоэлемента до температуры T , °C:
1 — 80; 2 — 170

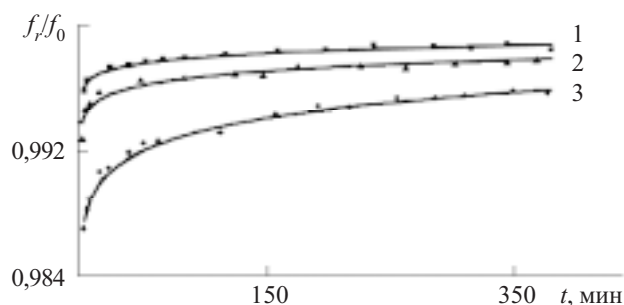


Рис. 6. Зависимость относительной резонансной частоты от времени после механического сжатия пьезоэлемента с усилием P , кг/см²:
1 — 30; 2 — 150; 3 — 350

Во второй части эксперимента ПКЭ из тех же материалов выдерживались при температурах 170 и 80°C в течение 15 минут, затем охлаждались до комнатной температуры не более двух минут. После этого также фиксировались их резонансные характеристики в течение нескольких часов. Результаты приведены на **рис. 5**.

В третьей части эксперимента ПКЭ выдерживались под одноосной механической нагрузкой (30, 150, 350 кг/см²) в течение 30 минут. После этого фиксировались их резонансные характеристики также в течение нескольких часов. Результаты приведены на **рис. 6**.

Из приведенных рисунков видно, что все рассмотренные выше воздействия приводят к обратимым из-

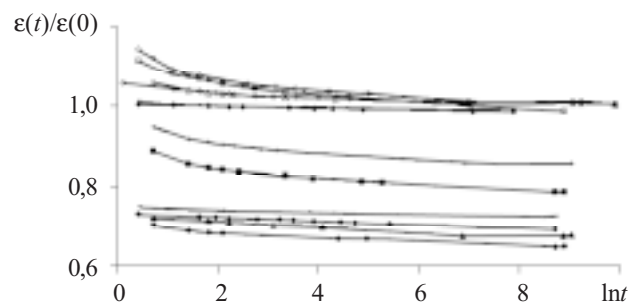


Рис. 7. Релаксация диэлектрической проницаемости пьезоэлемента после возбуждения постоянным электрическим полем различной напряженности

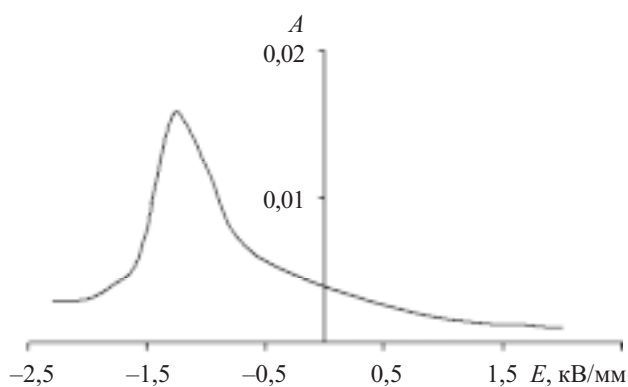


Рис. 8. Полевая зависимость скорости релаксации диэлектрической проницаемости пьезоэлемента после возбуждения постоянным электрическим полем напряженностью E

менениям свойств — резонансная частота возвращается к первоначальному значению.

В четвертой части эксперимента ПКЭ из материала ЦТСС-3 выдерживались в постоянном электрическом поле в течение 10 минут. После снятия поля фиксировалась диэлектрическая проницаемость образцов в течение нескольких суток. На **рис. 7** видно, что при некоторых значениях напряженности электрического поля диэлектрическая проницаемость изменялась необратимо ($\epsilon(t)/\epsilon(0) < 1$, где $\epsilon(0)$ — диэлектрическая проницаемость, измеренная до возбуждения). Эти значения напряженности электрического поля были близки к коэрцитивной силе. На **рис. 8** изображена полевая зависимость коэффициента A , характеризующего скорость релаксации диэлектрической проницаемости после возбуждения ПКЭ постоянным электрическим полем: $\epsilon(t)/\epsilon(0) = A \cdot \ln t + D$, где D — постоянная, определяемая по виду кривой релаксации. Максимум этой скорости приходится на значения поля, лежащие ниже коэрцитивной силы для данных элементов.

Обсуждение результатов

Результаты, показанные на **рис. 1**, объясняются тем, что при возбуждении ПКЭ на частоте резонанса, которая совпадает с частотой собственных механических радиальных колебаний, происходит его значительная деформация. При увеличении амплитуды возбуждающего напряжения деформация также увеличивается, одновременно с этим увеличивается и джоулево

тепло (пропорциональное U^2/R , где U — возбуждающее напряжение; R — сопротивление образца в резонансе), выделяющееся в ПКЭ за период. Это приводит к значительному разогреву ПКЭ, что в свою очередь сказывается на снижении частоты.

Увеличение амплитуды возбуждающего напряжения на частоте 3-й гармоники резонансной частоты приводит к меньшему разогреву ПКЭ и, соответственно, к меньшему снижению самой частоты. Это объясняется меньшими, по сравнению с резонансными, механическими деформациями и более высоким сопротивлением ПКЭ на этой частоте.

Возбуждение же ПКЭ на частоте антирезонанса не приводит ни к снижению частоты, ни к разогреву ПКЭ, т. к. на этой частоте он обладает максимальным сопротивлением и механического резонанса не возникает.

Таким образом, на снижение частот при увеличении переменного напряжения основное влияние оказывает температура ПКЭ. Как видно из рис. 2, механическая добротность при этом может значительно снизиться. Анализ формулы для расчета Q_m показал, что такое снижение вызвано увеличением сопротивления ПКЭ на резонансной частоте R_r и его емкости C_o в результате разогрева. Это следует из того, что изменение частоты в результате нагрева составляет 2—5%, а изменение сопротивления и емкости может достигать сотни процентов (для данных значений температуры).

При проведении экспериментов по определению скорости возвращения к исходным значениям резонансных характеристик ПКЭ после возбуждения (электрического, температурного, механического) установлено, что во всех четырех рассмотренных случаях наблюдается долговременная релаксация упругих параметров ПКЭ, что свидетельствует о едином механизме, приводящем к растянутой во времени релаксации (десять часов).

Объяснить это можно рассматривая поляризованную пьезокерамику как поликристаллическое тело (рис. 9, а), в котором существует некоторая разориентировка векторов поляризации в соседних зернах (блоках зерен). На рис. 9, б схематически показано, что при различном направлении векторов поляризации их тангенциальные и нормальные проекции будут отличаться. Соответственно будет отличаться и деформация зерен, которая определяется уравнением $u = dP + QP^2$, где P — поляризация; d — пьезоэлектрический коэффициент; Q — электрострикционный коэффициент. Это приводит к возникновению нескомпенсированных механических напряжений, которые накапливаются на границах зерен. После снятия нагрузки происходит продолжительное ослабление накопленных напряжений, что и приводит к длительной релаксации свойств.

Данный механизм действует для всех рассмотренных видов выведения ПЭ из равновесного состояния. Разогрев ПЭ приводит к его частичной деполяризации, что, как показано выше, приводит к накоплению механических напряжений на границах зерен. Механическое одноосное нагружение ПЭ также частично деполяризует его. Электрическое возбуждение полем резонансной частоты приводит как к разогреву ПЭ, так и к его деформации.

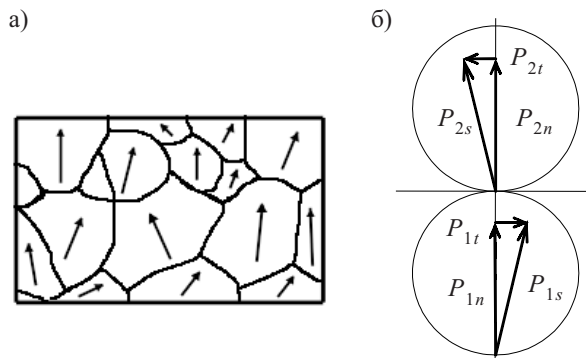


Рис. 9. Схема кристаллитной структуры поляризованной пьезокерамики (а) и тангенциальные и нормальные составляющие векторов поляризации в соседних зернах (б)

Следует отметить, что длительную релаксацию после механических деформаций можно рассматривать как один из способов снятия механических напряжений в металлах и сплавах [7, 8].

Для твердых растворов на основе цирконат-титаната свинца, в которых реализуется сегнетоэлектрическое или антисегнетоэлектрическое состояние, релаксационные процессы имеют другую природу [9].

В случае возбуждения постоянным электрическим полем появление необратимых процессов связывается с образованием в образцах зародышей новой фазы (другой полярности). Это приводит также к появлению дополнительных внутренних напряжений и, как следствие, к увеличению скорости релаксации (рис. 8). Таким образом, на описанный выше механизм накладывается механизм образования новой фазы.

Выводы

В результате проведенных исследований было установлено, что после прекращения возбуждения сегнетокерамики ее диэлектрические и пьезоэлектрические свойства длительно релаксируют по закону, близкому к логарифмическому.

Установлено также, что существуют области возбуждения, приводящие к обратимым и к необратимым процессам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Джагупов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. — С.-Пб.: Политехника, 1994.
2. Фесенко Е. Г., Данцигер А. Я., Бородин В. З. и др. Поляризация пьезокерамики. — Изд-во Ростовского ун-та, 1968.
3. ОСТ 110444—87. Материалы пьезокерамические. Технические условия.
4. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Балдев Радж. Применение ультразвука. — М.: Техносфера, 2006.
6. Priya S., Viehland D. High-power resonant measurements of piezoelectric materials. Importance of elastic nonlinearities // Journal of Applied Physics. — 2001. — Vol. 90, N 3. — P. 1469.
7. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в твердых телах. — М.: Атомиздат, 1975.
8. Игнатенко П. И., Иванишин Н. П. Физика прочности и пластичности кристаллов. — Донецк: ДонНУ, 2005.
9. Ishchuk V. M., Samoylenko Z. A., Sobolev V. L. The kinetics of the local compositional changes of the ferroelectric-antiferroelectric interphase boundaries in lead-lanthanum titanate-zirconate solid solutions // J. Phys.: Condens. Matter. — 2006. — N 18. — P. 11371.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2009 г.

Современные электронные технологии

Обеспечение заданной длины проводников в САПР TороR. *Лысенко А. А., Полубасов О. Б.* 4

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Органические светоизлучающие структуры — технологии XXI века. *Сорокин В. М., Коломзаров Ю. В., Маслак-Гудима Н. П., Миняйло М. А.* 1

Первичные источники тока $\text{Li}/\text{Cu}_4\text{Bi}^5\text{S}_{10}$. *Дудяк А. В., Заслонкин А. В., Ковалюк З. Д., Минтянский И. В., Савицкий П. И.* 2

Индуктивность, перестраиваемая электрическим полем. *Семёнов А. А., Усанов Д. А.* 5

Матричные кремниевые микрокатоды для автоэмиссионных дисплеев. *Дружинин А. А., Голота В. И., Козут И. Т., Ховерко Ю. М.* 6

Электронные средства: исследования, разработки

Связь параметров спектральной плотности фликкер-шума с особенностями внутренней структуры системы. *Колодий З. А., Крук О. Г., Саноцкий Ю. В., Голынский В. Д., Колодий А. З., Депко П. И.* 1

Расчет нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий. *Шило Г. Н., Коваленко Д. А., Гапоненко Н. П.* 1

Свойства коммутационных ячеек, используемых в системах автоматизированного контроля. *Медведик А. Д.* 2

Физические основы проектирования зеркал оптических резонаторов полихромных лазеров. *Бондарчук Я. М., Петровская Г. А., Татарин В. Я.* 2

Непаяные контактные соединения в электронных печатных узлах. *Ефименко А. А., Собченко Д. Л.* 3

Моделирование электрических характеристик и расчет конструктивных параметров кремниевого стабилизатора с напряжением стабилизации 6,5 В. *Дудар Н. Л., Сякерский В. С., Корытко Н. Н.* 3

К вопросу о минимизации числа межслойных переходов при трассировке печатных плат. *Лузин С. Ю., Петросян Г. С., Полубасов О. Б.* 3

Светофильтры с тонкопленочным прозрачным нагревателем. *Хомич И. Н.* 4

Гибридный автодинный сенсор магнитного резонанса. *Браиловский В. В., Верига А. Д., Политанский Л. Ф.* 5

Установка для измерения удельного коэффициента силы света материалов со световозвращающим эффектом. *Бутенко В. К., Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г., Юрьев В. Г.* 5

Метод расчета сопротивления электродов тонкопленочного резистора. *Спирин В. Г.* 6

Системы передачи и обработки сигналов

Алгоритмическая фильтрация помех методом α -усеченного среднего в устройствах преобразования «угол-код». *Гордиенко В. И., Гусаченко С. А., Клецкий Н. В., Мытник Г. И., Хомченко А. Я.* 1

Способы повышения эффективности многоканального фильтра доплеровского сигнала. *Василевский В. В., Головань В. Г., Дроздов М. А., Хижняк Т. А.* 4

Оптимизация процесса поиска неизвестного количества движущихся объектов. *Гришин И. Ю.* 5

Микропроцессорные устройства и системы

Универсальная матрица структурно-логических преобразований n -мерного куба E^n единого кодирующего формата. *Иванов Ю. Д.* 1

Микропроцессор звездообразной структуры. *Синегуб Н. И.* 2

Умножитель/делитель с повышенным быстродействием. *Синегуб Н. И.* 3

Вопросы приборостроения

Аппаратура для мониторинга элементного состава полиметаллических руд РЛП-21. *Ефименко С. А.* 2

Энергетическая электроника

Кремний мультипористой текстуры для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. *Ерохов В. Ю., Дружинин А. О.* 3

Биомедицинская электроника

Устройство сбора биометрической информации с использованием тензотранзисторных датчиков. *Жильцов В. В., Костенко В. Л.* 6

Сенсоэлектроника

Анизотропный приемник теплового излучения на основе антимонида кадмия. *Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г.* 1

Магнитокоммутируемая микросхема и датчик измерения скорости ветра на ее основе. *Касимов Ф. Д., Ибрагимов Р. А., Свихнушин Н. М.* 2

Датчик угла поворота генераторного типа с элементом на поверхностных акустических волнах. *Лепих Я. И.* 3

Первичные преобразователи для микродатчиков ускорения и давления на алмазных материалах. *Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Могучев А. В., Митягина А. Б.* 4

Оптимизация конструкции мембранных датчиков. *Рубцевич И. И., Высоцкий В. Б., Ковальчук Н. С.*

5

Дифференциальный термометр с высокой разрешающей способностью. *Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Павлов С. В., Куленко С. С., Манус О. В.*

6

Радиоволновые датчики дымовых газов ТЭС. *Иванова Е. П., Радченко В. Ф., Ханамиров А. Е., Хрюнов А. В.*

6

Функциональная микро- и наноэлектроника

Инфракрасные отрезающие фильтры на основе монокристаллов CdSb, ZnSb для оптофототронных устройств. *Ащеулов А. А., Грицюк Б. Н., Стребежев В. Н.*

1

Применение гибких носителей при сборке кремниевых детекторов. *Перевертайло В. Л., Жора В. Д., Грунянская В. П., Пугач В. М., Тучинский И. А., Шкиренко Э. А.*

1

Измерение температуры с использованием оптических датчиков на основе двулучепреломляющих кристаллов. *Габа В. М.*

1

СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов. *Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В., Кизяк А. Ю., Николаенко Ю. Е.*

2

Анализ влияния способа соединения столбиковых выводов интегральных схем на их сопротивление. *Готра З. Ю., Дячок Д. Т.*

2

Квантовое ограничение закона Мура. *Джеймс Р. Пауэлл*

3

Арсенид-галлиевые p^+-n-p^+ -структуры с обедняемой базовой областью. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Абдулхаев О. А.*

3

Жидкокристаллические мониторы для авиационной техники. *Коваленко Л. Ф., Жураковский И. Ю., Стасьевский В. В., Севастьянов В. В.*

3

Модель линии передачи для наноэлектроники. *Нелин Е. А.*

4

Объемные оптические покрытия из халькогенидных стекол для полупроводниковых источников ИК-излучения. *Кабацкий В. Н.*

4

Разработка схемы и топологии элементов матрицы управляемых автоэмиссионных кремниевых микрокатодов. *Дружинин А. А., Голота В. И., Когут И. Т., Ховерко Ю. Н.*

5

Вольт-фарадные измерения в тонкопленочных эпитаксиальных структурах GaAs. *Горев Н. Б., Коджеспирова И. Ф., Привалов Е. Н.*

5

Фотоприемники ультрафиолетового излучения на основе тонких пленок ZnS. *Бобренко Ю. Н., Ярошенко Н. В., Шереметова Г. И., Семикина Т. В., Амдаев Б. С.*

5

Измерения ВАХ импульсных кремниевых ЛПД на участке лавинного пробоя. *Кудрик Я. Я.*

5

Многофункциональная гомопереходная арсенид-галлиевая $n-p-m$ -структура. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Абдулхаев О. А., Гиясова Ф. А., Назаров Ж. Т.*

6

Влияние термического окисления на анизотропию электропроводности и фотопроводимости наноструктурированного кремния. *Форш П. А., Форш Е. А., Мартышов М. Н., Тимошенко В. Ю., Кашкаров П. К.*

6

Повышение зонной избирательности электромагнитных кристаллов. *Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф., Нелин Е. А., Попсуй В. И.*

6

Обеспечение тепловых режимов

Система термоэлектрического кондиционирования воздуха на основе проницаемых термоэлементов. *Черкез Р. Г.*

2

Прогнозирование показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства в режиме ΔT_{\max} . *Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф., Казанжи Л. Д., Ключников Д. А.*

4

Прогнозирование показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства в режиме $Q_{0\max}$. *Зайков В. П., Киншова Л. А., Казанжи Л. Д., Храмова Л. Ф.*

5

Технологические процессы и оборудование

Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной электроники. *Митягин А. Ю., Алтухов А. А., Митягина А. Б.*

1

Электроосаждение конформных электродов для получения туннельного перехода с вакуумным нанозазором. *Джангидзе Л. Б., Тавхелидзе А. Н., Благодзе Ю. М., Талиашвили З. И.*

2

Бесконтактный метод определения эффективности термоэлектрических материалов. *Ащеулов А. А.*

2

Формирование МОП-транзисторов с изоляцией активных элементов окисленным пористым кремнием. *Новосядлый С. П., Вивчарук В. М.*

3

Прибор и методы измерения параметров и степени однородности пленочных структур. *Макара В. А., Одарич В. А., Кепич Т. Ю., Преображенская Т. Д., Руденко О. В.*

3

Корреляция параметров арсенид-галлиевых эпитаксиальных слоев и технологии их выращивания. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Якубов Э. Н.*

5

Исследование погрешности сопротивления тонкопленочного резистора. *Спирин В. Г.*

5

Формирование мезоструктур 4HSiC $p-i-n$ -диодов методом ионно-плазменного травления. *Болтовец Н. С., Борисенко А. Г., Иванов В. Н., Федорович А. О., Кривуца В. А., Полозов Б. П.*

5

Закономерности формирования пучка ионов низкой энергии при помощи односеточной ионно-

оптической системы. *Дудин С. В., Рафальский Д. В.*

Особенности плазмохимического травления торцов кремниевых пластин для фотоэлектрических преобразователей. *Федорович О. А., Кругленко М. П., Полозов Б. П.*

Материалы электроники

Высокоэффективные катодные элементы для газоразрядных источников света. *Севастьянов В. В., Шutowский В. В.*

Гетероструктуры, полученные методом отжига монокристаллов InSe в парах серы. *Ковалюк З. Д., Кушнир О. И., Сидор О. Н., Нетьяга В. В.*

Изменение свойств пленок кремнийорганических стекол после термической и плазмохимической обработки. *Иванчиков А. Э., Кисель А. М., Медведева А. Б., Плебанович В. И.*

Оценка параметров компонентов моноармированной стеклокерамики со стеклокристаллической матрицей. *Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.*

Прогнозирование параметров стеклокерамики со стеклокристаллической матрицей для разных соотношений компонентов и режимов спекания. *Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.*

Разработка сцинтилляторов на основе соединений A^IVB^VI для медицинского и технического радиационного приборостроения. *Старжинский Н. Г., Зеня И. М., Катрунов К. А., Рыжиков В. Д.*

Влияние облучения кремния низкоэнергетическими ионами аргона на образование в нем электрически активных дефектов. *Попов В. М., Шустов Ю. М., Клименко А. С., Поканевич А. П.*

Модификация барьерной структуры на основе $pAlGaInAs-nGaAs$ последовательно соединен-

ными потенциальными барьерами. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Гиясова Ф. А., Зоирова Л. Х., Абдуллаев О. А., Джураев Д. Р.*

Наноструктурированная композитная пленка для сенсоров влажности. *Коваленко К. Л., Шаран Н. Н., Севастьянов В. В.*

Способ определения доли кристаллов в стеклокерамическом диэлектрике. *Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.*

Адсорбционно-кинетическая модель осаждения пленок поликристаллического кремния, легированных фосфором в процессе роста. *Наливайко О. Ю., Турцевич А. С.*

Математические модели формирования химической связи твердых растворов $CdSb-ZnSb$. *Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Маник О. Н., Маник Т. О.*

Метрология. Стандартизация

Измеритель динамического диапазона радиочастотных усилителей. *Дрозд С. С., Мамедов К. Я., Ямпольский Ю. С.*

От аттестации к мотивации. *Рудковский В. Н., Пик В. Н.*

Метод считывания и обработки стационарных интерференционных картин. *Ильин В. Н., Дубешко А. В., Михеевич Д. А.*

Малогабаритные цифровые частотомеры сверхвысокочастотного диапазона. *Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьенко А. В.*

Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2008 г.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Чобану М. Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов.— М.: Техносфера, 2009.— 480 с.

Рассматриваются многомерные многоскоростные системы, которые используются для обработки ММ цифровых сигналов. Монография является первым систематическим изложением теории и методов неразделимой обработки ММ-сигналов на русском языке, в ней приводятся все необходимое для разработки ММ многоскоростных систем, начиная с фундаментальных результатов из теории цифровой обработки ММ-сигналов и заканчивая алгоритмами и программным/аппаратным обеспечением для ММ многоскоростных систем. Особенностью монографии является применение математических пакетов MATLAB, MAPLE, Singular и др., а также программ, написанных на языке С, на протяжении всего изложения. Приведены результаты реализации разработанных неразделимых операторов на основе процессоров общего назначения, сигнальных процессоров фирмы Texas Instruments и графических процессоров (GPU) фирмы nVidia.

