

*analysis of charged particle beams in the most general tensor form. It is shown that perturbation technique, being combined with other numerical approaches such as the tau-variations method and generalized method of initial parameters variation, proves to be most promising for evaluation of mechanical tolerances and simulation of Coulomb repulsion effects and charged particles scattering upon a fine-structure grid.*

УДК 537.533

## Электронно-зондовый контроль мостовых структур микроболометрических матриц

*Н. Б. Каган, Г. В. Либерова, С. Н. Якунин*

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный  
научный центр РФ, Москва, Россия

*Представлены результаты разработки и практического применения методик контроля с помощью растровых электронных микроскопов (РЭМ) технологических процессов изготовления приборов микрофотоэлектроники. Разработанные методики, базирующиеся на стандартной технике эксплуатации РЭМ в режимах формирования изображений во вторичных и отраженных электронах, были использованы для решения задач, связанных с отработкой и оптимизацией режимов технологических процессов изготовления мостовых структур микроболометрических матриц. На ряде конкретных примеров продемонстрирован положительный эффект применения РЭМ-контроля.*

Растровая электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализом широко и успешно используется в технологии изделий микрофотоэлектроники как метод контроля топографии поверхности приборных структур и анализа элементного состава материалов при отработке режимов технологических процессов и установлении причин технологического брака изделий. Опыт работы с реальными структурами приборов микрофотоэлектроники показал, что для эффективного использования многообразных диагностических возможностей современных аналитических РЭМ требуется детальная разработка специальных методик анализа и контроля применительно к основным наиболее распространенным категориям задач.

Цель настоящей работы — разработка простых методик контроля на базе РЭМ, позволяющих использовать последние в качестве инструмента экспресс-контроля как на этапе отработки технологии изготовления микроболометрических матриц (МБМ), так и в процессе их производства для отбраковки промежуточных структур, а также при анализе причин технологического брака. Опыт работы с МБМ убедительно продемонстрировал целесообразность использования РЭМ в качестве инструмента межоперационного контроля.

Первая и основная задача, которая может быть успешно решена с помощью РЭМ, сводится к анализу полной конфигурации чувствительного элемента. Цель такого контроля — выявление имеющихся и потенциальных термических утечек, создающих неконтролируемый теплоотвод от чувствительного элемента.

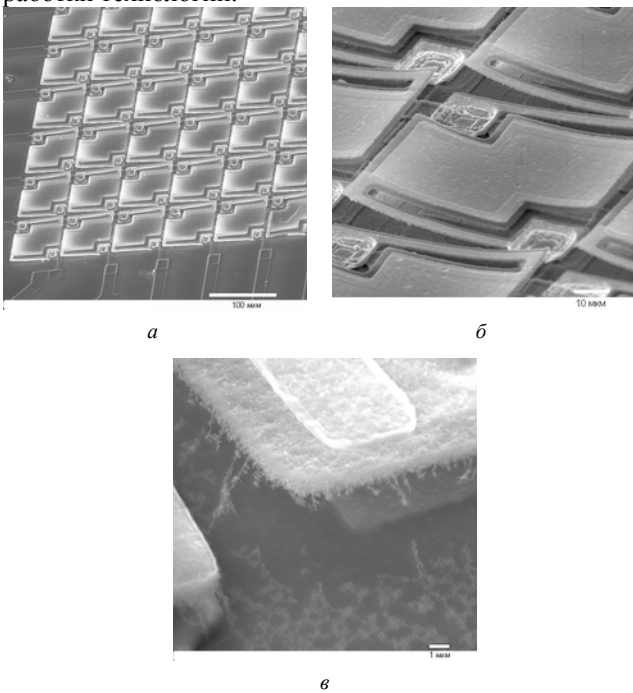
Вторая группа задач, решаемых с помощью РЭМ, — анализ микроморфологии и оценка толщины отдельных слоев приборной структуры, т.е. чувствительных слоев, контактных покрытий, диэлектрических слоев, пленок-зеркал и жертвенных слоев. Цель этих исследований — контроль результатов операций химического и плазмохимического травления, напыления, осаждения, вскрытия окон и других операций, используемых в технологическом процессе формирования приборных структур.

Отдельное третье направление составляют задачи контроля профиля слоев фоторезистов и технологии удаления фоторезистивных масок.

В связи с тем, что МБМ в целом (рис. 1) и каждый отдельный чувствительный элемент имеют довольно сложную конфигурацию, для анализа такого объекта в РЭМ требуется разработка специальной методики, которая обеспечивает формирование наиболее информативных изображений с учетом морфологических особенностей изучаемых структур. Как известно, информация о морфометрических параметрах исследуемого объекта, получаемая с помощью РЭМ, существенным образом зависит от взаимной ориентации этого объекта, электронного зонда и системы детектирования сигнала. Это означает, что достоверное описание морфологии объекта по изображению случайной проекции в принципе невозможно. В связи с этим основная задача, стоящая перед разработчиком методики, сводится к нахождению такой геометрии съемки, которая обеспечивает максимально возможную информативность и достоверность изображений.

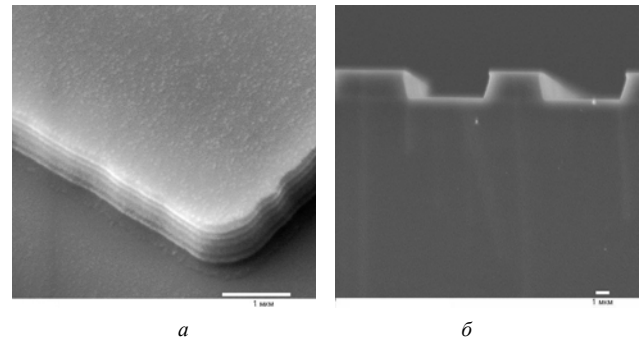
Чувствительный элемент МБМ представляет собой многослойную структуру, имеющую кон-

фигурацию плоского или вогнутого висячего моста с двумя точками опоры на контактных площадках в концах висячих контактных дорожек. Типичный размер чувствительной площадки  $\sim 50 \times 50$  мкм, в то время как зазор между площадкой и подложкой составляет величину от десятых долей микрона до 1—2 мкм, а расстояние между соседними площадками матрицы — единицы микрон. На рис. 1, б в качестве примера представлено растровое изображение во вторичных электронах типичного элемента матрицы. Для получения наиболее полной информации о конфигурации систем с такой геометрией в РЭМ формировались изображения проекций, образующихся при больших углах наклона образца, т. е. в условиях, когда нормаль к поверхности площадки составляет угол  $\sim 50\text{—}70^\circ$  с оптической осью РЭМ. Очевидно, что в такой проекции возникают существенные искажения масштаба, но вместе с тем она является наиболее информативной для визуализации пространства между чувствительной площадкой и подложкой, что имеет принципиальное значение для выявления каналов неконтролируемого теплоотвода. Рис. 1, в демонстрирует наличие таких микроканалов, которые возникли на первом этапе разработки технологии.



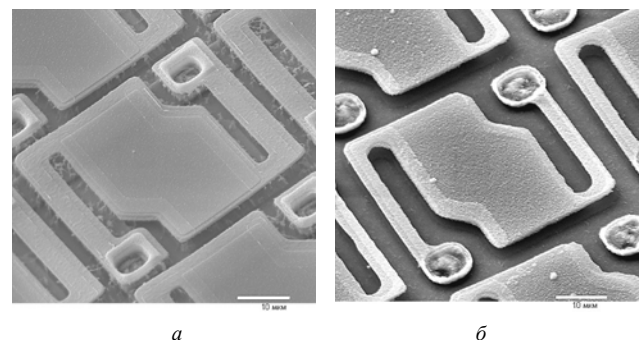
**Рис. 1. Конфигурация мостовых структур:**  
 а — фрагмент МБМ; б — чувствительный элемент МБМ;  
 в — фрагмент дефектного чувствительного элемента с микроканалами неконтролируемого теплоотвода

Оценочные измерения толщины слоев осуществлялись по изображениям как наклонных проекций, так и сколов приборных и специальных модельных структур. Для получения сколов структур, содержащих слои полиимидного лака и фоторезистов, была применена техника скалывания в жидком азоте. В качестве примера на рис. 2 представлены изображения фрагментов фоторезистивных масок: а — наклонная проекция, б — скол фоторезистивной маски.



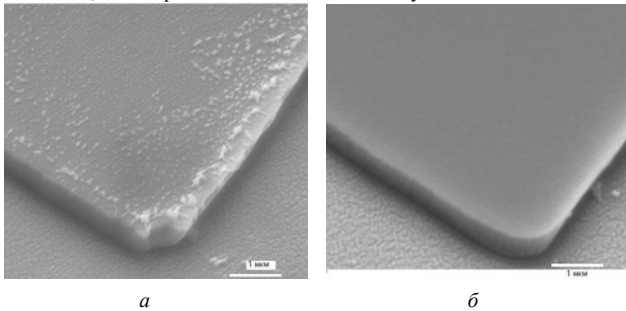
**Рис. 2. Фрагменты фоторезистивных масок:**  
 а — слой фоторезиста толщиной  $\sim 0,8$  мкм на структуре Si—Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; б — скол структуры Si-фоторезист

Положительный эффект применения РЭМ-контроля в технологии описанных структур был достигнут при отработке режимов ряда важных операций, в том числе таких, как вытравливание жертвенного слоя полиимидного лака, удаление фоторезистивных масок и вскрытие контактных окон. С помощью РЭМ на подложке структуры была выявлена полимерная пленка, которая образуется, по-видимому, в результате травления нитрида кремния после удаления жертвенного слоя. Очевидно, что фрагменты этой пленки могут формировать термические "закоротки", создающие дополнительный теплоотвод от чувствительного элемента. Подбор режимов травления и введение дополнительных операций с использованием межоперационного РЭМ-контроля позволили сформировать структуры, свободные от такой пленки. На рис. 3, а, б для сравнения представлены изображения фрагментов мостов, сформированных по начальному и усовершенствованному вариантам технологий. По данным РЭМ-контроля структур, на этапе удаления фоторезистивных масок была скорректирована технология снятия фоторезистов, что обеспечило полную очистку поверхности от остаточных микроскопических фрагментов фоторезиста (рис. 4, а, б). На этапе вскрытия контактных окон РЭМ-контроль структур обеспечил возможность визуализации профиля стенки окна, образующегося при травлении слоев лака и нитрида кремния. Для выявления формы профиля применялись изображения как поверхности пластины, наклоненной на угол  $\sim 50\text{—}70^\circ$  к оптической оси, так и сколов по плоскости (110) через контактные окна. На рис. 5 представлено изображение скола структуры кремний—полиимидный лак по диаметру вытравленного в лаке окна.



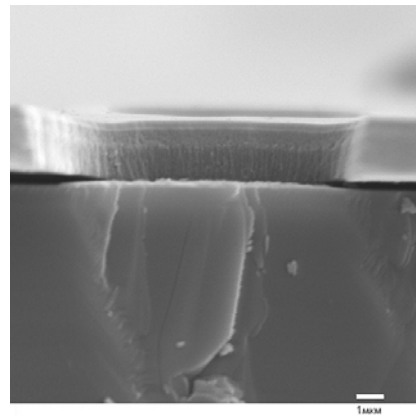
**Рис. 3. Фрагменты МБМ:**

*a* — вариант несовершенной технологии удаления пленки с подложки; *б* — вариант технологии полного удаления пленки



**Рис. 4. Фрагменты приборных структур после снятия фоторезистивных масок:**

*a* — вариант несовершенного удаления фоторезиста;  
*б* — вариант полного удаления



**Рис. 5. Скол структуры кремний—лак по диаметру вытравленного в лаке окна**

На основе полученной таким способом информации была разработана технология комбинированного плазмохимического травления для создания контактных окон с требуемым профилем наклона стенок, что обеспечило возможность напыления слоев металлизации без разрывов и, следовательно, формирования надежных контактов.

*Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.*

## Bridge structure control of microbolometer array using electron probe

*N. B. Kagan, G. V. Liberova, S. N. Yakunin*  
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The results of development and practical application of the methods to control technological processes involved in fabrication of microphotoelectronics devices using regular scanning electron microscope (SEM) are presented. The methods employ standard SEM protocols in the image-forming regime in the secondary and backscattered electron beams. These methods were successfully applied for the problems arising in technological optimization of the fabrication processes for bridge structures in the microbolometer arrays. Positive effect of SEM usage is demonstrated in a number of examples.*

УДК 531.75

## Зоны устойчивости квадрупольного масс-спектрометра в продольном магнитном поле

*Ю. К. Голиков, Н. К. Краснова, К. В. Соловьев*  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, С.-Петербург, Россия

*В. А. Елохин, В. И. Николаев*  
ОАО "Научные приборы", С.-Петербург, Россия

*Рассмотрена методика построения зон устойчивости системы уравнений движения заряженной частицы в поле электрического квадруполя с периодическим питанием в постоянном магнитном поле.*