

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.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)
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. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
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. Томашик (г. Киев)
Д.т.н. В. М. Шокало (г. Харьков)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотьок (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 9 от 29.06 2010 г.)

Электронные средства: исследования, разработки

Моделирование электрических схем защиты с использованием силовых лавинных диодов. *Кравчина В. В., Нагорная Н. Н.* 3
Малогабаритный цифровой частотомер с высокой разрешающей способностью. *Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьенко А. В.* 11

Контактные соединения в электронных печатных узлах, выполненные методом прокола фольги. *Ефименко А. А.* 15

Тепловизор на основе матричного фотоприемного устройства из 128×128 CdHgTe-фотодиодов. *Рева В. П., Голенков А. Г., Забудский В. В., Коринец С. В., Цибрий З. Ф., Гуменюк-Сычевская Ж. В., Бунчук С. Г., Апатская М. В., Лысюк И. А., Смолий М. И.* 24

Метод преобразования обычной разводки печатных плат в полигональную. *Муров С. Ю.* 29

Логические методы расчета надежности. *Левин В. И.* 32

Микропроцессорные устройства и системы

Микропроцессоры звездообразной структуры с расширенными функциональными возможностями. *Синегуб Н. И., Ситников В. С.* 40

Функциональная микро- и наноэлектроника

Локальные свойства электрически активных дефектов в солнечных батареях на основе кремния. *Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П., Шустов Ю. М., Гаврилюк И. И., Панин А. И.* 43

Технологические процессы и оборудование

Оптимизация струйной технологии изготовления токопроводящих элементов печатных плат. *Лесюк Р. И., Бобицкий Я. В., Котлярчук Б. К., Иллек В.* 49

Материалы электроники

Диагностика глубоких центров на границе пленка-подложка в тонкопленочных эпитаксиальных структурах GaAs. *Горев Н. Б., Коджеспирова И. Ф., Привалов Е. Н.* 53

К истории науки и техники

Становление и развитие Института физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины (к пятидесятилетию создания). *Мачулин В. Ф.* 57

Аннотации к статьям номера 61

Новые книги 10, 42, 48, 56, 60

Выставки. Конференции 39, 2-ая, 4-ая стр. обл.

Рекомендации автору журнала "ТКЭА" 64

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Моделювання електричних схем захисту з використанням силових лавинних діодів. *Кравчина В. В., Нагорна Н. Н.* (3)

Малогабаритний цифровий частотомір з високою роздільною здатністю. *Криваль І. І., Скрипнюк А. І., Проценко В. А., Мар'єнко А. В.* (11)

Контактні з'єднання в електронних друкованих вузлах, виконаних методом проколу фольги. *Єфіменко А. А.* (15)

Тепловізор на основі матричного фотоприймального приладу з 128×128 CdHgTe-фотодіодів. *Рева В. П., Голєнков А. Р., Забудський В. В., Корінець С. В., Цибрій З. Ф., Гуменюк-Сичевська Ж. В., Бунчук С. Р., Апаська М. В., Лисюк І. А., Смолий М. І.* (24)

Метод перетворення звичайного розведення друкованих плат у полігональне. *Муров С. Ю.* (29)

Логічні методи розрахунку надійності. *Левін В. І.* (32)

Мікропроцесорні засоби та системи

Мікропроцесори зіркоподібної структури з розширеними функціональними можливостями. *Синегуб М. І., Ситніков В. С.* (40)

Функціональна мікро- і наноелектроніка

Локальні властивості електрично активних дефектів в сонячних батареях на основі кремнію. *Попов В. М., Кліменко А. С., Поканевич А. П., Шустов Ю. М., Гаврілюк І. І., Панін А. І.* (43)

Забезпечення теплових режимів

Оптимізація струменевої технології виготовлення струмопровідних елементів друкованих плат. *Лесюк Р. І., Бобицький Я. В., Котлярчук Б. К., Їллек В.* (49)

Матеріали електроніки

Діагностика глибоких центрів на межі "плівка — підкладка" у тонкоплівкових епітаксialних структурах GaAs. *Горєв Н. Б., Коджеспірова І. Ф., Привалів Е. Н.* (53)

До історії науки і техніки

Становлення і розвиток Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України (до п'ятдесятиріччя заснування). *Мачулін В. Ф.* (57)

CONTENT

Electronic means: investigations, development

Design of electronics charts of defence with the use of power avalanche diodes. *Kravchina V. V., Nagornaya N. N.* (3)

Small digital cymometer high-resolution *Krival' I. I., Skripnyuk A. I., Procenko V. A., Mar'enko A. V.* (11)

Contact connections in electronic printing knots, executed the method of puncture of foil. *Yefimenko A. A.* (15)

Thermal imager based on the array light sensor device of 128×128 CdHgTe-photodiodes. *Reva V. P., Golenkov A. R., Zabudskiy V. V., Korinec S. V., Cibriy Z. F., Gumenyuk-Sychevskaya Z. V., Bunchuk C. R., Apatskaya M. V., Lysyuk I. A., Smoliy M. I.* (24)

Method of transformation of printed circuit boards regular interconnection into polygonal. *Murov S. Yu.* (29)

Logical methods of calculation of reliability. *Levin V. I.* (32)

Microprocessor devices and systems

Starshaped structure microprocessors with the extended functional possibilities. *Sinegub N. I., Sitnicov V. S.* (40)

Functional micro- and nanoelectronics

Investigation of local electrophysical properties of electrically active defects in silicon-based solar cells. *Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P., Shustov Y. M., Gavriluk I. I., Panin A. I.* (43)

Technological processes and equipment

Optimization of ink-jet technology for PCB interconnects fabrication. *Lesyuk R. I., Bobitskiy Y. V., Kotlyarchuk B. K., Jillek W.* (49)

Materials of electronics

Diagnostics of deep centers on the border of film-substrate in thin-film all-epitaxial structures of GaAs. *Gorev N. B., Kodzhespirova I. F., Privalov E. N.* (53)

To a history of science and engineering

Establishment and development of the V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics (dedicated to fiftieth anniversary of creation). *Machulin V. F.* (57)

К. т. н. В. В. КРАВЧИНА, Н. Н. НАГОРНАЯ

Украина, Запорожская государственная инженерная академия,
Запорожский национальный технический университет
E-mail: Kravchina@list.ru

Дата поступления в редакцию
13.11 2009 г.

Оппонент д. т. н. А. Ф. КАДАЦКИЙ
(ОНАС, г. Одесса)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВЫХ ЛАВИННЫХ ДИОДОВ

Показана эффективность защиты от перенапряжений с помощью электрических схем с применением лавинных диодов, использующих для гашения импульсов перенапряжения лавинный разряд.

Промышленность Украины выпускает ряд лавинных диодов (в таблеточном исполнении, а также в штыревых корпусах с жесткими и гибкими выводами), рассчитанных на токи в прямом направлении I_{FAV} от 10 до 5000 А, с мощностью, выделяемой в лавине, от 2,5 до 16 кВт (способных пропускать достаточно большие обратные токи, составляющие 1...10% от допустимого прямого тока в течение до 100 мкс [1]) при повторяющихся импульсных обратных напряжениях U_{RRM} в диапазоне от 800 до 3800 В и выше. Также выпускаются быстровосстанавливающиеся лавинные диоды ДЧЛ233, ДЧЛ253, особенности конструкции которых рассматриваются в [2, 3].

Лавинные диоды широко используются в выпрямительных агрегатах для металлургической, химической промышленности, железнодорожного транспорта и в других электротехнических изделиях, в которых наблюдается или может возникнуть напряжение выше допустимого. Преимущество лавинных диодов перед силовыми выпрямительными диодами состоит в том, что они, имея меньшую мощность, не разрушаются при значительных превышениях напряжения, а после снятия перенапряжения восстанавливают свои параметры. Использование таких диодов позволяет увеличить надежность электрических схем, так как защитные возможности лавинного пробоя преобладают по мощности по сравнению с обычным силовым диодом.

Исследование и моделирование работы электрических схем защиты силовых приборов с применением лавинных диодов важны и необходимы для разработчиков как агрегатного оборудования, так и силовых полупроводниковых приборов. Поэтому целью настоящей работы являлось проведение моделирования силовых схем с защитными лавинными диодами, а также исследование особенностей ВАХ и коммутационных характеристик лавинных диодов. Задача состояла в исследовании электрических схем защиты ключей с применением лавинных диодов, в создании и исследовании моделей лавинных диодов и проведении моделирования работы схем защиты с помощью системы MATLAB.

При увеличении обратного напряжения, приложенного к p^+-n -переходу лавинного диода, напряженность электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ) увеличивается, достигая значений, при которых наблюдается заметная ударная ионизация [4—6]. При этом электроны и дырки образуют вторичные электронно-дырочные пары, которые умножаются в ОПЗ. Количественной характеристикой этого процесса является коэффициент умножения носителей. В электрических полях, напряженность которых превышает 10^5 — 10^6 В/см, носители заряда приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кристалла и рождения новых электронно-дырочных пар, вследствие чего наступает лавинный пробой. В лавинных диодах на первоначальной стадии лавинного пробоя образуются области малых размеров с локальными пробоями (микроплазменные пробой) и меньшим напряжением пробоя по сравнению с однородными областями p - n -перехода.

При появлении микроплазменного пробоя вольт-амперная характеристика (ВАХ) выпрямительного элемента описывается следующей зависимостью [3]:

$$U(I) = U_{\text{проб}}(I_0)(1 + \beta_T \Delta T) + \int_{I_0}^I \frac{dU}{dI} dI, \quad (1)$$

где $U_{\text{проб}}$ — напряжение «загиба» на кривой ВАХ (напряжение, при котором появляются первые микроплазменные пробой);
 I_0 — ток, соответствующий напряжению $U_{\text{проб}}$;
 ΔT — перегрев p - n -перехода за счет протекания обратного тока I , $\Delta T = T_2 - T_1$;
 β_T — температурный коэффициент пробивного напряжения.

Величина $dU/dI = R_{dR}$ представляет собой дифференциальное (динамическое) сопротивление p - n -структуры в области лавинного пробоя и определяется сопротивлением и количеством областей микроплазменного пробоя. Зависимость динамического сопротивления лавинных диодов от обратного тока описывается формулой $IR_{dR} = A$. Величина A характеризует степень однородности лавинного пробоя и для p - n -переходов с $U_{\text{проб}} = 400$ — 1000 В составляет 4—10 В. Величина R_{dR} при больших обратных токах стремится к некоторому насыщению.

Изотермическая ВАХ p - n -перехода в области микроплазменного пробоя описывается зависимостью

$$I = I_0 e^{\frac{U(I) - U_{\text{проб}}(I_0)}{A}}. \quad (2)$$

При дальнейшем увеличении обратного напряжения объем областей с микроплазменными образованиями значительно увеличивается, и ВАХ лавинного диода становится линейной [4—6]:

$$I(U_n) = \frac{U_n - U_m}{R_d}, \quad (3)$$

где U_n — напряжение включенного состояния лавины;
 U_m — экстраполированное напряжение микроплазменного пробоя.

Дифференциальное сопротивление R_d определяется наклоном ВАХ на линейном участке, U_m определяется продлением линейного участка ВАХ до пересечения с уровнем обратного тока p - n -перехода, протекающего вне области образования микроплазменных каналов.

Проведение эксперимента

В работе проводилось исследование различных серийных диодных структур производства ООО «Элемент-Преобразователь» (Украина, г. Запорожье), которые формировались на пластинах кремния n -типа с удельным сопротивлением 40—60 Ом·см. С одной стороны пластин Si формировался p^+ - p -слой области анода за счет диффузии бора с алюминием на глубину 60—110 мкм, а с другой стороны пластин формировался n^+ -слой Si катодной области за счет диффузии фосфора на глубину 40—70 мкм. Одновременная диффузия акцепторной и донорной примесей происходила при температуре 1250°C в присутствии легированных оксидных пленок. Омические контакты анода и катода получали путем формирования пленок алюминия.

Проводился контроль основных параметров сформированных диодных структур:

- времени жизни неосновных носителей заряда τ_p ;
- времени обратного восстановления $t_{rr} = t_s + t_f$ где t_s — время запаздывания обратного напряжения, t_f — время спада обратного тока;
- тока I_{rr} и заряда $Q_{rr} = Q_s + Q_f$ обратного восстановления, где Q_s — заряд запаздывания, Q_f — остаточный заряд;
- амплитудного значения обратного тока I_{RRM} ;
- установившегося импульсного прямого напряжения U_{FRM} ;
- импульсного переходного прямого напряжения U_{FR} ;
- времени релаксации импульса t_{FR} (рис. 1).

Кроме перечисленных параметров контролировались также коммутационные характеристики диодных структур, такие как время и величина изменения тока и напряжения при включении прямого U_{FM} или обратного U_R напряжения.

В таблице приведены полученные экспериментально численные значения коммутационных параметров исследуемых лавинных диодов типа ДЧЛ271, имеющих разную ширину базы W_n и время жизни τ_p неравновесных носителей заряда в базе.

Приведенные значения тока I_{rr} , времени t_{rr} и заряда Q_{rr} получены при скорости изменения анодного тока $dI/dt = 100$ А/мкс.

На рис. 2 для тех же образцов лавинных диодов приведены импульсы прямого переходного напряжения при пропускании прямого тока $I_{FAV} = 160$ А и скорости $dI/dt = 200$ А/мкс и временные зависимости переходного тока в процессе обратного восстановления образцов силового диода. На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что амплитудное значение обратного тока I_{RRM} и время обратного восстановления t_{rr} зависят от ширины базы W_n и времени жизни τ_p неравновесных носителей заряда в базе.

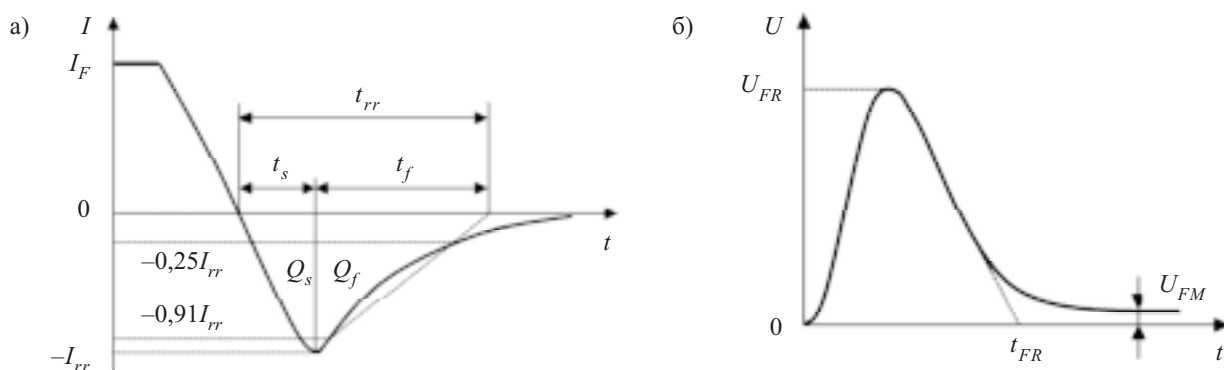


Рис. 1. Изменение тока диода во времени при смене смещения на нем с прямого на обратное (а) и импульс прямого переходного напряжения диода (б)

Коммутационные параметры пяти лавинных диодов

№ образца	W_n , мкм	τ_p , мкс	U_{RRM} , В	I_{FAV} , А	U_{FR} , В	U_{FM} , В	t_{FR} , мкс	I_{rr} , А	Q_{rr} , мкКл	t_{rr} , мкс
1	170	9,0	1800	500	46	1,43	2,4	99	225	4,0
2	170	4,2	1800	500	42	1,48	2,1	66	98	2,5
3	170	3,9	1800	500	36	1,49	1,9	61	80	2,2
4	145	3,4	1400	500	26	1,40	1,7	53	51	1,5
5	170	30	1800	500	58	1,15	2,8	240	1020	12

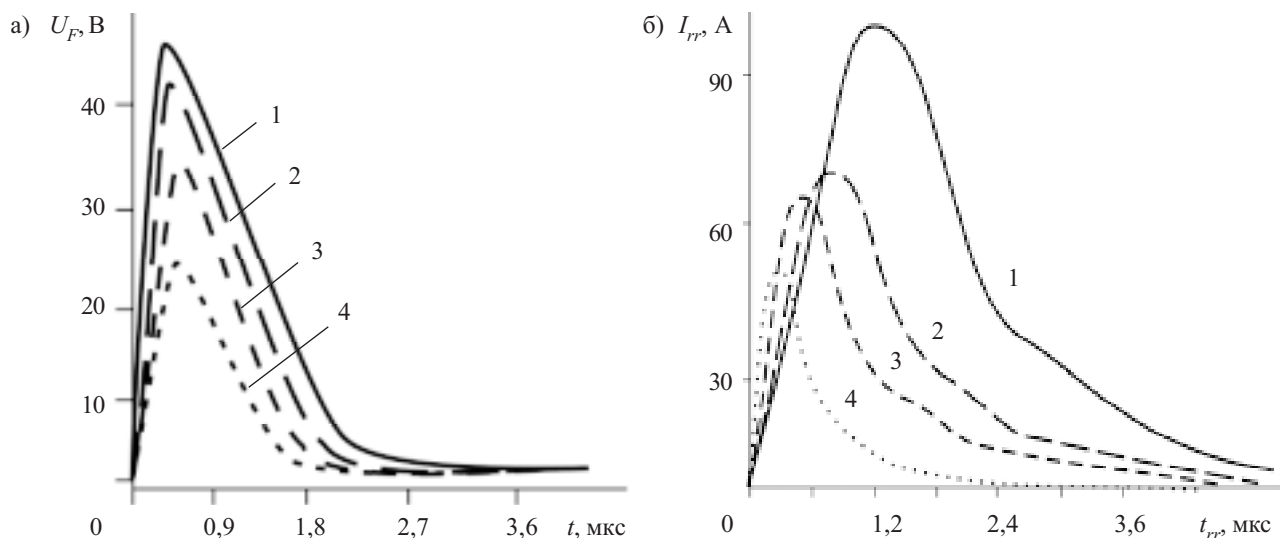


Рис. 2. Импульсы прямого переходного напряжения при установлении прямого тока $I_{F(AV)}=160$ А (а) и временные зависимости переходного тока в процессе обратного восстановления силовых диодов ДЧЛ271 (б) (Нумерация диодов соответствует нумерации образцов таблицы)

литуда импульсов, соответствующая импульсному переходному прямому напряжению U_{FR} , и время релаксации импульсов t_{FR} (время включения t_{Fon} в прямом направлении), значения тока I_{rr} и времени t_{rr} обратного восстановления зависят от ширины базы, а также от времени жизни неравновесных носителей заряда τ_p и величины накапливаемого в базе заряда при высоком уровне инжекции.

Учитывая данные таблицы, накапливаемый в базе нестационарный заряд дырок можно определить по формуле

$$Q = I_{F(AV)} \tau_p k(W_n),$$

где τ_p — время жизни неравновесных носителей заряда (дырок) в области базы;

$k(W_n)$ — коэффициент, зависящий от ширины базы W_n и диффузионной длины дырок L_p в области базы.

Сопротивление базы в начальный момент включения в сотни раз больше, чем при установившемся режиме с высоким уровнем инжекции при напряжении U_{FM} и токе $I_{F(AV)}$. Динамическое сопротивление R_{dF} на прямом участке ВАХ составляет 0,3—0,7 Ом. Для обратного напряжения, соответствующего началу образования микроплазменных пробоев, динамическое сопротивление R_{dR} составляет величину порядка десятков ом.

С учетом формулы (3), напряжение в ВАХ в зависимости от величины прямого и обратного тока (тока лавины) определяется по формуле

$$U_{F(n)} = U_{T0(m)} + R_{dF(R)} I_{F(R)}.$$

Сопротивление R_{dF} определяется как

$$R_{dF} = \frac{U_{FM} - U_{T0}}{4,71 I_{F(AV)}},$$

где U_{T0} — пороговое напряжение диода;

U_{FM} — прямое напряжение диода при заданном импульсном токе $4,71 I_{F(AV)}$;

$I_{F(AV)}$ — максимально допустимый средний прямой ток диода.

При построении электрических схем защиты от пиковых перенапряжений целесообразно использовать серийные высокочастотные лавинные диоды, имеющие соответствующее обратное напряжение пробоя, т. е. для которых пиковые перенапряжения соответствуют области напряжений лавинного пробоя U_{BR} . В случае использования диодов для электрических схем сварочных аппаратов следует применять диоды с уменьшенной шириной базы (подобно образцу 4), т. к. для подобных применений желательно иметь как можно меньшее значение параметра U_{FR} .

Известны схемы защиты с помощью сапсессоров типа Transil, для которых максимальные значения напряжения достигают величины 700 В. В настоящей работе моделируются схемы с напряжениями до 4000 В и выше при значительных обратных токах.

Защитная RCD-цепь в силовых схемах

Снаббер (демпфирующая цепь), показанный на рис. 3, позволяет, во-первых, ограничить скорость нарастания напряжения на силовом приборе (в схеме

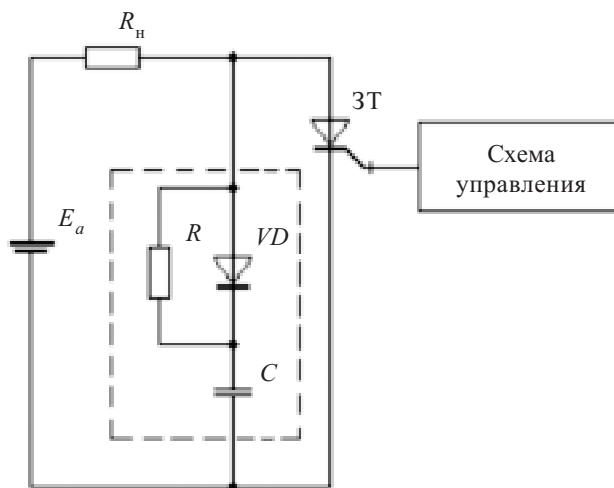


Рис. 3. Запираемый тиристор со снаббером

это — запираемый тиристор) в процессе спада его анодного тока при выключении, а во-вторых, ускорить процесс спада анодного тока, что важно при наличии индуктивной нагрузки в схеме. В результате, процессы спада тока и нарастания напряжения разнесены во времени, что приводит к уменьшению выделяемой динамической мощности силового прибора.

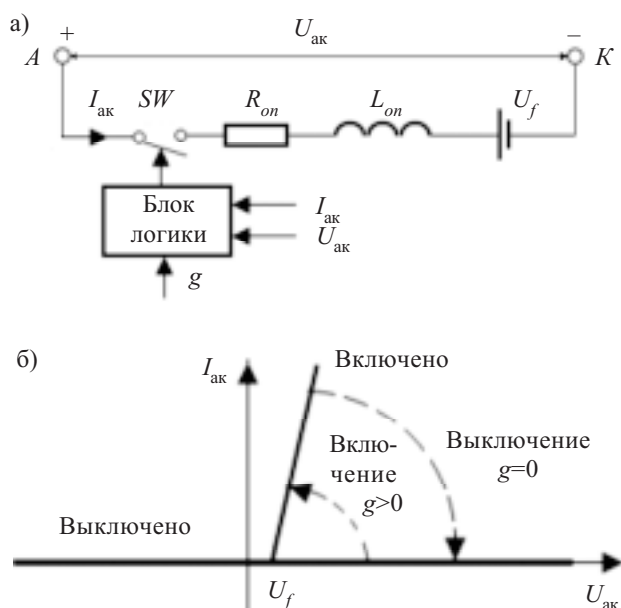
Кроме того, использование снаббера приводит к ослаблению всплеска напряжения, возникающего в силовой цепи из-за резкого прерывания большого тока. Перенапряжение на силовом ключе в виде всплесков большой амплитуды, зависящей от значения индуктивности в цепи, может привести даже к разрушению структуры прибора.

При включении силового прибора ограничение скорости нарастания анодного тока прибора осуществляет дроссель, функции которого могут выполнять паразитные индуктивности монтажа, если допустимая скорость нарастания анодного тока прибора достаточно высока (несколько сотен ампер в микросекунду, как в запираемых тиристорах). Скорость уменьшения прямого напряжения определяется снабберной цепью.

Время восстановления запирающих свойств диода VD в обратном направлении должно быть как можно меньшим с целью исключения возможности разряда конденсатора C через этот диод при включении защищаемого прибора. Кроме того, для предотвращения возникновения низковольтной динамической лавины в диоде VD он должен иметь малый ток обратного восстановления и мягкую способность восстановления.

Подготовка к моделированию силовых устройств с лавинным диодом

Моделирование работы электронных силовых устройств проводилось в системе MATLAB+Simulink с применением пакета SimPowerSystems, содержащего в своих библиотеках блоки моделей электротехнических устройств.



Такой подход позволил проводить динамический анализ электронных систем, представленных на уровне структурных и функциональных блоков с минимальным набором исходных параметров. Применяемое имитационное моделирование существенно упрощает задачу разработчиков силовых устройств на первоначальных этапах проектирования.

Перед проведением анализа необходимо выполнить компоновку электронной системы (схемы). Компоновка предусматривает выбор блоков из библиотек используемых пакетов, их размещение в окне модели и соединение между собой, в результате чего формируется mdl-файл.

При исследованиях компоновка моделей электронных устройств проводилась с учетом того, что модельные блоки из пакетов Simulink (S-блоки) и SimPowerSystems (SPS-блоки) функционируют принципиально различными способами. В S-блоках передача сигналов однонаправленная — от входов к выходам, а в SPS-блоках, моделирующих прохождение энергетических потоков, передача информации двунаправленная, причем направление передачи зависит от направления тока. В связи с этим S-блоки и SPS-блоки невозможно соединять непосредственно. Для соединения любого SPS-блока с S-блоком в моделях устройств используются промежуточные блоки — измерители тока и напряжения. Сигнал же от S-блока к SPS-блоку передается через управляемые источники тока и напряжения.

После компоновки проводилось описание моделируемых систем. В рассматриваемых моделях электронных устройств использовался набор необходимых блоков как без задаваемых параметров, так и с задаваемыми параметрами.

Из библиотеки пакета SimPowerSystems были выбраны следующие блоки [7]:

— Connector-блоки (соединительные блоки) типа T-Connector и L-Connector, не имеющие заданных входных параметров;

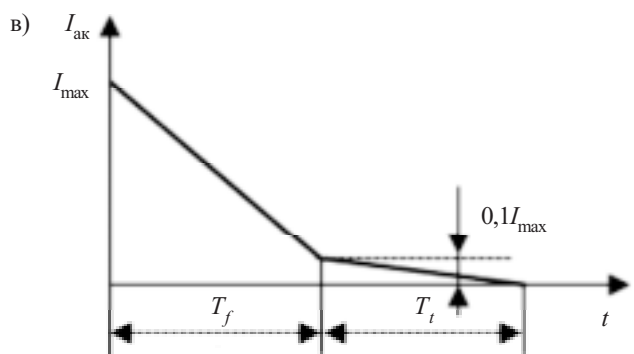


Рис. 4. Модель запираемого тиристора, построенная в программе SimPowerSystems:
а — эквивалентная схема; б — статические ВАХ; в — переходная характеристика в режиме выключения

— Measurement-блоки (измерительные блоки) типа измеритель тока (Current Measurement) и измеритель напряжения (Voltage Measurement), формирующие мгновенные значения тока и напряжения в формате выходных Simulink-сигналов;

— DC Voltage Source (источник постоянного напряжения), входным параметром которого является амплитуда сигнала (Amplitude);

— Controlled Voltage Source (управляемый идеальный источник напряжения), вырабатывающий напряжение по Simulink-сигналу управления. При инициализации задаются начальные амплитуда, фаза и частота сигнала, а также тип источника переменного (AC) или постоянного (DC) напряжения;

— Series RLC Branch (последовательная RLC-цепь). Определенным сочетанием значений параметров блока задается одна из конфигураций цепи — RLC, R, L, C, RL, RC, LC или Open circuit (разрыв). Для удаления из цепи резистора или для исключения индуктивности их величина задается равной нулю. Для исключения из цепи емкости ее значение приравнивается к бесконечности (inf). Исключенный элемент на пиктограмме не изображается.

Модель запираемого тиристора (GTO) (рис. 4, а) состоит из последовательно включенных резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного на-

пряжения U_f , ключа SW . Сигнал управления g подается через управляющий электрод на блок логики. При $g>0$ и $U_{ак}-U_f>0$ прибор находится во включенном состоянии, через него протекает ток $I_{ак}$ (рис. 4, б). Для выключения тиристора необходимо, чтобы сигнал g стал нулевым ($g=0$).

Процессы переключения (рис. 4, в) моделируются с помощью следующих параметров: T_f — время спада анодного тока до уровня 0,1 от значения тока на момент выключения; T_t — время затягивания, в течение которого ток анода уменьшается от уровня 0,1 до нуля.

В модели запираемого тиристора предусмотрена демпфирующая RC-цепь с параметрами R_s , C_s . При необходимости она удаляется, если задать $R_s=inf$, $C_s=inf$.

В случае отсутствия управляющего электрода модель представляет собой модель силового диода.

Моделирование работы силовых схем с защитными цепями

Перед началом моделирования задавались параметры моделирования в меню Simulation/ Simulation Parameters/ Solvers.

При анализе переходных процессов электронных схем решаются системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), которые являются мо-

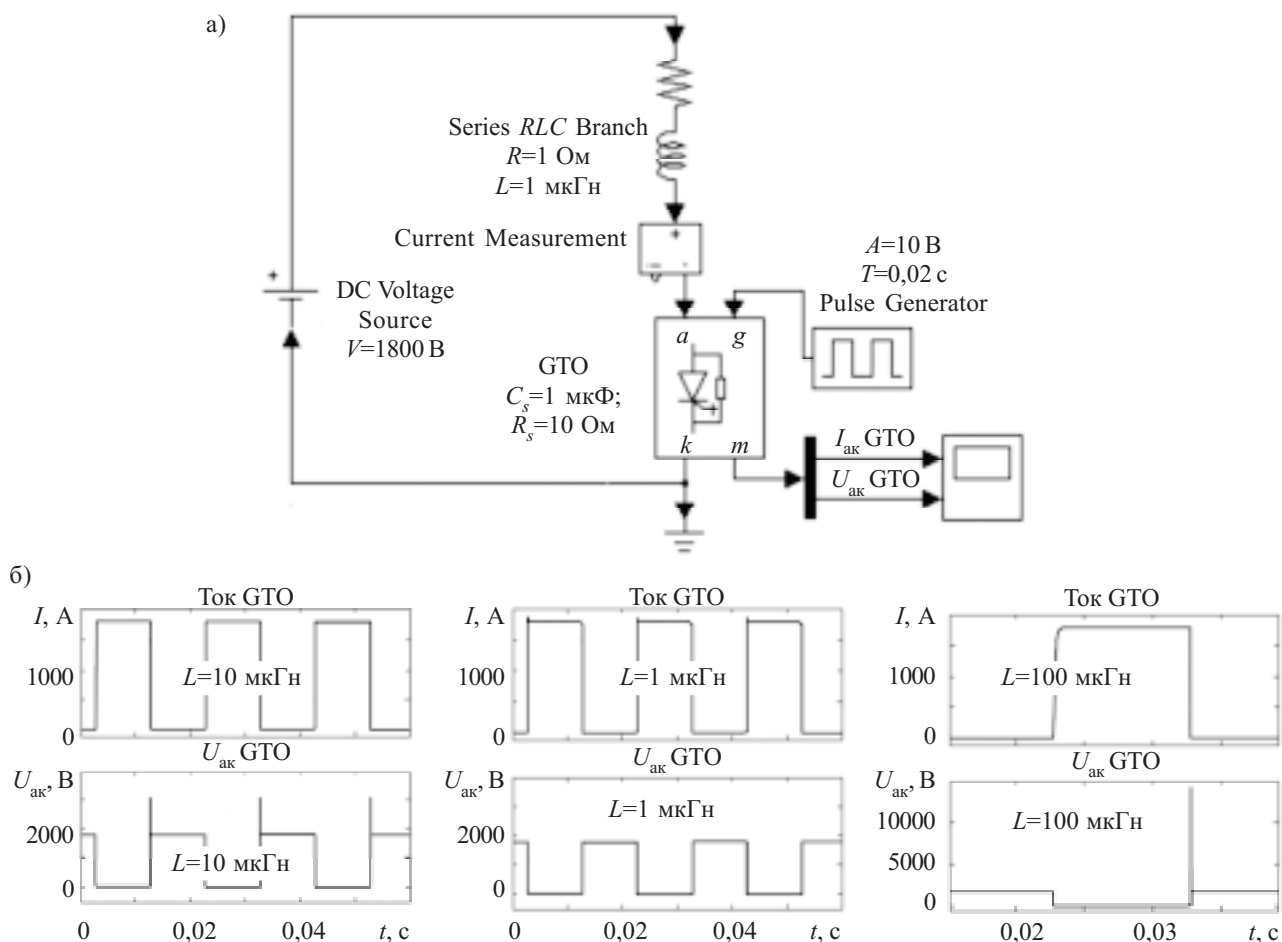


Рис. 5. Схема преобразователя напряжения без защитных цепей (а) и временные диаграммы тока запираемого тиристора и падения напряжения на нем (б)

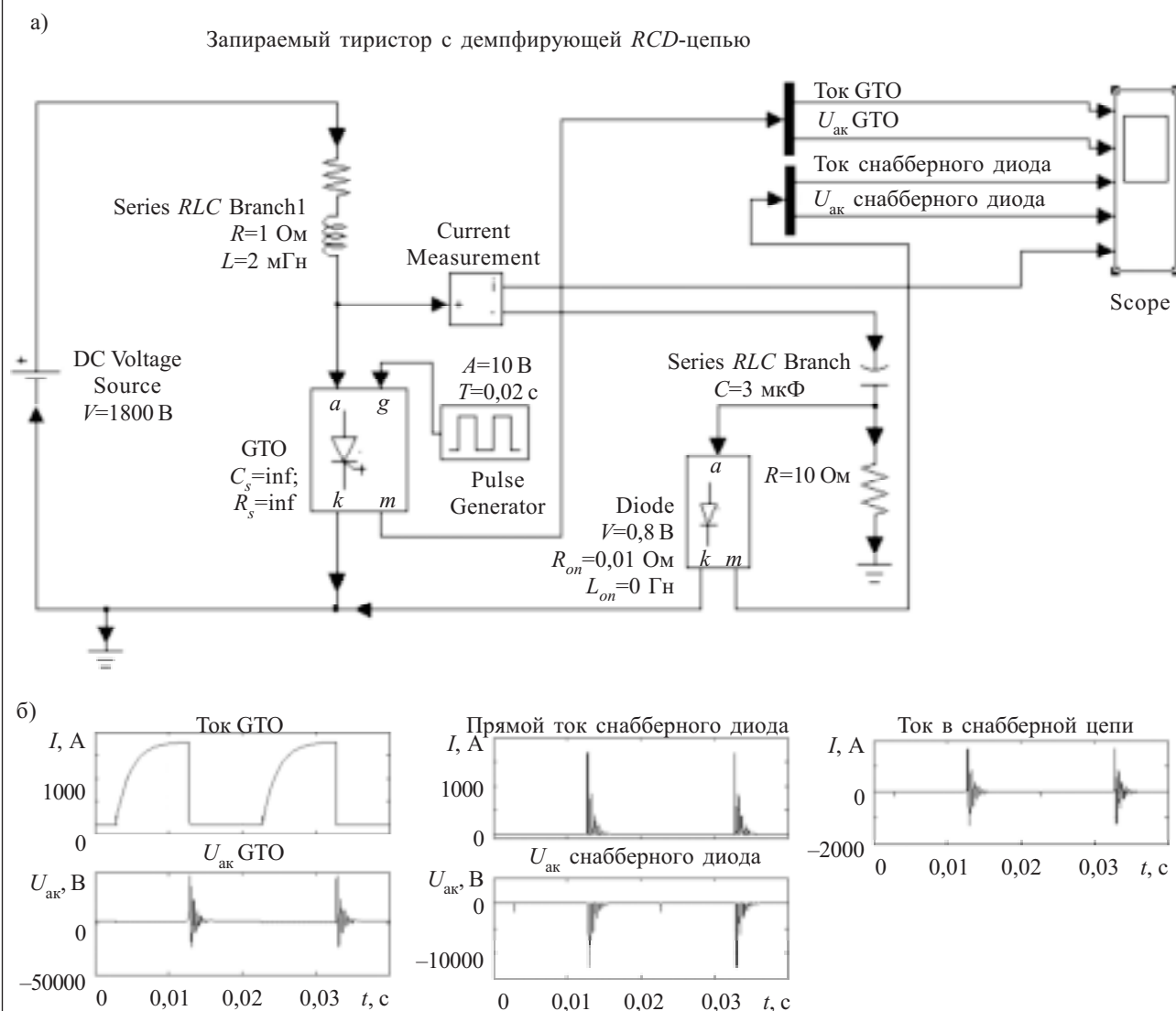


Рис. 6. Схема преобразователя напряжения с защитной RCD-цепочкой (а) и ее временные диаграммы (б)

делями анализируемых схем. Различные методы решения систем ОДУ в системе MATLAB реализуются с помощью встроенных функций (солверов).

В работе при анализе всех схем шаг интегрирования выбирался переменным с помощью параметра Solver options, задавалось конечное время моделирования, выбиралась функция солвера ode23tb, в основе работы которой лежит неявный метод Рунге-Кутты с первым шагом по методу трапеций и вторым шагом по методу «дифференцирования назад» 2-го порядка. Все остальные параметры устанавливались по умолчанию.

Моделирование работы силовых схем с защитными цепями на основе лавинных диодов рассматривалось на примере импульсного преобразователя с запираемым тиристором.

Поскольку статическая ВАХ модели диода, используемая в пакете SimPowerSystems, является линеаризованной (представленной совокупностью двух асимптот), а обратный ток диода в модели является нулевым, для отображения процессов в об-

ласти микроплазменного пробоя предлагается использовать параллельное соединение двух встречно-включенных диодов, один из которых моделирует прямую ветвь ВАХ лавинного диода, а другой — обратную.

В модели одного из диодов параметр V_f — это падение напряжения на прямосмещенном диоде во включенном состоянии при нулевом анодном токе. В модели же встречного диода V_f — это напряжение лавинного пробоя U_{BR} обратносмещенного диода, а параметр R_{on} соответствует дифференциальному сопротивлению диода в режиме микроплазменного пробоя.

Для исследования влияния защитных цепей на работу силовых приборов вначале рассматривалась схема импульсного преобразователя со встроенной в модель тиристора последовательной защитной RC-цепью при варьировании значения индуктивности в нагрузке. Активное сопротивление нагрузки не изменялось и принималось равным 1 Ом.

В схеме на рис. 5, а и во всех далее приведенных схемах для возможности сопоставления результатов

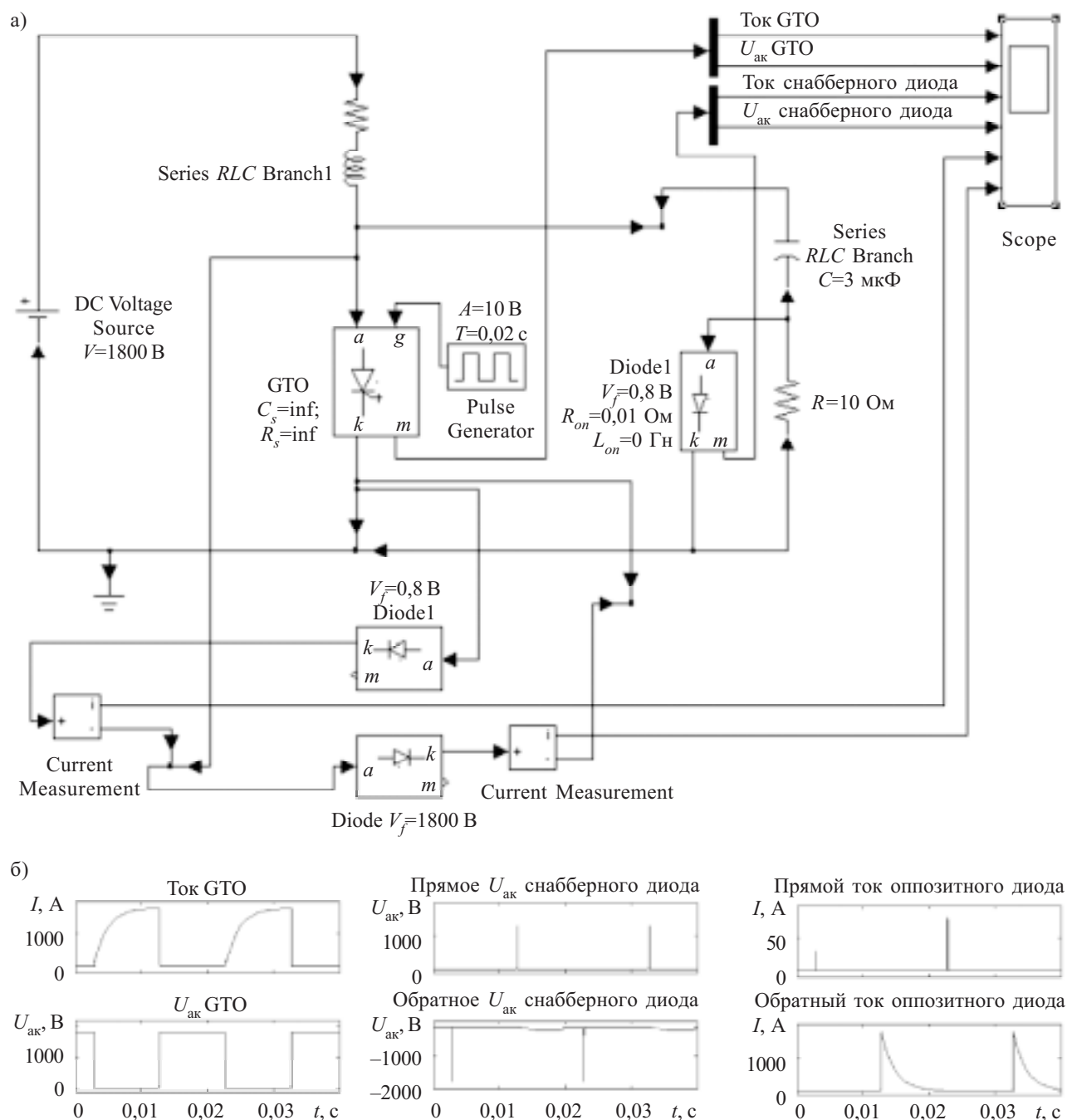


Рис. 7. Импульсный преобразователь напряжения с оппозитным диодом

их анализа использовалась модель запираемого тиристора с одинаковыми параметрами: $R_{on}=0,1$ Ом, $L_{on}=1$ мкГн, $U_f=0,8$ В, $T_f=10$ мкс, $T_i=20$ мкс.

Результаты моделирования (рис. 5, б) наглядно демонстрируют, что при повышении значения индуктивности амплитуда кратковременных всплесков на силовом приборе, которые могут вывести его из строя, увеличивается (амплитуды всплесков напряжения на тиристоре по отношению к установившемуся значению $U_{ак}=1800$ В равны 0; 100; 1250 В при $L=10^{-6}$; 10^{-5} ; 10^{-4} Гн, соответственно). Следовательно, в схеме должны присутствовать защитные цепи.

Известно, что RCD -цепочка снижает скорость нарастания прямого напряжения при выключении тиристора и исключает возможный пробой при восстановлении прямой запирающей способности тиристора. Причем ее роль увеличивается при увеличении прямого рабочего напряжения тиристора, т. к. увеличивается мощность, выделяющаяся при выключении тиристора. Схема преобразователя напряжения с RCD -цепочкой и результаты моделирования показаны на рис. 6. Напряжение источника постоянного напряжения составляет 1800 В, сопротивление нагрузочного резистора $R=1$ Ом, значение индуктивности $L=2$ мГн. Анализ представленных временных диаграмм позво-

ляет сделать вывод о неэффективности *RCD*-цепочки при наличии в схеме достаточно большой индуктивности, вызывающей колебательный процесс перезарядки снабберной емкости (при выключении тиристора на нем возникают затухающие колебания с максимальным размахом 7000 В в течение 4 мс, при этом прямой ток снабберного диода также колеблется с максимальной амплитудой 1700 А в течение того же времени, а максимальное напряжение на нем достигает 12500 В).

Электрические перенапряжения, образующиеся в результате колебательных процессов при коммутации силовых приборов, можно устранить несколькими способами. Один способ предусматривает параллельное подключение обратного диода к индуктивной нагрузке. При втором способе оппозитный (антипараллельный) лавинный диод устанавливается параллельно силовому прибору.

Схема с оппозитным лавинным диодом и результаты ее моделирования показаны на **рис. 7**. Сопротивление и индуктивность нагрузки — такие же, как на схеме на **рис. 6**. Временная диаграмма $U_{ак}(t)$ в этом случае указывает на отсутствие всплесков напряжения.

Максимальное прямое падение напряжения на снабберном диоде составляет 1300 В при длительности импульса 25 мкс; максимальное обратное напряжение на нем равно минус 1800 В при длительности импульса приблизительно 10 мкс. При расчете практических схем полученные значения параметров моделирования могут существенно изменяться.

Таким образом, в работе приведены измеренные параметры диодов, используемые при моделирова-

нии электрических схем защиты, рассчитанных на напряжения до 4000 В и выше. Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что обратные напряжения как на снабберном, так и на оппозитном диоде могут иметь достаточно высокие амплитудные значения. Показана эффективность защиты от перенапряжений, возникающих при коммутации в течение переходных процессов, с помощью электрических схем с применением лавинных диодов, которые гасят импульсы перенапряжения путем инициирования лавинного разряда.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы. — М.: Энергоиздат, 1981.
2. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Гомольский Д. М. Формирование силовых лавинных диодов // Складні системи і процеси. — КПУ. — 2009. — № 1. — С. 27—34.
3. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Гомольский Д. М., Солодовник А. И. Особенности формирования быстросовосстанавливающихся диодов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 3. — С. 36—40.
4. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой *p-n*-перехода в полупроводниках. — Л.: Энергия, 1980.
5. Намаюнас А. М., Пожела Ю. К., Томашавичюс А. В. О вольт-амперной характеристике кремниевого *p-n*-перехода в области микроплазменного пробоя // ФТП. — 1987. — Т. 27, вып. 4. — С. 760—761.
6. Сережкин Ю. Н., Шестеркина А. А. Умножение носителей разряда в кремниевых *p-n*-переходах // ФТП. — 2003. — Т. 37, вып. 9. — С. 1109—1113.
7. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.

НОВЫЕ КНИГИ

Букреев И. Н., Горячев В. И., Мансуров Б. М. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. — М.: Техносфера, 2009. — 712 с.

В учебном пособии рассматриваются основные понятия схемотехнического проектирования радиоэлектронных устройств и математические основы их моделирования с использованием средств автоматизации.

Излагаются основы практического применения программ системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0 (OrCAD) для построения и моделирования принципиальных схем пассивных РЭУ в режиме анализа временных и частотных характеристик, а также для моделирования активных аналоговых и цифровых устройств. К книге прилагается компакт-диск с демо-версией системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0, моделями фильтров, резистивного и резонансного усилителей, делителя частоты, преобразователя кода, а также с необходимыми для их исследований источниками цифровых и аналоговых сигналов.

Предназначена для студентов, занимающихся изучением и проектированием РЭУ, а также может быть полезна аспирантам, преподавателям и научным работникам, применяющим средства автоматизированного проектирования РЭУ.



И. И. КРИВАЛЬ, А. И. СКРИПНЮК, В. А. ПРОЦЕНКО,
А. В. МАРЬЕНКО

Украина, г. Киев, ОАО «Меридиан» им. С. П. Королёва
E-mail: Feedback@meridian.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
31.03 2010 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО
(НПП «Сатурн», г. Киев)

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЦИФРОВОЙ ЧАСТОТОМЕР С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Рассмотрены методы измерения частоты и времени, принцип действия, области применения, краткие технические и метрологические характеристики частотомера УА ЧЗ-64/2.

Развитие ряда направлений науки и техники определяется точностью измерения временных и частотных параметров. Среди эталонов основных физических величин самыми точными являются эталоны времени и его производной — частоты. Поэтому и измерения частоты и ее обратной величины — периода являются самыми точными.

Область применения частотно-измерительной аппаратуры непрерывно расширяется. Поэтому в последнее время в таких областях науки и техники как связь, радиолокация, радионавигация, метрология и др. большим спросом пользуются частотомеры, которые измеряют не только частоту синусоидальных сигналов и несущую частоту радиоимпульсных сигналов, но и временные интервалы прохождения этих сигналов с высокой разрешающей способностью.

Еще в 80-е годы 20 века в Украине был разработан и серийно выпускался на заводе «Радиоприбор» им. С. П. Королёва вычислительный частотомер ЧЗ-64/1, который частично решал эти задачи. В настоящее время этот прибор морально устарел и снят с производства.

В ОАО «Меридиан» им. С. П. Королёва, право-наследнике завода «Радиоприбор», которое является ведущим предприятием в области различной частотно-измерительной аппаратуры не только в Украине, но и на всем постсоветском пространстве, выполнена разработка малогабаритного цифрового частотомера с высокой разрешающей способностью УА ЧЗ-64/2. В настоящее время на предприятии ведется подготовка производства к его серийному выпуску.

Так как частотомер УА ЧЗ-64/2, кроме частотных параметров сигналов, измеряет интервалы времени с высокой разрешающей способностью, а также имеет интерфейсы канала общего пользования (КОП) и RS-232, его можно отнести к категории высокоточных измерительных приборов, которые могут работать как в автономном режиме, так и в составе сложных метрологических комплексов. Частотомер относится к разряду образцовых средств измерения [1], т. е. к тем, что переносят точность рабочих эталонов

на результат измерений, тем самым обеспечивая единство измерений на основе Закона «О метрологии и метрологической деятельности» в самых разных областях — от нанотехнологий до технологий навигации, телефонной связи и радиосвязи.

Методы измерения частоты и времени

Из всех существующих методов измерения частоты и времени прохождения сигнала оптимальным является метод дискретного счета, который заключается в подсчете электронным счетчиком числа импульсов, являющегося функцией измеряемой величины за образцовый интервал времени.

В свою очередь, частотомеры, построенные по дискретному методу, разделяются на частотомеры «прямого счета» и частотомеры «обратного счета».

Принцип прямого счета характеризуется подсчетом числа периодов M измеряемой частоты за известный образцовый интервал времени t_0 . Результат измерения M определяется как

$$M = t_0 / t_x = t_0 f_x,$$

где t_x — период измеряемой частоты;
 f_x — измеряемая частота.

Относительная погрешность измерения из-за дискретности счета $\delta_{\text{дс}}$ на низких частотах может достигать значительных величин. Она определяется выражением [2]

$$\delta_{\text{дс}} = \pm 1/M = \pm 1/(t_0 f_x). \quad (1)$$

Значительно меньшей погрешностью из-за дискретности счета обладают частотомеры обратного счета, суть работы которых заключается в измерении периода t_x или суммы периодов исследуемого сигнала с последующим вычислением значения частоты f_x как $f_x = 1/t_x$. Измерение периода t_x происходит путем заполнения его импульсами известной образцовой частоты f_0 . В этих частотомерах относительная погрешность из-за дискретности счета определяется выражением [2]

$$\delta_{\text{дс}} = \pm 1/(k t_x f_0) \quad (2)$$

где k — целое число периодов t_x .

Из выражения (2) следует, что в данном случае погрешность из-за дискретности счета обратно пропорциональна эталонной частоте f_0 . С целью уменьшения погрешности эталонную частоту f_0 выбирают максимально большой с учетом элементной базы, позволяющей реализовать схемные решения.

Принцип действия измерителя частоты и времени

Для построения частотомера, измеряющего временные интервалы с высокой разрешающей способностью, оптимальным является принцип обратного счета. Он наиболее органично позволяет использовать метод интерполяции временных интервалов, что в свою очередь позволяет значительно уменьшить составляющую погрешности, связанную с квантованием сигнала.

Рассмотрим это более подробно.

Допустим, необходимо измерить некий интервал времени $\tau_{\text{изм}}$ (рис. 1), который состоит из определенных отрезков:

$$\tau_{\text{изм}} = \tau_0 + \tau_1 - \tau_2, \quad (3)$$

где τ_0 — интервал времени между вторым после начала измеряемого интервала $\tau_{\text{изм}}$ и вторым после конца измеряемого интервала тактовыми импульсами опорной частоты 100 МГц;

τ_1 — интервал времени между началом измеряемого интервала и вторым тактовым импульсом, который следует за ним;

τ_2 — интервал времени между концом измеряемого интервала $\tau_{\text{изм}}$ и вторым, следующим за ним тактовым импульсом частоты 100 МГц.

Из рис. 1 видно, что измеряемый интервал $\tau_{\text{изм}}$ равен целому числу периодов N частоты 100 МГц плюс ΔT_1 и ΔT_2 . Если измерить точно величину временных интервалов ΔT_1 и ΔT_2 , то в результате будет значительно увеличена точность измерения за счет уменьшения погрешности квантования.

Для облегчения аппаратной обработки к временным интервалам ΔT_1 и ΔT_2 добавляется по периоду опорной частоты T , и в дальнейшем, при формировании измеряемого интервала, учитывают τ_1 и τ_2 , т. е.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \Delta T_1 + T, \\ \tau_2 &= \Delta T_2 + T. \end{aligned} \quad (4)$$

В частотомере интервалы τ_1 и τ_2 расширяются в M_1 и M_2 раз, соответственно ($M_1 \approx M_2 \approx 128$), и измеряются точно так же, как и τ_0 — счетно-импульсным методом (суммированием целого числа периодов опорной частоты 100 МГц).

По результатам измерений вычисляются следующие величины:

$$N_0 = \tau_0 / T; \quad N_1 = (M_1 \tau_1) / T; \quad N_2 = (M_2 \tau_2) / T, \quad (5)$$

где N_0 — количество целого числа периодов тактовой частоты 100 МГц за время τ_0 ;

N_1 — количество целого числа периодов тактовой частоты 100 МГц за время $\tau_1 M_1$ (расширенный интервал ΔT_1);

N_2 — количество целого числа периодов тактовой частоты 100 МГц за время $\tau_2 M_2$ (расширенный интервал ΔT_2).

Тогда длительность одиночного измеряемого интервала $\tau_{\text{изм}}$ будет определяться как

$$\tau_{\text{изм}} = 10(N_0 + N_1/M_1 - N_2/M_2 - \Delta N_{\text{рас}}), \quad (6)$$

где $\tau_{\text{изм}}$ — выражается в наносекундах, разрешающая способность — 100 пс;

$\Delta N_{\text{рас}}$ — коэффициент, учитывающий взаимное рассогласование интерполяторов.

Если необходимо измерить временной интервал, который повторяется, то происходит процесс усреднения. При этом дополнительно подсчитывается число усредненных за время измерения (время счета) интервалов N_E . Результат измерения вычисляется следующим образом:

$$\tau_{\text{изм}} = 10(N_0 + N_1/M_1 + N_2/M_2 - N_E \Delta N_{\text{рас}}) / N_E. \quad (7)$$

В режиме измерения периода число N_E есть количество усредняемых периодов, и тогда период будет определяться как

$$T_{\text{изм}} = 1/f_{\text{изм}} = 10(N_0 + N_1/M_1 - N_2/M_2 - \Delta N_{\text{рас}}) / N_E. \quad (8)$$

Значение частоты, которая измеряется, определяется как величина, обратная периоду, т. е. $f_{\text{изм}} = 1/T_{\text{изм}}$.

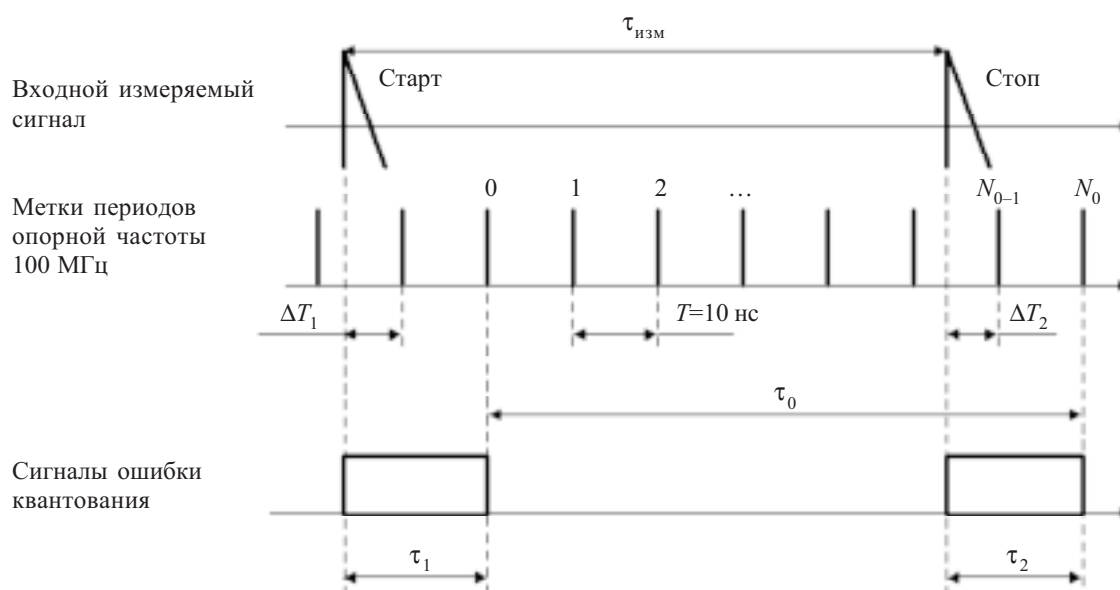


Рис. 1. Формирование измеряемого интервала времени

При измерении несущей частоты импульсно-модулированных колебаний происходит процесс измерения и формирования интервалов времени, которые лежат внутри огибающей отнормированного входного радиоимпульса. Эти интервалы равны длительности целого числа периодов несущей частоты.

За установленное время счета частотомера происходит определение суммарного числа периодов N_0 сигнала опорной частоты 100 МГц, суммарного числа периодов опорной частоты 100 МГц интерполяторов N_1 и N_2 , суммарного числа периодов сигнала несущей частоты N_E , числа радиоимпульсов $N_{\text{и}}$, коэффициента деления частоты входного делителя K_d . Результат измерения $f_{\text{нес}}$ определяется как

$$f_{\text{нес}} = (K_d N_E) / 10(N_0 + N_1/M_1 - N_2/M_2 - N_{\text{и}} \Delta N_{\text{рас}}). \quad (9)$$

Практическая реализация измерителя частоты и временных интервалов

Частотомер, работающий по описанному принципу действия, реализован по структурной схеме, приведенной на **рис. 2**.

Усилители-формирователи каналов *A* и *B* предназначены для усиления и формирования входных сигналов. В делителе частоты происходит деление входной частоты на 8. Линия задержки служит для задержки радиоимпульса на 50 нс с целью его нормирования по длительности для исключения переходных процессов в начале и конце радиоимпульса.

Селектор предназначен:

— для формирования импульсов длительностью τ_1 и τ_2 ;

— для формирования из входного сигнала строба *E* (измеряемый интервал времени) и из сигнала опорной частоты 100 МГц строба *Ж* (эталонного временного интервала, равного измеряемому интервалу с точностью до периода опорной частоты). Длительность строба *Ж* фактически равна времени счета частотомера $\tau_{\text{сч}}$;

— для подсчета числа колебаний входного сигнала за время прохождения строба *E* и сигнала опорной частоты за время прохождения строба *Ж*.

Формирователь опорных сигналов (**ФОС**) предназначен для формирования из частоты кварцевого генератора 10 МГц опорных сигналов с частотами 5 и 100 МГц.

Интерполятор содержит два одинаковых канала и служит для расширения импульсов сигнала ошибки квантования τ_1 и τ_2 в 128 раз с последующим их измерением методом счета числа колебаний сигнала опорной частоты 100 МГц.

Счетчик предназначен для подсчитывания числа колебаний опорной частоты при проведении измерений, обмена информацией с микропроцессорным контроллером (**МПК**) посредством шины данных (**ШД**).

МПК служит для управления алгоритмом работы частотомера, обеспечения функционирования каналов общего пользования (**КОП**) и RS-232 через ШД, шину адреса (**ША**) и шину управления (**ШУ**).

Блок индикации отображает результаты измерения.

Блок питания предназначен для выработки стабилизированных напряжений +12, -12, +5 В.

Рассмотрим алгоритм работы прибора при измерении частоты и периода по каналу *A*.

Усиленный и отнормированный входной сигнал с выхода усилителя поступает на селектор, где происходит формирование стробов *E* и строба *Ж*.

После прихода с МПК команды «Пуск» формирователь строба *E* срабатывает в момент поступления первого после сигнала «Пуск» импульса входного сигнала. А после поступления второго после начала строба *E* импульса сигналов опорной частоты срабатывает формирователь строба *Ж*.

В момент переполнения счетчика сигнал «Пуск» заканчивается, и формирователь строба *E* возвращается в исходное состояние в момент поступления второго после окончания строба *E* импульса опорной

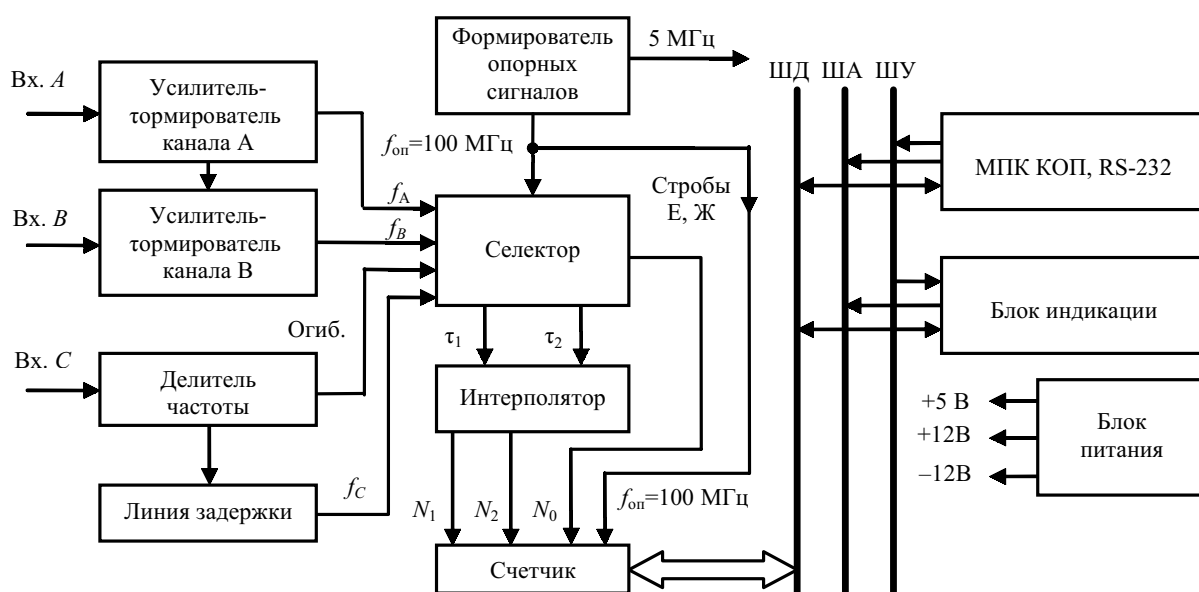


Рис. 2. Структурная схема частотомера UA ЧЗ-64/2

частоты. Таким образом, длительность строба Е равна целому числу периодов входного сигнала, а длительность строба Ж — целому числу периодов сигнала опорной частоты.

В селекторе также происходит формирование импульсов длительностью τ_1 и τ_2 . Величина τ_1 равна задержке начала строба Ж относительно начала строба Е, а величина τ_2 — задержке конца строба Ж относительно конца строба Е.

После расширения в интерполяторе импульсов длительностью τ_1 и τ_2 в 128 раз происходит подсчитывание N_1 и N_2 .

По окончании прохождения стробов Е и Ж прекращается процесс измерения, и МПК переходит к приему информации со счетчика с последующим вычислением измерительного периода T_A по формуле (6).

Измеряемая частота f_A вычисляется как функция, обратная периоду T_A , т. е. $f_A = 1/T_A$.

Алгоритм измерения частоты по входу С следующий.

Входной сигнал поступает на вход делителя частоты, где происходит его усиление и деление его частоты на 8. Здесь же дополнительно формируется огибающая радиоимпульса.

Строб Е будет представлять собой серию строб-импульсов, длительность каждого импульса равна целому числу периодов входного сигнала и приблизительно равна длительности огибающей радиоимпульса. Формируется строб так же, как и при измерении частоты или периода по каналу А.

Интерполяционные импульсы τ_1 и τ_2 вырабатываются на каждый строб-импульс. Вычисление определяемой частоты f_C производится по формуле (7).

При измерении интервала времени сигнал «Старт» подается на вход А, а сигнал «Стоп» — на вход В частотомера.

При измерении длительности импульсов t_a измеряемый сигнал подается на вход А, затем в усилитель-формирователе канала А он ответвляется также на усилитель-формирователь канала В. Дальше измерение происходит аналогично измерению временного интервала.

Разработанный частотомер многофункционален и позволяет выполнять:

- автоматическое измерение частоты и периода синусоидальных и импульсных сигналов;
- измерение несущей частоты импульсно-модулированных сигналов;
- измерение отношения частот двух электрических сигналов;
- счет числа колебаний электрических сигналов;
- измерение интервалов времени;
- измерение длительности импульсов.

Применение метода обратного счета совместно с интерполяцией позволило создать средство измерений с высокими техническими и метрологическими характеристиками (см. таблицу), получить высокую разрешающую способность при измерении временных интервалов (<100 пс), значительно уменьшить погрешность измерения как частоты синусоидальных

Краткие технические характеристики частотомера



Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерения: — частоты синусоидальных сигналов — частоты и периода сигналов импульсной формы — несущей частоты (с абсолютной погрешностью измерения $\leq 0,5$ МГц)	0,1 Гц — 1500 МГц 0,1 Гц — 150 МГц 100 — 1500 МГц
Уровни входных сигналов в диапазоне частот: — 0,1 Гц — 150 МГц — 100—1000 МГц — 1000—1500 МГц	50 мВ — 10 В 10 мВ — 1 В 200 мкВт — 10 мВт
Диапазон измерения длительности: — импульсов — интервала времени	10 нс — $2 \cdot 10^4$ с 0 — $2 \cdot 10^4$ с
Разрешающая способность измерения	100 пс
Номинальная частота опорного кварцевого генератора	10 МГц
Стабильность частоты опорного кварцевого генератора за 12 мес.	$\pm 10^{-7}$
Питание прибора	220±22 В, 50±0,5 Гц; 115±6 В, 110 В, 400 Гц
Потребляемая мощность	≤50 В·А
Рабочий диапазон температуры	От -10 до +50°C
Средняя наработка на отказ	≥8000 ч
Габаритные размеры	307×115×112 мм
Масса	6 кг
Интерт ейс	КОП, RS-232

сигналов, так и несущей частоты радиоимпульсных сигналов.

По сравнению с частотомером ЧЗ-64/1 в несколько раз уменьшены массогабаритные характеристики прибора, более чем в три раза уменьшено его энергопотребление, существенно повышена точность измерения.

Частотомер выполнен на современной элементной базе, что способствует достижению высоких точностных характеристик и параметров надежности. Прибор малогабаритен, прост в управлении и удобен в работе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ДСТУ 2705-96. Частотоміри електронні цифрові. Технічні вимоги та методи випробовувань.
2. Аппаратура для частотных и временных измерений / Под. ред. А. П. Горшкова. — М.: Сов. радио, 1971.

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: aiefimen@gmail.com

Дата поступления в редакцию
27.04 2010 г.

Оппонент д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ
(ХНУРЭ, г. Харьков)

КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕЧАТНЫХ УЗЛАХ, ВЫПОЛНЕННЫЕ МЕТОДОМ ПРОКОЛА ФОЛЬГИ

Приведено теоретическое обоснование возможности реализации, а также результаты экспериментальных исследований контактных соединений, выполненных методом прокола фольги.

В современном электронном приборостроении целесообразность использования технологии монтажа на поверхность уже давно не вызывает сомнений, однако и ей присущи определенные недостатки. Проблемы в значительной степени связаны с процессом пайки, при помощи которой образуются контактные соединения — это сложное и дорогостоящее оборудование, дорогая и объемная оснастка для каждого печатного узла, необходимость тестирования образованных контактов, которое значительно усложняется при использовании корпусов с матричным расположением выводов (BGA), необходимость использования бессвинцовых паяльных паст и покрытий.

Аналогичные причины привели к широкому распространению методов непаяного монтажа проводных электрических соединений [1] в связи с их эффективностью (технологичность, высокая производительность, надежность, экологическая чистота). Однако эти методы не являются универсальными, т. е. не могут использоваться для монтажа большинства электронных компонентов (ЭК). В первую очередь, это связано со значительными размерами выводов, а значит и контактных соединений, что в эпоху микроминиатюризации электронной аппаратуры (ЭА) является существенным недостатком.

Таким образом, существует проблема создания контактных соединений в электронных печатных узлах высокоэффективными и экологически безопасными методами, адаптированными к современным требованиям микроминиатюризации и развития ЭК.

Одним из направлений решения поставленной задачи является создание непаяного контактного соединения выводов ЭК с контактными площадками печатных плат (ПП).

Целью работы является теоретическое обоснование возможности практической реализации и экспериментальное исследование контактного соединения в электронных печатных узлах, выполненного методом прокола фольги (МПФ). При этом решаются ос-

новные задачи теоретических и экспериментальных исследований:

- описание МПФ и особенностей такого механизма образования контактного соединения;
- определение конструктивных параметров элементов контактного соединения, показывающих возможность использования метода в современной микроминиатюрной электронной аппаратуре;
- установление связи между усилиями запрессовки выводов при монтаже ЭК и прочностными показателями выводов;
- представление конструктивных моделей соединений МПФ, рассмотрение отдельных проблем их технической реализации и некоторых особенностей использования;
- проведение некоторых испытаний контактных соединений на возможность их эксплуатации.

Актуальность работы определяется возможностью получения непаяного контактного соединения, позволяющего вести монтаж ЭК на ПП автоматизированным методом без использования энергозатратных и экологически небезопасных процессов пайки, а также менее затратной подготовки производства.

Контактные соединения МПФ в электронных печатных узлах выполняются путем прокалывания выводами ЭК фольги контактных площадок ПП, под которыми расположены отверстия в диэлектрическом основании ПП (рис. 1). Собственно соединение образуется выводами ЭК, введенными в отверстия под контактными площадками, на стенки которых загибается часть фольги контактных площадок [2, 3].

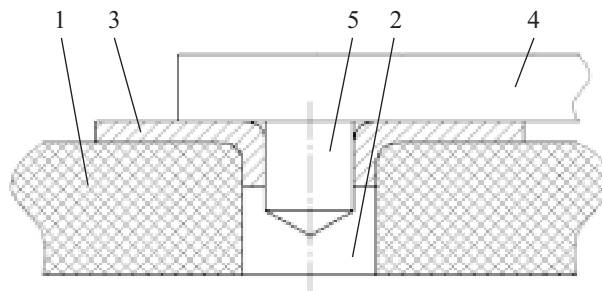


Рис. 1. Контактное соединение МПФ:

1 — основание печатной платы; 2 — отверстие; 3 — контактная площадка; 4 — электронный компонент; 5 — вывод электронного компонента

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МПФ

Рассмотрим механизм образования контакта МПФ.

На **рис. 2** представлена фотография контактного соединения, выполненного на макете печатного узла методом прокола фольги, а также печатной платы после демонтажа ЭК. Собственно контактные части дополнительно приведены в увеличенном масштабе.

Контактное соединение предполагает использование миниатюрных контактных выводов ЭК. Минимальное сечение вывода определяется требуемой прочностью, связанной с величиной усилия прокола фольги и его запрессовкой и, конечно же, с получением надежного во времени и в условиях действия дестабилизирующих факторов контакта с допустимыми значениями переходного сопротивления.

Конструкция такого контактного соединения достаточно технологична за счет использования выводов с простой формой поперечного сечения, простым конструктивным решением контактных элементов на печатной плате. Надежность соединения определяется значительной площадью контакта вывода с фольгой контактной площадки и плотным их прилеганием за счет прессовой посадки и холодной деформации в месте контактирования.

Механизм образования контакта МПФ, на первый взгляд, подобен механизму метода «press-fit» [1; 4, с. 178—192], однако последний предполагает использование выводов-штырей с упругими элементами, которые должны обеспечить требуемое давление при контактировании со стенками металлизированного отверстия, компенсируя производственные погрешности размеров элементов соединения штырей и отверстий и усадку, вызванную явлением релаксации материала основания платы (материал «плывет», ослабляя первоначально тугое соединение штырей с

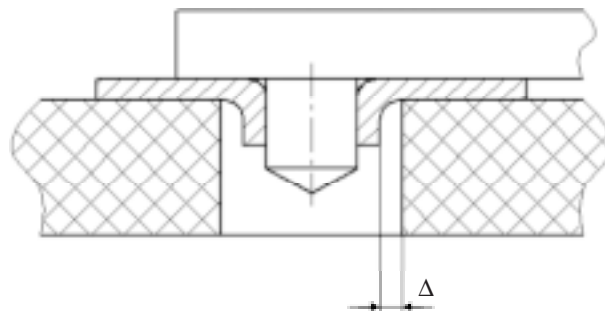


Рис. 3. Контактное соединение МПФ (Δ — возможный зазор за счет релаксации материала основания платы)

металлизированными отверстиями). С другой стороны, эти упругие элементы выводов должны ограничивать усилие запрессовки штырей в отверстия с тем, чтобы предотвратить разрушение слоя металлизации в отверстии.

Эти требования к конструкции штырей противостоят возможности уменьшения их размера и, соответственно, микроминиатюризации ЭК.

В предлагаемой конструкции механизм образования контактного соединения имеет следующую особенность — вывод-штырь должен образовывать контакт не с жестко расположенной стенкой металлизированного отверстия, а с подвижным элементом — отбортованной после прокола фольгой. Поэтому достаточно изначально создать условия обеспечения пластической деформации (холодной сварки) в области контактирования вывода и фольги, а релаксация материала основания платы не имеет принципиального значения (**рис. 3**).

С позиций технологичности конструкции соединения более всего подходит простая форма поперечного сечения вывода — круглая или квадратная. Что

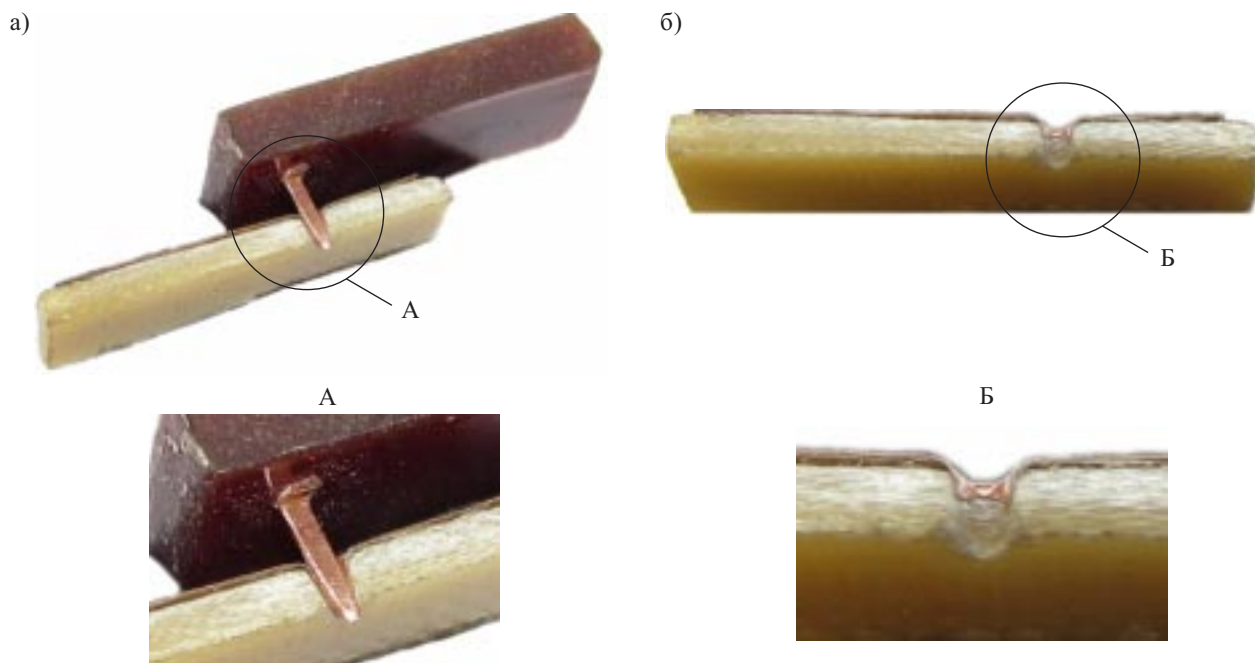


Рис. 2. Поперечное сечение контактного соединения МПФ (а) и печатной платы после демонтажа ЭК (б)

же касается условия обеспечения пластической деформации с одновременным ограничением усилия запрессовки, то ему лучше удовлетворяет квадратная форма вывода. Конечно же, можно применять выводы и другой формы поперечного сечения, однако в настоящей статье они не рассматриваются.

Определение конструктивных параметров ПП и выводов ЭК

Таковыми основными параметрами являются:

- шаг контактных площадок на ПП и выводов электронных компонентов;
- диаметр отверстий, который определяется диаметром выводов электронных компонентов;
- длина выводов электронных компонентов.

Значения этих параметров взаимосвязаны между собой и, в свою очередь, зависят от размеров корпусов ЭК и количества выводов на них, величины токов и напряжений, которые действуют в цепях ЭК, характеристик материалов ПП и выводов ЭК, конструкции корпусов ЭК, класса точности ПП и др.

С точки зрения реализации монтажа МПФ можно говорить о целесообразности его использования для различных ЭК — от ИМС с высокой степенью интеграции для микроминиатюрной электронной аппаратуры до компонентов силовой электроники. Очевидно, что именно для микроминиатюрной аппаратуры условия реализации МПФ самые сложные, а именно — минимальный шаг расположения выводов в сочетании с необходимостью приложения механического усилия, в том числе на вывод. Это может существенно ограничивать использование метода.

В силу сказанного для микроминиатюрной аппаратуры целесообразно определять конструктивные параметры ПП и ЭК исходя из минимально возможного шага выводов ЭК, который может быть реализован при условии минимизации диаметра выводов. Минимальный диаметр выводов ограничивается их прочностными характеристиками, которые зависят от материала выводов и их длины. Необходимо также учитывать и форму сечения выводов, и не только с точки зрения прочностных характеристик, но и, в первую очередь, создания надежного контактного соединения.

Определение формы и размеров сечения выводов проводилось на основании ранее проведенного анализа. В качестве наиболее технологичной формы поперечного сечения вывода выбираем квадрат. Исходя из предположений обеспечения прочности на первом этапе итерации выбираем диаметр его описанной окружности — 0,2 мм.

Расчеты минимального шага расположения выводов ЭК и контактных площадок на ПП выполняются для многослойной печатной платы 5-го класса точности для трех случаев:

- без возможности прокладки проводников между контактными площадками;
- с возможностью прокладки одного проводника между контактными площадками;
- для матричного расположения выводов (корпуса BGA).

В такой же последовательности произведем расчеты.

1. Наименьшее номинальное расстояние l между центрами двух контактных площадок (отверстий) определяется по формуле [5]

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + S, \quad (1)$$

где D_1 и D_2 — диаметры рядом расположенных контактных площадок;

S — зазор между контактными площадками.

Принимаем $D_1 = D_2 = D$, который рассчитываем по формуле

$$D = (d + \Delta d_{\text{во}}) + 2b + \Delta t_{\text{во}} + 2\Delta d_{\text{тр}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{но}}^2)^{1/2} \quad (2)$$

где d — номинальный диаметр отверстия;

$\Delta d_{\text{во}}$ — верхнее предельное отклонение диаметра отверстия;

b — гарантийный пояс;

$\Delta t_{\text{во}}$ — верхнее предельное отклонение диаметра контактной площадки;

$\Delta d_{\text{тр}}$ — величина подтравливания диэлектрика в отверстии (для предлагаемой технологии $\Delta d_{\text{тр}} = 0$);

T_d — позиционный допуск расположения оси отверстия;

T_D — позиционный допуск расположения центра контактной площадки;

$\Delta t_{\text{но}}$ — нижнее предельное отклонение диаметра контактной площадки.

Поскольку номинальный диаметр отверстия для монтажа МПФ должен быть приблизительно равен номинальному диаметру вывода, в нашем случае $d = 0,2$ мм.

Значения остальных составляющих выбираем из [5], и тогда из (2) получим

$$D = 0,2 + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + (0,1^2 + 0,15^2 + 0,03^2)^{1/2} = 0,46 \text{ мм.}$$

Подставляя в формулу (1) полученное значение D и значение S из [5], получим

$$l = 0,46 + 0,10 = 0,56 \text{ мм.}$$

Учитывая, что стандартный шаг расположения выводов и контактных площадок составляет 0,5 мм, можно сделать вывод о том, что при незначительном уменьшении сечения выводов и повышении точности изготовления ПП можно получить $l = 0,5$ мм.

2. Наименьшее номинальное расстояние l между центрами двух контактных площадок (отверстий) с учетом возможности прокладки между ними одного проводника определяется по формуле

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + t \cdot n + S(n+1) + T_l, \quad (3)$$

где n — количество печатных проводников;

t — номинальное значение ширины проводника;

T_l — позиционный допуск расположения проводника.

Подставляя в формулу (3) ранее полученное значение D и значения других параметров из [5], получим

$$l = 0,46 + 0,1 + 2 \cdot 0,1 + 0,02 = 0,78 \text{ мм.}$$

3. Минимальный шаг расположения выводов при их матричном расположении определим с учетом

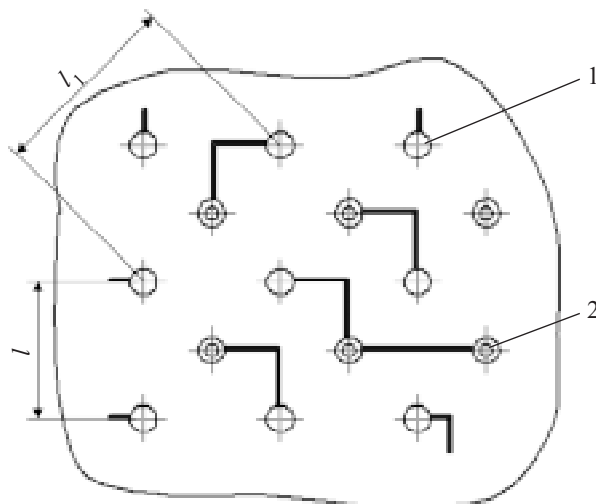


Рис. 4. Матричное расположение контактных площадок под выводы ЭК (1) и переходных металлизированных отверстий (2) на ПП

необходимости иметь переходные отверстия, которые в общем случае также имеют матричное расположение (рис. 4).

Диаметр контактной площадки переходного металлизированного отверстия $D_{по}$ по рекомендациям, приведенным в [6], составляет 20—25 мил (0,51—0,64 мм). Размер по диагонали между центрами контактных площадок под выводы ЭК равен

$$l_1 = D + D_{по} + 2S = 0,46 + 0,64 + 2 \cdot 0,10 = 1,3 \text{ мм.}$$

Исходя из этого, минимальный размер l , соответствующий минимальному шагу расположения выводов ЭК (контактных площадок под выводы ЭК), равен 0,92 мм.

Это дает основание выбрать шаг расположения выводов 1,0 мм, применяемый для типовых корпусов BGA [6].

Определение длины выводов ЭК

Длина выводов ЭК должна быть минимальной, чтобы удовлетворялись условия прочности и минимизации влияния выводов на условия трассировки ПП. Но при этом необходимо обеспечить надежный электрический контакт вывода с контактной площадкой ПП.

Рассмотрим условия контактирования на графической модели элементов контактного соединения (рис. 5) до запрессовки.

Минимальная длина вывода определяется следующим образом:

$$l_b = l_k + l_3 + \Delta k + \Delta n, \quad (4)$$

где l_k — минимальная длина контактирования вывода с фольгой контактной площадки печатной платы;

l_3 — длина заострения выводов.

Величина l_k ограничивается длиной фольги, которая загибается внутрь отверстия после ее разрыва выводом во время монтажа. Так, для монтажного отверстия $\varnothing 0,2$ мм $l_k = 0,1$ мм, для отверстия $\varnothing 0,5$ мм $l_k = 0,25$ мм.

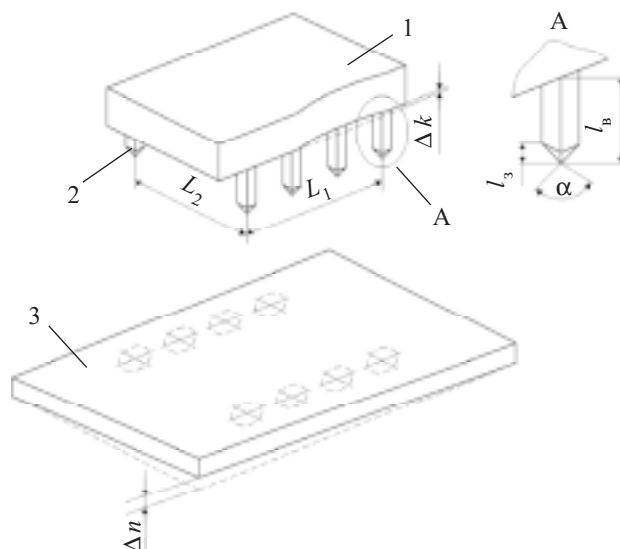


Рис. 5. Элементы контактного соединения:

1 — электронный компонент; 2 — вывод ЭК; 3 — печатная плата; α — угол заострения вывода; Δn — величина стрелы прогиба и коробления печатной платы; Δk — отклонение основания корпуса ЭК от плоскостности

Величины Δn и Δk определяют неплотность прилегания корпуса ЭК к печатной плате.

Величина коробления печатной платы является параметром материала ПП и зависит от деформации в процессе изготовления печатных плат [7].

Угол заострения вывода α определяет усилие прокола фольги. С уменьшением угла α снижается усилие прокола, но увеличивается длина вывода за счет увеличения длины заострения l_3 , причем с увеличением диаметра вывода l_3 также растет.

Таким образом, минимальная длина вывода зависит не только от составляющих выражения (4), но и является функцией размеров ЭК (L_1 , L_2) и, соответственно, размеров участка печатной платы, на который монтируется ЭК.

Для оценки практической возможности реализации МПФ определим минимальную длину вывода при предельных (на сегодняшний день) размерах ЭК и при средних значениях диаметра описанной окружности поперечного сечения вывода.

Исходные данные для расчета следующие:

- диаметр описанной окружности поперечного сечения вывода — 0,5 мм;
- угол $\alpha = 90^\circ$, тогда $l_3 = 0,25$ мм;
- величина стрелы прогиба и коробления печатной платы Δn ;
- минимальная длина контактирования $l_k = 0,25$ мм.

Для стеклотекстолита фольгированного по ГОСТ 10316-78 принимаем значение $\Delta n = 11$ мм на длине 1000 мм. Если считать максимальные размеры L_1 и L_2 равными примерно 40 мм (это корпус PLCC-124), то на этой длине $\Delta n = 0,44$ мм;

Что касается отклонения основания корпуса ЭК от плоскостности Δk , данные по этому параметру отсутствуют, но можно предположить, что его величина незначительна и находится в пределах допуска длины вывода.

Таблица 1

Расчетные значения $P_{кр}$ для выводов длиной 1 мм из различных материалов

D , мм	a , мм	Бронза фосфористая катаная		Латунь холоднотянутая		Медь холоднотянутая прокатная		Сталь углеродистая и хромоникелевая	
		E , кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс	E , кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс	E , кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс	E , кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс
0,2	0,14	11500	0,91	9500	0,75	12000	0,95	20500	1,62
0,3	0,21		4,6		3,8		4,8		8,2
0,4	0,28		14,5		12,0		15,1		25,9
0,5	0,35		35,5		29,3		37,1		63,3
0,6	0,42		73,5		60,7		76,7		131
0,7	0,49		136		113		142		242
0,8	0,57		249		206		260		444

Отсюда можем определить минимальную длину вывода

$$l_{в} = 0,25 + 0,25 + 0,44 = 0,94 \text{ мм.}$$

Этот расчет проведен, можно сказать, для предельного случая. При меньших размерах корпусов ЭК и, соответственно, диаметре выводов, длина вывода может быть меньше. Но даже для приведенного случая длина вывода может удовлетворить предъявленные требования. Однако окончательное заключение можно сделать после анализа механической прочности вывода, которая также зависит от его длины.

Определим минимальный диаметр описанной окружности D поперечного сечения вывода, т. к. в дальнейшем при конструировании ПП его удобно сравнивать с диаметром отверстия.

С точки зрения микроминиатюризации ЭА поперечное сечение выводов следует минимизировать. Однако тут есть существенное ограничение — прочность. Вывод не должен изгибаться при приложении значительных усилий в процессе запрессовки. Следует также учитывать технологичность изготовления выводов и корпусов ЭК.

Первое ограничение можно определить с помощью известной задачи Эйлера [8], второе ограничение определяется уровнем развития технологии на современном этапе.

Рассмотрим решение задачи Эйлера для вывода (стержня) с площадью поперечного сечения F , сжи-

маемого продольной силой P , линия действия которой совпадает с геометрической осью вывода (рис. 6).

Для условий задачи, когда один конец стержня (А) зашкреплен, а другой (Б) свободен, формула для определения критической силы (формула Эйлера) имеет вид

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2};$$

$$J_{\min} = a^4/12,$$

где E — модуль упругости материала вывода;

J_{\min} — осевой момент инерции, для вывода квадратного сечения со стороной квадрата a ;

μ — коэффициент, характеризующий условия закрепления концов стержня, в рассматриваемом случае $\mu=2$;

l — длина вывода, для принятых выше обозначений $l=l_{в}$.

Критической силой называется нагрузка, при которой начальное равновесие перестает быть устойчивым, т. е. при действии в этом положении небольшой поперечной силы либо каких-либо других факторов (эксцентричность приложения силы P , первоначальный прогиб вывода, неоднородность его материала и др.) появляется непрерывно увеличивающийся прогиб вывода. Следует также учитывать, что после устранения причины, вызвавшей прогиб (в том числе и после снятия нагрузки P), вывод не возвращается в первоначальное прямолинейное положение и остается изогнутым [8].

Из этого следует, что должно выполняться условие

$$P < P_{кр}, \quad (5)$$

где P — сила, необходимая для запрессовки вывода.

В таблице 1 приведены результаты расчетов $P_{кр}$ для выводов длиной 1 мм из наиболее подходящих материалов с различными размерами поперечного сечения a .

Усилие P запрессовки выводов контактного соединения МПФ определим экспериментально, после чего можно будет проверить выполнение (5).

Конструктивные модели соединений МПФ

По конструктивному исполнению печатные платы, которые могут использоваться для монтажа ЭК методом прокола фольги, принципиально не отличаются от существующих плат для монтажа в отвер-

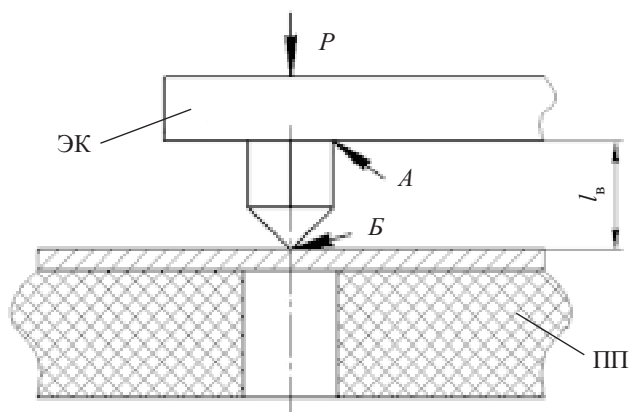


Рис. 6. Иллюстрация к определению критической силы при запрессовке вывода

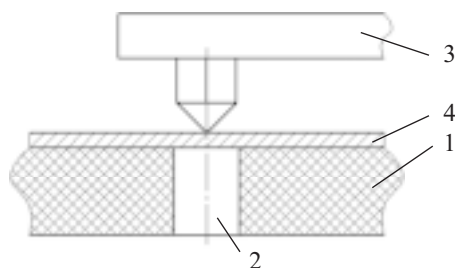


Рис. 7. Односторонняя печатная плата

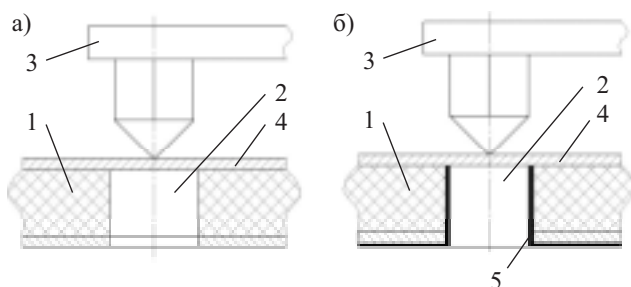


Рис. 8. Двусторонняя печатная плата:

а — без металлизации; б — с металлизацией монтажных отверстий

стия и на поверхность. Их особенностью является то, что отверстия должны быть глухими («слепыми») и могут быть скрытыми («погребенными»), а для микроминиатюрных ЭК — еще и малого диаметра.

На рис. 7—9 представлены некоторые возможные варианты конструкции печатных плат для монтажа МПФ. Здесь обозначено: 1 — основание ПП; 2 — монтажное отверстие; 3 — электронный компонент; 4 — фольга; 5 — слой металлизации; 6 — прокладка.

Остановимся на некоторых вопросах возможности выполнения глухих и скрытых отверстий и их технологичности.

Существует вариант технологического процесса изготовления глухих и скрытых отверстий, при котором производится сверление отверстий на заданную глубину с последующей металлизацией [9].

В случае многослойных печатных плат эти операции могут осуществляться как после прессования слоев (рис. 9, б), так и до прессования платы в целом применительно к промежуточным частям или полупакетам (рис. 9, г).

Требования микроминиатюризации ЭС повлекли за собой использование микроотверстий в ПП. Механическим сверлением легко выполняются отверстия диаметром не менее 150 мкм. Отверстия диаметром 100 мкм и менее эффективней формировать с использованием лазерной технологии.

Развитие лазерной технологии привело к возможности формирования отверстий двойным лазером. Это позволяет получать отверстия любых заданных размеров в диапазоне от 25 до 250 мкм [10]. Однако механическое сверление как метод формирования отверстий еще доминирует в производстве ПП. Такое положение сохраняется благодаря развитию производства микросверл и использованию свер-

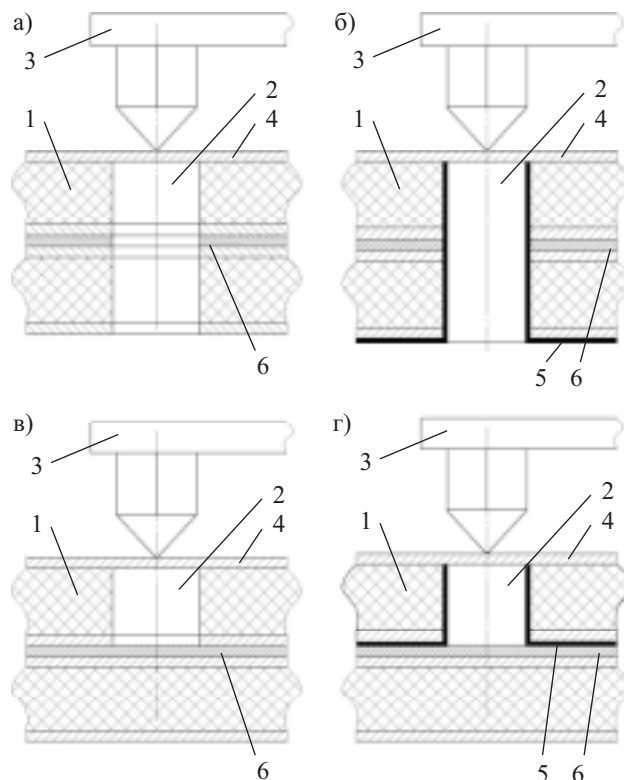


Рис. 9. Многослойная печатная плата с глухими (а, б) и скрытыми (в, г) монтажными отверстиями:

а, в — без металлизации; б, г — с металлизацией монтажных отверстий

лильных станков с высокой скоростью шпинделей (до 350 тыс. об/мин).

На сегодняшний день механическим сверлением можно достичь высокого качества отверстий диаметром 50 мкм, а несколько фирм-производителей разработали и сверла ультрамалого диаметра — 20 мкм. Тем не менее, некоторые специалисты считают, что при сверлении глухих отверстий малых диаметров механическое сверление все же не составляет серьезной конкуренции лазерному из-за трудностей управления глубиной сверления [11].

Однако следует отметить, что технологии изготовления ПП развиваются очень быстрыми темпами, это касается также и обеспечения точности заглубления отверстий. До недавнего времени она составляла ± 50 мкм, что явно недостаточно для микроотверстий. Новая система управления на основе использования датчика электрического поля может обеспечить точность заглубления отверстия ± 5 мкм при том, что она позволяет выполнять четко сформированные отверстия диаметром до 100 мкм с прямоугольным дном [12].

Таким образом, можно утверждать, что изготовление печатных плат для монтажа МПФ основывается на современных технологиях и особенности, связанные с формированием отверстий, выражаются в том, что лазерное и механическое сверление не заменяют друг друга, а дополняют.

Кроме того, технология выполнения контактных соединений методом прокола фольги в электронных печатных узлах рассчитана на использование перспективных ЭК, имеющих штыри-выводы.

В связи с тем, что используются ПП без видимых отверстий со стороны установки ЭК, монтаж компонентов должен производиться автоматизированным методом, аналогичным поверхностному монтажу компонентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ МПФ

Критерием качества контактного соединения может служить контактное сопротивление, которое является основной характеристикой любого контакта.

Исследования контактного соединения, выполненного МПФ, проводились на тест-плате, эскиз которой представлен на рис. 10.

Тест-плата состоит из двух печатных плат — верхней, на которой выполнены четыре паяных соединения выводов с контактными площадками, и нижней с четырьмя контактными соединениями МПФ выводов с контактными площадками.

Платы 1 и 2 механически скреплены между собой двумя самонарезающими винтами 3 диаметром 2 мм.

Отверстия в нижней плате под соединение МПФ имеют диаметр 0,6 мм. Поперечное сечение выводов близко к квадратному с диаметром описанной окружности около 0,6 мм.

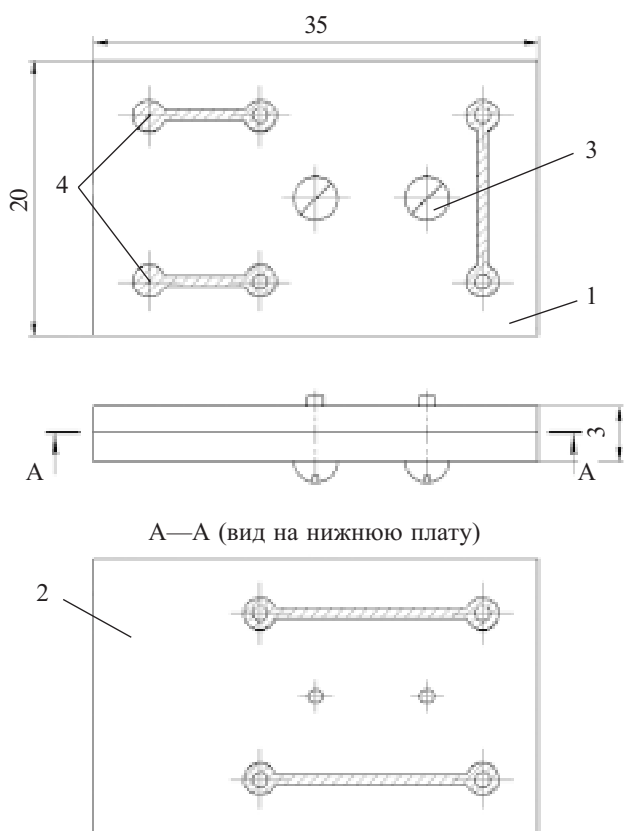


Рис. 10. Тест-плата:

1 — верхняя ПП; 2 — нижняя ПП; 3 — винт; 4 — контактные площадки для измерений

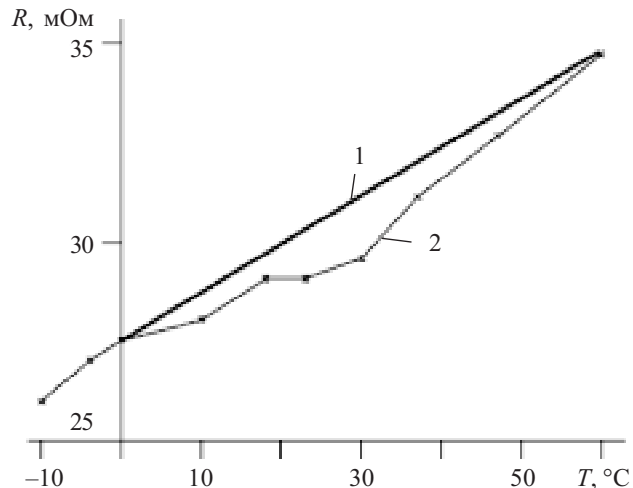


Рис. 11. Зависимость сопротивления токопроводящей части тест-платы от температуры:

1 — расчетная; 2 — экспериментальная

Толщина фольги печатных плат равна 35 мкм. Для измерения сопротивления токопроводящей части тест-платы используются контактные площадки 4. Измерение сопротивления проводилось микроомметром Ф4104.

В нормальных условиях сопротивление между контактными площадками 4 равно 29 мОм. Если вычесть отсюда сопротивление соединительных печатных проводников, то суммарное контактное сопротивление вывода с контактной площадкой платы 1 (паяное) и контактной площадкой платы 2 (МПФ) составит около 4 мОм (для сравнения — допустимое контактное сопротивление контактных пар электрических соединителей составляет 10—20 мОм).

Были проведены испытания тест-платы на воздействие температуры. Экспериментальные значения сопротивления всей токопроводящей части тест-платы при различной температуре представлены кривой 2 на рис. 11.

Анализ полученной зависимости сопротивления токопроводящей части тест-платы от температуры дает основание предположить, что изменение сопротивления вызвано свойством материала проводников и выводов изменять сопротивление при изменении температуры в соответствии с формулой

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \Delta t,$$

где R_T — сопротивление при температуре T ;

R_0 — сопротивление при определенной температуре T_0 , например при 0°C;

α — температурный коэффициент электрического сопротивления проводника (для меди $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

Δt — разность температур, $\Delta t = T - T_0$.

Приведенная на рис. 11 расчетная зависимость подтверждает предположение о том, что изменение сопротивления токопроводящей части тест-платы вызвано физическими свойствами материала проводников, а отклонение экспериментальной зависимости от расчетной объясняется погрешностями измерений.

В свою очередь, экспериментальные результаты говорят об относительной стабильности контактного

сопротивления тест-платы в рассматриваемом диапазоне температур.

Также исследовалось *воздействие на тест-плату смены температуры* (термоциклирование). Были проведены 3 цикла испытаний, при которых плата выдерживалась по 20 мин поочередно при температуре -10 и $+70^{\circ}\text{C}$. После испытаний сопротивление токопроводящей части тест-платы составило 29 мОм при нормальной температуре, что соответствует его величине в начале испытаний.

Испытание на воздействие агрессивной среды проводилось в соляном (NaCl) и щелочном (NaHCO_3) растворе в течение одного часа при температуре около 100°C (кипение). Величина измеренного затем сопротивления составила 27 мОм при нормальной температуре. Полученное отклонение от первоначального значения сопротивления можно объяснить погрешностью микроомметра, которая равна $\pm 2,5\%$ от конечного значения диапазона измерения (100 мОм).

При испытаниях на механическое воздействие тест-плату подвергали воздействию одиночных ударов с ускорением (30—40)g. Было произведено по 5 ударов в двух направлениях — параллельно и перпендикулярно выводам платы.

После испытаний сопротивление составило 29,5 мОм при нормальной температуре.

Для определения *усилия прокалывания фольги и запрессовки выводов в отверстие печатной платы* были проведены определительные испытания на приспособлении, схематически показанном на **рис. 12**.

Испытания по определению усилия прокалывания фольги проводились по 6 раз для выводов разных диаметров. В качестве выводов использовались штыри круглого сечения. На печатных платах использовалась медная фольга толщиной 35 мкм.

Результаты испытаний приведены в **табл. 2**.

Из-за существенной разницы в диаметрах вывода и отверстия (свободная посадка) в полученных результатах не учитывалось влияние отверстия на усилие запрессовки вывода. В связи с этим были прове-

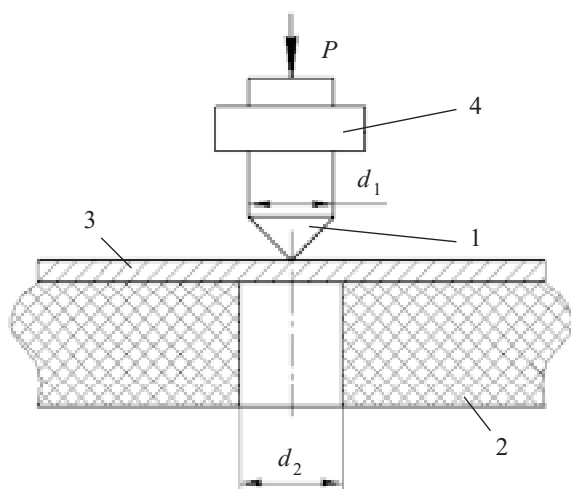


Рис. 12. Приспособление для проведения испытаний: 1 — вывод; 2 — основание печатной платы; 3 — фольга; 4 — динамометр

Таблица 2

Усредненные значения усилия прокалывания фольги выводами различного диаметра

Диаметр вывода d_1 , мм	Диаметр отверстия d_2 , мм	Усилие прокалывания P , кгс
0,2*	—	0,22
0,3	0,4	0,26
0,4	0,5	0,29
0,5	0,6	0,33
0,6	0,7	0,38
0,7	0,8	0,42
0,8	0,9	0,47

* Для этого диаметра значение P было получено методом прогнозирования.

дены испытания для разных соотношений диаметров вывода и отверстия. В **табл. 3** приведены результаты определения усилия запрессовки выводов разного диаметра в отверстие диаметром 0,6 мм.

Таким образом, для прессовой посадки и создания условий для холодной сварки вывода с фольгой необходимо приложить усилие, которое примерно в 2 раза больше усилия прокалывания фольги.

Основываясь на полученных экспериментально значениях усилия запрессовки P (табл. 2) и расчет-

Таблица 3

Усредненные значения усилия запрессовки выводов различного диаметра в отверстие диаметром $d_2=0,6$ мм

Диаметр вывода d_1 , мм	Усилие запрессовки P , кгс
0,55	0,38
0,56	0,39
0,57	0,59
0,58	0,71

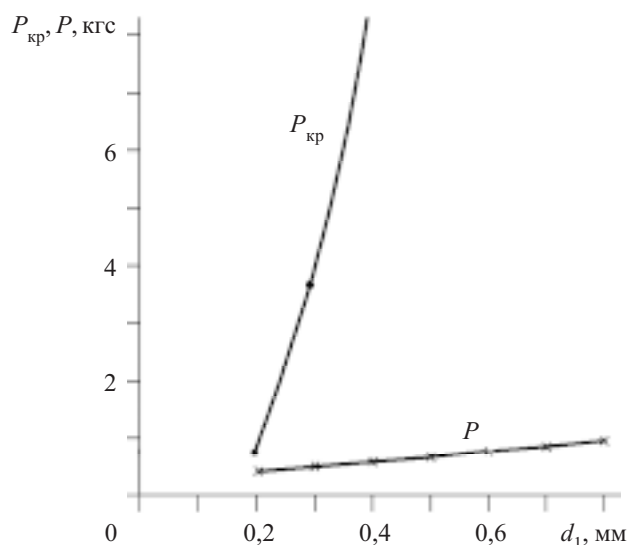


Рис. 13. Зависимость усилия запрессовки P и критической силы $P_{кр}$ от диаметра выводов

ных значениях критической силы $P_{кр}$, вызывающей прогиб вывода (табл. 1), получим зависимости, которые позволяют их сравнить (рис. 13).

Зависимость $P_{кр}$ приведена для латуни холодной, имеющей наименьшее значение модуля упругости из всех рассматриваемых материалов.

Зависимость P построена для удвоенных значений P , приведенных в табл. 2.

Анализ зависимостей позволяет говорить о том, что с точки зрения прочностных показателей выводов контактные соединения МПФ могут быть реализованы. При этом следует отметить, что метод имеет значительные резервы — для выводов диаметром начиная с 0,3 мм и выше выполняется условие $P_{кр} \gg P$. Также очевидно, что усилие запрессовки вывода квадратного сечения будет меньше, чем усилие запрессовки вывода круглого сечения с одинаковыми диаметрами соответственно описанной окружности и круга за счет меньшей площади соприкосновения поверхности вывода с поверхностью отверстия.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДАННОМ НАПРАВЛЕНИИ

Промышленное освоение монтажа МПФ требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований и опытно-конструкторских работ, детального изучения физико-механических особенностей формирования контактного соединения с тем, чтобы получить оптимальные конструктивные, технологические и экономические показатели электронной аппаратуры. И в этом направлении целесообразным представляется формальное описание поставленной задачи для дальнейшего ее решения.

На основании проведенных исследований предлагается математическая постановка задачи выбора и оптимизации структуры и параметров конструкции контактных соединений МПФ с учетом технологических и экономических показателей. В качестве целевой функции выберем функциональную зависимость контактного сопротивления соединения, выполненного МПФ, от его структуры и конструктивных параметров.

Требуется найти такой вектор \vec{K} структурных и геометрических параметров контактных соединений МПФ, чтобы $R(\vec{K}) \rightarrow \min$ с учетом ряда ограничений на структуру, материалы, конструктивные размеры, форму, покрытия, шероховатость, технологичность (усилие запрессовки выводов и т. д.). Необходимо включить в ограничения также группу параметров и показателей качества, которые характеризуют надежное функционирование электрических соединений и аппаратуры в целом: токовую нагрузку, тепловой режим, электромагнитную совместимость, стойкость к действию внешних дестабилизирующих факторов и др.

Тогда

$$\vec{K} = \bigcup_{i=1}^n \vec{K}_i, \quad \vec{K}_i = \{D_i, L_i, G_i, T_i, S_i\}, \quad i \in [1, n],$$

где D_i — множество диаметров выводов и отверстий на ПП;

L_i — множество размеров выводов ЭК, определяющих сопряжение с отверстиями;

G_i — множество форм выводов;

T_i — множество типов монтажных отверстий на ПП (с металлизацией, без металлизации, сквозных, глухих и др.);

S_i — множество типов покрытий.

Такая математическая постановка задачи создания оптимальных конструкций контактных соединений МПФ позволяет ориентироваться на ее алгоритмическую реализацию и использование средств вычислительной техники.

ВЫВОДЫ

В результате выполненной работы были определены конструктивные параметры ПП и выводов ЭК под монтаж МПФ с позиций их минимизации и, соответственно, микроминиатюризации ЭА.

Приведенные расчеты определяют возможность проектирования ПП пятого класса точности с шагом расположения выводов ЭК до 0,5 мм с использованием реально существующих технологических процессов.

Теоретические и экспериментальные исследования контактных соединений с учетом воздействия ряда климатических и механических факторов, а также измерения прочностных показателей выводов ЭК для обеспечения их запрессовки могут служить основанием для дальнейших исследований МПФ с целью более детального изучения физико-механических особенностей формирования собственно контактного соединения и определения технико-экономической целесообразности практического применения метода в электронных печатных узлах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ефименко А. А., Собченко Д. Л. Непаяные контактные соединения в электронных печатных узлах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 3. — С. 3—9.
2. Патент 86381 України. Контактне з'єднання на друкованій платі / А. А. Єфіменко. — 2009. — Бюл. № 8.
3. Ефименко А. А., Собченко Д. Л. Определение конструктивных параметров контактных соединений МПФ // Тр. 9-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ». — Одесса. — 2008. — Т. II. — С. 88.
4. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств. — М.: Техносфера, 2007.
5. ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции.
6. Паллием В. Проектируем платы с BGA // Печатный монтаж. — 2008. — № 2 — С. 34—37; № 3. — С. 38—40.
7. Бегер Е. Предупреждение деформации печатных плат на этапе конструирования // Chip news. Инженерная микроэлектроника. — 2008. — № 10—11. — С. 44—48.
8. Заблонский К. И., Беляев М. С., Телис И. Я. и др. Проектирование механизмов и приборов. — К.: Вища школа, 1971.
9. Чернышов А. Рекомендации по применению различных типов глухих и скрытых отверстий // Печатный монтаж. — 2009. — № 2—3. — С. 32—35.
10. Никируй В. Лазерные технологии в производстве печатных плат и не только // Печатный монтаж. — 2009. — № 2—3. — С. 25—28.
11. Джиянгу К., Лианю Ф., Жефенг Д. Механическое сверление печатных плат // Печатный монтаж. — 2007. — № 2. — С. 22—24.
12. Иванова А., Медведев А. Механическое и лазерное формирование отверстий // Печатный монтаж. — 2008. — № 1. — С. 2—7.

К. т. н. В. П. РЕВА, к. ф.-м. н. А. Г. ГОЛЕНКОВ,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСКИЙ, к. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ,
С. В. КОРИНЕЦ, к. ф.-м. н. Ж. В. ГУМЕНЮК-СЫЧЕВСКАЯ,
С. Г. БУНЧУК, М. В. АПАТСКАЯ, И. А. ЛЫСЮК, М. И. СМОЛИЙ

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

Дата поступления в редакцию
30.04 2010 г.

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

ТЕПЛОВИЗОР НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ИЗ 128×128 CdHgTe-ФОТОДИОДОВ

Приемник может быть использован в системах с высокой разрешающей способностью по температуре. Среднее значение температуры излучения, эквивалентной шуму, составляет 20 ± 4 мК.

Созданию фотоприемных устройств средневолновой части (3—5 мкм) инфракрасного (ИК) диапазона спектра посвящено значительное число публикаций (см., например, [1, 2], а также использованные в них источники). Факторами, которые благоприятствуют использованию таких ИК-приемников излучения, являются большой контраст, более благоприятные погодные условия (при увеличении содержания водяных паров в атмосфере пропускание в области 3—

5 мкм уменьшается медленнее по сравнению с областью 8—14 мкм), большая прозрачность в условиях большей влажности, большее разрешение благодаря меньшей оптической дифракции [2].

В высокочувствительных тепловизионных системах обычно используются фотоприемные модули на основе охлаждаемых гибридных линейчатых или матричных инфракрасных фотоприемников (ФП). Одни из наиболее применяемых — это ФП на основе гибридных сборок из диодных фоточувствительных элементов, изготовленных из эпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути (КРТ), соединенных через индиевые столбики с кремниевыми приборами с зарядовой связью или КМОП-мультиплексорами. Такие ИК ФП для средневолновой части спектрального ИК-диапазона обеспечивают максимальную температурную чувствительность по сравнению с другими ИК-фотоприемниками [2, с. 239], поэтому разработка тепловизионного приемника на их основе является практически важной и актуальной задачей.

Авторы выражают благодарность за сотрудничество коллегам из Института физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск, Россия) Ю. Г. Сидорову, С. А. Дворецкому, Н. Н. Михайлову.

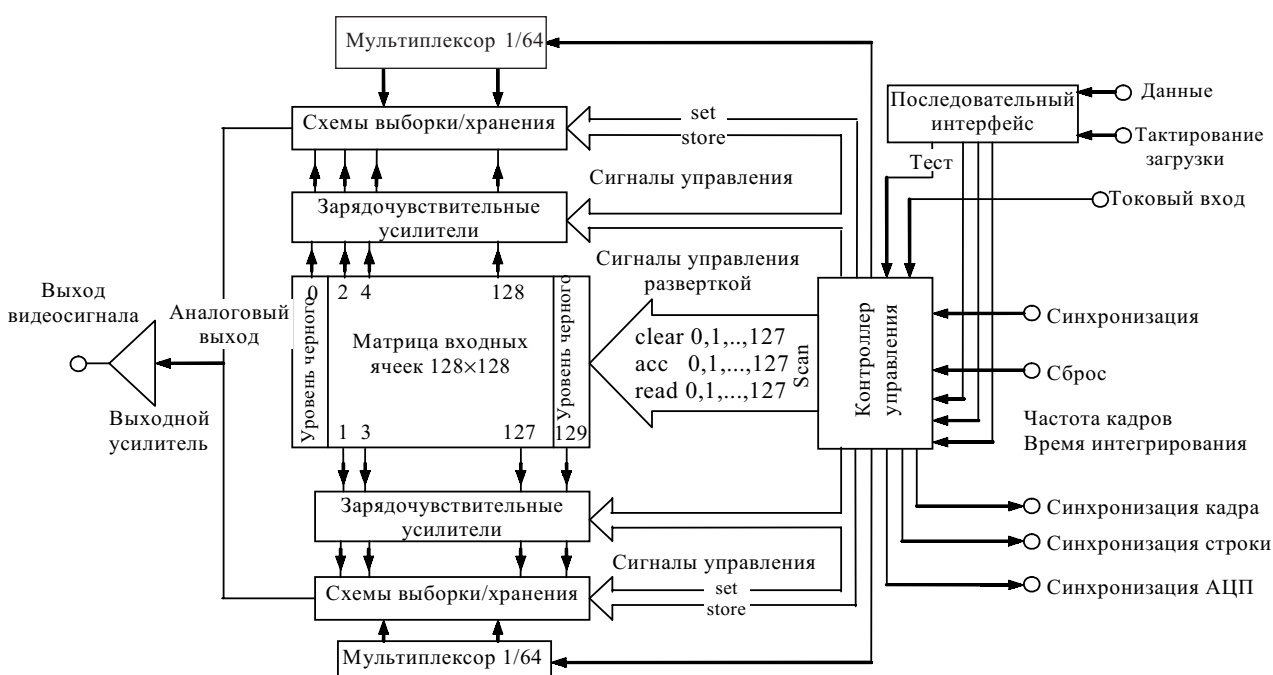


Рис. 1. Структура схемы считывания формата 128×128

Матричная схема считывания формата 128×128

Предварительная разработка такой схемы была осуществлена в [3]. Модификация ее архитектуры проводилась исходя из необходимости получения оптимальных энергетических характеристик (минимального тока потребления и минимального количества выводов из криостата) и упрощения интерфейса управления схемой считывания. Для этой цели использовались один аналоговый выход, двухпроводной асинхронный последовательный интерфейс управления ИС, а все сигналы синхронизации формировались на кристалле. Структура схемы считывания представлена на **рис. 1**, основные параметры — в **таблице**.

Накопительная емкость, пКл	1,78
Динамический диапазон, дБ	≥ 76
Максимальный выходной сигнал, В	≥ 3,0
Шум, мкВ	≤ 300
Напряжение питания, В	+5
Частота вывода информации, МГц	5
Нелинейность выходной характеристики, %	≤ 1
Потребляемая мощность, мВт	≤ 70

С помощью последовательного интерфейса можно задавать частоту кадров 200, 100, 50 или 25 Гц, время накопления (интегрирования) составляет от 11 до 1035 мкс, тип режима — рабочий/тестовый. Для тестирования микросхемы без подключения матрицы фотодиодов предусмотрен токовый вход. Для задания уровня «черного» предусмотрены два столбца темновых ячеек, к которым фотодиоды не подключают-

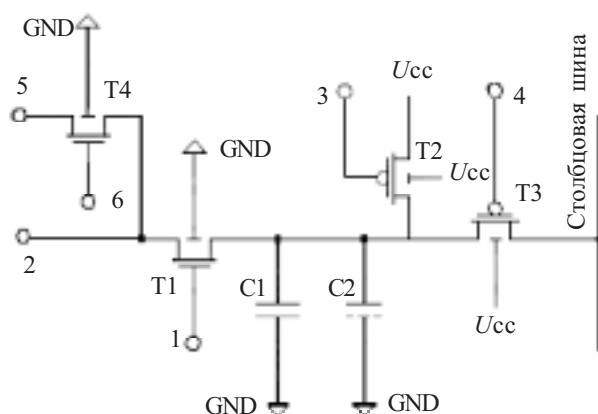


Рис. 2. Входная ячейка схемы считывания:

T1 — *n*-канальный транзистор прямой инжекции; T2 — *p*-канальный транзистор сброса; T3 — *p*-канальный транзистор выборки; T4 — *n*-канальный тестирующий транзистор; 1 — напряжение прямой инжекции; 2 — площадка подключения ИК-фотодиода; 3 — импульс сброса; 4 — импульс выборки строки; 5 — тестирующий токовый вход; 6 — импульс выборки строки в тестовом режиме

ся. Этот уровень может задаваться внешним потенциальным сигналом. В тестовом режиме предусмотрен режим опроса одной строки. В качестве входной ячейки использована схема прямой инжекции (**рис. 2**).

Для изготовления матричной схемы считывания была использована 1,0 мкм КМОП-технология с двумя уровнями металла и двумя уровнями поликремния. В процессе производства использовались пластины кремния толщиной 150 мм ориентации <100> с удельным сопротивлением 12 Ом·см. Толщина подзатворного и межслойного оксида составляла соответственно 400 и 900 Å при удельной емкости $8,65 \cdot 10^{-4}$ и $3,8 \cdot 10^{-4}$ пФ/мкм². В качестве транзистора прямой инжекции использовался *n*-канальный транзистор с подлегированием с пороговым напряжением порядка 0,7 В и увеличенной до 2,4 мкм длиной канала. Это позволяет получать разброс значений напряжения смещения на диодах не более 10 мВ. Элементная база схемы — КМОП-транзисторы и конденсаторы с обкладками из поликристаллического кремния в двух уровнях.

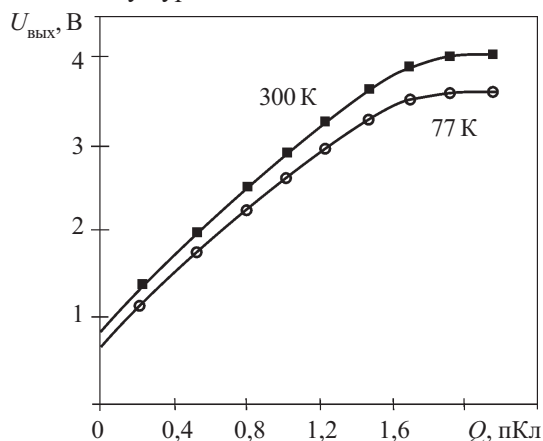


Рис. 3. Передаточная характеристика схемы считывания при различной температуре

Специально проведенные работы по оптимизации схемотехнических решений позволили увеличить величину накопительной емкости. На **рис. 3** представлена передаточная характеристика схемы считывания (зависимость выходного $U_{\text{вых}}$ напряжения от входного заряда Q), измеренная в тестовом режиме без подключения ИК-фотодиодов.

Изготовление матрицы фотодиодов

Для разработки и изготовления матриц фотодиодов среднего ИК-диапазона используются, в основном, гетероэпитаксиальные структуры теллуридов кадмия и ртути, которые выращиваются методами жидкофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии [1, 2, 4].

Матрицы фотоприемников изготавливались с помощью микроэлектронной технологии по пяти фотошаблонам. Разработка топологии фотошаблонов проводилась постепенно, с учетом ограничений приборов для создания шаблонов и ограничений, которые накладываются особенностями исходного материала. Сформированная матрица фоточувствительных элементов представляет собой эпитаксиальную пленку CdHgTe размером 7,4×7,5 мм и состоит из 128×128

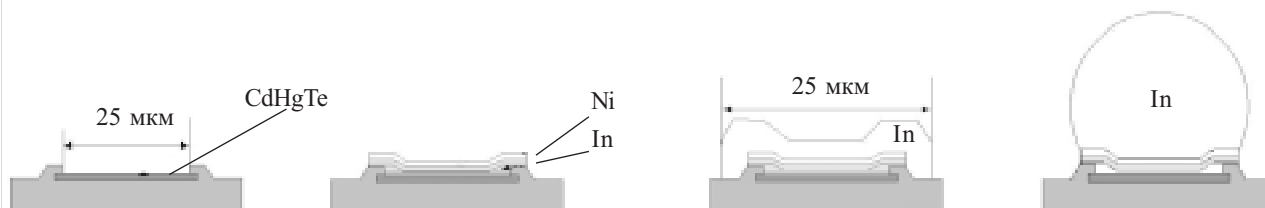


Рис. 4. Схема технологического процесса формирования индиевого контакта в виде шарика

фотодиодов. Расположение диодов и расстояние между ними согласовано с расположением соответствующих контактных площадок для In-столбиков на схеме считывания, на которой монтируется кристалл фотоприемника.

Для создания $p-n$ -переходов в узкощелевом полупроводнике CdHgTe использовалось легирование ионами B^+ на импланторе „Везувий-5”. Использовался ионный источник с разрядом Пеннинга с холодным катодом и осевой экстракцией пучка, который часто применяется в установках имплантации малых доз. Как правило, рабочее вещество подается к такому источнику в виде газа или пара. Источник позволяет быстро заменять мишени, которые распыляются; изменение интенсивности ионного пучка осуществляется за счет мощности газового разряда и запуска газа.

Для формирования многоэлементной системы контактов была использована трехслойная металлизация на основе металлов индия и никеля с различной толщиной слоев. Промежуточный слой никеля придает контактам необходимую механическую прочность и стабильность, а слой индия обеспечивают пластичность и упругость. Слои наносились методом термического напыления в вакууме и методом магнетронного распыления. Последний слой индия толщиной 3—4 мкм обрабатывался термически без доступа воздуха. В результате были получены контакты в виде шариков высотой 8—10 мкм (рис. 4, 5), поскольку индиевые контакты должны выступать над поверхностью кристалла из-за развитого рельефа микросхемы.

С целью формирования ФП-устройств с учетом требований к получению надежной гибридной сборки было проведено прецизионное совмещение фотоди-

одной матрицы на основе CdHgTe с кремниевой схемой считывания на установке „Гибрид”. Микросборка двух кристаллов является процессом холодной сварки (без нагрева обоих чипов). Установка позволяет разместить два кристалла параллельно один над другим, сориентировать кристаллы в соответствии с топологией схемы и провести холодную сварку индиевых шариков, сформированных на обоих кристаллах, с помощью специально подобранной величины механической нагрузки.

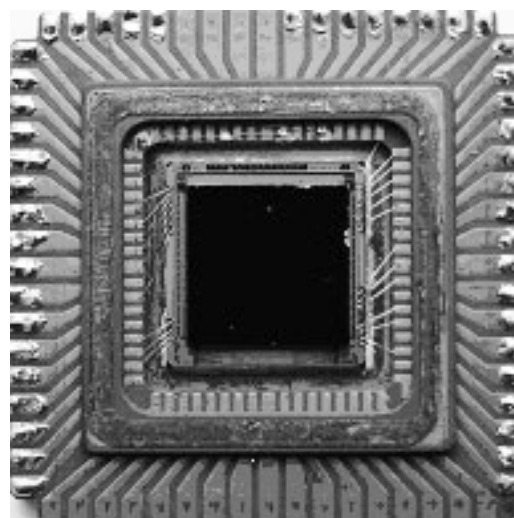


Рис. 6. Матрица, сгибридизированная со схемой считывания и вмонтированная в корпус

На рис. 6 показана фотография матрицы КРТ формата 128×128, сгибридизированной с кремниевой схемой считывания в корпус, который устанавливается в криостат.

Оптимизация токовых характеристик ИК-фотодиодов

Электрические параметры изготовленных фотодиодов контролировались с помощью вольт-амперных характеристик (ВАХ), полученных на стенде, предназначенном для автоматизированного измерения ВАХ многоэлементных фотодетекторов микрозондовым методом при температуре $T=78—300$ К [5].

На рис. 7 приведена типичная вольт-амперная характеристика фотодиода из матрицы формата 128×128, сформированной ионной имплантацией бора в эпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0,3$). Нами использовались слои, выращенные методом молекуляр-

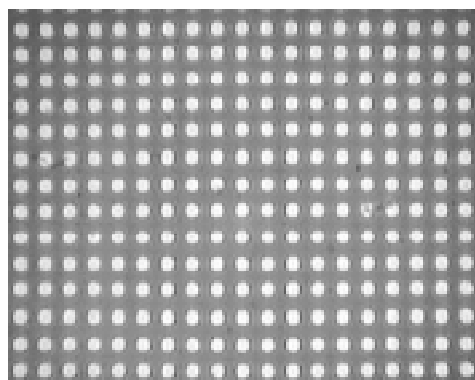


Рис. 5. Фотография фрагмента матрицы фотодиодов с индиевыми контактами

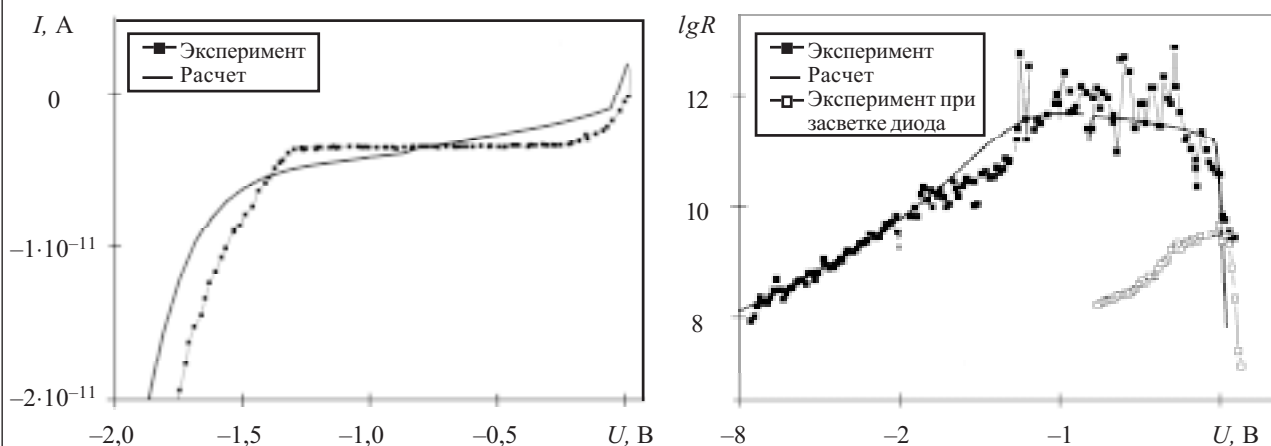


Рис. 7. Типичная темновая вольт-амперная характеристика (а) и зависимость дифференциального сопротивления R от напряжения смещения (б) для фотодиодов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x = 0,282$, $\lambda_{\text{co}} = 5,78$ мкм при $T=78$ К

но-лучевой эпитаксии или жидкофазной эпитаксии на монокристаллических подложках GaAs с использованием CdZnTe -буфера или на монокристаллических подложках CdZnTe . Толщина эпитаксиальных слоев составляла 8—18 мкм, исходная концентрация дырок $N_p = (0,7—1,5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu = 400—500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Фотодиоды n^+p -типа размерами 25×25 мкм формировались методом ионной имплантации атомов бора с энергией 50—100 кэВ и дозой около $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Разработанный теоретический метод моделирования электрических параметров фотодиодов [6] позволяет проанализировать ВАХ и зависимости динамического сопротивления от напряжения на диоде с целью определения параметров структуры и дальнейшей их оптимизации. Модель тока для $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -фотодиода учитывает следующие транспортные механизмы: диффузионный ток I_{diff} , термический генерационно-рекомбинационный ток Шокли–Рида–Холла I_{SRH} и туннелирование I_{TAT} через локализованные ловушечные уровни в запрещенной зоне в p - n -переходе, туннельный межзонный ток I_{BTB} , а также термический ток в квази-нейтральных областях $I_{\text{SRHn,p}}$, ток Оже I_{Au} , излучательный рекомбинационный ток I_{rad} в p - n -переходе и в квазинейтральных областях. Все эти токи являются независимыми и суммируются, за исключением I_{SRH} , $I_{\text{SRHn,p}}$, I_{TAT} , поскольку их интенсивность зависит от заполнения локализованных ловушечных состояний. Токи I_{SRH} , I_{TAT} моделируются в приближении баланса носителей на ловушках [6, 7]. Предполагалось наличие локализованных ловушечных центров донорного типа в запрещенной зоне шириной E_g с энергией $E_t = (0,6—0,75)E_g$ над краем валентной зоны [8, 9].

Коротко суть метода уравнений баланса можно выразить следующим образом. Свободный носитель может быть захвачен локализованной ловушкой или эмитировать с нее термическим забросом или туннелированием. Вероятность этих процессов определяется заселенностью ловушки, ее положением в p - n -переходе и приложенным напряжением. Плотность такого генерационно-рекомбинационного тока получается путем ин-

тегрирования темпов рекомбинации по координате внутри p - n -перехода. Возникающие интегралы аналитически не вычисляются, поэтому делается это численно. Таким образом, учитывая известные электрофизические параметры подложки и слоев и подбирая неизвестные, можно вычислить вольт-амперные характеристики фотодиодов для различной температуры и стехиометрического состава. Основные электрофизические параметры фотодиода $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,282$), при которых рассчитывались приведенные на рис. 7 зависимости, следующие: энергия уровня ловушек $E_t = 0,73E_g$, концентрация доноров в n -слое $N_d = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация акцепторов в p -слое $N_a = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, концентрация ловушек в области p - n -перехода $N_t = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, время жизни носителей $\tau_{n,p} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

Для полученных фотодиодов доминирующими составляющими тока являются туннелирование через ловушки I_{TAT} и термическая генерация-рекомбинация типа Шокли–Рида. При рабочих напряжениях смещения суммарная их величина составляет $(1—2) \cdot 10^{-12} \text{ А}$. Диффузионный ток вместе с остальными (Оже, радиационный, межзонного туннелирования и др.) при таких смещениях значительно меньше — $(1—1,5) \cdot 10^{-13} \text{ А}$. При увеличении напряжения смещения сумма $I_{\text{TAT}} + I_{\text{SRH}}$ возрастает сначала медленно, почти линейно, а при обратных смещениях, больших 2 В — экспоненциально за счет быстрого опустошения ловушек путем туннелирования электронов с них. При еще больших обратных смещениях (2,5 В) ток межзонного туннелирования становится доминирующим и происходит электрический пробой диодов.

Измеренные темновые токи при рабочих обратных смещениях имеют значения порядка 10 пА, а $R_0 A \approx 1 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ (R_0 — сопротивление фотодиода при нулевом смещении, A — площадь фотодиода), что свидетельствует о высоком качестве исследуемых структур. Моделирование токов позволило определить микропараметры структуры и указать пути к дальнейшему улучшению технологии изготовления крупноформатных массивов фотодиодов средневолнового инфракрасного спектрального диапазона (3—5 мкм).

Характеристики тепловизионного приемника

Фотоэлектрические свойства опытного образца фотоприемного устройства измерялись с помощью регистрации шумов каждого из пикселей матрицы 128×128 и измерения фотоответа от разных потоков эталонного излучателя — абсолютно черного тела HGN DCN1000 с размером выходного отверстия 180 мкм и точностью установления температуры $0,005$ К. Это позволяет определить параметр NEDT — температурную разницу, эквивалентную шуму. Для исследованного образца эта величина составляла 20 ± 10 мК, что является достаточно высоким результатом. Гистограмма распределения измеренной величины NEDT по элементам матрицы приведена на **рис. 8**.

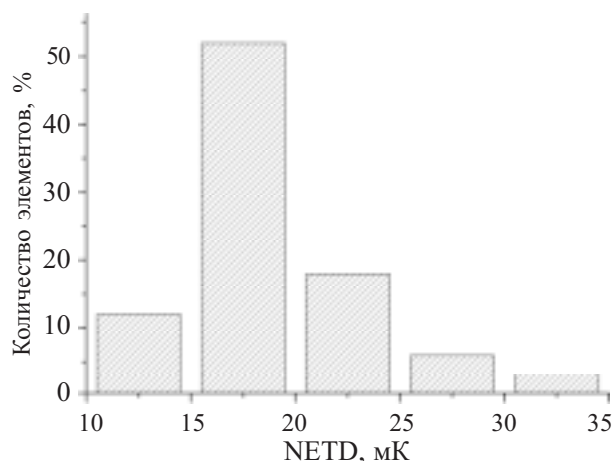


Рис. 8. Распределение величины NEDT по элементам матрицы 128×128

На **рис. 9** представлено изображение фрагмента микросхемы в спектральном диапазоне $3 - 5$ мкм, полученное с помощью разработанного макета тепловизионной камеры.

Отличительными особенностями данного тепловизионного приемника являются: низкая потребляемая мощность (менее 50 мВт), небольшое количество управляющих (5, включая питание и землю) и информационных сигналов (один видеовыход и 3 выходных импульса синхронизации), высокая частота кадров (до 200 Гц), управление режимами работы фотоприемника интегрированным в схему считывания последовательным портом, динамический диапазон более 80 дБ при максимальном уровне выходного сигнала 3 В.

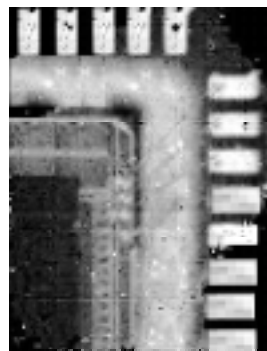


Рис. 9. Изображение фрагмента микросхемы в ИК-диапазоне (пространственное разрешение системы — 50 мкм)

Таким образом, разработанное тепловизионное устройство для средней части ($3 - 5$ мкм) спектрального ИК-диапазона на основе фотоприемного модуля, состоящего из 128×128 CdHgTe-элементов, может быть использовано в системах с высокой разрешающей способностью по температуре.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kinch. M. A. Fundamentals of infrared detector materials.— SPIE Press, Bellingham, 2007.
2. Сизов. Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения в невидимых участках спектра.— Киев: Академперіодика, 2008.
3. Рева В. В., Сизов Ф. Ф. Проектирование схемы считывания для матриц ИК-фотодиодов среднего диапазона длин волн // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 6.— С. 56—60.
4. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего диапазонов спектра на основе фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // ФТП.— 2005.— Т.39, вып. 10.— С. 1257—1265.
5. Сизов Ф.Ф., Забудский В.В., Голенков А.Г. и др. Методика измерения темновых токов полупроводниковых многоэлементных структур при криогенных температурах // Контрольно-измерительные приборы и автоматика.— 2007.— № 1.— С. 4—7.
6. Anderson W. W., Hoffman H. J. Field ionization of deep levels in semiconductors with applications to $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ p-n junctions // J. Appl. Physics.— 1982.— V. 53, N.12.— P. 9130—9145.
7. Gumenjuk-Sichevska J. V., Sizov F. F. Currents in narrow-gap photodiodes // Semicond. Sci. Techn.— 1999.— V. 14.— P. 1124—1133.
8. Yoshino J., Morimoto J., Wada H. et al. Studies of relationship between deep levels and RA product in mesa type HgCdTe devices // Opto-Electronics Review.— 1999.— V. 7.— P. 361—367.
9. Krishnamurthy S., Berding M.A., Robinson H., Sher A. Tunneling in long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes // Journal of Electronic Materials.— 2006.— V. 35(6)— P. 1399—1402.

С. Ю. МУРОВ

Россия, Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
E-mail: ncdf@mail.ru

Дата поступления в редакцию
28.07.2010 г.

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

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОБЫЧНОЙ РАЗВОДКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ПОЛИГОНАЛЬНУЮ

Описан метод преобразования традиционной разводки печатной платы в полигональную с предварительным рассмотрением вопросов построения триангуляции Делоне, диаграммы Вороного и эквидистанты к контуру.

Печатные платы для мощных радиопередающих устройств и устройств силовой электроники имеют свои особенности и существенные отличия от печатных плат устройств другого назначения. Как правило, это двухслойные платы, причем для минимизации перекрестных помех нижний слой выполнен сплошным («земля»). На верхнем — однослойная разводка, полигональная, т. е. когда проводники представлены не линиями определенной ширины, а плоскими фигурами, разделенными зазорами, — многоугольниками, занимающими все доступное свободное пространство.

В мировой практике отсутствуют специализированные средства автоматизированного проектирования мощных радиоэлектронных устройств и устройств силовой электроники, а использование универсальных САПР — SPECCTRA (фирма Cadence, США), EXPEDITION (фирма Mentor Graphics, США), SITUS (фирма Altium, Австралия – США), CADSTAR (фирма Zuken, Япония) — не дает практического эффекта, что приводит к необходимости применения ручных методов, трудоемких и технически ограниченных. В настоящее время разводка подобных плат — исключительно ручной процесс.

В данной работе описан метод преобразования традиционной разводки печатной платы в полигональную с предварительным рассмотрением вопросов построения триангуляции Делоне, диаграммы Вороного и эквидистанты к контуру.

Триангуляция Делоне

Триангуляция Делоне [1] — это такое разбиение плоскости на треугольники (рис. 1), что окружность, описанная вокруг любого из них не содержит внутри себя вершин других треугольников (рис. 2). Количество ребер в триангуляции меньше, чем утроенное число вершин, а треугольников — меньше чем удвоенное. Триангуляция Делоне может быть получена из любой другой триангуляции с помощью последова-



Рис. 1. Триангуляция Делоне

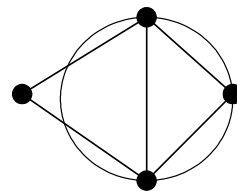


Рис. 2. Круговой критерий

тельности так называемых флипов. Флипом ребра называется замена его на ребро, соединяющее противоположащие вершины инцидентных ему треугольников (рис. 3).

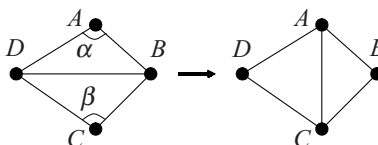


Рис. 3. Флип ребра

Триангуляция Делоне обладает многими полезными свойствами, в том числе и тем, что любая вершина триангуляции всегда соединена ребром с ближайшей к ней вершиной. Это позволяет использовать такую структуру для быстрого определения расстояний от одной вершины до ближайших к ней вершин, причем узнать именно величину этого расстояния, а не только ответить на вопрос, не меньше ли это расстояние, чем заданная величина h . Вершинами триангуляции выступают контакты и барьеры. Круглые контакты представляются одной вершиной, некруглые — несколькими.

Флип ребра, согласно круговому критерию триангуляции Делоне, выполняется, если сумма противолежащих ребру углов больше 180 градусов (см. рис. 3), то есть $\alpha + \beta > \pi$.

Построение триангуляции рабочего поля

Алгоритмов построения триангуляции существует довольно много [1]. Будем использовать алгоритм включения новой вершины в уже имеющуюся триангуляцию.

Начальная триангуляция состоит из четырех вершин прямоугольника, ограничивающего область трассировки (рис. 4). Для включения новой вершины в триангуляцию необходимо определить треугольник, в который она попадает. Для этого используется метод

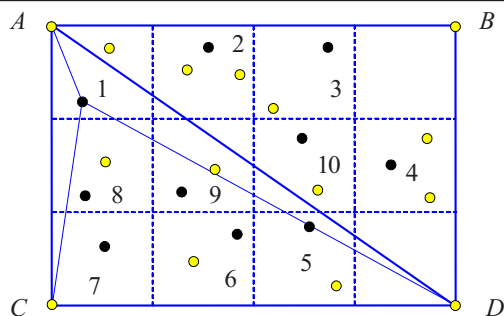


Рис. 4. Построение триангуляции Делоне (толстыми линиями показаны ребра первоначальной триангуляции габаритного прямоугольника $ABCD$, опорные точки — черные, цифра рядом — порядок включения)

опорных точек. Опорными точками выступают вершины, уже включенные в триангуляцию. Искомый треугольник определяется следующим образом.

Опорная точка соединяется с новой вершиной отрезком. Определив, которое из трех ребер пересекает этот отрезок, переходим из треугольника, содержащего опорную точку, в соседний, и так до тех пор, пока отрезок пересекает ребра. Очевидно, для того чтобы алгоритм работал быстрее, опорная точка должна находиться как можно ближе к включаемой вершине. Для этого рабочее поле разбивается на некоторое количество областей — карманов, каждому карману назначается опорная вершина, находящаяся внутри него (см. рис. 4). Опорной точкой для верши-

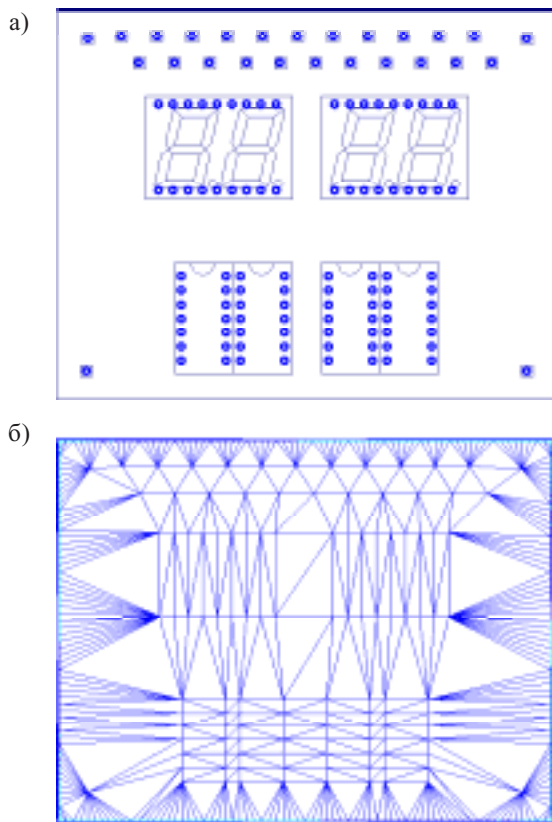


Рис. 5. Внешний вид (а) и триангуляция рабочего поля (б) печатной платы

ны кармана служит опорная вершина предыдущего кармана, а опорной вершиной первого кармана выступает одна из вершин габаритного прямоугольника. Опорные вершины карманов включаются в триангуляцию первыми, в порядке, указанном на рис. 4. Включение вершины в триангуляцию заключается в том, что она соединяется тремя ребрами с вершинами найденного треугольника, а затем противоположные этой вершине ребра проверяются на соответствие критерию триангуляции Делоне. Если ребро не соответствует критерию, осуществляется флип этого ребра. После включения опорных вершин карманов в триангуляцию добавляются все оставшиеся вершины. На рис. 5 приведен пример триангуляции рабочего поля реальной печатной платы.

Диаграмма Вороного

Диаграмма Вороного [2, с. 295] конечного множества точек S на плоскости представляет такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества S , чем к любому другому элементу множества.

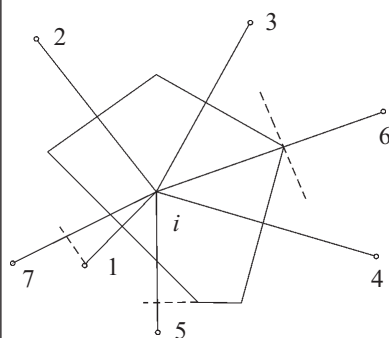


Рис. 6. Многогранник Вороного для центра i двумерной системы

Двумерный многогранник (многоугольник) Вороного показан на рис. 6. Плоскости Вороного, которые породили грани у данного многогранника, называются образующими плоскостями Вороного, а соответствующие центры системы — геометрическими соседями данного центра i . Среди геометрических соседей различают основные (естественные) и неосновные. Для первых середина отрезка, соединяющая его с центральным узлом, лежит на грани многогранника Вороного. Для вторых — вне грани и, следовательно, вне самого многогранника.

Многогранники Вороного, построенные для каждого центра $\{i\}$ системы, дают мозаику многогранников — разбиение Вороного (рис. 7).

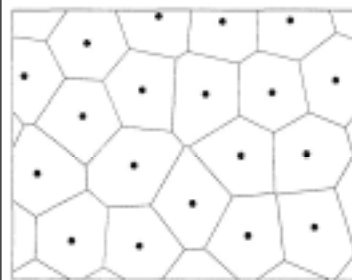


Рис. 7. Диаграмма Вороного на плоскости

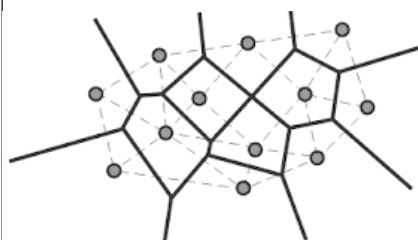


Рис. 8. Диаграмма Вороного и триангуляция Делоне (пунктир)

Диаграмма Вороного — структура, двойственная триангуляции Делоне и которая может быть построена на ее основе: каждый из многоугольников Вороного образован точками пересечения серединных перпендикуляров к ребрам триангуляции Делоне (рис. 8).

Эквидистанта

Эквидистанта для данной плоской кривой L — это множество концов равных отрезков, отложенных в определенном направлении (внешняя и внутренняя эквидистанты) на нормалях к L .

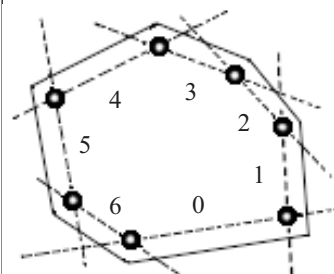


Рис. 9. Метод последовательного пересечения эквидистантных линий

Задача построения эквидистанты к выпуклому контуру достаточно проста. Необходимо для каждого из ребер контура построить параллельные линии на заданном расстоянии и найти точки пересечения линий, соответствующих смежным отрезкам контура (рис. 9).

Метод преобразования обычной разводки в полигональную

Исходная информация — топология слоя печатной платы, включающая контактные площадки компонентов, проводники и запреты трассировки (рис. 10).

Существующие программы заливки полигонов автоматически “выкусывают” с заданным зазором не принадлежащие цепи контакты и зоны запрета трассировки. Поэтому задача состоит в том, чтобы получить контуры металлизированных многоугольников, охватывающих эквипотенциальные контактные площадки, и уменьшить их на заданную для обеспечения требуемых зазоров величину. Решается задача в три этапа.

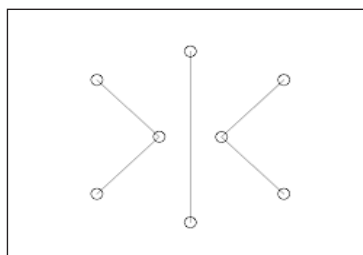


Рис. 10. Топология печатной платы

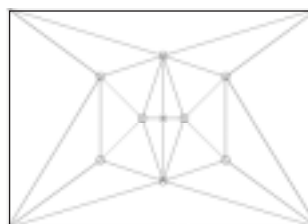


Рис. 11. Триангуляция Делоне

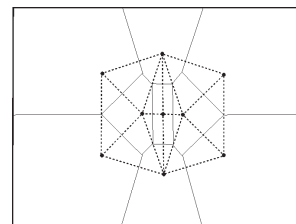


Рис. 12. Диаграмма Вороного

1. Построим триангуляцию Делоне, используя в качестве множества вершин контакты и вершины многоугольников, задающих зоны запрета (рис. 11). Введем дополнительные вершины, соответствующие точкам пересечения проводников и ребер полученной триангуляции (крестик в центре на рисунке), и перестроим триангуляцию с учетом добавленных вершин. Затем исключим вершины, соответствующие неподключенным на данном слое контактам и зонам запрета трассировки, и ребра, соединяющие вершины триангуляции с виртуальными вершинами на контуре платы.

2. На полученном в результате множестве вершин построим диаграмму Вороного (рис. 12). На этой диаграмме удаляются общие ребра смежных многоугольников, если эти многоугольники описаны вокруг эквипотенциальных вершин.

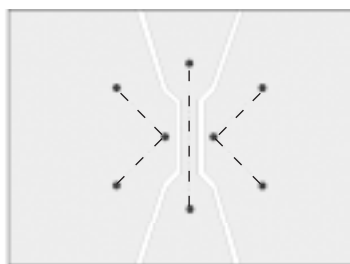


Рис. 13. Топология печатной платы с полигональной разводкой

3. Для каждой из полученных на плате областей строится внутренняя эквидистанта к контуру, отстоящая от него на половину величины заданного зазора. Контуры полученных полигонов передаются в программу, осуществляющую заливку полигона с выкусыванием не принадлежащих полигону областей (рис. 13).

Описанный метод позволяет автоматизировать процесс полигональной разводки печатных плат, которая нужна при проектировании мощных радиопередающих устройств, а также многослойных печатных плат, когда на опорном слое присутствует несколько различных цепей питания.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применения. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002.
2. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. — М.: Мир, 1989.

Д. т. н. В. И. ЛЕВИН

Россия, Пензенская государственная технологическая академия
E-mail: levin@pgta.ru

Дата поступления в редакцию
30.03 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. Е. ПАТРАЕВ
(ОАО «Информационные спутниковые
системы», г. Железногорск)

ЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Предложена автоматически-логическая модель надежности систем, в которой входные процессы автомата моделируют надежностные процессы в блоках системы, а выходные — надежностные процессы в самой системе.

При проектировании технических систем их обычно рассчитывают на надежность. Имеется множество источников, указывающих, как рассчитать нужную вероятностную характеристику (показатель) надежности системы по аналогичным характеристикам ее элементов. В качестве характеристик надежности обычно выбирают среднее время $T_{\text{ср}}$ безотказной работы или вероятность $P(t)$ безотказной работы за время t . Но вероятностные характеристики — не первичные величины, а результат их усреднения. Поэтому вероятностный расчет надежности системы не элементарен и для сколько-нибудь сложных систем сопряжен с большими трудностями. Кроме того, вероятностные характеристики надежности элементов не всегда могут быть определены из-за большой трудоемкости необходимых статистических испытаний. Наконец, разработка новых систем может требовать рассмотрения новых вероятностных характеристик надежности. В этих условиях кажется целесообразным построение такой теории и методов расчета надежности систем, где оперируют первичными (которые невозможно вывести из других) величинами, относящимися к надежности системы и ее элементов, и устанавливают связь между ними. Действительно, при таком подходе расчет надежности систем становится элементарным, что должно расширить класс анализируемых систем, отпадает необходимость в специальном изучении конкретных характеристик надежности систем, т. к. их всегда можно выразить через указанные первичные величины. К тому же, естественно ожидать, что опытное определение первичных характеристик надежности элементов проще, чем вероятностных.

В предлагаемой в данной работе теории первичными считаются последовательные моменты t_i отказов и восстановлений блоков (элементов) и аналогичные моменты T_k для системы в целом, а задача состоит в отыскании зависимостей $T_k = f_k(t_i)$ между

ними. Эта теория обладает не только всеми указанными выше достоинствами, но к тому же имеет и другие. Рассмотрим их.

1. Набор функций $\{f_k\}$ является наиболее полной качественной информацией о влиянии надежности блоков на надежность системы, т. к. по нему можно количественно предсказать надежностное поведение системы при любых значениях надежности ее блоков (в частности, вычислить те или иные характеристики надежности системы).

2. Сравнивать надежность систем можно даже в отсутствие числовых данных о надежности блоков. Равнонадежным системам соответствуют эквивалентные наборы $\{f_k\}$, более надежной системе соответствуют большие значения функций, выражающих моменты отказов, и меньшие значения функций, выражающих моменты восстановлений.

3. Можно изучать не только модели обычных систем, в которых надежность состояние системы в целом в любой момент времени полностью определяется надежностными состояниями ее блоков в тот же момент, но и модели систем с запоминанием предыдущих состояний.

4. Зная набор функций $\{f_k\}$, можно, наблюдая состояние блоков системы, прогнозировать ее индивидуальное надежностное поведение и на этой основе организовать рациональное техническое обслуживание.

В качестве модели надежности системы был выбран динамический автомат, на входы которого подаются надежностные процессы в блоках (импульс процесса определяет интервал работоспособности блока, пауза — интервал неработоспособности), а с выхода снимается аналогичный процесс для системы. (Надежностным процессом будем называть процесс последовательного изменения состояний системы, определяющий ее надежность). При этом оказалось, что функции влияния f_k всегда выражаются суперпозицией операций непрерывной логики, а это позволяет говорить о применимости логической теории надежности. Эта теория, помимо ее важного самостоятельного значения, полезна и при расчетах надежности по традиционной вероятностной теории, ибо, устанавливая логическую связь между первичными надежностными характеристиками системы и ее блоков, она облегчает расчет и компьютерное моделиро-

вание вероятностных характеристик надежности сложных систем, сводя его к известной задаче — отысканию (моделированию) распределения детерминированных функций от случайных аргументов.

Переключательные процессы

Рассмотрим произвольную двоичную функцию непрерывного времени t , генерируемую в некоторой системе (в частности, в технической), т. е. функцию $x(t)$, значения которой принадлежат множеству $\{0, 1\}$. Пусть эта функция удовлетворяет трем условиям: 1) значение функции x в момент ее изменения a совпадает со значением x при $t > a$; 2) значения x определены на интервале времени $(-\infty, \infty)$; 3) на любом конечном подынтервале указанного интервала имеется конечное число изменений значения функции.

Введенная функция называется переключательным процессом в системе.

Обозначим: 1 — постоянный процесс, равный единице на некотором интервале времени t ; 0 — постоянный процесс, равный нулю на некотором интервале времени t ; $1'$ — изменение значения процесса вида $0 \rightarrow 1$; $0'$ — изменение значения процесса вида $1 \rightarrow 0$; $0'_a$ — изменение $0'$ в момент a ; $1'_a$ — изменение $1'$ в момент a ; $1(a, b)$ — импульс $1'_a 0'_b$; $0(a, b)$ — пауза $0'_a 1'_b$. В соответствии с условием 1, в некоторой окрестности момента a изменения значения процесса определяются выражениями

$$1'_a = \begin{cases} 0, & t < a; \\ 1, & t \geq a; \end{cases} \quad 0'_a = \begin{cases} 1, & t < a; \\ 0, & t \geq a. \end{cases} \quad (1)$$

Согласно (1), импульс — это интервал единичных значений процесса, включающий начало и не включающий конец, а пауза — интервал нулевых значений процесса с аналогичными включениями:

$$1(a, b) = \begin{cases} 1, & a \leq t < b; \\ 0, & t < a \text{ или } t \geq b; \end{cases} \quad (2)$$

$$0(a, b) = \begin{cases} 0, & a \leq t < b; \\ 1, & t < a \text{ или } t \geq b. \end{cases}$$

Формулы (2) при $a=b$ принимают вид

$$1(a, a) \equiv 0; \quad 0(a, a) \equiv 1, \quad (3)$$

откуда видно, что импульс (пауза) с совмещенными началом и концом фактически есть отсутствие импульса (паузы), т. е. это вырожденный участок, и он может быть исключен из рассмотрения. Однако при этом из (3) следует возможность формально рассматривать отсутствие импульса (паузы), т. е. тождественный 0 (тождественную 1), как импульс (паузу) с совмещенными началом и концом, что часто бывает полезным. Отметим также возможность рассматривать изменения процесса (1) как импульс (паузу) на бесконечном интервале:

$$1'_a = 1(a, \infty) = 0(-\infty, a); \quad 0'_a = 0(a, \infty) = 1(-\infty, a). \quad (4)$$

Введем необходимые определения. Пусть $x(t)$ — любой переключательный процесс, отличный от тождественного 0 или 1; a_x — момент начала первого

изменения и b_x — момент окончания последнего изменения $x(t)$. Значение x_0 процесса при $t < a_x$ назовем его начальным значением. При этом будем говорить, что $x(t)$ начинается импульсом (паузой), если $x_0 = 0$ ($x_0 = 1$). Аналогично, значение x_∞ при $t > b_x$ назовем конечным значением процесса, говоря, что $x(t)$ оканчивается импульсом (паузой), если $x_\infty = 0$ ($x_\infty = 1$). Процессы $x(t)$, $y(t)$ назовем непересекающимися во времени, если $b_x \leq a_y$.

Общее число изменений значения переключательного процесса называется длиной L процесса. При $L \leq 1$ процесс называется простым, при $L \geq 2$ — сложным. Два переключательных процесса равны, если у них одинаковое число соответственно однотипных изменений, моменты которых совпадают. Два переключательных процесса считаем эквивалентными, если при любой численной конкретизации буквенных обозначений указанных моментов оба процесса становятся равными.

Будем записывать переключательные процессы в виде последовательности изменений с указанием момента изменения или в виде последовательности импульсов и пауз. Во втором случае для простоты будем опускать начальное и конечное постоянные значения, а моменты промежуточных изменений указывать один раз либо в импульсе, либо в соседней паузе. Например, один и тот же процесс можно записать в виде $x(t) = 1'_a 0'_b 1'_c 0'_d 1'_e$ или $x(t) = 1(a, b) 0(-, c) 1(-, d) 0(-, e)$.

Этот процесс до момента a равен 0, в интервале $a \leq t < b$ он равен 1, в интервале $b \leq t < c$ равен 0, в интервале $c \leq t < d$ — снова 1, в интервале $d \leq t < e$ — снова 0 и при $t \geq e$ принимает постоянное значение 1.

Двоичные операторы технических систем

Пусть имеется множество переключательных процессов $x_1(t), \dots, x_n(t)$. Закон G , по которому это множество преобразуется в переключательный процесс $y(t)$, называется двоичным оператором. Таким образом,

$$y(t) = G[x_1(t), \dots, x_n(t)]. \quad (5)$$

В технических системах $x_1(t), \dots, x_n(t)$ означают входные процессы, $y(t)$ — выходной процесс, G — оператор системы. Оператор, реализующий преобразование (5), называется n -местным по числу преобразуемых процессов. На операторном языке преобразуемые процессы $x_1(t), \dots, x_n(t)$ называются воздействиями на оператор G , а результирующий процесс $y(t)$ — реакцией оператора. Ограничимся рассмотрением операторов, удовлетворяющих следующему условию (принципу физической осуществимости): значение реакции $y(t)$ в любой момент времени t зависит только от значений воздействий $x_1(t_1), \dots, x_n(t_n)$ в предшествующие t_1, \dots, t_n или текущий t моменты ($t_1 < t, \dots, t_n < t$) и от значений самой реакции $y(t_*)$ в предшествующие моменты t_* ($t_* < t$). Если зависимость $y(t)$ от $y(t_*)$ существенна, оператор называется оператором с памятью, если несущественна — оператором без памяти. Число моментов t_{*1}, \dots, t_{*s} ($t_{*i} < t$), таких, что значение $y(t)$ существенно зависит от зна-

чений $y(t_{*1}), \dots, y(t_{*s})$, называется глубиной памяти оператора. Это число может быть конечным или бесконечным. В первом случае имеем оператор с конечной памятью, во втором — с бесконечной. Оператор без памяти называется временным, если $y(t)$ существенно зависит от значения воздействий $x_i(t_i)$ в предшествующие моменты $t_i (t_i < t)$, и логическим — в противном случае, т. е. если $y(t)$ зависит только от значений воздействий $x_1(t), \dots, x_n(t)$ в тот же текущий момент t . Для логического оператора зависимость (5) реакции от воздействий конкретизируется:

$$y = f(x_1, \dots, x_n), \quad (6)$$

где f — некоторая булева функция;
 x_1, \dots, x_n, y — соответственно мгновенные значения воздействий и реакции оператора в момент времени t .

Двоичный оператор можно задать с помощью уравнения, связывающего значение $y(t)$ со значениями $x_1(t_1), \dots, x_n(t_n), y(t_*)$, где $t_i \leq t, t_* < t$, посредством алгоритма, позволяющего вычислить значения $y(t)$ для любого t . Удобным способом задания произвольного оператора является его структурное представление в виде суперпозиции (схемы) из элементарных операторов. Элементарным считается оператор, который является простейшим, т. е. не может быть представлен суперпозицией более простых операторов. Удобство такого представления в том, что изучение произвольного оператора сводится к изучению существенно более простых элементарных операторов, число которых конечно.

Задачи изучения операторов технических систем можно разделить на три типа. Задача анализа оператора заключается в отыскании реакций $y(t)$ заданного оператора на заданные воздействия $x_1(t), \dots, x_n(t)$. Задача синтеза оператора состоит в построении оператора, преобразующего заданные воздействия $x_1(t), \dots, x_n(t)$ в требуемую реакцию $y(t)$. Под построением оператора понимается какое-нибудь конструктивное его задание — абстрактное или структурное (абстрактный или структурный синтез). Задача синтеза воздействий заключается в отыскании воздействий $x_1(t), \dots, x_n(t)$ на оператор по заданным оператору G и его реакции $y(t)$.

Элементарные операторы

Будем записывать любой переключательный процесс с неутонченным характером участков (импульсов и пауз) в виде

$$x(t) = u(a_1, a_2) \bar{u}(-, a_3) \dots u^{(-1)^m} (a_{m-1}, a_m), \quad u \in \{0, 1\}, \quad (7)$$

причем

$$u^p = \begin{cases} u & \text{при } p = 1; \\ \bar{u} & \text{при } p = -1, \end{cases} \quad (8)$$

где \bar{u} — отрицание u ;
 $m-1$ — показывает число участков.

Рассмотрим несколько элементарных временных операторов.

1. Оператор D_τ задержки на τ — это одноместный оператор, преобразующий воздействие $x(t)$ вида (7) в реакцию

$$\begin{aligned} y(t) &= D_\tau[x(t)] = x(t - \tau) = \\ &= u(a_1 + \tau, a_2 + \tau) \bar{u}(-, a_3 + \tau) \dots \\ &\dots u^{(-1)^m} (a_{m-1} + \tau, a_m + \tau), \end{aligned} \quad (9)$$

т. е. сдвигающий входной процесс $x(t)$ на постоянное время задержки τ .

2. Оператор D_τ^Φ фильтрации на τ — одноместный оператор, преобразующий каждый импульс и паузу $u(a_i, a_{i+1})$ воздействия (7) в реакцию

$$\begin{aligned} y(t) &= D_\tau^\Phi [u(a_i, a_{i+1})] = \\ &= \begin{cases} u(a_i + \tau, a_{i+1} + \tau), & a_{i+1} - a_i \geq \tau; \\ \bar{u}, & a_{i+1} - a_i < \tau, \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

т. е. сдвигающий входной процесс $x(t)$ на время τ и, кроме того, не пропускающий (фильтрующий) изменения $x(t)$, отстоящие друг от друга ближе, чем на τ .

3. Оператор достройки паузой до c — одноместный оператор, преобразующий воздействие $x(t)$ вида (7) в реакцию (достройка справа, $c > a_m$)

$$y(t) \equiv x_c(t) = \begin{cases} x(t), & u^{(-1)^m} = 0; \\ x(t) 0(a_m, c), & u^{(-1)^m} = 1, \end{cases} \quad (11)$$

или в реакцию (достройка слева, $c < a_1$)

$$y(t) \equiv {}^c x(t) = \begin{cases} x(t), & u = 0; \\ 0(c, a_1) x(t), & u = 1. \end{cases} \quad (12)$$

4. Оператор достройки импульсом до c — одноместный оператор, преобразующий воздействие $x(t)$ вида (7) в реакцию (достройка справа, $c > a_m$)

$$y(t) \equiv x^c(t) = \begin{cases} x(t), & u^{(-1)^m} = 1; \\ x(t) 1(a_m, c), & u^{(-1)^m} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

или в реакцию (достройка слева, $c < a_1$)

$$y(t) \equiv {}^c x(t) = \begin{cases} x(t), & u = 1; \\ 1(c, a_1) x(t), & u = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Операторы достройки выполняются раньше других элементарных операторов.

5. Оператор усечения до b — одноместный оператор, преобразующий воздействие $x(t)$ вида (7) путем взятия конъюнкции непрерывной логики моментов изменения $x(t)$ с данным моментом b (усечение справа) в реакцию

$$\begin{aligned} y(t) \equiv x(t \wedge b) &= u(a_1 \wedge b, a_2 \wedge b) \bar{u}(-, a_3 \wedge b) \dots \\ &\dots u^{(-1)^m} (a_{m-1} \wedge b, a_m \wedge b) \end{aligned} \quad (15)$$

или путем взятия дизъюнкции непрерывной логики данных моментов (усечение слева) в реакцию

$$y(t) \equiv x(t \vee b) = u(a_1 \vee b, a_2 \vee b) \bar{u}(-, a_3 \vee b) \dots$$

$$\dots u^{(-1)^m}(a_{m-1} \vee b, a_m \vee b). \quad (16)$$

Процесс $x(t \wedge b)$ отличается от процесса $x(t)$ заменой на интервале $b < t < \infty$ всех значений $x(t)$ конечным значением. Процесс $x(t \vee b)$ отличается от $x(t)$ заменой при $-\infty < t < b$ всех значений $x(t)$ начальным значением.

6. Оператор умножения — двухместный оператор, преобразующий пару воздействий $x_1(t), x_2(t)$, не пересекающихся во времени ($b_{x_1} \leq a_{x_2}$) и таких, что конечное значение процесса $x_1(t)$ совпадает с начальным значением процесса $x_2(t)$, в реакцию вида

$$y(t) = \begin{cases} x_1(t), & t < b_{x_1}; \\ x_2(t), & t \geq b_{x_1}. \end{cases} \quad (17)$$

Эта реакция называется произведением процесса $x_1(t)$ на $x_2(t)$ и обозначается

$$y(t) = x_1(t) \circ x_2(t). \quad (18)$$

Из (17) видно, что произведение процесса $x_1(t)$ на $x_2(t)$ до момента b_{x_1} окончания $x_1(t)$ совпадает с $x_1(t)$, с момента a_{x_2} начала $x_2(t)$ совпадает с $x_2(t)$, в интервале $[b_{x_1}, a_{x_2}]$ — равно конечному значению $x_1(t)$ (начальному значению $x_2(t)$). Оператор умножения подчиняется ассоциативному закону, т. е. при $b_{x_1} \leq a_{x_2} \leq b_{x_3}$

$$[x_1(t) \circ x_2(t)] \circ x_3(t) = x_1(t) \circ [x_2(t) \circ x_3(t)] = x_1(t) \circ x_2(t) \circ x_3(t), \quad (19)$$

но не подчиняется коммутативному закону, т. е. в общем случае выражение $x_1(t) \circ x_2(t)$ не совпадает с $x_2(t) \circ x_1(t)$.

7. Оператор разбиения — одноместный оператор, который разбивает процесс $x(t)$ вида (7) на два последовательных подпроцесса

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= u(a_1, a_2) \bar{u}(-, a_3) \dots \bar{u}(a_{i-1}, a_i), \\ \text{где } \bar{u} &= u \text{ или } \bar{u} \\ x_2(t) &= \bar{u}(a_i, a_{i+1}) \bar{u}(-, a_{i+2}) \dots u^{(-1)^m}(a_{m-1}, a_m), \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

при этом

$$x(t) = \begin{cases} x_1(t), & t < a_i; \\ x_2(t), & t \geq a_i. \end{cases} \quad (21)$$

Сравнение (21) с (17) показывает, что

$$x(t) = x_1(t) \circ x_2(t), \quad (22)$$

т. е. перемножение подпроцессов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ снова дает исходный процесс $x(t)$. Потому операторы умножения и разбиения взаимно обратны. Заключительное изменение в первом подпроцессе $x_1(t)$ разбиения (20) назовем точкой деления разбиваемого процесса $x(t)$. Точка деления имеет вид $1'_{a_i}$ или $0'_{a_i}$.

Рассмотрим несколько элементарных логических операторов [1]. Согласно (6), такой оператор можно

задать с помощью булевой функции, преобразующей мгновенное значение воздействий в любой момент t в мгновенное значение реакции, относящееся к тому же моменту.

1. Конъюнктор — двухместный оператор, преобразующий воздействия $x_1(t), x_2(t)$ в реакцию $y(t)$ согласно булевой конъюнкции

$$y = x_1 \wedge x_2. \quad (23)$$

2. Дизъюнктор — двухместный оператор, преобразующий воздействия $x_1(t), x_2(t)$ в реакцию $y(t)$ согласно булевой дизъюнкции

$$y = x_1 \vee x_2. \quad (24)$$

3. Инвертор — одноместный оператор, преобразующий воздействие $x(t)$ в реакцию $y(t)$ согласно булевой функции отрицания

$$y = \bar{x}. \quad (25)$$

4. Дизъюнктивный инвертор (оператор Вебба) — двухместный оператор, преобразующий воздействия $x_1(t), x_2(t)$ в реакцию $y(t)$ согласно булевой функции «отрицание дизъюнкции»:

$$y = \overline{x_1 \vee x_2}. \quad (26)$$

5. Конъюнктивный инвертор (оператор Шеффера) — двухместный оператор, преобразующий воздействия $x_1(t), x_2(t)$ в реакцию $y(t)$ согласно булевой функции «отрицание конъюнкции»:

$$y = \overline{x_1 \wedge x_2}. \quad (27)$$

Дизъюнктивный и конъюнктивный инверторы, строго говоря, не могут считаться элементарными операторами, т. к. они являются суперпозицией операторов (23)–(25). Однако на практике оба часто используются как элементарные операторы.

Структурное представление операторов без памяти

Для структурного представления операторов целесообразно разработать специальную методику перехода от произвольного содержательного описания оператора к его структурному представлению, т. е. к схеме, реализующей оператор в виде суперпозиции конечного числа элементарных операторов. Такой переход выполняется в два этапа — от содержательного описания оператора к его математическому описанию и от математического описания оператора к реализующей его схеме. Первый этап неалгоритмичен и выполняется неформально. Рассмотрим второй этап.

Реакция $y(t)$ оператора без памяти в любой момент времени t зависит от значений воздействий $x_1(t), \dots, x_n(t)$ в тот же момент t , а также от их значений $x_1(t_1), \dots, x_n(t_n)$ в некоторые предшествующие моменты t_1, \dots, t_n . Будем считать, что число таких предшествующих моментов для каждого воздействия конечно. Тогда зависимость реакции оператора без памяти от воздействий принимает вид

$$y(t) = f[x_1(t), x_1(t_{11}), \dots, x_1(t_{1m_1}); \dots; x_n(t), x_n(t_{n1}), \dots, x_n(t_{nm_n})], \quad (28)$$

где f — некоторая булева функция;

t — текущий момент времени;

$t_{ij} (t_{ij} < t)$ — предшествующие t моменты, значения воздействий в которых влияют на значение реакции в текущий момент t .

В частном случае, когда значения воздействий в предшествующие моменты несущественны, т. е. когда оператор логический, зависимость реакции от воздействий приобретает тот же вид, что и зависимость (6), т. е.

$$y=f(x_1, \dots, x_n). \quad (29)$$

Формулы (28), (29) дают математическое описание двух типов оператора без памяти — временного и логического.

Начнем с задачи структурного представления логического оператора, т. е. построения схемы, реализующей булеву функцию f из (29) в виде суперпозиции нескольких элементарных операторов f_i . При этом достаточно ограничиться только логическими операторами. Набор f_i , позволяющий реализовать любую функцию f , называется функционально полным или *базисом*. Образуют базис, например, следующие наборы: 1) конъюнктор и инвертор; 2) дизъюнктор и инвертор; 3) конъюнктор, дизъюнктор и инвертор; 4) оператор Вебба; 5) оператор Шеффера. Чтобы реализовать логический оператор в базисе 3, необходимо выполнить следующее:

— перейти от имеющегося представления оператора к соответствующей булевой функции f ;

— привести функцию f к эквивалентному выражению в дизъюнктивной или конъюнктивной или нормальной форме (ДНФ или КНФ) (см. в [1]);

— полученное выражение разложить по элементарным операциям — двухместным конъюнкции и дизъюнкции, используя сочетательный закон;

— каждой элементарной операции — конъюнкции, дизъюнкции и отрицанию — поставить в соответствие элементарный логический оператор.

При необходимости между вторым и третьим этапами можно выполнить этап упрощения функции f . Для этого выражение f подвергается эквивалентным преобразованиям.

Для примера реализуем в приведенной последовательности логический оператор, для которого за-

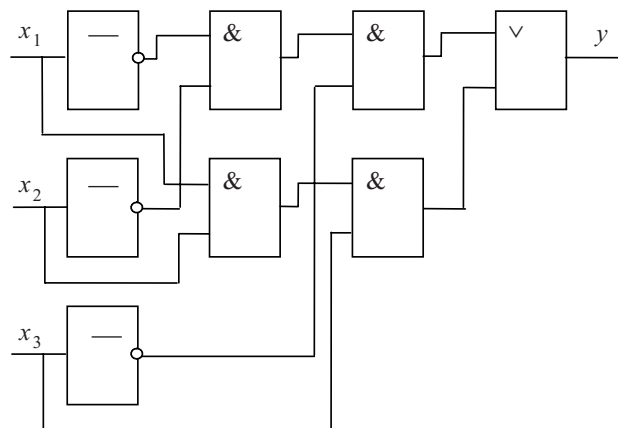


Рис. 1. Схема, реализующая логический оператор

зависимость реакции y от воздействий x_1, x_2, x_3 такова, что $y=1$ на наборах воздействий 000 и 111. Поскольку первый этап уже выполнен — функция $y=f(x_1, x_2, x_3)$ задана перечислением единичных наборов, сразу перейдем к определению ДНФ нашей функции: $y = \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 \vee x_1x_2x_3$. После этого получим $y = (\bar{x}_1\bar{x}_2)\bar{x}_3 \vee (x_1x_2)x_3$. В соответствии отрицаниям поставим инверторы, конъюнкциям — конъюнкторы, дизъюнкциям — дизъюнктор, в результате находим схему, реализующую логический оператор (рис. 1).

Итак, любой логический оператор можно представить структурно в виде логической схемы, построенной из элементарных логических операторов.

Перейдем к структурному представлению временного оператора. Построим схему, реализующую зависимость (28). Введем замену:

$$\begin{aligned} x_1(t_{11}) &= x_{n+1}(t), \dots, x_1(t_{1m_1}) = x_{n+m_1}(t); \\ x_2(t_{21}) &= x_{n+m_1+1}(t), \dots, x_2(t_{2m_2}) = x_{n+m_1+m_2}(t); \\ &\dots\dots\dots \\ x_n(t_{n1}) &= x_{n+\sum_{i=1}^{n-1} m_i+1}(t), \dots, x_n(t_{nm_n}) = x_{n+\sum_{i=1}^n m_i}(t). \end{aligned} \quad (30)$$

Тогда зависимость (28) примет вид булевой функции от расширенного множества аргументов

$$x_1, \dots, x_{n+\sum_{i=1}^n m_i}, \text{ T. e.}$$

$$y = f \left(x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+\sum_{i=1}^n m_i} \right), \quad (31)$$

в которой x_i и y — мгновенные значения воздействий и реакции оператора, взятые в один и тот же, произвольный момент времени. Функция (31) имеет тип (29), т. е. задает некоторый логический оператор.

Таким образом, задача структурного представления временного оператора распадается на две: структурное представление логического оператора и соотношений (30). Первая задача рассмотрена выше. Рассмотрим вторую.

Обратимся, например, к первому соотношению в (30). Учитывая, что $t_{11} < t$, т. е. $t_{11} = t - \tau_{11}$, где $\tau_{11} > 0$, запишем его как $x_{n+1}(t) = x_1(t - \tau_{11})$ или, используя оператор задержки D_{τ} , как

$$x_{n+1}(t) = D_{\tau_1} [x_1(t)]. \quad (32)$$

Очевидно, что любое соотношение (30) реализуется при помощи оператора задержки $D_{\tau_{ij}}$ с нужным временем задержки τ_{ij} . При этом для реализации всех соотношений в (30) нет нужды использовать соответствующее число операторов задержки. Действительно, соединяя последовательно несколько операторов задержки $D_{\tau_1}, \dots, D_{\tau_p}$, получаем новый опер-

тор D_τ с суммарным временем задержки $\tau = \sum_{i=1}^p \tau_i$.

Поэтому достаточно выбрать в качестве элементарного оператора D_τ с временем задержки τ — общим делителем всех интервалов времени $\tau_{ij}=t-t_{ij}$ в (30). Тогда реализация любого соотношения в (30) сведется к последовательному соединению нужного числа элементарных операторов D_τ .

Итак, любой временной оператор можно представить структурно в виде логической схемы, построенной из элементарных логических операторов и элементарного оператора задержки.

Математическая модель надежности системы

Рассмотрим модель произвольной системы (это может быть техническая, экономическая, биологическая и т. д. система), состоящей из N взаимодействующих подсистем, которые назовем блоками. В системе имеется n входов и r выходов. По входам система получает предусмотренные условиями ее работы полезные воздействия (физические входные сигналы, задачи, подлежащие решению, управляющие команды и т. д.) или вредные воздействия (помехи, вибрация, повышенная температура, влажность и т. д.), влияющие на ее надежность, причем каждый вход предназначен для воздействий одного типа. С выходов системы снимаются различные результаты ее работы (обработанные сигналы, решенные задачи, выполненные команды и т. д.), причем каждый выход характеризует какую-то одну функцию (один результат работы) системы.

Зададим надежностное состояние (НС) системы двоичным вектором

$$y=(y_1, \dots, y_r), y_i \in \{0, 1\}, \quad (33)$$

i -я компонента которого y_i характеризует НС i -го выхода системы

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если система работоспособна по } i\text{-й функции;} \\ 0, & \text{если система неработоспособна по } i\text{-й функции (частичный отказ } i\text{-го типа).} \end{cases} \quad (34)$$

Аналогично зададим НС совокупности блоков двоичным вектором

$$a=(a_1, \dots, a_N), a_i \in \{0, 1\}, \quad (35)$$

i -я компонента которого a_i характеризует НС i -го блока:

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й блок работоспособен;} \\ 0, & \text{если } i\text{-й блок отказал.} \end{cases} \quad (36)$$

Опишем НС совокупности входов системы вектором

$$x=(x_1, \dots, x_n), x_i \in \{0, 1\}, \quad (37)$$

i -я компонента которого x_i ($i=1, \dots, n$) характеризует НС i -го входа:

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{если система воспринимает воздействие } i\text{-го типа;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (38)$$

Описание входов системы при помощи двоичного вектора (37) годится и в более общем случае, когда важен не только сам факт наличия (отсутствия) воздействия каждого типа, но и значения этих воздействий. При этом множество возможных значений воздействия каждого типа i дискретизируется (если эти воздействия непрерывные) и кодируется двоичным кодом x_{i1}, \dots, x_{im_i} , причем последний заменяет x_i в основном коде (37).

Итак, надежностную ситуацию в системе в произвольный момент времени t можно полностью описать тремя векторами, а именно

$$z=(x, a, y), \quad (39)$$

где x — НС входов;

a — НС блоков;

y — НС выходов системы в момент t .

Описание (39) — статическое, относящееся к выбранному моменту времени. Поскольку все три вектора зависят от времени, надежностную эволюцию системы можно описать вектор-функцией

$$z(t)=[x(t), a(t), y(t)]. \quad (40)$$

Такое описание — динамическое, оно охватывает интервал времени функционирования системы. Первая компонента в (40) — вектор-функция $x(t)=[x_1(t), \dots, x_n(t)]$ — задает эволюцию НС входов системы, т. е. воздействия на входы системы. Здесь $x_i(t)$ — двоичная функция непрерывного времени t , описывающая эволюцию НС i -го входа, т. е. воздействие на i -м входе системы. Функция $x_i(t)$ имеет вид последовательности интервалов наличия и отсутствия i -го внешнего фактора, влияющего на надежность системы. Из физического смысла функции $x_i(t)$ следует, что она определена в любой момент бесконечного временного интервала $t(-\infty < t < \infty)$, причем на любом конечном его подынтервале $x_i(t)$ изменяется конечное число раз. Условимся, что значение функции $x_i(t)$ в момент ее изменения $t=a$ совпадает с ее значением при $t>a$. Таким образом, воздействия на входы системы $x_1(t), \dots, x_n(t)$ есть некоторые переключаемые процессы.

Вторая компонента в (40) — вектор-функция $a(t)=[a_1(t), \dots, a_N(t)]$ — задает эволюцию НС блоков системы, причем $a_i(t)$ — двоичная функция времени, задающая эволюцию НС i -го блока в виде последовательности интервалов наличия и отсутствия работоспособности блока. Аналогично предыдущему случаю, убеждаемся, что процессы надежностной эволюции блоков $a_1(t), \dots, a_N(t)$ являются переключаемыми. Назовем их надежностными процессами (НП) в блоках.

Третья компонента в (40) — вектор-функция $y(t)=[y_1(t), \dots, y_r(t)]$ — описывает эволюцию НС вы-

ходов системы, т. е. эволюцию работоспособности системы в отношении ее функций. Здесь $y_i(t)$ — двоичный процесс, задающий эволюцию НС i -го выхода, т. е. эволюцию работоспособности системы в отношении ее i -й функции; $y_i(t)$ имеет вид последовательности интервалов выполнения и невыполнения функции. Как и раньше, устанавливаем, что процессы надежностной эволюции выходов системы $y_1(t), \dots, y_r(t)$ — переключательные. Назовем их надежностными процессами на выходах системы.

Итак, надежностную эволюцию в системе можно полностью описать указанными тремя группами переключательных процессов. Эти группы процессов зависимы. Действительно, выполнение системой возложенных на нее функций определяется НП в блоках системы и входными воздействиями на систему. При этом выполнение системой любой i -й функции в любой момент времени t зависит только от значений НП в блоках и значений входных воздействий в тот же самый момент t и предшествующие моменты (и, возможно, от выполнения системой ее функций в предшествующие моменты времени). Таким образом,

$$\begin{aligned} y_1(t) &= G_1[x_1(t), \dots, x_n(t); a_1(t), \dots, a_n(t)]; \\ &\dots\dots\dots (41) \\ y_r(t) &= G_r[x_1(t), \dots, x_n(t); a_1(t), \dots, a_n(t)], \end{aligned}$$

где $G_i (i=1, \dots, r)$ — некоторые двоичные операторы, удовлетворяющие принципу физической осуществимости. Назовем эти операторы собственными надежностными операторами (**НО**) системы. Их совокупность

$$G=(G_1, \dots, G_r) \quad (42)$$

является наиболее полной надежностной характеристикой системы. Зная эту характеристику, можно из соотношений (41) вычислить НП на выходах системы при любых заданных входных воздействиях и НП в блоках системы. Получаемые НП $y_1(t), \dots, y_r(t)$ полностью характеризуют надежность работы системы. По ним, в частности, можно вычислить любой показатель надежности (**ПН**) системы, поскольку каждый ПН R есть некоторый функционал F от $y_1(t), \dots, y_r(t)$:

$$R=F[y_1(t), \dots, y_r(t)]. \quad (43)$$

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Выбор того или иного ПН системы зависит от назначения системы и надежностного режима ее работы — без восстановления или с восстановлением отказавших блоков. Для системы без восстановления основным ПН является наработка T до отказа, определяемая как интервал времени от момента t_0 начала эксплуатации системы до ее первого отказа. Другим ПН таких систем может служить функция готовности $K_r(t)$, определяемая как

$$K_r(t) = \begin{cases} 1, & \text{если система в момент } t \\ & \text{работоспособна;} \\ 0, & \text{если система в момент } t \\ & \text{неработоспособна,} \end{cases} \quad (44)$$

и функция надежности $P(t)$:

$$P(t) = \begin{cases} 1 & \text{при отсутствии отказов на интервале} \\ & [t_0, t]; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (45)$$

Функции $P(t)$, $K_r(t)$ невосстанавливаемой системы являются переключательными процессами одинакового вида

$$K_r(t)=P(t)=0'_{T'} \quad (46)$$

так что ПН $K_r(t)$, $P(t)$, T оказываются взаимозависимыми.

Для систем с восстановлением основными ПН служат функция готовности $K_r(t)$ (имеющая, в отличие от (46), вид переключательного процесса с несколькими изменениями) и ресурс V , определяемый как интервал времени от момента t_0 начала эксплуатации системы до момента ее окончательного (невосстанавливаемого) отказа. Используется и функция надежности $P(t)$, имеющая вид (46), а также коэффициент готовности K_r — доля времени, в течение которого система работоспособна:

$$K_r = \left[\int_{t_0}^{t_0+V} K_r(t) dt \right] / V, \quad (47)$$

т. е. является средним значением функции готовности $K_r(t)$ на интервале (t_0, t_0+V) .

Часто надежность восстанавливаемой системы характеризуют наработкой T_i между отказами, определяемой как интервал времени от момента очередного i -го восстановления системы до момента следующего после него отказа, и временем i -го восстановления T_{bi} . Как видно из (45), (47), готовность $K_r(t)$ является первичным ПН системы, через который выражаются другие ее ПН. Отметим, что при $T_i=T$, $T_{bi}=T_b$

$$K_r = T/(T+T_b). \quad (48)$$

Вычисление ПН по соотношению (43) требует знания критерия отказа системы. Этот критерий зависит от назначения системы, режима эксплуатации и т. д.

Если по условиям работы система должна выполнять одновременно все r своих функций, то критерием отказа системы является невыполнение хотя бы одной из этих функций (случай 1).

Если система должна выполнять по крайней мере одну из возможных функций, то критерий отказа — невыполнение всех r функций (случай 2).

Если система должна выполнять не менее p функций, безразлично каких ($1 < p < r$), то критерий отказа

— невыполнение не менее r - p каких-либо функций (случай 3).

Возможны и более сложные критерии отказа, учитывающие, например, неравноценность различных функций системы. Знание критерия отказа системы позволяет выразить ее ПН $K_r(t)$ и $P(t)$ через НП на выходах системы $y_1(t), \dots, y_r(t)$ следующим образом: для однофункциональной системы

$$K_r(t) = y_{\text{экв}}(t) = y(t);$$

для многофункциональной системы

$$K_r(t) = y_{\text{экв}}(t) = \begin{cases} \bigwedge_{i=1}^r y_i(t) & \text{в случае 1,} \\ \bigvee_{i=1}^r y_i(t) & \text{в случае 2,} \\ \bigvee_{s=p}^r \bigwedge_{i_1 \neq \dots \neq i_s} [y_{i_1}(t) \dots y_{i_s}(t)] & \text{в случае 3.} \end{cases} \quad (49)$$

Здесь $y_{\text{экв}}(t)$ — эквивалентный НП в системе, полученный объединением всех НП на выходах системы.

$$P(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_{\text{экв}}(\tau) = 1 \text{ при } 0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (50)$$

Таким образом, вычисление различных ПН системы сводится к одной, но более общей задаче — определению НП на выходах системы.

Введенные выше операторные зависимости (41) НП на выходах произвольной системы от НП на ее входах и в блоках задают надежность модель системы. Эта модель имеет две важные особенности:

1) работоспособность системы определяется не только работоспособностью ее блоков, но и внешними воздействиями на ее входы;

2) работоспособность системы в любой текущий момент времени может зависеть от работоспособности блоков и входных воздействий не только в этот, но и в предшествующие моменты (и, возможно, от предшествующих значений работоспособности системы).

Заключение

С математической точки зрения достоинство введенной надежности модели системы в виде операторной зависимости (41) в том, что ее структурным воплощением оказывается некоторый динамический автомат (типа приведенного на рис. 1), входные процессы которого связаны с его выходными процессами указанной зависимостью. Таким образом, вычисление НП на выходах системы по известным НП в ее блоках и на входах сводится к хорошо известным и детально разработанным в теории автоматов методам вычисления выходных процессов динамических автоматов по их входным процессам. Поскольку в статике в любой фиксированный момент времени выходные значения автомата связаны с его входными значениями суперпозицией операций двужанговой логики, а в динамике выходные процессы автомата связаны с его входными процессами суперпозицией операций непрерывной логики, можно говорить, что предложенная модель и вытекающие из нее теория и методы расчета надежности систем являются логическими.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Левин В. И. Логические методы в теории надежности. I. Математический аппарат // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2009. — Т. 15, № 4. — С. 873—884.
2. Левин В. И. Динамика конечных автоматов и надежность сложных систем // Автоматика и вычислительная техника. — 1976. — № 6. — С. 17—24.
3. Левин В. И. Введение в динамическую теорию конечных автоматов. — Рига: Зинатне, 1975.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



14-я Международная выставка компонентов и комплектующих для электронной промышленности



9-я Международная выставка технологического оборудования и материалов для производства изделий электронной промышленности

www.electronechexpo.ru

www.expoelectronica.ru

19 – 21 апреля 2011 г.
Москва, Крокус Экспо

К. т. н. Н. И. СИНЕГУБ, д. т. н. В. С. СИТНИКОВ

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

Дата поступления в редакцию
23.12 2009 г.

Оппонент к. т. н. А. И. ЦОПА
(ХНУРЭ, г. Харьков)

МИКРОПРОЦЕССОРЫ ЗВЕЗДООБРАЗНОЙ СТРУКТУРЫ С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Рассмотрен вопрос разработки оригинальных звездообразных структур микропроцессоров, в которых объединяются архитектуры суперскалярного микропроцессора и VLIW-процессора.

Решение задач, требующих выполнения значительных объемов вычислений в реальном масштабе времени наряду с миниатюризацией габаритов устройств, возможно лишь при наличии микропроцессорной техники с расширенными функциональными возможностями.

К особенностям компьютеров пятого поколения относят [1]:

— использование сверхсложных микропроцессоров высокой производительности с параллельно-векторной структурой, одновременно выполняющих десятки последовательных инструкций программы;

— применение большого количества (сотен) параллельно работающих процессоров, позволяющих строить системы обработки данных и знаний как в сети, так и вне ее.

Несмотря на достигнутые успехи, задача повышения производительности микропроцессоров (МП) и микропроцессорных систем остается актуальной. В этом направлении постоянно ведутся исследования, в том числе и в области компьютерной архитектуры и схемотехники, а также структурной организации микропроцессоров [2—5].

В [6] рассмотрена структурная организация микропроцессора с высоким внутренним параллелизмом, в которой объединены архитектуры суперскалярного микропроцессора и VLIW-процессора (VLIW — very long instruction word), что позволяет повысить производительность за счет получения в одном такте нескольких скалярных результатов (рис. 1).

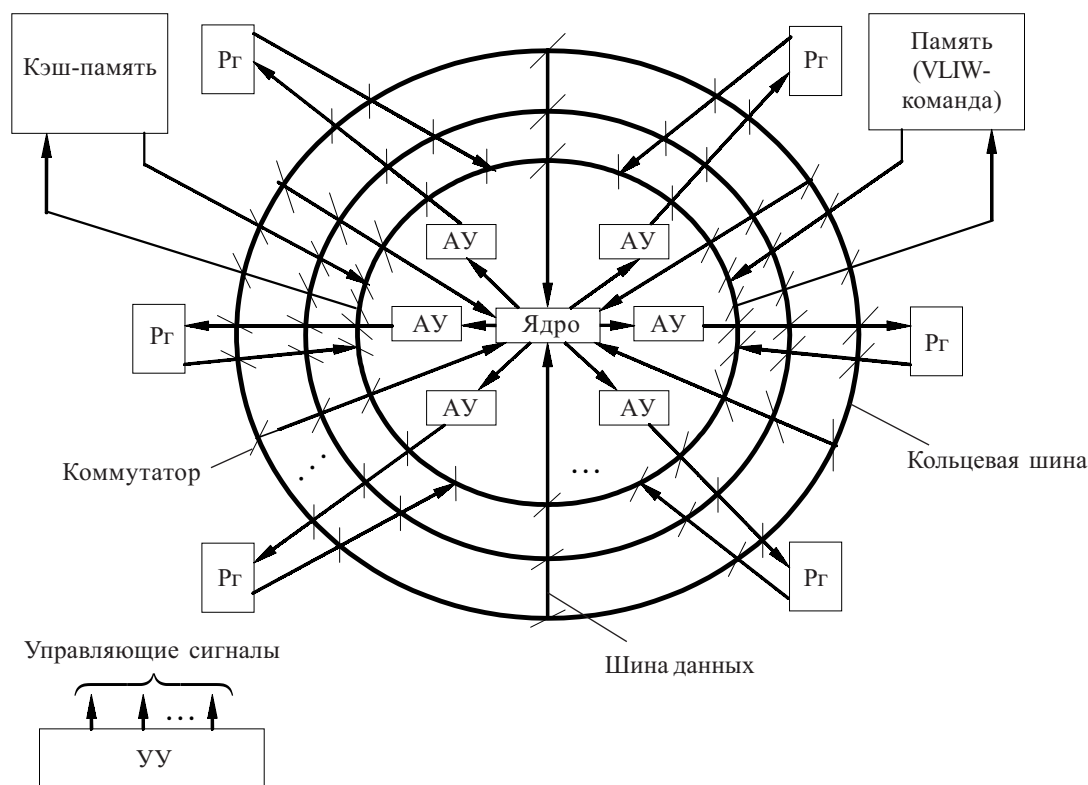


Рис. 1. Структурная организация микропроцессора с высоким внутренним параллелизмом

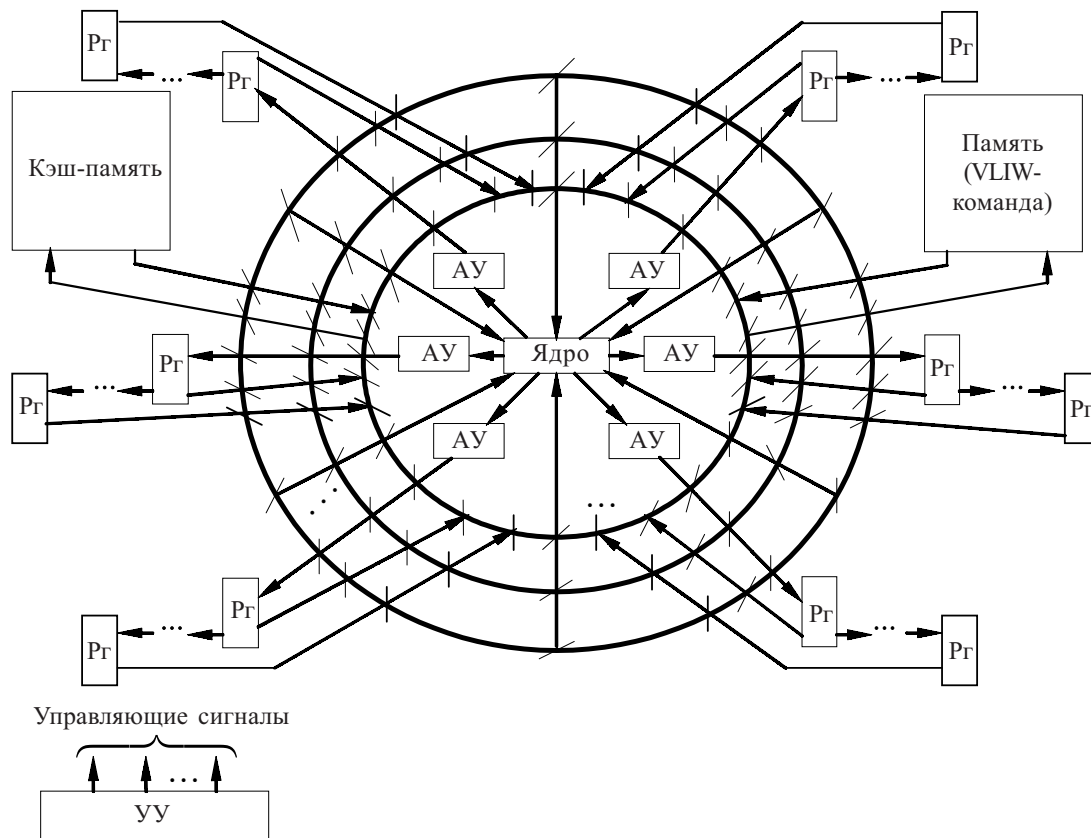


Рис. 2. Звездообразная структурная организация МП с дополнительными регистрами данных

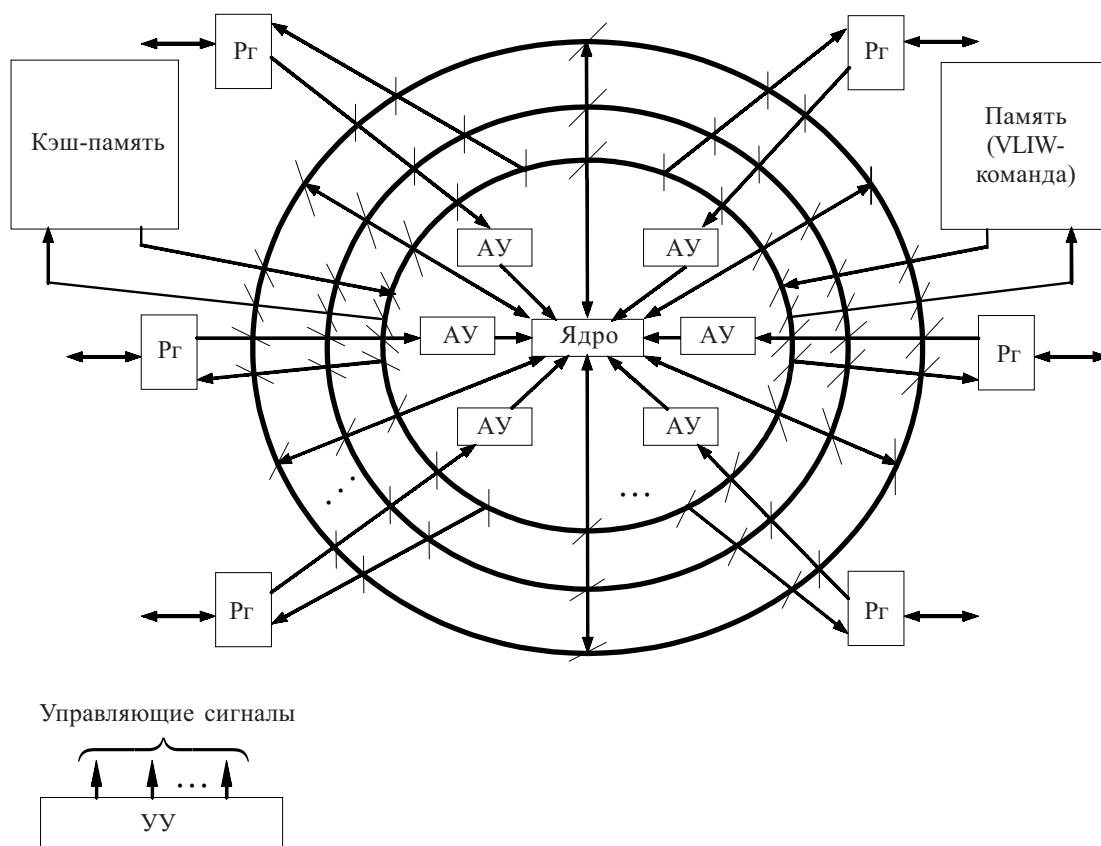


Рис. 3. Звездообразная структурная организация МП с инверсным потоком данных

На регистры ядра данного МП по соответствующим шинам данных поступают операнды, а также управляющие сигналы из командного слова [7], задающие режимы работы арифметических устройств (АУ). Сформированные на выходах АУ результаты обработки данных заносятся в регистры данных (Рг) (кэш-память, память, др.). В соответствии с VLIW-командой информация из любого Рг может быть либо записана в любой регистр ядра и обработана АУ, либо выведена на внешнее устройство МП. При этом устройство управления (УУ) формирует необходимые для функционирования МП управляющие сигналы и синхроимпульсы.

Расширяя функциональные возможности за счет увеличения числа регистров данных с целью повышения производительности МП, получим новую оригинальную звездообразную структуру МП (рис. 2).

Увеличение числа регистров данных позволяет организовать параллельную работу ядра МП и внешних регистров данных. Для этого при помощи VLIW-команды запускается хранящаяся в устройстве управления микропрограмма считывания данных с внешних регистров. При выполнении микропрограммы информация во внешних регистрах с целью сохранения фиксируется и затем последовательно считывается с применением одной из кольцевых шин, например, в кэш-память в соответствии с одним из известных протоколов обмена данными [8]. При этом остальные регистры данных могут быть использованы в протекающих параллельно со считыванием процессах обработки данных АУ. Наряду с рассмотренной операцией возможны и другие дополнительные операции обработки данных, также протекающие параллельно и повышающие производительность МП.

Таким образом, предлагаемая структурная организация МП — это структурная организация МП с более развитым внутренним параллелизмом.

В развитие идеи внутреннего параллелизма на рис. 3 предложена звездообразная структурная организация МП с инверсным потоком данных. Ее особенность состоит в том, что информация на АУ поступает с регистров данных, а не с регистров ядра, как в структурах на рис. 1 и 2.

Следует отметить, что шины данных при такой организации — двунаправленные. Это позволяет орга-

низовать специфические операции обработки данных. Например, возможен быстрый прием информации в оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) через регистры данных, и считывание информации из ОЗУ через регистры ядра на любое другое устройство МП или на внешнее устройство. Возможна также параллельная запись информации в несколько ОЗУ через один из регистров данных. Данные режимы работы МП могут быть использованы в различных устройствах регистрации информации.

Предложенная структурная организация МП позволяет организовать и другие протекающие параллельно операции обработки данных с целью повышения производительности МП. Следует отметить, что возможен вариант структуры микропроцессора, в которой объединяются характерные особенности рассмотренных выше структур МП.

Таким образом, положительный эффект повышения производительности МП в предложенных структурных организациях достигается за счет использования и дальнейшего развития присущего им внутреннего параллелизма, позволяющего параллельно организовывать различные дополнительные операции по обработке данных и их обмену.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бройдо В. Л., Ильина О. П. Архитектура ЭВМ и систем: Учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2009.
2. Самофалов К. Г., Луцкий Г. М. Структуры и организация функционирования ЭВМ и систем. — К.: Вища школа, 1978.
3. Бабич Н. П., Жуков И. А. Основы цифровой схемотехники: Учебное пособие. — М.: Додэка-XXI, 2007. К.: МК-Пресс, 2007.
4. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: Учеб. пособие для вузов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007.
5. Бойт К. Цифровая электроника. — М.: Техносфера, 2007.
6. Синегуб Н. И. Микропроцессор звездообразной структуры // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 14—15.
7. Корнеев В. В., Киселев А. В. Современные микропроцессоры. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
8. Бойко В. И., Гуржий А. Н., Жуйков В. Я. и др. Схемотехника электронных схем. Микропроцессоры и микроконтроллеры. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004.

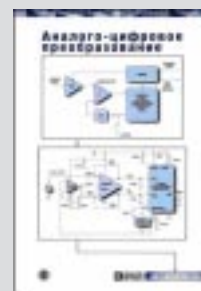
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование. — М.: Техносфера, 2007.

Книга написана для инженеров-конструкторов, которые используют преобразователи данных и связанные с ними вспомогательные схемы, поэтому в ней приведено много практических советов. Большая часть материала с необходимыми обновлениями была взята из предыдущих популярных выпусков книг для семинаров Analog Devices. Для более четкого изложения материала многие разделы подверглись переработке с привлечением технических специалистов Analog Devices.



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

Украина, г. Киев, Центр «Микроаналитика» Института
микроприборов НАНУ, ОАО «Квазар»
E-mail: popovmc@i.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
23.01 2010 г.

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

ЛОКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ В СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

Исследованы электрически активные дефекты с локально повышенной проводимостью p - n -перехода и световой эмиссией. Показано, что по их концентрации можно контролировать качество солнечных батарей в процессе изготовления.

Повышение эффективности функционирования солнечных батарей (СБ) непосредственно связано со снижением концентрации дефектов с повышенной проводимостью в p - n -переходах. Известно, что наличие электрически активных дефектов (ЭАД), оказывающих шунтирующее влияние на p - n -переходы СБ, сопровождается ухудшением эксплуатационных характеристик приборов — понижением напряжения холостого хода и коэффициента заполнения [1]. Наличие указанных дефектов снижает КПД солнечных батарей при работе в условиях пониженной освещенности [2]. Поэтому ЭАД, шунтирующие p - n -переходы СБ, в последнее время исследуются особенно интенсивно [3]. Развиваются и совершенствуются методы локализации дефектов [4, 5], расширяются представления о физико-химических свойствах ЭАД в СБ [6, 7]. Имеются работы по выявлению и исследованию ЭАД, обладающих электролюминесценцией при прямых напряжениях на p - n -переходах [8]. В то же время, дефекты, характеризующиеся световой эмиссией при обратных смещениях на p - n -переходах СБ, исследованы недостаточно.

В настоящей работе проведены комплексные исследования ЭАД с повышенной проводимостью в p - n -переходах СБ, характерной особенностью которых являлось наличие световой эмиссии в видимом диапазоне излучения, наблюдаемого при обратных смещениях на p - n -переходах. Сочетание оптической микроскопии высокого разрешения, жидкокристаллической термографии, растровой электронной микроскопии (РЭМ), включая режим токов, индуцированных электронным лучом (ТИЭЛ), локального рентгено-спектрального микроанализа (ЛРСМА), электрофизических измерений и других методов позволило определить локальные физико-химические свойства электрически активных электролюминесцентных дефектов (ЭАЭЛД). Полученные результаты представляют интерес для применения в целях контроля каче-

ства СБ на этапах разработки и серийного производства приборов, а также для оптоэлектроники при создании локальных источников световой эмиссии на основе кремния

Образцы и методика эксперимента

Исследованы пластины СБ, изготовленных различными производителями на основе кремния p -типа с удельным сопротивлением 1—10 Ом·см. Формирование p - n -переходов осуществлялось путем диффузии фосфора, глубина залегания находилась в пределах 0,2—0,4 мкм. Исследования проводились на пластинах СБ как после операции создания n^+ -слоя, так и после завершения всех технологических процессов (в готовых изделиях).

Первоначально определялось распределение дефектов с повышенной проводимостью в p - n -переходах при обратном смещении на основе выявления локальных источников повышенного тепловыделения, так называемых «горячих точек», методом жидких кристаллов (ЖК) [9]. Индикаторами «горячих точек» служили полимерная пленка с диспергированным в ней холестерическим ЖК и прозрачные ячейки с гомеотропно ориентированными молекулами такого ЖК в смектической фазе [10] и молекулами нематического ЖК.

После картографирования «горячих точек» по всей площади пластин проводился анализ распределения локальных источников световой эмиссии при обратном напряжении на p - n -переходе 10—15 В в готовых СБ и 15—20 В на пластинах после формирования n^+ -слоя. Визуализация отдельных источников света осуществлялась с помощью оптического микроскопа «Jena Tech» и встроенной в него высокочувствительной видеокамеры «Edmund Optics» с кремниевой ПЗС-матрицей (порог чувствительности — 0,02 лк) при увеличениях до 1000 раз. Разрешающая способность выявления ЭАЭЛД составляла около 1 мкм. Регистрация общего распределения источников световой эмиссии проводилась путем фотографирования в светоизолированной камере всей пластины цифровым фотоаппаратом (с емкостью ПЗС-матрицы 10^7 пикселей) при длительной экспозиции (более 10 секунд).

Исследованные пластины разрезались на части различных размеров (от 2×2 до 20×20 мм), в пределах которых фиксировался только один дефект либо дефекты отсутствовали. На одинаковых по площади

фрагментах пластин с одним дефектом, а также без дефектов измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ). Тип проводимости поверхности кремния в области наиболее крупных дефектов определялся с использованием теплового микроскопа (локальность порядка 5 мкм).

Выявленные дефекты исследовались с помощью растрового электронного микроскопа JSM IC845 «JEOL» в режимах вторичной электронной эмиссии и ТИЭЛ. Элементный состав технологических структур в ЭАД определялся методом ЛРСМА в режиме энергетической дисперсии на установке AN10000/95S «Link Analytical».

В ряде случаев отдельные ЭАЭЛД были исследованы с помощью метода электролиза деионизованной воды.

Экспериментальные результаты

Установлено, что распределения «горячих точек» на открытой поверхности пластин СБ (вне электродов) практически совпадают с распределением ЭАЭЛД, т. е. очевидно, что в обоих случаях их источником служат одни и те же дефекты. Наибольшее число дефектов обнаружено на краях пластин вдоль границы n^+ -слоя, образовавшейся в результате удаления этого слоя на торцах пластин при плазмохимическом травлении. При малых увеличениях дефекты выглядели, как отдельные светящиеся точки или их скопления. При больших увеличениях (500—1000 раз) дефекты, в основном, имели вид светящихся замкнутых или не полностью замкнутых контуров (рис. 1). В случае точечных источников излучения их размеры составляли менее микрометра, диаметр свечения замкнутых контуров достигал 20 мкм и более. Цвет свечения дефектов в подавляющем большинстве исследованных образцов был белым, а в отдельных случаях имел красноватый оттенок.

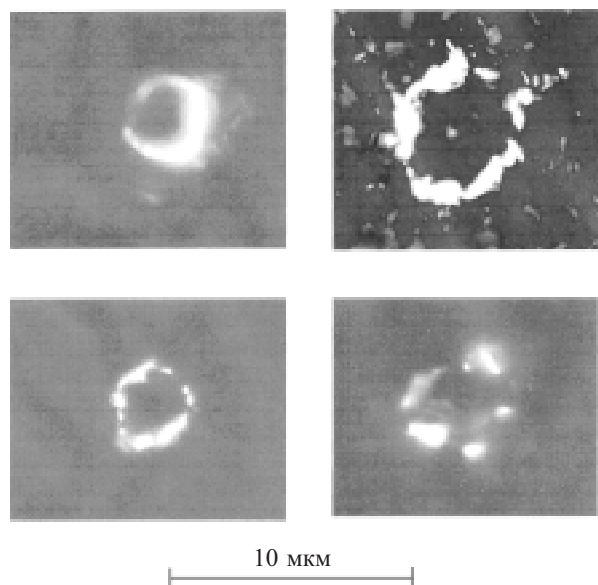


Рис. 1. Характерные примеры свечения в области электрически активных дефектов на пластинах солнечных батарей при обратном смещении на p - n -переходе

Электролюминесценцию дефектов наблюдали на образцах большинства известных европейских и отечественных изготовителей СБ на основе кремния. Следует подчеркнуть, что излучающие белый свет дефекты обнаруживались на всех технологических этапах изготовления СБ после формирования на пластинах кремния p -типа n^+ -слоя, т. е. после образования n^+ - p -перехода. Детальное сопоставление мест расположения «горячих точек» и электролюминесцирующих областей показало, что лишь в отдельных, немногочисленных случаях в областях «горячих точек» свечение не наблюдалось. Как правило, это были области наиболее высокой проводимости, для которых характерны локальные линейные ВАХ.

Анализ приведенных на рис. 2 данных показал, что обратный ток растет с увеличением количества регистрируемых визуально в темноте электролюминесцирующих дефектных областей. Следует отметить, что эта зависимость отражает только общую тенденцию, т. к. наблюдаемые ЭАЭЛД имели разные геометрические размеры и уровни электрической проводимости, а близкие по размерам излучающие области могут существенно (иногда на порядки) отличаться по уровню обратного тока. Минимальный уровень тока фрагмента пластины площадью около 5 мм² с отдельным ЭАЭЛД размером несколько микрон при визуальном регистрируемом в темноте пороге излучения составлял 35 мкА, что соответствовало интегральной плотности тока $7 \cdot 10^{-4}$ А/см², а минимальное обратное напряжение, при котором регистрировалось излучение, равнялось 3,6 В.

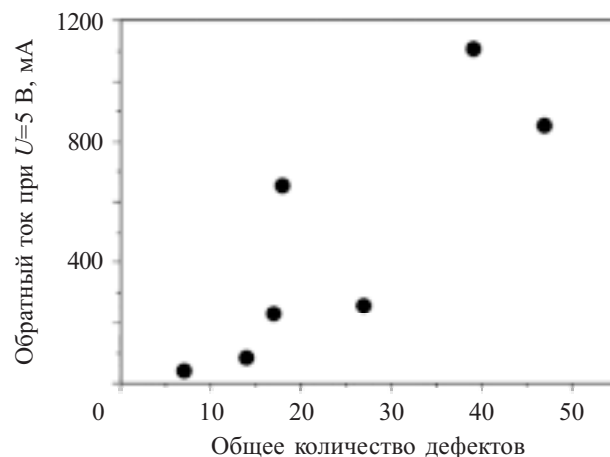


Рис. 2. Связь величины обратного тока с общим количеством ЭАЭЛД на пластине

На рис. 3 приведены обратные ветви ВАХ двух фрагментов пластин равной площади (4×4 мм), на одном из которых ЭАЭЛД не выявлены, а на другом визуально и с помощью холестерического ЖК при напряжении 10 В зарегистрирован отдельный ЭАЭЛД. Фрагменты вырезаны из пластины, прошедшей полный технологический цикл изготовления СБ. Обе части пластины СБ на лицевой поверхности имели одинаковые площади собирающих ток шин, покрывающих приблизительно третью часть поверхности, а с обратной стороны эти участки были металлизированы алюминиевой пастой. Из рисунка видно, что уро-

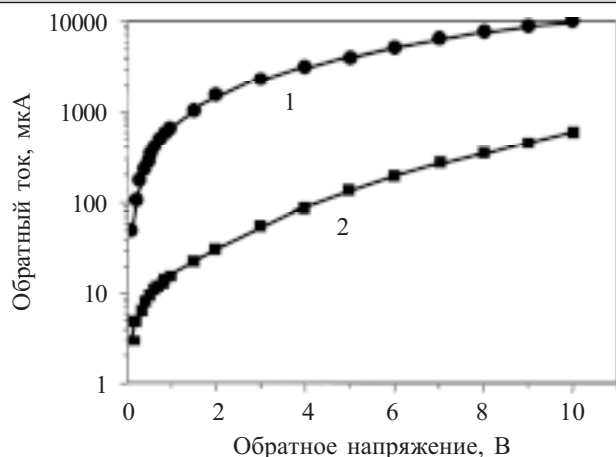


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ двух фрагментов, вырезанных из одной пластины, равной площади:
1 — участок с одним ЭАЭЛД; 2 — участок без дефектов

вень тока на участке с дефектом приблизительно в 50 раз больше тока бездефектного участка.

Установлено, что при обратном напряжении до 30 В обратные ветви ВАХ, измеренных на отдельных участках пластин без дефектов, имеют форму, типичную для n^+-p -переходов на кремнии с удельным сопротивлением несколько Ом·см. При обратном напряжении свыше 30 В наблюдается резкий рост тока $p-n$ -перехода с последующим появлением участка отрицательного сопротивления, и при дальнейшем увеличении тока имеет место деградация ВАХ $p-n$ -перехода. Обратные ВАХ пластин с ЭАЭЛД в диапазоне напряжения до и после появления излучения, но не более приблизительно 30 В имеют плавный характер без резких изменений формы, а при напряжении свыше 30 В ток, как и в случае бездефектных фрагментов СБ, резко возрастает. Свечение всегда начинает наблюдаться до начала пробоя по всей площади исследуемой пластины или ее фрагмента. Наиболее вероятной причиной свечения является развитие локального микропробоя в области дефектов. Не исключено, что в области ЭАЭЛД локальные условия зарождения лавинного пробоя (например, кривизна $p-n$ -перехода, величина электрического поля) более благоприятны, чем в среднем в СБ.

На рис. 4 представлены ВАХ одинаковых по площади фрагментов, вырезанных из бездефектной области пластин СБ и из области с одним крупным (≈ 20 мкм в диаметре) ЭАЭЛД, а также ВАХ самого дефекта. ВАХ дефекта была измерена с помощью вольфрамового зонда с диаметром закругления острия 7,5 мкм, приложенного к центральной области дефекта. Из рисунка видно, что ВАХ фрагментов (кривые 1 и 2) имеют обычный диодный вид, а для ВАХ дефекта (кривая 3) характерна линейность, свидетельствующая о том, что в его центральной области зонд образует практически омический контакт к кремниевой подложке.

Для исследования природы ЭАЭЛД выделяли участки пластин с достаточно крупными (≈ 20 мкм в поперечнике) излучающими дефектами, которые были расположены как вблизи края травления n^+ -диффу-

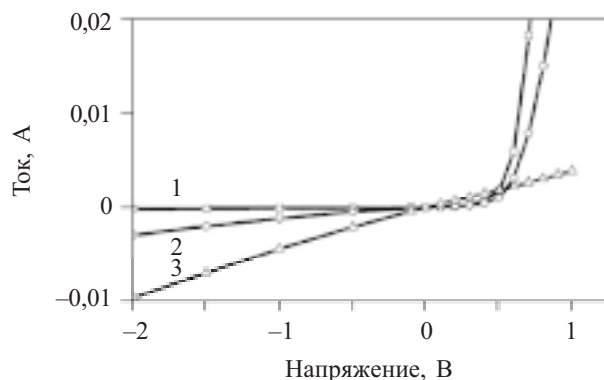


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики фрагментов пластин СБ:

1 — бездефектный участок пластины; 2 — участок пластины с ЭАЭЛД; 3 — ВАХ дефекта

зионного слоя, так и вдали от него. Принципиальных отличий в свойствах дефектов в зависимости от области их расположения на пластине не установлено.

Геометрическая форма светящейся области одного из исследованных крупных дефектов, в котором отсутствует слой антиотражающего покрытия, показана на рис. 5, а. Видно, что излучающая белая область этого дефекта имеет форму с достаточно четким контуром. Исследования типа проводимости кремния, проведенные с помощью игольчатого микротермозонда в области дефекта, показали, что внутри светящегося контура имеет место p -тип проводимости, а вне дефекта, как и ожидалось, — n -тип. На рис. 5, б показано изображение исследуемой области

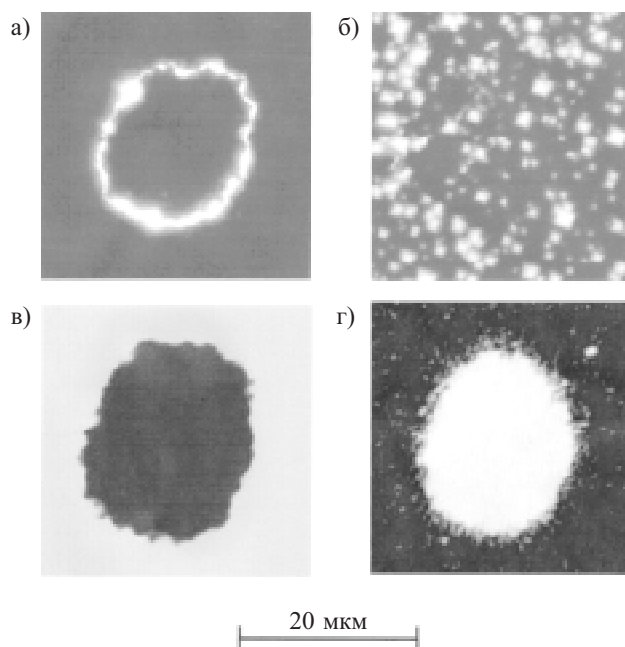


Рис. 5. Изображения области ЭАЭЛД в СБ в различных режимах наблюдения:

а — свечение в оптическом микроскопе; б — топография поверхности во вторичных электронах РЭМ; в — ток, индуцированный электронным лучом РЭМ; г — характеристическое рентгеновское излучение алюминия

ти с дефектом во вторичных электронах РЭМ. Наблюдаемые здесь светлые пятна являются вершинами пирамид текстурированной поверхности кремния.

Анализ области расположения дефекта в РЭМ в режиме ТИЭЛ выявил внутри светящегося контура ЭАЭЛД практически полное отсутствие индуцированного тока, т. е. отсутствие $p-n$ -перехода (рис. 5, в). Эта область по форме и местоположению практически совпадает с областью, ограниченной светящимся контуром. Проведенный в этой области локальный рентгеноспектральный микроанализ выявил характеристический пик атомов алюминия. На рис. 5, г показана эта же область в характеристическом рентгеновском излучении атомов алюминия. Видно, что по форме она также соответствует области, ограниченной контуром свечения дефекта. Изучение локальных рентгеноспектрограмм материала внутри контура свечения позволило оценить концентрацию алюминия на указанном участке. В пределах площади рассмотренного ЭАЭЛД концентрации алюминия и кремния на поверхности были приблизительно одинаковы.

В других исследованных дефектах, размеры которых были меньше рассмотренного выше, в различных точках области свечения среднее содержание алюминия в слое глубиной порядка 1 мкм, в основном, было ниже и составляло от 5 до 50% от концентрации кремния.

Обсуждение результатов

Полученные результаты дают основания считать, что в исследованных солнечных батареях ЭАЭЛД формируются в n^+ -диффузионном слое кремния в результате локальной диффузии атомов алюминия, которая приводит к компенсации свободных электронов в легированном фосфором слое и формированию области p^+ -типа проводимости. Если диффундирующие атомы алюминия, проникая через n^+ -слой, достигают подложки, то на всей площади диффузии образуется область p -типа. В результате на участке диффузии алюминия $p-n$ -переход исчезает, а на его месте поверхность кремния приобретает тип проводимости подложки, что подтверждается линейным характером ВАХ дефекта (см. рис. 4). На границе (по контуру) легированных алюминием областей с n^+ -слоем формируются $p-n$ -переходы с различными электрическими характеристиками, зависящими от условий их формирования. Эти $p-n$ -переходы включаются параллельно общему переходу СБ, сформированному диффузией, и в случае их локально высоких обратных токов шунтируют его. При приложении к СБ обратного электрического смещения эти переходы также включаются в обратном направлении и определяют характер ВАХ солнечных батарей. Именно отдельные участки этих $p-n$ -переходов становятся источниками излучения света.

Диффузия алюминия из локальных источников на поверхности кремния происходит во время проведения высокотемпературных операций формирования $p-n$ -перехода (при диффузии фосфора) и (или) на этапе вжигания металлизации, проводимой при температуре выше 900°C.

Наличие p -типа проводимости во внутренней области ЭАЭЛД и электрического поля по его внешней контуре, где наблюдается электролюминесценция, подтверждено также электролизом деионизованной воды, сопровождающимся выделением пузырьков водорода в области проводящего дефекта. С этой целью пластина СБ располагалась на металлическом столике, а над исследуемым дефектом помещалась специальная ячейка в виде прозрачного электрода (стеклянной пластинки, покрытой проводящим слоем SnO_2). Толщина слоя деионизованной воды между прозрачным электродом и поверхностью СБ была постоянной и составляла 20 мкм. Тонкий слой деионизованной воды в ячейке позволял точно фиксировать расположение пузырька непосредственно над дефектом. Пузырек водорода в области дефекта появлялся как при подаче напряжения между прозрачным электродом и подложкой СБ, так и при приложении обратного смещения к $p-n$ -переходу, когда электрод ячейки был пассивным. В первом случае при электрическом поле, перпендикулярном поверхности, наличие электролиза свидетельствовало о том, что область дефекта соединена с подложкой (p -тип проводимости выходит на поверхность кремния). Во втором случае электролиз указывал на присутствие электрического поля, параллельного поверхности СБ и образующегося между поверхностным n^+ -диффузионным слоем и областью дефекта, соединенной с подложкой p -типа. Интересно, что при таком подключении в процессе электролиза по внешнему контуру дефекта наблюдалась эмиссия света.

Следует отметить, что присутствие на поверхности СБ локальных участков с повышенной концентрацией алюминия не является достаточным условием формирования ЭАЭЛД. На поверхности кремния в СБ за пределами области ЭАЭЛД методом вторичной ионной масс-спектропии на установке IMS-4f «Cameca» зарегистрировано наличие отдельных областей с повышенной концентрацией алюминия, которые не вызывали свечения при обратных смещениях на $p-n$ -переходе. В этом случае, видимо, степень и глубина локального легирования алюминием не достаточны для перекомпенсации фосфора в диффузионном слое, для формирования p -области, достигающей подложки, и создания ЭАЭЛД. Кроме того, ускоренной диффузии алюминия в кремний на отдельных участках могут также способствовать и отдельные структурные дефекты на поверхности полупроводника.

Учитывая то, что при визуальном наблюдении светящихся дефектов мы видим только поверхностную картину, представляло интерес исследовать глубину излучаемой области. С этой целью проведен следующий эксперимент. Предварительно выбранный и исследованный фрагмент пластины СБ с излучающим светом дефектом был помещен в камеру установки ионного травления «Ion Tech» на предметный столик, обеспечивавший возможность подключения образца к источнику питания. Имея возможность наблюдать с помощью микроскопа свечение дефекта через специальное окно в рабочей камере, проводили послойное или непрерывное ионное травление поверхности

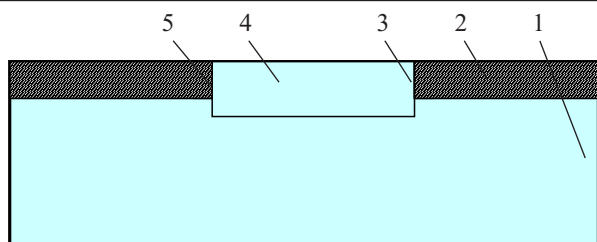


Рис. 6. Схематическое изображение области ЭАЭЛД на пластине СБ:

1 — подложка p -типа; 2 — диффузионная область n^+ -типа; 3, 5 — области электролюминесценции; 4 — область диффузии алюминия (p -тип)

образца в области дефекта до исчезновения свечения. Определив предварительно скорость травления таких образцов в аргоне, оценивали глубину стравленного слоя кремния в области дефекта в момент прекращения видимого излучения. Оказалось, что глубина стравленного слоя была практически равна глубине диффузии фосфора, т. е. толщине диффузионного n^+ -слоя. Этот результат указывает на то, что излучение на внешнем контуре дефектной области имеет объемный характер, т. е. поступает из слоя, приблизительно равного глубине p - n -перехода в СБ.

На основании всех вышеизложенных результатов предложена общая схема ЭАЭЛД в СБ на основе кремния, представленная на рис. 6. Выяснение физических механизмов, ответственных за возникновение свечения в указанных дефектах, требует дальнейших исследований.

По вопросу появления на поверхности пластин кремния посторонних примесей можно отметить следующее. Из анализа технологических процессов изготовления пластин СБ следует, что вероятность загрязнений пластин такими примесями как алюминий достаточно высока. Алюминий входит в состав паст, наносимых трафаретным способом на обратную сторону платины при формировании омического контакта к подложке и на лицевую сторону при создании токосъемных шин. Источником алюминия может быть и технологическая тара для транспортировки пластин в процессе производства. Однако загрязнение поверхности пластин, например, алюминиевой пастой даже после проведения последующих высокотемпературных отжигов (более 800°C) не всегда приводит к образованию наблюдаемых дефектов, что подтвердили проведенные нами эксперименты. Так, нанесение алюминиевой пасты на поверхность сформированного на пластине кремния диффузионного n^+ -слоя, с которого было удалено антиотражающее покрытие, и ее вжигание, имитирующее реальный технологический процесс, не всегда приводило к появлению ЭАЭЛД. Это свидетельствует о том, что формирование ЭАЭЛД происходит лишь при определенных условиях и в местах, где обеспечивается такой контакт атомов алюминия с поверхностью, при котором происходит его эффективная диффузия в кремний.

Для проверки этого вывода и для обеспечения явных условий взаимодействия слоя алюминия с кремнием проведены эксперименты, в которых алю-

миний через маску напылялся на освеженную поверхность диффузионного n^+ -слоя фрагментов пластин СБ методом термического испарения в вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. После формирования круглых алюминиевых электродов (толщина слоя алюминия $\approx 0,5$ мкм) образцы отжигали в течение 5—10 минут при температуре из диапазона 600 — 850°C на воздухе. Далее алюминий стравливался. После этого исследовались ВАХ и наличие видимого свечения, причем наибольшее внимание было обращено на области, с которых алюминиевые электроды были удалены. Анализ результатов исследований показал следующее.

ВАХ образцов, отжигавшихся при максимальных температуре (850°C) и времени, имели высокую проводимость и практически симметричный вид при обеих полярностях приложенного напряжения. Образцы, отожженные при наиболее низких температурах (600 — 700°C) имели ВАХ, близкие к характеристикам образцов до отжига. И только на отдельных образцах, прошедших отжиг при температурах 700 — 800°C , в областях, с которых были удалены электроды, появились аналогичные наблюдаемым на пластинах СБ светящиеся локальные области (рис. 7). Детальное исследование таких образцов с участками световой эмиссии показало, что в результате описанных технологических процедур были сформированы ЭАЭЛД, аналогичные выявленным и исследованным в пластинах СБ.

Этот эксперимент указывает на то, что в реальных технологических условиях формирования СБ при наличии неконтролируемых загрязнений, содержащих относительно легко диффундирующий в кремний алюминий, могут образовываться ЭАЭЛД.

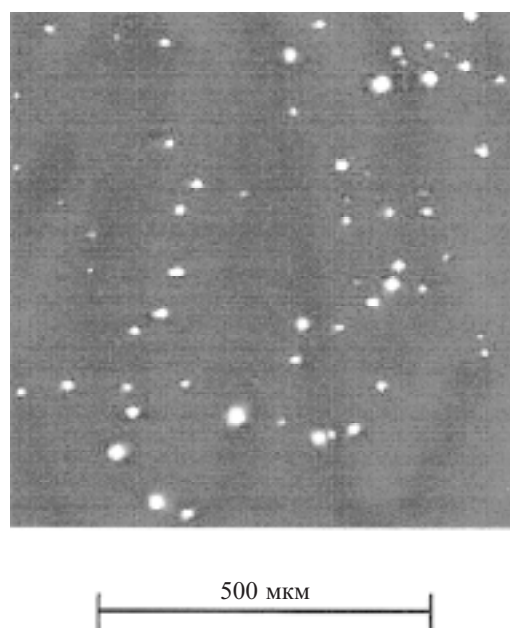


Рис. 7. Распределение ЭАЭЛД на поверхности n^+ -слоя кремния в пластине СБ после высокотемпературного отжига и удаления тонкой пленки алюминия (при обратном смещении на n^+ - p -переходе 15 В)

Как уже отмечалось, на серийных образцах пластин СБ повышенная плотность ЭАЭЛД наблюдалась по периметру пластин. Здесь концентрация дефектов иногда на порядок и более превышала их концентрацию в центральной части пластин. Такое поведение ЭАЭЛД обусловлено особенностями технологии изготовления СБ: на краях пластин формируется клин плазмохимического травления при удалении с торцов диффузионного n^+ -слоя. Как следствие, на краях пластины p - n -переход выходит на поверхность. В результате плазмохимического воздействия формируются структурные дефекты в кремнии, и при наличии загрязнения торцов алюминием при вжигании металлизации именно в этих дефектах создаются наиболее благоприятные условия для ускоренной диффузии алюминия и возникновения ЭАЭЛД и, соответственно, шунтов, снижающих технические характеристики СБ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что бесконтактная регистрация ЭАЭЛД по их световому излучению в видимой области спектра позволяет экспрессно выявлять дефекты с повышенной проводимостью (шунты) и может быть положена в основу эффективного метода контроля качества солнечных батарей в процессе изготовления.

Кроме того, установленная возможность воспроизведения свечения на отдельных участках СБ в результате проведения определенных технологических процессов указывает на перспективность изучения природы выявленных дефектов для создания источников излучения света в кремнии, что является одной из наиболее актуальных задач оптоэлектроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rakotoniaina J. P., Breitenstein O., Langenkamp M. Localization of weak heat sources in electronic devices using highly sensitive lock-in thermography // *Materials Science and Engineering*.— 2002.— B91-92.— P. 481—485.
2. Breitenstein O., Rakotoniaina J. P., Al Rifai M. H. Quantitative Evaluation of Shunts in Solar Cells by Lock-In Thermography // *Prog. Photovolt: Res. Appl.*— 2003.— Vol. 11.— P. 515—526.
3. Kaseman M., Kwopil W., Walter B. et. al. Progress in silicon solar cell characterization with infrared imaging methods // *Photovoltaic Solar Energy Conference*.— Valencia.— 2008.— P. 965—973.
4. Ballif C., Peters S., Zerres T. et. al. Efficient characterization techniques for industrial solar cells and solar cell materials // *12th Workshop on crystalline silicon solar cell materials and processes*.— 2002.— Breckenridge, CO, USA.— P. 136—146.
5. Carstensen J., Popkurov G., Bahr J., Foll H. CELLO: an advanced LBIC measurement technique for solar cell local characterization // *Solar Energy Materials and Solar Cells*.— 2003.— Vol. 76.— P. 599—611.
6. Bauer J., Breitenstein O., Rakotoniaina J. P. Electronic activity of SiC precipitates in multicrystalline solar silicon // *Phys. Stat. Sol. (a)*.— 2007.— Vol. 204, N 7.— P. 2190—2195.
7. Buonassisi T., Vyvenko O. F., Istratov A. A. et al. Observation of transition metals at shunt locations in multicrystalline silicon solar cells // *Journal of Applied Physics*.— 2004.— Vol. 95, N 3.— P. 1556
8. Емельянов А. М. Краевая электролюминесценция монокристаллического кремния при температуре 80 К: структуры на основе высокоэффективного солнечного элемента // *Физика твердого тела*.— 2009.— Т. 51, № 2.— С. 231—236.
9. Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П. и др. Жидкокристаллическая термография «горячих точек» в изделиях электронной техники // *Микроэлектроника*.— 2007.— Т. 36, № 6.— С. 446—456.
10. Патент Украины на изобретение № 84808. Способ выявления локальных тепловыделяющих дефектов в пластинах солнечных батарей / Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П., Мошель Н. В.— 2008.— Бюлл. № 22.

НОВЫЕ КНИГИ

Редькин П. Микроконтроллеры Atmel архитектуры AVR32 семейства AT32UC3. Руководство пользователя.— М.: Техносфера, 2010. — 784 с.

Книга является законченным справочным пособием и руководством по применению 32-разрядных микроконтроллеров архитектуры AVR32 фирмы Atmel семейства AT32UC3. Содержит подробную справочную информацию о всех выпускаемых в настоящее время устройствах этого семейства. Помимо сведений справочного характера, книга включает обширную информацию по программным инструментальным средствам разработки приложений для AT32UC3: IDE IAR Embedded Workbench for AVR32 от IAR, IDE AVR32Studio от Atmel и аппаратным инструментальным средствам от Atmel. Здесь также приводятся описания свободно распространяемых производителем примеров приложений для AT32UC3, протестированных автором. Изложенная в книге информация охватывает все этапы проектирования приложений на основе AT32UC3, что позволяет в короткие сроки овладеть навыками работы с этими микроконтроллерами даже начинающим разработчикам. К книге прилагается DVD-диск, содержащий бесплатные демоверсии описанного в ней инструментального программного обеспечения, исходные коды описанных проектов, оригинальную справочную информацию производителя и другие информационные и справочные материалы.



Р. И. ЛЕСЮК, д. т. н. Я. В. БОБИЦКИЙ,
к. ф.-м. н. Б. К. КОТЛЯРЧУК, д. инж. В. ИЛЛЕК

Украина, г. Львов, ИППМиМ им. Я. С. Пидstryгача НАНУ;
НУ «Львовская политехника»;
Германия, г. Нюрнберг, G.-S. Ohm University of Applied Sciences
E-mail: lesyuk@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
25.03 2010 г.

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

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Исследованы факторы, влияющие на качество печати токопроводящих дорожек, изготовленных струйной технологией. Найдены пути минимизации их негативного влияния, реализована многослойная печать.

В последнее десятилетие струйная печать стала одной из альтернативных технологий для изготовления токопроводящих, резистивных элементов электронных схем, позволяя получить ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями [1]. Синтез коллоидных систем с наночастицами металлов, углеродными нанотрубками позволил использовать эти материалы как функциональные «чернила» для специализированных ink-jet-установок [2]. Из литературы также известно применение струйной печати для формирования *p-n*-переходов путем нанесения органических соединений (пентацен, PEDOT:PSS) на подложку [3, 4]. Тем не менее, качество и надежность структур, изготовленных с ее использованием, нуждаются в исследованиях. В предыдущих работах, в частности [1, 5], нами была описана методика использования ink-jet-технологии для формирования токопроводящих дорожек нанесением наночастиц серебра, исследовано изменение сопротивления структур после печати в процессе спекания, исследована деградационная стойкость структур при перепадах температуры и повышенной влажности.

Важным аспектом остается сам процесс нанесения коллоида с частицами серебра на подложку и его поведение на ней во время спекания, которое определяет кривизну края изготовленных структур.

Среди факторов, влияющих на качество печатных структур, можно выделить смачивание подложки коллоидной системой и стекание дисперсионной среды внутрь капли на подложке во время спекания. Это служит причиной двух негативных эффектов: растекания коллоида и эффекта «кофейного пятна», суть которого заключается в неравномерном распределении частиц дисперсной фазы по профилю напечатанной структуры во время спекания.

Целью настоящей работы являлось изучение этих эффектов, поиск путей минимизации их негативного влияния, а также способов улучшения качества токопроводящих дорожек, полученных технологией ink-jet.

Условия проведения эксперимента

Экспериментальная установка состояла из устройства Microdrop MD-201H для струйной печати и координатного стола, который обеспечивал возможность передвижения печатающей головки по координатам X, Y. Устройство содержит одну печатающую головку, которая работает по принципу пьезоэлектрических преобразований импульсов генерации капель. Исследовался массив капель, генерируемых из сопла, расположенного на расстоянии 1 мм от подложки, которое направлялось перпендикулярно к поверхности подложки. В качестве рабочего раствора использовали коллоид частиц серебра со средним диаметром 9,2 нм в органической матрице триэтиленгликоль-моноэтилового эфира. Коэффициент динамической вязкости коллоида составлял 17,9 мПа·с, коэффициент поверхностного натяжения — 36,4 мН/м, диаметр сопла — 100 мкм. Диаметр капель на выходе из сопла был приблизительно таким же. Выбор относительно большого диаметра сопла обусловлен удобством наблюдения за большими каплями. В качестве подложки использовали полиимидную фольгу Kapton толщиной 125 мкм, обладающую высокой термостойкостью (–273...+400°C), гибкостью, химической стойкостью, свойствами диэлектрика. Способность подложки выдерживать температуру 250—300°C без изменения свойств является важным условием, т. к. в этом интервале происходит спекание коллоида серебра. Узкие дорожки печатались одинарным нанесением коллоида, широкие — нанесением параллельных линий. Ширина дорожек зависела от условий предварительной обработки подложек и от параметров печати.

Результаты и их обсуждение

Обработка поверхности подложки

При попадании коллоида на подложку форма капли и размер пятна контакта определяются условиями смачивания поверхности. Если краевой угол смачивания $\alpha < 90^\circ$, коллоид растекается, и разрешающая способность печати снижается. Вследствие неравномерного распределения жидкости по поверхности подложки в направлении печати дорожка получается волнистой, с перешейками, местами — растекшейся (рис. 1, а). При условии $\alpha > 90^\circ$ растекания не происходит, но по мере возрастания α уменьшается площадь контакта жидкости с подложкой, что во время спекания приводит к уменьшению адгезии.

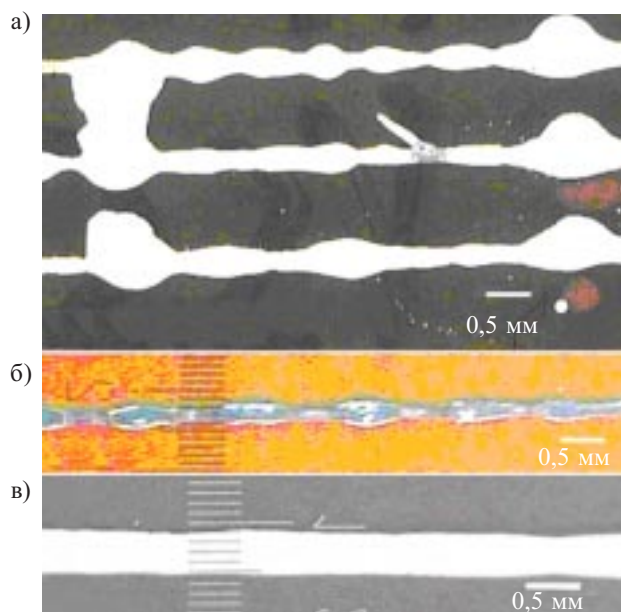


Рис. 1. Снимки токопроводящих дорожек, напечатанных на полиимидной подложке без ее предварительной обработки (а), обработанной раствором ПАВ в воде (б) и этиловым спиртом (в)

Поэтому нашей задачей было обеспечение условия $\alpha \approx 90^\circ$, для чего партии подложек обрабатывали различными растворами — водой, этиловым спиртом, ацетоном, жидким мылом, т. е. поверхностно-активным веществом (ПАВ), с дистиллированной водой, 1%-ным раствором серной кислоты и 1%-ным раствором щелочи (NaOH). После этого на поверхность подложки наносили капли коллоида и исследовали растекание капли при постепенном повышении температуры до 80°C . Определялось относительное изменение линейных размеров капли (диаметра пятна контакта с подложкой) с помощью микроскопа.

Для сравнения исследовали растекание капли на стеклянной подложке, обработанной дистиллированной водой. Результаты, представленные в таблице, свидетельствуют, что минимальное растекание коллоида наблюдается после обработки полиимидной подложки раствором ПАВ в воде. В этом случае относительное изменение размеров капли на подложке имеет небольшое отрицательное значение, и диаметр капли больше, чем диаметр пятна контакта капли с под-

Относительное изменение размеров капли коллоида в зависимости от средства предварительной обработки подложки

Средство обработки	Относительное изменение размеров, %
ПАВ + дистиллированная вода	-0,24
Вода (подложка—стекло)	-0,09
Вода (подложка—полиимид)	0,22
Кислота 1%	1,12
Щелочь 1%	1,13
Спирт	3,18
Ацетон	6,59

ложкой. Таким образом, с помощью обработки раствором ПАВ+вода можно достичь высокой разрешающей способности. Тем не менее, в этом случае (рис. 1, б) не удастся полностью избежать возникновения перешейков, регулируя частоту импульсов генерации капель. При постепенном увеличении частоты возникает излишек жидкости, который приведет к ее растеканию при достижении определенного предела (0,5—1 кГц). В тех случаях, когда к разрешающей способности не предъявлялись высокие требования, обработка этиловым спиртом и ацетоном (рис. 1, в) позволяла формировать дорожки шириной более 400 мкм с высоким качеством печати краев. Для этого были подобраны следующие параметры импульсов генерации капель: частота 357 Гц, длительность приложения напряжения — 16 мкс, величина напряжения 75 В. Поскольку длительность приложения напряжения определяет количество коллоида в капле, значение ее целесообразно удерживать низкой (10—20 мкс), чтобы не допустить излишка жидкости. Величина приложенного напряжения определяет скорость капли на вылете из сопла. При увеличении скорости усиливается соответственно и растекание, поэтому значение напряжения целесообразно также устанавливать на низком уровне (50—75 В).

Нарушение плоскостности поверхности дорожек.

Эффект «кофейного пятна» являлся причиной того, что при испарении органической матрицы (стабилизаторов, растворителей) при температуре $80—100^\circ\text{C}$ распределение частиц серебра по поверхности подложки было неравномерным. По периметру пятна контакта капли с подложкой (т. е. по кольцу) сосредотачивалось значительно большее количество серебра, чем внутри пятна. Теоретическое описание этого эффекта было предложено в [6—8]. По данным этих исследований, масса серебра в кольце (или по краям дорожки) растет во времени по степенному закону.

Для проверки справедливости этого утверждения печатались слои различной толщины. На рис. 2. изображен поперечный профиль напечатанного квадрата коллоидного серебра после спекания, полученный с

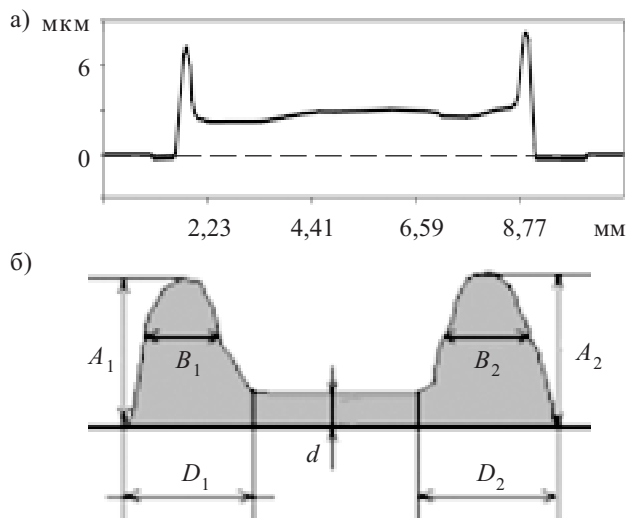
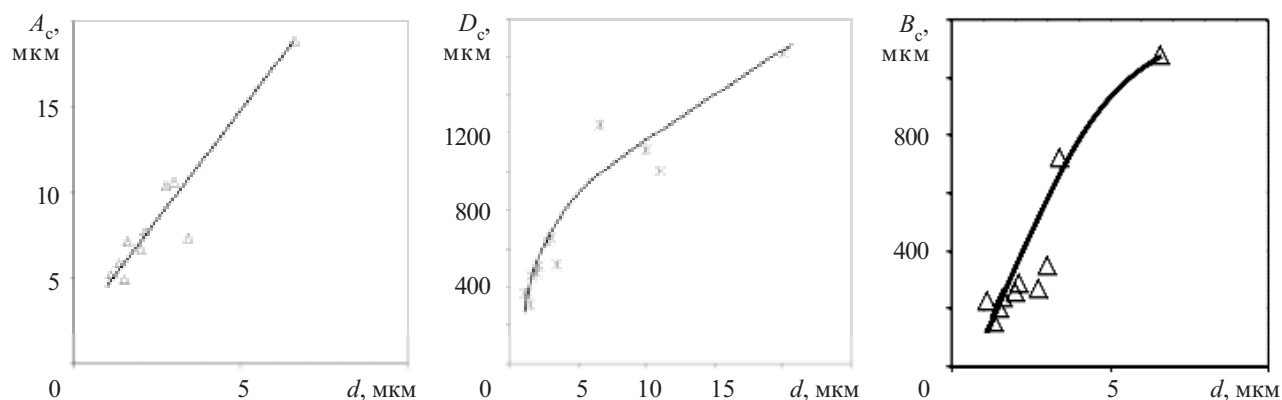


Рис. 2. Профиль напечатанного квадрата размерами 7×7 мм (а) и его схематическое изображение (б)


 Рис. 3. Зависимость средних размеров краевых образований от толщины d слоя серебра

помощью конфокального лазерного профилометра. Контролировалась высота края A , ширина в его основании D и ширина на половине высоты B , причем вычислялись их средние значения A_c , D_c , B_c . Печать образцов проводилась с изменением частоты вылета капель (от 200 до 1000 Гц) при постоянном шаге между линиями (0,3 мм) и с переменным шагом (от 0,1 до 0,5 мм) при постоянной частоте (320 Гц). Таким образом получали слои с различным количеством коллоида на площади размерами 7×7 и 5×5 мм. Нагревание до температуры 100°C длилось 3 мин. При спекании получали квадраты различной толщины, измеряли размеры их краевых образований и строили зависимость средних размеров от толщины слоев (рис. 3).

Измерения показали, что размеры краевых образований растут с увеличением толщины слоя. Средняя высота краев прямо пропорциональна толщине: $A_c = kd$, где $k=3$ (линейная аппроксимация). Параметры B и D также растут с ростом толщины слоя. Их средние значения находятся в соотношении $D_c \approx 1,72B_c$. Очевидно, эти размеры также должны зависеть от скорости нагрева во время спекания. Дальнейшие измерения показали, что высота A при изменении скорости нагрева (например, при внесении образца в нагретую печь) уменьшается, в то время как значения толщины B , D растут, т. к. частицы серебра не успевают достичь краев за время спекания.

Трудность изучения данного эффекта заключалась в весьма значительном разбросе исследуемых величин. Полученные результаты подтвердили предположение, что обеспечить плоскостность поверхности печатных структур и полную компенсацию указанного эффекта изменениями толщины слоя и скорости нагрева не удастся.

Можно использовать дополнительные источники тепловой энергии, позволяющие распределить температуру на поверхности таким образом, чтоб минимизировать эффект «кофейного пятна».

Улучшение качества печати путем подогрева подложки.

Наши предыдущие исследования [5], а также источник [9] указывают, что для обеспечения коммуникационной функции, а также бесперебойной работы схемы печати одного слоя серебра может быть недостаточно. В промышленности при изготовлении печатных плат толщина проводящих слоев меди состав-

ляет не менее 25 мкм, в то время как нанесение одного слоя серебра методом ink-jet с удовлетворительным качеством края дает толщину 1—3 мкм. Для предотвращения значительного растекания рабочего коллоида на подложке непосредственно после печати и во время спекания и для формирования линий с минимальной кривизной края было предложено проводить печать на подложке, температура которой поддерживалась повышенной. Такой способ позволяет осуществлять эффективную многослойную печать и увеличивать разрешающую способность, предотвращать возникновение перешейков. За счет быстрого испарения органических веществ жидкость превращается в твердый слой серебра, не успевая растечься в тех местах, где возникает ее излишек.

Было также исследовано влияние температуры подложки на кривизну края токопроводящих дорожек. Температурный диапазон 200—225°C был определен как оптимальный. При более высокой температуре подложки наблюдался разлет капель при контакте с поверхностью (так называемый эффект Ляйденфроста [10, с. 188]), что было причиной замыкания соседних параллельных дорожек. При нагреве подложки до температуры из этого диапазона было исследовано влияние частоты генерации капель на качество многослойной печати и времени задержки τ между печатью слоев при количестве слоев $N > 5$ (рис. 4). Задержка была введена по двум причинам: в момент печати второго и последующих слоев капли коллоида попадают на дорожку, с которой интенсивно продолжает испаряться органическая фаза. Это приводит к разбрызгиванию и растеканию коллоида (см. рис. 4, з). Кроме того, из-за малого расстояния между нагретой подложкой и соплом (около 1 мм), через некоторое время от начала печати сопло нагревается, а это, в свою очередь, приводит к нарушению условий генерации одинаковых капель с одинаковым углом вылета из сопла. Поэтому задержка использовалась для быстрого перемещения печатающей головки за пределы подложки, что не позволяло ей нагреваться. Частота генерации капель, как и скорость передвижения печатающей головки, влияет на формирование излишка жидкости на единице длины дорожки, который приводит к искривлению краев и возникновению перешейков, ограничивающих проводимость тонких дорожек. Была определена оптимальная частота гене-

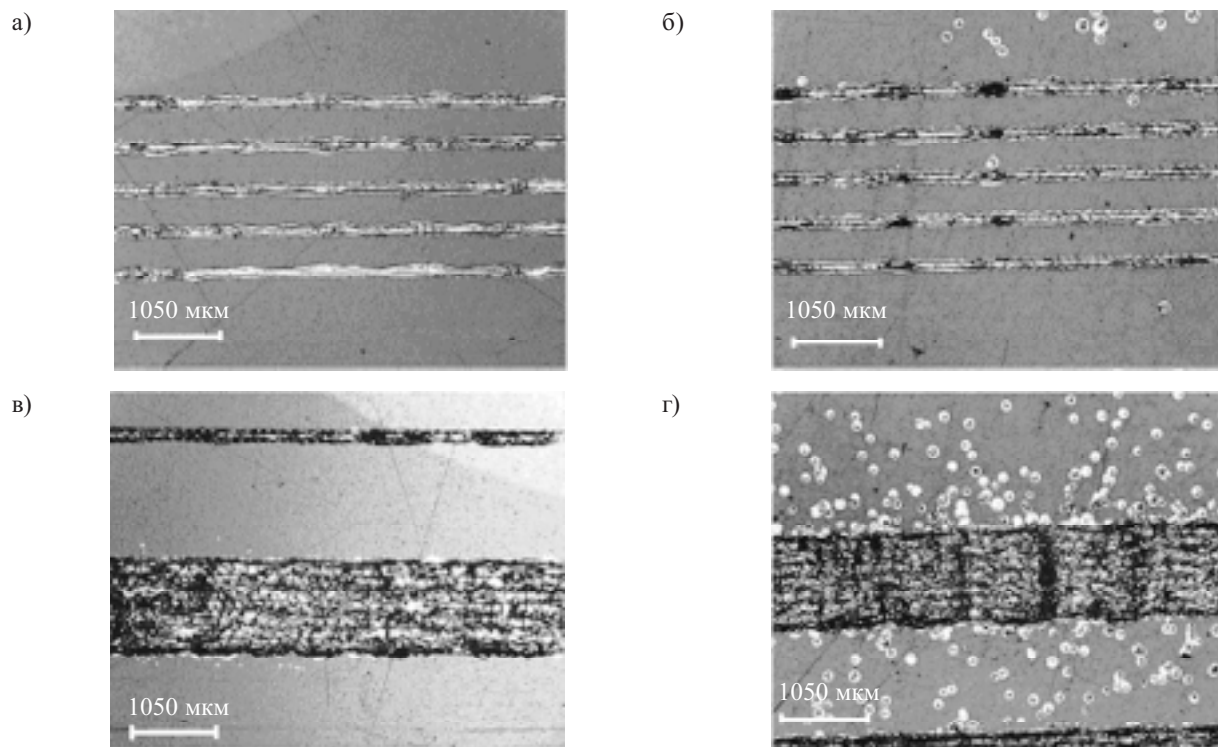


Рис. 4. Снимки многослойных дорожек, напечатанных без задержки (б, г) и с задержкой $\tau=1$ с (а, в) при разном количестве слоев N : а, б — 5; в, г — 10

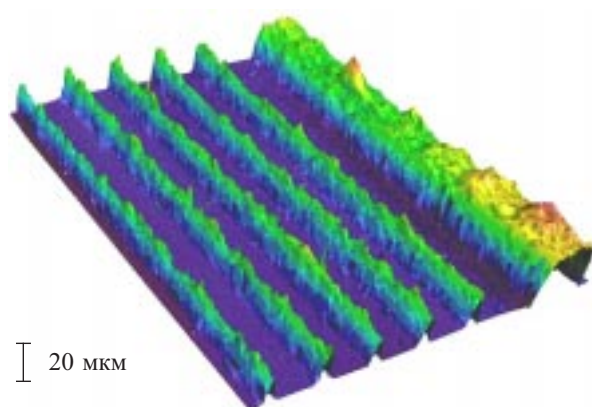


Рис. 5. 3-D изображение одинарных и широкой дорожек при $N=15$

рации капель — 250 Гц при скорости передвижения головки 5 см/с. Введение задержки в 1 с позволило заметно улучшить качество печати (рис. 4, а, в). Используя полученные результаты, была реализована печать дорожек толщиной 30—40 мкм шириной 250 мкм. Удельная электропроводность дорожек после спекания достигала 30% от электропроводности объемного серебра. Это значительно превышает результаты, полученные другими исследователями методом ink-jet. Изображение одного из образцов, полученное лазерным профилометром, представлено на рис. 5.

Выводы

Исследования поведения коллоида серебра на подложке в процессе струйной печати позволили вы-

брать оптимальные условия для печати максимально плоских слоев, у которых толщина краевых образований и кривизна краев будет минимальной. Специальные меры позволяют существенно улучшить качество печати дорожек с толщиной слоев 30—40 мкм, которые могут использоваться как токопроводящие коммуникационные элементы на печатных платах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лесюк Р., Бобицкий Я., Ёллек В. Ink-jet формування комутаційних елементів мікросхем з використанням наночастинок срібла // Нові технології.— 2008.— № 2 (20).— С. 30—37.
2. Song J. W., Kim J., Yoon Y. H. et al. Ink-jet printing of single-walled carbon nanotubes and electrical characterization of the line pattern // Nanotechnology.— 2008.— N 19.— P. 1—6.
3. Volkman S. K., Moles S., Mattis B. et al. Inkjetted organic transistors using a novel pentacene precursor // Proceedings of Materials Research Society Symposium.— Warrendale.— 2003.— Vol. 769.— H11.7.
4. B.-J. de Gans, Duineveld P. C., Schubert U. S. Ink-jet printing of polymers: state of the art and future developments // Advanced Materials.— 2004.— N 3.— P. 203—213.
5. Лесюк Р. І., Бобицький Я. В., Ёллек В. Адгезія та надійність струмопровідних шарів, виготовлених струменевим друком наночастинок срібла // Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія Електроніка.— 2009.— № 646.— С. 24—29.
6. Deegan R. D. Pattern formation in drying drops // Physical Review E.— 2000.— Vol. 61(1).— P. 475—485.
7. Deegan R. D., Bakajin O., Dupont T. F. et al. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops // Nature.— 1997.— Vol. 389(6653).— P. 827—829.
8. Brethour J. M., Hirt C. W. Stains arising from dried liquid drops // 12th International Coating Science and Technology Symposium.— 2004.— New York, Rochester.
9. Shin D.-Y., Lee Y., Kim C. H. Performance characterization of screen printed radio frequency identification antennas with silver nanopaste // Thin Solid Films.— 2009.— Vol. 517.— P. 6112—6118.
10. Rein M. Drop-Surface interactions.— CISM, Udine.— 2002.

К. ф.-м. н. Н. Б. ГОРЕВ, к. ф.-м. н. И. Ф. КОДЖЕСПИРОВА,
к. ф.-м. н. Е. Н. ПРИВАЛОВ

Украина, г. Днепропетровск,
Институт технической механики НАНУ и НКАУ
E-mail: gorev57@mail.ru

Дата поступления в редакцию
09.06 2010 г.

Оппонент к. т. н. Я. Я. КУДРИК
(ИПФ им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ДИАГНОСТИКА ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ НА ГРАНИЦЕ «ПЛЕНКА — ПОДЛОЖКА» В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ GaAs

Предложенный вольт-фарадный метод измерения концентрации незаполненных глубоких центров вблизи границы «пленка — подложка» не требует дорогостоящего оборудования и может быть легко встроен в технологический цикл изготовления приборов.

Наличие глубоких центров захвата является одним из наиболее важных факторов, влияющих на свойства как самого полуизолирующего арсенида галлия, так и эпитаксиальных пленок, выращенных на этом материале. Концентрация и тип глубоких центров вблизи границы раздела «эпитаксиальная пленка — полуизолирующая подложка» и в объеме подложки могут различаться, т. к. в процессе роста эпитаксиальной пленки могут возникать новые глубокие центры [1]. Кроме того, новые центры могут возникать и во время последующих технологических процессов изготовления приборов, таких как имплантация примесей и отжиг, формирование омических контактов, нанесение диэлектрических покрытий [2].

Глубокие центры на границе «эпитаксиальная пленка — подложка» оказывают значительное влияние на характеристики приборов, изготовленных на этой пленке, и, следовательно, на характеристики интегральных схем, в состав которых входят эти приборы. К числу широко известных негативных эффектов, связанных с наличием глубоких центров, относятся эффект управления по подложке, гистерезис вольт-амперных характеристик транзисторов, низкочастотные осцилляции и увеличение шума в канале полевых транзисторов [3]. Следует отметить, что интегральное влияние глубоких центров на рабочие характеристики приборов на тонкопленочных эпитаксиальных структурах определяется, в первую очередь, концентрацией N_{vac} незаполненных глубоких центров в подложке вблизи границы с пленкой [4]. Поэтому важно иметь простые и достоверные методы определения этой концентрации.

Общепринятым методом диагностики глубоких центров вблизи границы «пленка — подложка» является токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней [5]. Однако этот метод является довольно громоздким, требует дорогостоящего оборудова-

ния и может оказаться несовместимым с технологическим циклом изготовления приборов. Кроме того, он требует наличия омических контактов, что не позволяет использовать его для контроля исходных полупроводниковых пластин перед изготовлением приборов. Поэтому наиболее подходящим решением представляется разработка метода определения N_{vac} , основанного на вольт-фарадных измерениях.

В настоящее время существует много вольт-фарадных методов диагностики глубоких центров [6], однако все они разработаны для объемных полупроводников, где зондирующий край области обеднения барьера Шоттки граничит с нейтральным полупроводником. В эпитаксиальных же структурах на границе раздела «пленка — подложка» неизбежно присутствует область встроенного объемного заряда, обусловленная резким градиентом концентрации легирующей примеси. Смыкание области обеднения барьера Шоттки с этой областью объемного заряда приводит к появлению качественных отличий от объемных полупроводников и, следовательно, к неправильной интерпретации результатов вольт-фарадных измерений.

В данной статье описан разработанный вольт-фарадный метод измерения концентрации N_{vac} незаполненных глубоких центров, свободный от указанных недостатков, использующий особенности $n-v$ -перехода на границе «пленка — подложка». Локализованная в пленке область обеднения этого перехода образована зарядом ионизированных доноров, а его область накопления, локализованная в подложке, образована зарядом, связанным на глубоких центрах, причем практически во всей области накопления плотность отрицательного объемного заряда ρ^- равна произведению концентрации N_{vac} в нейтральной части подложки вблизи пленки на заряд электрона q . В силу этого концентрация N_{vac} может быть определена путем измерения отклика перехода «пленка — подложка» на какое-либо внешнее воздействие. В предлагаемом методе таким воздействием является освещение примесным светом, приводящее к сужению области объемного заряда перехода «пленка — подложка» и соответствующему расширению проводящего канала в пленке, величина которого определяется из вольт-фарадных измерений.

Рассмотрим планарную структуру GaAs, состоящую из низкоомной пленки и полуизолирующей ком-

пенсированной подложки. Пленка содержит только мелкие доноры с концентрацией N_0 , а подложка — мелкие доноры и компенсирующие их глубокие электронные центры захвата акцепторного типа с концентрацией N_s и N_p , соответственно. При этом концентрация свободных носителей в глубине подложки $n_{sub} \ll N_s$, а концентрация N_{vac} в подложке равна $N_t - N_s$. Пренебрегая зарядом свободных носителей в областях обеднения и накопления n - v -перехода и изменением плотности связанного заряда по ширине соответствующих областей, можем записать

$$N_0 d^+ = N_{vac} d^- = \frac{\epsilon \epsilon_0}{q} E_{n-v}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} E_{n-v} (d^+ + d^-) = V_{n-v} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_0}{n_{sub}}, \quad (2)$$

где d^+ , d^- — ширины области обеднения и области накопления n - v -перехода;

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная;

E_{n-v} — электрическое поле на границе «пленка — подложка»;

V_{n-v} — встроенное напряжение n - v -перехода;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Разрешив (1) и (2) относительно ширины области обеднения d^+ , получим

$$d^+ = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 kTN_{vac}}{q^2 N_0 (N_0 + N_{vac})}} \ln \frac{N_0}{n_{sub}}. \quad (3)$$

Фотоионизация глубоких центров при примесном освещении увеличивает концентрацию свободных носителей в подложке, что в соответствии с (3) приводит к уменьшению d^+ и, следовательно, к увеличению ширины проводящего канала в пленке. Из (3) следует, что увеличение Δh_I ширины проводящего канала при примесном освещении описывается выражением

$$\Delta h_I = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 kTN_{vac}}{q^2 N_0 (N_0 + N_{vac})}} \left(\sqrt{\ln \frac{N_0}{n_{sub0}}} - \sqrt{\ln \frac{N_0}{n_{subl}}} \right), \quad (4)$$

где n_{sub0} , n_{subl} — концентрация свободных носителей в объеме подложки в отсутствие и при наличии примесного освещения, соответственно.

С использованием уравнения кинетики захвата носителей на глубокие центры и уравнения электро-нейтральности для объема подложки можно легко показать, что концентрация n_{subl} выражается через интенсивность освещения I_p следующим образом:

$$n_{subl} = \frac{N_s}{N_t - N_s} (n_1 + S_{pe} I_p / c_e), \quad (5)$$

где n_1 — параметр Шокли-Рида, равный концентрации свободных электронов в зоне проводимости в случае, когда уровень Ферми совпадает с энергетическим уровнем глубокого центра;

c_e — коэффициент захвата электрона глубоким центром;

S_{pe} — сечение захвата фотона заполненным глубоким центром при переходе электрона в зону проводимости.

Введя обозначение

$$\beta = \frac{N_s}{N_t - N_s} \frac{S_{pe}}{c_e}$$

и учитывая что

$$n_{sub0} = \frac{N_s}{N_t - N_s} n_1,$$

соотношение (5) можно представить в следующем простом виде:

$$n_{subl} = n_{sub0} + \beta I_p. \quad (6)$$

Подставив (6) в (4), получим

$$\Delta h_I = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 kTN_{vac}}{q^2 N_0 (N_0 + N_{vac})}} \times \left(\sqrt{\ln \frac{N_0}{n_{sub0}}} - \sqrt{\ln \frac{N_0}{n_{sub0} + \beta I_p}} \right). \quad (7)$$

Формула (7) позволяет определить концентрацию незаполненных глубоких центров N_{vac} (а также с n_{sub0} и β) при условии, что известна зависимость Δh_I от I_p . Входящая в (7) концентрация N_0 легирующей примеси в пленке может быть получена с использованием общепринятых соотношений для определения профиля легирования полупроводника с помощью вольт-фарадных измерений, которые имеют вид

$$N_0(x) = -\frac{C^3}{q\epsilon\epsilon_0 S^2 \frac{dC}{dV_{rev}}}; \quad (8)$$

$$x = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C}, \quad (9)$$

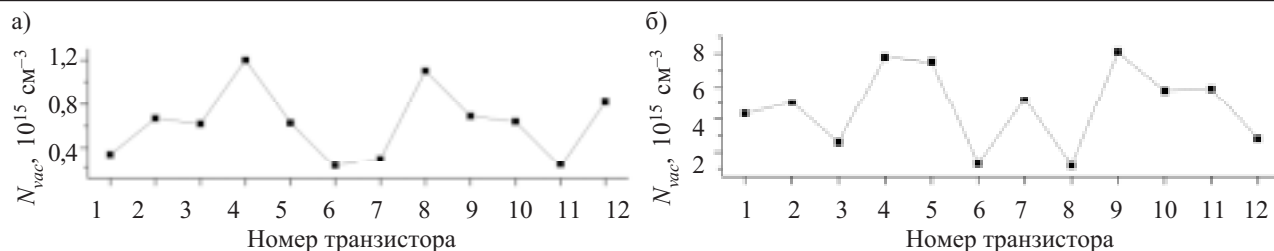
где x — координата, отсчитываемая от барьерного контакта;

C — барьерная емкость;

V_{rev} — обратное напряжение на барьере Шоттки;

S — площадь барьерного контакта.

Зависимость Δh_I от I_p также может быть определена из вольт-фарадных измерений. Известно [7], что в общем случае выражения (8), (9) дают «кажущийся» профиль концентрации $\hat{n}(x)$, который совпадает с профилем легирования только в случае, когда область обеднения барьера Шоттки граничит с нейтральным полупроводником, в то время как при наличии встроенного объемного заряда (например, вблизи границы «пленка — подложка») $\hat{n}(x)$ представляет собой среднее значение концентрации свободных носителей $n(x)$ на длине порядка длины Дебая. Дифференциро-



Измеренные распределения концентрации N_{vac} по пластинам GaAs со сформированными транзисторами для пластин с буферным слоем (а) и без него (б)

вание (8), (9) дает (штрихи обозначают соответствующие производные)

$$C_{V_{rev}}'' = \frac{C_{V_{rev}}'^2}{C} \left[3 + \frac{x \hat{n}'_x(x)}{\hat{n}(x)} \right].$$

Таким образом, изменение знака второй производной емкости $C_{V_{rev}}''$ с «+» на «-» указывает на резкое падение концентрации свободных носителей, т. е. на достижение областью обеднения барьера Шоттки границы между проводящим каналом и областью обеднения перехода «пленка — подложка». Поэтому координату x_{chan} этой границы можно оценить как

$$x_{chan} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{C_{inf}},$$

где C_{inf} — ордината точки перегиба на вольт-фарадной кривой, в которой эта кривая становится из выпуклой вниз (ее обычное поведение) выпуклой вверх.

Следовательно, увеличение Δh_I ширины канала при освещении можно найти по формуле

$$\Delta h_I(I_p) = \epsilon \epsilon_0 S \left[\frac{1}{C_{inf I}(I_p)} - \frac{1}{C_{inf 0}} \right], \quad (10)$$

где $C_{inf I}$, $C_{inf 0}$ — величина C_{inf} в отсутствие и при наличии освещения, соответственно.

Концентрация незаполненных глубоких центров N_{vac} определяется путем аппроксимации зависимости (10), полученной из экспериментальных данных, формулой (7).

Как было указано выше, приведенное рассмотрение относится к случаю подложки n -типа с мелкими донорами, компенсированными глубокими электронными центрами акцепторного типа. Однако на практике часто встречается случай, когда подложка n -типа содержит мелкие акцепторы, компенсированные глубокими донорами. В частности, полуизолирующие свойства нелегированного арсенида галлия обусловлены наличием глубокого донорного центра $EL2$. В этом случае мелкие акцепторы полностью заполнены электронами, захваченными с глубоких доноров, и поэтому в нейтральном объеме подложки, где суммарный объемный заряд равен нулю, концентрация положительно заряженных незаполненных доноров N_{vac} равна концентрации мелких акцепторов N_A . В области же объемного заряда вблизи границы с пленкой (области накопления перехода «пленка —

подложка») все глубокие доноры полностью заполнены диффундировавшими из пленки электронами и, следовательно, нейтральны. В силу этого объемный заряд этой области образован электронами, связанными на мелких акцепторах, т. е. плотность p отрицательного объемного заряда в этой области равна qN_A . Отсюда следует, что описанным выше методом в этом случае также можно найти концентрацию N_{vac} незаполненных глубоких доноров в нейтральном объеме подложки, поскольку в соответствии со сказанным выше эта концентрация равна N_A .

Предложенный метод апробирован на арсенид-галлиевых пластинах со сформированными полевыми транзисторами с барьером Шоттки, изготовленных на основе эпитаксиальных структур n^+-n-i (n^+ -слой — низкоомная пленка — полуизолирующая подложка) и $n^+-n-n_p^-i$ (n^+ -слой — низкоомная пленка — высокоомный буферный слой — полуизолирующая подложка).

Вольт-фарадные характеристики измерялись при помощи измерителя емкости Е7-12, работающего на частоте 1 МГц. Пластины освещались со стороны пленки инфракрасной лампой накаливания мощностью 175 Вт через кремниевый фильтр. Это давало примесный свет, т. к. ширина запрещенной зоны кремния (1,1 эВ) меньше ширины запрещенной зоны арсенида галлия (1,4 эВ). Поскольку длина затвора сформированных на пластине транзисторов была равна 2 мкм, этот свет мог легко проникать в подзатворную область благодаря дифракции (длина волны света с энергией кванта 1,1 эВ равна 1,1 мкм).

Интенсивность освещения изменялась путем изменения расстояния между лампой и полупроводниковой пластиной. Из формулы (7) видно, что при определении концентрации N_{vac} вместо интенсивности освещения I_p может использоваться любая пропорциональная ей величина (это приводит только к перепределению коэффициента β), а из формулы (6) следует, что такой величиной может быть разность между значениями проводимости подложки при наличии освещения $G_{sub I}$ и в его отсутствие $G_{sub 0}$. Поэтому при определении N_{vac} в формуле (7) вместо интенсивности освещения использовалась измеренная разность $G_{sub I} - G_{sub 0}$ нормированная на ее значение при максимальном расстоянии между лампой и полупроводниковой пластиной.

Точность аппроксимации измеренной зависимости $\Delta h_I(I_p)$ формулой (7) составила около 10%. Поскольку в формуле (7) для Δh_I концентрация N_{vac} сто-

ит под знаком квадратного корня, точность определения N_{vac} можно примерно оценить, удвоив значение точности аппроксимации зависимости $\Delta h_f(I_p)$, т. е. это величина порядка 20%.

Измерения, результаты которых приведены на рисунке, показали, что концентрация N_{vac} имеет значительный разброс по пластине даже при достаточно однородном распределении концентрации легирующей примеси N_0 . Так, для пластины без буферного слоя N_{vac} изменяется от 10^{15} до $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в то время как N_0 изменяется в пределах $(1,4—1,6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Это указывает на то, что при диагностике пластин концентрация N_{vac} должна контролироваться локально в месте расположения каждого прибора. Из рисунка также видно, что для пластины с буферным слоем концентрация N_{vac} заметно ниже, чем для пластины без буферного слоя, как и должно быть, что служит подтверждением достоверности предложенного подхода.

Таким образом, разработан простой метод определения концентрации незаполненных глубоких центров вблизи границы «пленка — подложка», т. е. величины, являющейся интегральным показателем влияния глубоких центров на работу приборов на основе тонкопленочных арсенид-галлиевых структур. Данный метод не требует дорогостоящего оборудования и может быть легко встроен в технологический цикл изготовления приборов и интегральных схем. При использовании ртутных зондов он позволит определять концентрацию незаполненных глубоких центров в исходных полупроводниковых пластинах и затем получать достоверную информацию об изменении этой величины на разных стадиях процесса изготовления приборов (так как коэффициент поглощения примесного света весьма мал, при использо-

вании ртутных зондов полупроводниковые пластины могут освещаться с тыльной стороны). Это в свою очередь даст возможность отбраковывать пластины как до начала процесса изготовления приборов, так и на ранних его стадиях, что повысит выход годных приборов и снизит их себестоимость.

Данный метод был апробирован на арсенид-галлиевых пластинах с транзисторами, однако может быть применен и к другим полупроводниковым структурам соединений A_3B_5 с резким переходом между легированным эпитаксиальным слоем и полуизолирующей компенсированной подложкой, таким как тонкопленочные структуры на основе InP или GaN.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников.— М.: Металлургия, 1985.
2. Makram-Ebeid S., Minondo P. The roles of the surface and the bulk of the semi-insulating substrate in low-frequency anomalies of GaAs integrated circuits // IEEE Trans. Electron Devices.— 1985.— Vol. ED-32, N 5.— P. 632—642.
3. Костылев С. А., Прохоров Е. Ф., Уколов А. Т. Явления токопереноса в тонкопленочных арсенид-галлиевых структурах.— Киев: Наукова думка, 1990.
4. Khuchua N. P., Khvedelidze L. V., Gorev N. B. et al. Determination of deep trap concentration at channel-substrate interface in GaAs MESFET using sidegating measurements // Solid-State Electron.— 2002.— Vol. 46, N 9.— P. 1463—1466.
5. Adlerstein M. G. Electrical traps in GaAs microvawe F.E.T.s // Electron. Lett.— 1976.— Vol. 12, N 12.— P. 297—298.
6. Хучуа Н. П., Хведелидзе Л. В., Тигишвили М. Г. и др. Роль глубоких уровней в технологии арсенида галлия // Микроэлектроника.— 2003.— Т. 32, № 5.— С. 323—343.
7. Kroemer H., Chen W.-Y. On the theory of Debye averaging in the $C-V$ profiling of semiconductors // Solid-State Electron.— 1981.— Vol. 24, N 7.— P. 655—660.

НОВЫЕ КНИГИ

Справочник Шпрингера по нанотехнологии (в трех томах) / Под ред. Б. Бхушана.— М.: Техносфера, 2010.

Справочник объединяет сведения по технологиям, механике, материаловедению и надежности. Второе издание увеличилось с 6 до 8 частей (с 38 до 58 глав). Первая часть посвящена наноструктурам и технологиям изготовления микро- и наноструктур, включая используемые при этом методы и материалы, вторая — МЭМС/НЭМС и БиоМЭМС/БиоНЭМС приборам. Различные типы сканирующей зондовой микроскопии рассмотрены в третьей части. Четвертая посвящена обзору нанотрибологии и наномеханики. Обзор смазок на пленках молекулярной толщины представлен в пятой части справочника. Шестая знакомит читателя с некоторыми применениями нанотехнологий в промышленном масштабе, седьмая сфокусирована на надежности микроприборов. И, наконец, последняя посвящена технологической конвергенции, которую несут с собой нанотехнологии, в ней также рассмотрены возможные социальные, этические и политические последствия применения нанотехнологий.

Книга подготовлена опытным редактором и написана командой из 150 известных международных экспертов. Адресована инженерам-механикам и инженерам-электрикам, специалистам по материаловедению, медикам и химикам, работающим в области нано или в смежных областях.



Академик НАН Украины В. Ф. МАЧУЛИН

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

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ИМ. В. Е. ЛАШКАРЁВА НАН УКРАИНЫ (к пятидесятилетию создания)



Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева
НАН Украины

Разделение материалов на три группы — металлы, диэлектрики и полупроводники произошло в начале XX века при изучении электрических свойств твердых тел. Полупроводники считались плохими проводниками и плохими изоляторами и поэтому надлежащего внимания в классической физике не получили.

Тем не менее исследования полупроводниковых материалов продолжались, и уже в начале 1930-х годов было создано четыре типа полупроводниковых приборов: фотоэлементы, выпрямители, фотосопротивления и кристадин, которые начали находить применение в разных областях науки и техники. Физики достаточно интенсивно изучали некоторые свойства полупроводниковых соединений, в основном фотоэлектрические, пытаясь найти зависимость этих свойств от различных факторов: длины волны поглощенного света, введенных примесей, величины диэлектрической проницаемости, температуры, интенсивности светового потока, метода приготовления исследуемых образцов, их химической природы и т. п. Проводились чисто эмпирические поиски как природных, так и синтезированных полупроводников. Становилось все более очевидным, что изучение полупроводников должно привести к новым научным открытиям и новым техническим применениям.

В начале 30-х годов XX века был собран значительный экспериментальный материал, который, с одной стороны, требовал определенной систематизации и, следовательно, дальнейшего разворачивания ис-

следований, а с другой, давал возможность приступить к построению основ теории полупроводников.

Широкие перспективы технического применения полупроводников и интенсивное накопление экспериментальных сведений об их свойствах требовали безотлагательного изучения внутреннего механизма процессов в полупроводниках. Успехи квантовой механики конца 20-х годов XX века обусловили возможность построения некоторых общих контуров элементарной теории полупроводников уже на самом раннем этапе их систематического изучения. Как известно, изучение полупроводников важно не только с точки зрения их практического применения, но и в фундаментальном отношении, поскольку дает возможность прояснить строение твердого тела вообще и, в частности, детальнее изучить свойства диэлектриков и металлов. При этом имеет место и обратная зависимость: так, в процессе исторического развития квантовая теория металлов была расширена на полупроводники и диэлектрики, что привело к возникновению единой зонной теории твердого тела.

Наряду с работами ленинградской школы, все большее значение приобретали исследования полупроводников украинскими физиками. Прежде всего, необходимо отметить работы под руководством Е. А. Кириллова в Одессе, начатые еще в конце 1920-х годов и посвященные, в основном, изучению внутреннего фотоэффекта соединений серебра, а также работы киевской школы по изучению полупроводников.

Исследования полупроводников в Украине были начаты на Киевской научно-исследовательской кафедре физики Наркомобразования УССР (1921—1922 гг.) под руководством докт. физ.-мат. наук Ф. Г. Гольдмана (с 1929 г. — академик АН УССР). В 1929 г. на базе этой кафедры был создан НИИ физики Наркомпроса УССР, вошедший в 1932 г. в состав АН УССР, а в 1936 г. переименованный в Институт физики АН УССР. С первых дней его существования начались экспериментальные работы по физике полупроводников, что способствовало созданию в 1939 г. в институте отдела физики полупроводников, который возглавил докт. физ.-мат. наук В. Е. Лашкарёв (с 1945 г. — академик АН УССР). Уже в конце 1930-х годов этот отдел стал одним из ведущих научных центров физики и техники полупроводников в СССР.

После войны сотрудники отдела физики полупроводников продолжали начатые в довоенные годы ис-

следования фотоэлектрических и оптических явлений в полупроводниках, электронных явлений на контакте «металл—полупроводник» и на поверхности полупроводников, а также химии полупроводников. С 1950 г. начались экспериментальные и теоретические исследования, а также прикладные разработки по физике и технике новых полупроводников — кремния и германия.

В 1944 г. в Институте физики АН УССР сформировался отдел теоретической физики, организация которого связана с научной деятельностью доктора физ.-мат. наук С. И. Пекара (с 1961 г. — академик АН УССР). В тематике нового отдела преобладали вопросы теории неметаллических твердых тел — полупроводников и диэлектриков.

В 1954 г. по инициативе и во главе с А. Ф. Иоффе был организован Институт полупроводников АН СССР. С целью развития научных исследований по физике полупроводников в Украине, создания полупроводниковых приборов и их широкого применения в технике на базе отделов физики полупроводников и теоретической физики и некоторых лабораторий Института физики 7 октября 1960 г. в системе АН УССР был создан Институт полупроводников (нынешний Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН Украины — ИФП). Большой вклад в создание и организацию дальнейшей деятельности ИФП внесли первые руководители научно-исследовательских отделов и лабораторий, созданных в 1960—1961 гг.: д. ф.-м. н. М. Ф. Дейген, к. ф.-м. н. М. П. Лисица, д. ф.-м. н. В. И. Ляшенко, к. х. н. И. Б. Мизецкая, к. ф.-м. н. Е. Г. Миселюк, к. ф.-м. н. Э. И. Рашба, к. т. н. С. В. Свечников, к. ф.-м. н. О. В. Снитко, к. ф.-м. н. Г. А. Федорус.

Первым директором ИФП с 1960 по 1970 г. был академик АН УССР Вадим Евгеньевич Лашкарёв. В 1970—1990 г. институт возглавлял академик АН УССР Олег Вячеславович Снитко, с 1991 по 2003 г. — академик НАН Украины Сергей Васильевич Свеч-



Основатель ИФП академик В. Е. Лашкарёв со своими учениками (слева направо — М. К. Шейнкман, будущий чл.-кор. НАН Украины, Е. А. Сальков и В. А. Романов, будущие доктора физ.-мат. наук и профессора)



Разработанный в институте сверхчувствительный лазерный тензометр

ников, а с 2003 г. институт возглавляет академик НАН Украины Владимир Федорович Мачулин.

В начальный период в институте работал один академик АН УССР, 3 доктора и 14 кандидатов наук. Размещался ИФП в здании Института физики АН УССР, а с мая 1962 г. переехал в новый отдельный корпус.

В ИФП работали и работают сейчас известные украинские ученые, среди которых 6 академиков НАН Украины: В. Е. Лашкарёв (1903—1974 гг.), М. П. Лисица, В. Ф. Мачулин, С. И. Пекар (1917—1985 гг.), С. В. Свечников, О. В. Снитко (1928—1990 гг.); 10 членов-корреспондентов НАН Украины: О. Е. Беляев, М. Я. Валах, Е. Ф. Венгер, М. Ф. Дейген (1918—1977 гг.), В. С. Лысенко, В. Г. Литовченко, Б. А. Нестеренко (1938—2003 гг.), П. Ф. Олексенко, Ф. Ф. Сизов, М. К. Шейнкман (1929—2009 гг.), а также почти 90 докторов наук, среди которых 52 профессора, и более 200 кандидатов наук.

Основными научными направлениями деятельности ИФП, утвержденными Президиумом НАН Украины, являются:

- физика процессов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом;
- физика низкоразмерных систем, микро- и наноэлектроника;
- оптоэлектроника и солнечная энергетика;
- полупроводниковое материаловедение и сенсорные системы.

В последние годы приоритетное развитие в научной деятельности ИФП получили фундаментальные и прикладные исследования и разработки, в частности: теоретические и экспериментальные исследования процессов самоорганизации и физики полупроводниковых наноструктур; работы по созданию элементной базы оптоэлектроники, устройств для преобразования информации и источников излучения нового типа; исследования в области оптики твердого тела; теоретические и экспериментальные исследования электронных и электронно-атомных процессов на поверхности, в объеме и на границах разделов слож-

ных и слоистых полупроводниковых структур; исследования в области физики флуктуационных явлений в полупроводниках и полупроводниковых приборах, флуктуационная диагностика новейших субмикронных технологий; исследования процессов трансформации структуры и электрофизических свойств полупроводниковых материалов и структур под влиянием активных внешних воздействий; работы по физическим и физико-химическим проблемам полупроводникового материаловедения, направленные на создание опто-, фото- и микроэлектронных устройств разного назначения; теоретические и экспериментальные исследования электронного транспорта в полупроводниках и полупроводниковых структурах, электрон-фононного взаимодействия в твердых телах; работы по созданию новых методов и средств неразрушающего диагностирования полупроводниковых материалов и приборов опто-, микро- и нанoeлектроники.

За годы существования ИФП было зарегистрировано три научных открытия:

1) «Свойства многозначной анизотропии электропроводности полупроводниковых кристаллов в сильных электрических полях» (диплом № 294, заявка от 17.04 1982 г.). Авторы — З. С. Грибников, В. В. Митин;

2) «Явление распространения дополнительных волн в кристаллах» (диплом № 323, заявка от 27.09 1984 г.). Автор — С. И. Пекар;

3) «Явление комбинированного резонанса в кристаллах» (диплом № 327, заявка от 18.10 1984 г.). Автор — Э. И. Рашба.

ИФП осуществляет плодотворное научное и научно-техническое сотрудничество с рядом университетов и научных центров США, Великобритании, Франции, Италии, Испании, Израиля, Японии, Германии, Китая, а также поддерживает тесные научные контакты с ведущими научными учреждениями России и других стран-членов СНГ и Прибалтики.

В ИФП издается сборник «Оптоэлектроника и полупроводниковая техника» и журнал «Semiconductor Physics. Quantum Electronics & Optoelectronics».



В центре испытаний фотопреобразователей и фотоэлектрических батарей



Разработанный в институте диффрактометр для измерения рентгено-акустического резонанса

В институте работает аспирантура и докторантура, есть специализированные ученые советы по защите диссертаций на соискание научной степени кандидата и доктора физико-математических и технических наук, работает хозрасчетное Специальное конструкторско-технологическое бюро с опытным производством, действуют также технологический парк «Полупроводниковые технологии и материалы, оптоэлектроника и сенсорная техника», Центр коллективного пользования приборами НАН Украины «Диагностика полупроводниковых материалов, структур и приборных систем», Испытательная лаборатория голографических защитных элементов, Центральная испытательная лаборатория полупроводникового материаловедения и Центр испытаний фотопреобразователей и фотоэлектрических батарей. На базе ИФП работают Украинские отделения Международных обществ «Оптической техники» и «Информационных дисплеев», а сам институт является головной организацией Научного совета НАН Украины по проблеме «Физика полупроводников и полупроводниковые устройства». Как головная организация этого Научного совета ИФП принимает участие в организации и проведении конференций, симпозиумов, выставок и семинаров, причем особое внимание при этом уделяется новым актуальным направлениям в физике полупроводников.

Общие научные работы проводятся с высшими учебными заведениями Украины, в частности с Киевским им. Тараса Шевченко, Одесским им. И. И. Мечникова, Ужгородским и Черновицким им. Юрия Федьковича национальными университетами, Национальным техническим университетом Украины «Киевский политехнический институт», Национальным университетом «Львовская политехника», Луцким национальным техническим университетом, Житомирским государственным университетом им. Ивана Франко, Полтавским и Бердянским педагогическими университетами, Каменец-Подольским государственным университетом. На базе ИФП работает филиал кафедры оптики Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, а на базе Одесского

национального университета им. И. И. Мечникова совместно с ИФП создан межведомственный Научно-учебный центр МОН и НАН Украины как структурное подразделение университета, что способствует привлечению талантливой студенческой молодежи к научной деятельности. На базе ИФП совместно с Кременчугским университетом экономики, информационных технологий и управления создана научно-исследовательская лаборатория нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и научно-учебный производственный комплекс «Солар».

В интересах развития научных направлений в области наноматериалов и наноструктур и с целью координации и поддержки приоритетных научно-технических исследований на базе ИФП создан Научно-учебный центр «Физика, химия и технология наноструктур» при участии института физики, института металлофизики им. Г. В. Курдюмова, Прикарпатского и Черновицкого национальных университетов, Дрогобыцкого государственного педагогического университета и ГФФИ Украины.

За время существования ИФП научные разработки его сотрудников были удостоены Ленинской премии, двух Государственных премий СССР, получены 22 Государственные премии УССР и Украины в области науки и техники, Премии Совета Министров

СССР, 3 премий имени К. Д. Синельникова, 3 премии имени В. Е. Лашкарёва, 3 премии имени С. И. Пекара, премии имени С. Ф. Лебедева, 3 премии президентов Академий наук Украины, Беларуси, Молдовы, 13 сотрудников Института имеют почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины».

Институт входит в шестое десятилетие своего существования мощным научным коллективом, перед которым стоят сложные задачи. Современное развитие науки о полупроводниках переходит на новый уровень, появляются новые объекты для исследований, в первую очередь, это наноразмерные полупроводниковые материалы. Лаборатории ИФП оснащаются новым современным оборудованием для развития перспективных направлений фундаментальных и прикладных исследований. В институте готовятся молодые научные кадры для квалифицированного проведения научных исследований, продолжается интенсивное сотрудничество со многими зарубежными институтами и университетами.

Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева был, есть и, мы уверены, будет одним из крупнейших научно-исследовательских институтов Национальной академии наук Украины, который продолжает свою славную деятельность, опираясь на достижения великих предшественников.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Пул-мл. Ч. П., Оуэнс Ф. Дж. Нанотехнологии. 5-е изд. испр., доп.— М.: Техносфера, 2010.— 336 с.

Первое руководство на русском языке, описывающее структуру и свойства наноматериалов от твердотельных до биологических объектов. Изложена исчерпывающая информация о технологии изготовления и методах исследования наноструктур, разнообразных применениях — от оптоэлектроники до катализа и биотехнологий.

Пятое издание дополнено материалами по методическим аспектам «индустрии наносистем» и применениям нанотрубок в электронике.

Учебник-монография адресован широкому кругу научных работников, инженеров-электронщиков, специалистов в областях химических и биотехнологий.



НОВЫЕ КНИГИ



Применение высокоскоростных систем / Под ред. Кестера Уолта.— М.: Техносфера, 2009. — 368 с.

В книге рассмотрен метод высокоскоростного преобразования данных. В разделе 1 приведены архитектуры ЦАП и области их применения, а также оценочные комплекты АЦП и средство моделирования ADIsimADC®. Раздел 2 посвящен методам оптимизации интерфейсов преобразователей данных с помощью дифференциальных усилителей, трансформаторов и т.д. В разделе 3 рассмотрены ЦАП, оценочные аппаратные и программные средства ЦАП, программа их разработки и моделирования. В разделе 4 приведены сведения о топологии печатных плат. Подробно описываются программы разработки высокоскоростных систем. Предназначена для инженеров-конструкторов.

