

Рис. 4. Форма и угловая ширина пучка протонов с энергией 240 кэВ

### Заключение

Форма угловых распределений протонов, прошедших через стеклянный капилляр диаметром 0,5 мм и длиной 65 мм, определяется однократным рассеянием заряженных частиц внутренней поверхностью капилляра. При увеличении длины последнего в три раза на форму угловых распределений начинает сказываться влияние зарядки внутренней поверхности капилляра. Уменьшение диаметра капилляра до 0,1 мм показало, что прохождение через него протонов определяется в ос-

новном степени зарядки его внутренней поверхности. Конкуренция процессов зарядки внутренней поверхности и утечки заряда в узких капиллярах обеспечивает осциллирующий характер временной зависимости тока прошедших ионов. Обнаружен эффект перераспределения ионного пучка по углам вылета, т. е. в поле заряженного капилляра происходит разделение исходного пучка на ряд линий, отстоящих друг от друга на  $0,06^\circ$ .

### Литература

1. Силады М. Электронная и ионная оптика. — М.: Мир, 1990.
2. Stolterfoht N., Bremer J.-H., Hoffmann V., Hellhammer R., Fink D., Petrov A., Sulik B. // Physical Review Letters. 2002. V. 88. № 13. P. 133201-1.
3. Iwai Y., Ikeda T., Kanai Y., Kojima T. M., Kambara T., Kobayashi T., Anzai M., Nebeki T., Narusawa T., Pokhil G. P., Yamazaki Y. // ICACS'2006, Berlin. Germany. P. 76.
4. Жильяков Л. А., Костановский А. В., Кулинаускас В. С., Похил Г. П., Пресняков Д. В. // Поверхность. 2003. № 4. С. 6.
5. Lagutin A. E., Boyko E. B., Kamyshan A. S., Komarov F. F. — <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/>
6. Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Лагутин А. Е. // Вестник БГУ. Сер. 1. 2007. № 2. С. 8.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

## Investigation of ion-optical characteristics of dielectric capillaries

A. S. Kamyshan, F. F. Komarov, A. E. Lagutin

A. N. Sevchenko Institute for Applied Physical Problems of BSU, Minsk, Belarus

*A phenomenon of slipping of charged particles beams along the charged dielectric surface can be applied for some practical applications. In general, this is based upon interaction of slipped ion beams with a smooth internal surface of a glass capillary wall. The angular distributions of protons of 240 keV energy were measured. Protons passed through the glasses (boron-silicon) capillaries with a diameter of 0.1, 0.5 and length of 30, 65, 178 mm at the axial entry angles of particles  $\pm 0.2^\circ$  and in the range of proton beam currents from  $8.5 \cdot 10^{-13}$  to  $5 \cdot 10^{-11}$  A. It was shown, that the angular distribution profile of protons passed along the glass capillaries with the length of 65 mm is strongly determined by single scattering of the charge particles by capillary inner surface. Increasing of the capillary length of up to 178 mm changes the angular distribution profile since under these sizes it begins to tell the influence of charging an internal surface of the capillary.*

УДК 548.316:621.385.833:621.382

## Электронно-зондовые методы наведенного тока и потенциального контраста в анализе отказов специализированных интегральных схем считывания и обработки сигналов матричных ИК-фотоприемников

В. М. Акимов, Н. Н. Дремова, С. Н. Якунин

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Разработаны методики анализа на отказ и точной локализации дефектов интегральных схем с применением комбинаций методов наведенного тока и потенциального контраста*

**ста в растровом электронном микроскопе. На основании экспериментальных данных выявлены основные виды дефектов, приводящих к отказам мультиплексоров. Рассмотрена возможность исправления дефектов с помощью технологии фокусированных ионных пучков.**

Лидирующими материалами для создания матричных фотоприемных устройств (ФПУ) среднего и дальнего ИК-диапазонов спектра являются твердые растворы теллуридов кадмия и ртути, а также соединения антимонида индия [1]. Как правило, матрицы фотодиодов формируются на пластинах фоточувствительного материала по планарной либо меза-технологии. Механическая и электрическая стыковки фоточувствительной матрицы с кремниевым мультиплексором производятся по технологии flip-chip — холодной компрессионной сварки индиевых микроконтактов. Подобные гибридные матричные ФПУ могут содержать серию неработающих элементов, наличие которых может быть обусловлено дефектами как в фоточувствительной матрице, так и в кремниевом мультиплексоре.

Дефекты диодов в фоточувствительной матрице, как правило, проявляются в виде единичных неработающих пикселей либо в виде областей матрицы с пониженной чувствительностью, в то время как единичный дефект кремниевого мультиплексора может приводить к отказу его строк или выходу из строя всего матричного ФПУ.

Важной технологической задачей при создании матричных ФПУ является проведение контроля работоспособности матрицы фоточувствительных элементов и кремниевого мультиплексора до операции по их стыковке.

Цель настоящей работы — разработка методики пассивного тестирования специализированных интегральных схем (ИС) считывания и обработки сигналов матричных ИК-фотоприемников для проведения экспресс-анализа схемы на отказ и определения причины отказа.

Для контроля ИС обычно используются специализированные тестеры на базе ЭВМ, при этом на исследуемую ИС подаются все питающие напряжения и сигналы управления, а локализация неработающего узла проводится на уровне “черного ящика” [2]. Далее при визуализации участка ИС с помощью оптического или растрового электронного микроскопа (РЭМ) изучают узел схемы, находят отказавший элемент и устанавливают причину отказа. Для более оперативного анализа и своевременной коррекции соответствующего технологического этапа удобнее совместить указанные операции в одном диагностическом приборе.

Растровый электронный микроскоп является стандартным диагностическим инструментом в технологии микроэлектроники и позволяет проводить анализ отказов как по изображению топогра-

фии поверхности схемы во вторичных электронах, так и активным электронно-зондовым тестированием, основанным на анализе результата взаимодействия электронного луча с функциональными элементами интегральных схем. Набор дополнительных методик активного электронно-зондового тестирования позволяет локализовать дефект, вызвавший отказ без детального понимания самой ИС [3].

В настоящее время для анализа работоспособности ИС применяют более десяти разновидностей методов активного электронно-зондового тестирования. Наибольшее распространение получил метод наведенного тока в РЭМ [4] для исследования и диагностики барьерных структур полупроводниковой электроники. Метод резистивного контраста используется для контроля целостности разводки металлизации в интегральных схемах [5]. На базе метода потенциального контраста разработаны системы тестирования динамических процессов работы ИС и отображения логических состояний [6]. Используя метод электронно-индуцированных вариаций напряжения, в работе [7] были выявлены дефекты логических интегральных схем, находящихся в условиях функционирования, а также визуализированы логические состояния в МОП-микросхеме памяти. В работе [8] для исследования электрически активных дефектов в интегральных схемах и исходных приборных структурах был использован бесконтактный метод поверхностного электронно-индуцированного потенциала, позволяющий обнаружить места пробоев и другие электрически активные дефекты  $p$ - $n$ -переходов.

### Кремниевые микросхемы

Кремниевые микросхемы мультиплексора [9] выполняют накопление сигналов с отдельных фотодиодов на соответствующих конденсаторах, усиление, параллельный перенос накопленного заряда с конденсаторов накопления на конденсаторы хранения и последовательный вывод информации с конденсаторов хранения из холодной зоны для ее обработки.

В мультиплексорах реализовано пространственное разделение операций накопления и считывания информации и применены двухфазные динамические регистры сдвига. Ввод фототока в мультиплексорах осуществляется прямой инъекцией. Мультиплексоры изготавливали по  $n$ -канальной МОП-технологии с поликремниевыми затворами и толщиной подзатворного диэлектрика

~50 нм. Поликремний использовался также и для первого уровня разводки. Для изоляции элементов применяли либо LOCOS-технология, либо использовали области стоп-диффузии  $p^+$ -типа. Области исток–сток формировались имплантацией ионов фосфора или мышьяка. Межслойную изоляцию и планаризацию поверхности осуществляли осаждением слоя двуокиси кремния толщиной ~0,45 мкм.

### Методы

Для проведения анализа отказов были использованы известные методы наведенного тока (НТ) и потенциального контраста в растровом электронном микроскопе. В основе метода наведенного тока лежит явление генерации избыточных носителей заряда с помощью хорошо сфокусированного на поверхности полупроводника электронного зонда. При этом в качестве детектора избыточных носителей используют  $p$ - $n$ -переход, сформированный в исследуемом материале, а регистрируемой величиной является ток, наведенный электронным зондом, в короткозамкнутой цепи этого  $p$ - $n$ -перехода.

Электронно-лучевое зондирование дает возможность осуществлять визуализацию изменения потенциала — так называемый вольтов контраст. В основе этого явления лежит чувствительность низкоэнергетичных вторичных электронов к электростатическим полям. Вытягивающее поле детектора вторичных электронов может быть как нейтрализовано, так и усилено электростатическими полями на работающей ИС, возникающими вследствие различия напряжений на разных ее участках. Таким образом, количество вторичных электронов дает информацию об электрических свойствах прибора. Приемлемый контраст без использования дополнительных средств получается при напряжениях на элементах схемы не менее 1,5—2 В.

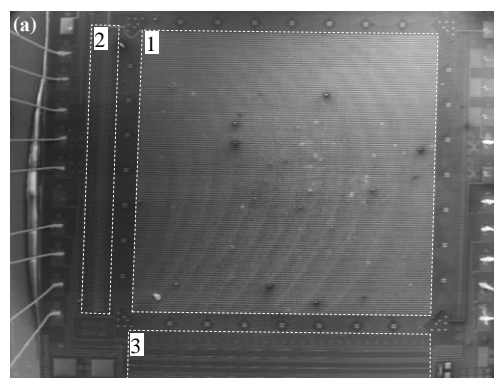
Экспериментальные методы были реализованы на растровом электронном микроскопе Philips SM515 с вакуумным разъемом для вывода электрических сигналов с исследуемой ИС. Сигналы наведенного тока с контактных площадок микросхемы регистрировались токовым усилителем 103В GW Electronics. Цифровая регистрация изображений осуществлялась системой пассивного захвата РЭМ-изображений MicroCapture [10].

### Анализ на отказ

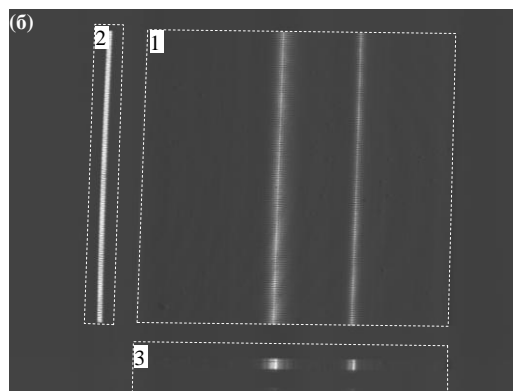
Наиболее критичной областью интегральной схемы к наличию дефектов является массив ключевых транзисторов, где единственный дефект может привести к отказу целой строки мультиплексора. Как показало динамическое тестирова-

ние мультиплексоров, наиболее распространенным видом дефектов в области массива ключевых транзисторов является замыкание сток-затворов полевых транзисторов.

Изображение поверхности микросхемы со структурно выделенными областями регистра управления, регистра считывания и собственно массива ключевых МОП-транзисторов заданного формата представлено на рис. 1, а. При детектировании сигнала наведенного тока со всех контактных площадок ИС все  $p$ - $n$ -переходы контрастировались как светлые участки микросхемы. При таком способе детектирования на изображении микросхемы в сигнале наведенного тока не наблюдалось никаких особенностей, по которым можно было бы судить о наличии отказа. Визуализация удаленных  $p$ - $n$ -переходов, не имеющих прямой электрической связи с контактными площадками, осуществлялась за счет прохождения сигналов НТ через МОП-транзисторы регистров управления, накопления и считывания, открытое состояние которых достигалось за счет наличия на поверхности микросхемы заряда, индуцированного электронным зондом.



а



б

Рис. 1. Изображение поверхности интегральной схемы в сигнале вторичных электронов (а) и в наведенном токе при детектировании сигнала с контактных площадок выбора четности регистра управления (б).

Выделенные области микросхемы:

1 — массив ключевых транзисторов; 2 — регистр управления; 3 — регистр считывания

При детектировании сигнала НТ с двух контактов выбора четности регистра управления (см. рис. 1, б) визуализируются как *p-n*-переходы двухфазного динамического сдвигового регистра, так и *p-n*-переходы, имеющие контакт с шинами поликремниевых затворов, объединенными в строки. Шина поликремниевых затворов изолирована от областей легирования ключевых МОП-транзисторов, поэтому появление случайного электрического контакта поликремниевой шины с сигнальной шиной либо областями стока приводит к детектированию сигнала НТ со всего столбца матрицы ключевых транзисторов. На изображении ИС в сигнале НТ (см. рис. 1, б) присутствуют яркие вертикальные полосы в области массива ключевых транзисторов, что указывает на наличие как минимум двух случайных замыканий “сток–затвор”.

Таким образом, критерием отказа микросхемы служило наличие сигнала наведенного тока (светлых полос) в области массива ключевых транзисторов при детектировании сигнала с контактных площадок регистра управления микросхемы

### Локализация дефектов

Визуализация столбца в режиме НТ дает информацию о наличии случайного контакта “сток–затвор” либо “затвор–сигнальная шина”, при этом вопрос о точном месте отказа остается открытым. Поиск дефектного элемента может быть проведен как простым визуальным осмотром всех элементов столбца, что потребует значительных затрат времени, так и с привлечением информации, полученной дополнительным методом.

Для точной локализации дефекта и выявления его природы использовали комбинацию методов наведенного тока и потенциального контраста. Приложение напряжения +2—5 В к тем же контактам выбора четности регистра управления позволяет детектировать потенциальный контраст шины поликремниевых затворов, который проявляется в уменьшении яркости шины в изображении поверхности ИС во вторичных электронах.

Наличие случайного контакта шины поликремниевых затворов с сигнальной шиной либо контакта “сток–затвор” приводит к утечке приложенного напряжения на землю и уменьшению потенциала поликремниевой шины во всей строке. Таким образом, строка с дефектным элементом может быть определена по отсутствию потенциального контраста шины поликремниевых затворов. В изображении ИС в сигнале НТ с приложенным напряжением утечка потенциала шины поликремниевых затворов на землю проявляется в виде темных строк (рис. 2). Места пересечений светлых столбцов и темных строк указывают на вероятные координаты неработающих элементов.

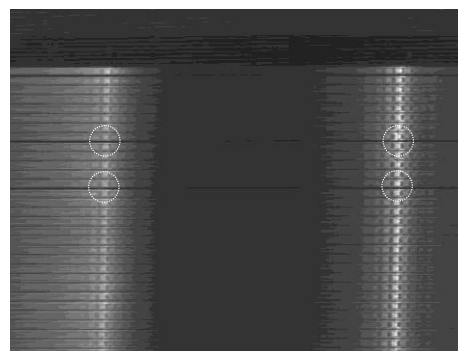


Рис. 2. Изображение фрагмента ИС в сигнале НТ с приложенным напряжением

На рис. 3, а, б показаны увеличенные изображения одного из выделенных на рис. 2 фрагментов матрицы в сигнале НТ и в изображении во вторичных электронах с потенциальным контрастом. Как видно из рис. 3, на пересечении сигнальной шины (Al) и шины поликремниевых затворов (Si\*) присутствует область с нарушенным межслойным диэлектриком, приводящая к электрическому контакту двух шин. Таким образом, столбец с дефектным элементом определялся по сигналу наведенного тока, в то время как точное положение дефекта (строка) — по отсутствию потенциального контраста поликремневых затворов. Кроме матрицы ключевых транзисторов, проводили идентификацию обрывов, замыканий и других отказов в регистрах управления и считывания.

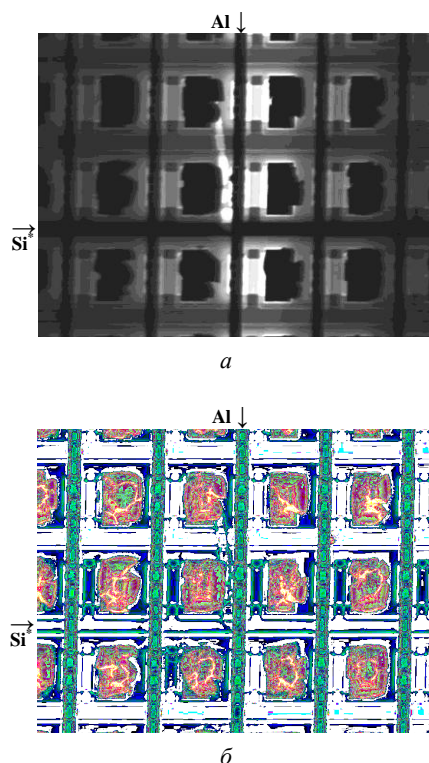


Рис. 3. Изображение выделенного (см. рис. 2) фрагмента матрицы ключевых транзисторов в сигнале НТ (а) и вторичных электронах (б) с приложенным потенциалом к шинам поликремниевых затворов

### Виды отказов

Анализ отказов серии мультиплексоров позволил установить основные виды дефектов, приводящих к отказу ИС. Наиболее распространенной причиной отказа кремниевых мультиплексоров является замыкание шин различных уровней разводки за счет нарушения межфазного окисла (рис. 4, *а*). Другим распространенным видом отказа (см. рис. 4, *б*) является контакт шин различных уровней разводки за счет присутствия микроскопических пор в межфазном окисле или за счет формирования поликремниевых зерен, выраженный рельеф которых также нарушает слой окисла. Непосредственный контакт поликремниевого затвора с областью легирования стока транзистора может происходить за счет дефекта рисунка поликремниевого затвора (см. рис. 4, *в*). При дефекте подзатворного диэлектрика (см. рис. 4, *г*) может появляться электрический контакт между затвором и каналом полевого транзистора, при этом неоднородность поверхности диэлектрика сказывается на рельефе поликремниевого затвора.

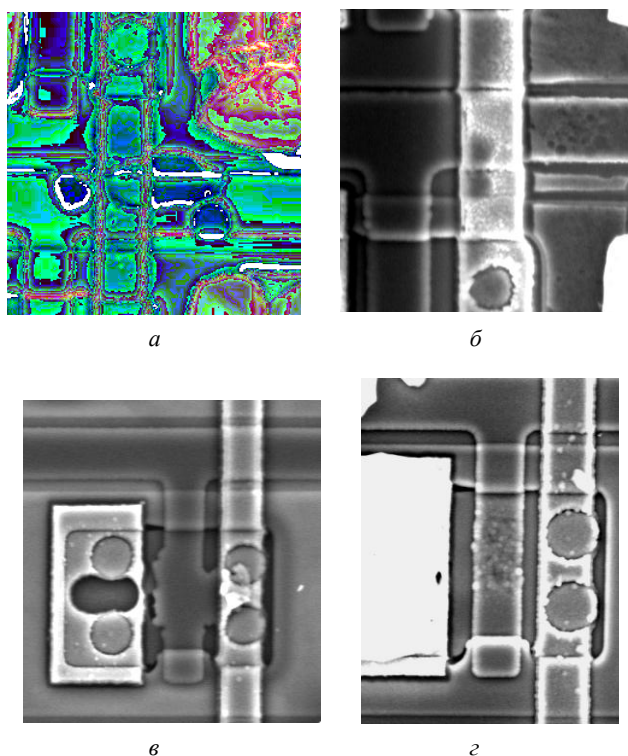


Рис. 4. Основные виды дефектов (*а—г*), приводящих к отказу ИС

### Редактирование дефектов

Выявление причин и механизмов отказов интегральных схем позволяет проводить совершенствование технологии их изготовления. С другой стороны, точная локализация дефекта дает возможность проводить его редактирование и восста-

навливать работоспособность схемы в целом с применением технологии “фокусированных ионных пучков” (FIB).

Применение тонкой ионно-лучевой технологии препарирования и реконструкции субмикронных элементов интегральных схем позволяет реализовать такие технологические операции как локальное удаление материала ионным фрезерованием или селективным ионно-стимулированным травлением с применением реагентов  $\text{XeF}_2$  и  $\text{I}_2$ , локальное ионно- или электронно-стимулированное осаждение диэлектриков ( $\text{SiO}_2$ ) и проводников (Pt, W) для изоляции и создания проводящих элементов ИС, соответственно.

Редактирование дефектов вида “поры межфазного окисла” (см. рис. 4, *а*) проводилось на установке FIB Quanta 3D посредством изоляции в области контакта шин различных уровней разводки и созданием обводного шунта на поверхности пассивирующего диэлектрика.

На первом этапе фокусированным ионным пучком вскрывались окна в пассивирующем диэлектрике  $\text{SiO}_2$  на алюминиевой шине верхнего уровня металлизации. Затем ионно-индуцированным осаждением из газовой фазы формировалась проводящая дорожка на некотором расстоянии от места пересечения шин. На завершающем этапе проводилось изолирование области контакта шин путем сечения сигнальной алюминиевой шины фокусированным ионным пучком. Результат реконструкции элемента мультиплексора показан на рис. 5.

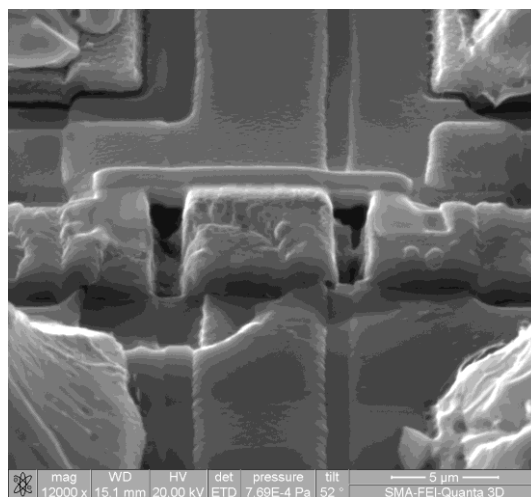


Рис. 5. Результат редактирования дефектного элемента ИС

Другой, более перспективный, способ редактирования подобных дефектов может основываться на повторении технологических операций изготовления ИС на локальном участке после удаления слоев, содержащих дефектные элементы: по-

следовательное восстановление поликремниевой шины, слоя межфазного окисла, алюминиевой шины и пассивирующего диэлектрика.

### Заключение

С применением методов наведенного тока и потенциального контраста в растровом электронном микроскопе разработана методика пассивного анализа отказов специализированных ИС считывания и обработки сигналов матричных ИК-фотоприемников. Данный подход позволил выявить основные виды дефектов, приводящих к отказам мультиплексоров. Детальный анализ природы возникновения дефектов позволил внести корректировки в технологический процесс изготовления мультиплексоров, что в конечном итоге привело к увеличению процента выхода годных ИС. Показана возможность исправления единичных дефектов и восстановления работоспособности ИС с применением технологии фокусированных ионных пучков, что может быть полезно при изготовлении тестовых образцов и мелкосерийном производстве изделий.

Авторы выражают благодарность Э. И. Рау за полезные обсуждения, а также представительству FEI Cotrapu — «Системы для микроскопии и анализа» за идейное сопровождение работы по редактированию дефектов и предоставленное для использования оборудование DualBeam Quanta 3D.

### Литература

1. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов на основе фотодиодов из CdHgTe// ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1257—1265.
2. Lee W., Pabbisety S. V. Microelectronic Failure Analysis: Desk Reference, 3rd Edition, ASM International, 1993.
3. Cole E. I., Soden J. M. Scanning Electron Microscope Techniques for IC Failure Analysis. ASM International, 1997.
4. Beall J. R. Electron Beam Induced Current Application Techniques, ASM International, 1997.
5. Smith C. A., Bagnell C. R., Cole Jr. E. I., DiBianca F. A., Johnson D. G., Oxford W. V., Propst R. H. Resistive Contrast Imaging: A New SEM Mode for Failure Analysis//IEEE Transactions on Electron Devices. Feb. 1986. V. ED-33. № 2. P. 282—285.
6. Fazekas P., Feuerbaum H. P., Wolfgang E. Scanning Electron Beam Probes VLSI Chips// Electronics. 1981. V. 54. № 14. P. 105—112
7. Беляев С. А., Дюков В. Г., Коломейцев М. И. и др. Локализация дефектов интегральных схем отображением логических состояний в РЭМ// Известия Академии наук СССР. Сер. физич. 1980. Т. 44. № 6. С. 1170—1174.
8. Гостев А. В., Клейнфельд Ю. С., Рау Э. И. и др. Неразрушающий бесконтактный контроль кремниевых пластин и приборов на их основе с помощью индукционно-зарядовой ЭДС в растровом электронном микроскопе// Микроэлектроника. 1987. Т. 16. Вып. 4. С. 311—319.
9. Акимов В. М., Болтарь К. О., Климанов Е. А. и др. Матричные МОП-мультиплексоры различных форматов для фотоприемных устройств смотрящего типа// Прикладная физика. 2003. № 2. С. 80—82.
10. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2001611618. — М., 2001.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

## Electron-beam methods of induced current and potential contrast in the failure analysis of front-end matrix for IR photodetectors

V. M. Akimov, N. N. Dreomova, S. N. Yakunin  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*In the present work the failures analysis of the silicon multiplexers is carried out. The failure analysis of "short circuit of polysilicon gate on the signal bus" was carried out by a method of the induced current in SEM. For exact localization of defect and determination of its nature the combination of methods of the induced current and potential contrast was used. The line with a defective unit was determined on a signal of the induced current, exact column on minimal of potential contrast of polysilicon gate. This method allowed determining basic type of defects of multiplexers, resulting on failures, the detailed analysis of a nature of defects has allowed to improvement the technological process of manufacturing of multiplexers. The ability and expediency of correction of individual defects through technology focused ion beams is discussed.*

\* \* \*