

Заключение

Показана принципиальная возможность распознавания на изображениях полированной поверхности халькогенидов цинка вида имеющих дефектов и определения их количественных характеристик.

Разработана методика использования компьютерной программы для оценки качества полированных поверхностей в соответствии с ГОСТ 11141—84. Отмечено, что положения этого стандарта требуют доработки для однозначной идентификации вида и размеров дефектов поверхности.

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для получения детальных количественных характеристик дефектов поверхности, в том числе их функций распределения по размерам.

Литература

1. Гавришчук Е. М., Тимофеев О. В., Погорелко А. А., Сучков А. И.//Неорганические материалы. 2004. Т. 40. № 3. С. 267.
2. Гавришчук Е. М., Потелов В. В., Сенюк Б. Н., Тимофеев О. В.//Прикладная физика. 2005. № 5. С. 107.
3. Тимофеев О. В., Кушнин С. Р., Гавришчук Е. М., Радебиль Б. А.: Тез. докл. 12-й конф. "Высококачественные вещества и материалы (получение, анализ, применение)". — г. Нижний Новгород, 2004. С. 299.
4. Девярых Г. Г., Коршунов И. А., Гавришчук Е. М. и др.//Высококачественные вещества. 1993. № 3. С. 16.
5. Боровских У. П., Тимофеев О. В., Вилкова Е. Ю., Попова Е. Ю.: Тез. докл. 13-й конф. "Высококачественные вещества и материалы (получение, анализ, применение)". — Нижний Новгород, 2007. С. 196.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

Computer estimation procedure for quality of the polished surfaces of polycrystalline zinc chalcogenides

E. M. Gavrishchuk, E. Yu. Vilkova, A. N. Kolesnikov, O. V. Timofeev
Institute of chemistry of high-purity substances RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

A procedure for the quantitative assessment of the optical finish of the polished surface of zinc selenide is developed. The procedure is based on computer recognition of defects on microphotography of surface which makes it possible to build their distribution functions according to the sizes and to determine the quality of polishing according to GOST 11141—84.

PACS: 85.60.-g

УДК 548.25: 621.383.4

Разработка элементов технологии монолитного инфракрасного фотоприемника

*М. В. Якушев, В. В. Васильев, С. А. Дворецкий, Т. И. Захарьян, А. И. Козлов,
Ю. Г. Сидоров, Б. И. Фомин, А. Л. Асеев*
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

А. В. Виноградов
УРБВТиСП Минобороны России, Москва, Россия

Е. В. Дегтярев
ФГУ "22 ЦНИИ России", Мытищи Московской обл., Россия

Предложена технология инфракрасных (ИК)-детекторов, основанная на монолитных интегрированных ИК-матрицах фокальной плоскости, которая может стать заменой традиционной технологии гибридных матриц фокальной плоскости. Исследованы критические вопросы, касающиеся выращивания слоев HgCdTe на кремниевой считывающей интегральной схеме (ИС) и создания монолитных матриц фокальной плоскости: 1 — модель кремниевой считывающей ИС и макеты матриц фокальной плоскости; 2 — устойчивость

считывающей ИС к высокотемпературному отжигу в вакууме; 3 — низкотемпературная очистка Si(310)-подложек; 4 — рост слоев CdTe и HgCdTe в окнах вскрытых в диэлектрике, нанесенном на поверхность Si(310); 5 — создание меза-структуры и соединяющих контактов. Полученные результаты показывают, что монолитное интегрирование ИК-матриц фокальной плоскости на основе HgCdTe на кремниевую считывающую ИС является вполне осуществимым процессом.

PACS: 07.57.Kp

Введение

Основным направлением в производстве ИК-матриц фокальной плоскости (ИКМФП) на данный момент является гибридная технология, при которой матрица детектора на основе HgCdTe (КРТ) и кремниевая интегральная микросхема считывания (ИМСС) формируются отдельно, а затем соединяются поэлементно индием. Размер таких гибридных матриц и количество пикселей ограничены следующими факторами:

- размером коммерчески доступных подложек CdZnTe, используемых для эпитаксиального роста КРТ;
- большим расхождением коэффициентов термического расширения между HgCdTe/CdTe и Si ($4,8 \cdot 10^{-10}$ и $2,3 \cdot 10^{-10}$ K⁻¹, соответственно), что ведет к рассогласованию между матрицами детектора и ИМСС в процессе циклов нагрева и охлаждения;
- заменой обыкновенных CdZnTe-подложек на композитные подложки CdZnTe/Si.

В настоящее время на кремниевых подложках получены слои КРТ приборного качества и созданы ИКМФП с размерностью до 1024×1024. Тем не менее даже эти ИКМФП на основе кремния имеют некоторые недостатки гибридных матриц, например, матрицы детектора и считывающей схемы скрепляются прижиманием, что требует достаточно больших усилий, и из-за сильной подверженности матриц к повреждениям при вибрации возникают паразитные емкости и индуктивности, ведущие к снижению чувствительности и высокочастотной полосе поглощения.

Технология, в которой матрица детектора на основе КРТ монолитно интегрируется с кремниевой ИМСС, позволит избавиться от вышеперечисленных недостатков и может стать передовой технологией для высокопроизводительных ИКМФП большого формата. Такая система имеет следующие преимущества:

- исключение сложных и низковоспроизводимых процессов гибридизации;
- решение проблем, касающихся термического расширения, что ведет к более длительной термической стабильности МФП, в том числе большого формата;

- создание компактных систем с уменьшенной тепловой нагрузкой;
- уменьшение стоимости за счет увеличения производительности.

Монолитные фотоприемные матрицы можно создать посредством технологий, которые связаны с применением компаунда для укрепления связи ФЧЭ и мультиплексора, таких как HDVIP™ [1], "loophole"-технологии [2] или монолитизация гибридной сборки ИК ФП [3].

Альтернативный способ создания монолитного фотоприемного устройства (ФПУ) заключается в выращивании методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) слоев КРТ в специально отведенных для этого участках на поверхности мультиплексора.

При использовании "ростовой" технологии монолитная ИКМФП будет образована из элементов, подобных представленным на рис. 1.

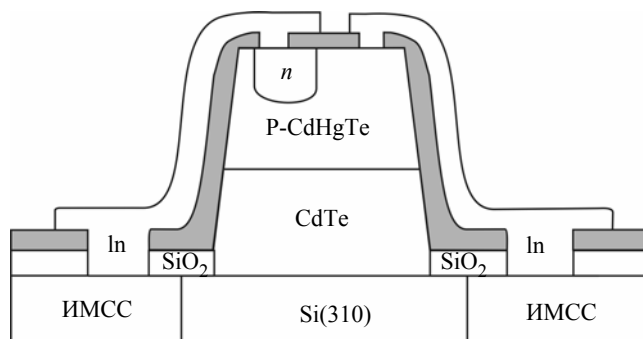


Рис. 1. Схема фоточувствительного элемента монолитного матричного фотоприемника

Несмотря на то, что имеющаяся технология выращивания композитных подложек CdTe/Si и слоев HgCdTe/CdTe/Si методом МЛЭ позволяет сделать подход к решению проблемы монолитности, создание по-настоящему монолитных структур требует решения ряда конструктивных и технологических проблем. Некоторые ключевые моменты при разработке технологии создания монолитной ИКМФП перечислены ниже:

- использование схемы ИМСС, адаптированной для создания монолитной ИКМФП;
- ИМСС должна быть реализована на подложке с соответствующей ориентацией (в нашем случае это Si(310));

- возможность осуществления контроля роста CdTe и CdHgTe на ИМСС-подложке;
- применение методики легирования HgCdTe примесями *n*- и *p*-типов;
- предотвращение осаждения на область ИМСС с помощью селективной эпитаксии или удаление осажденных слоев селективным травлением или другими методами;
- создание надежных контактов между ИКМФП и ИМСС;
- максимальная температура в течение всего процесса (включая подготовку кремниевой подложки, рост и создание прибора) не должна превышать 500 °С для кремниевой ИМСС.

В данной работе представлены результаты, полученные в ИФП СО РАН, по созданию монолитного приемника ИК-излучения.

Влияние отжига в вакууме на параметры матричного мультиплексора

Для моделирования предэпитаксиального отжига использовали 128×128-матричный мультиплексор МХ-4. Параметры его схемы:

- p*-канал на исходной подложке КЭФ-7,5 (100);
- n*-канал в кармане 4,5 мкм, $N_s = 1,96 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на 0,8 мкм. Расчетное значение порогового напряжения +0,868 В;
- полевой окисел — 1 мкм;
- подзатворный диэлектрик — 500 Å хлорного окисла;
- 2-poly, poly-затворы легированы фосфором;
- стоки: *p*-канал 1,29 мкм, *n*-канал 1,38 мкм;
- завершение схемы: алюминий +1 % кремния, моносилановый окисел, окна в окисле, водород.

Образцы, вырезанные из одной пластины с мультиплексором, были отожжены в вакууме при различных температурах. В таблице представлены результаты измерений пороговых напряжений и напряжений пробоя для *n*-канальных и *p*-канальных транзисторов после каждого отжига.

Из таблицы видно, что *p*-канальный транзистор сохраняет свои характеристики при отжиге до температуры 580 °С, а *n*-канальный — при отжиге до температуры 520 °С.

Определение минимальной температуры предэпитаксиального отжига

Как следует из вышесказанного, при создании монолитного фотоприемника температура предэпитаксиального отжига должна быть ниже 520 °С. Авторы использовали предэпитаксиальную подготовку, в результате которой получалась поверхность, пассивированная монослоем атомарного водорода [4]. Стандартной процедурой предэпитаксиального отжига подложек из Si для эпитаксиального роста соединений $A^{II}B^{VI}$ является отжиг в парах As_4 [5]. В результате такого отжига поверхность кремния освобождается от водорода и пассивируется мышьяком. Температура десорбции водорода с поверхности кремния составляет 550—600 °С [6]. Однако в присутствии паров As, энергия связи которого с кремнием выше, чем энергия связи Si—H, замещение H на As может происходить при более низких температурах.

На рис. 2 представлены дифракционные картины поверхности слоев ZnTe, выращенных на подложках Si(310), отожженных в парах As_4 при различных температурах. На рис. 2, а, з представлены два крайних случая.

Дифракционная картина на рис. 2, а получена от образца, выращенного без предэпитаксиального отжига в парах As_4 . Картина характеризуется размытыми луковочками, что говорит о том, что выросший ZnTe имеет поликристаллическую структуру.

Дифракционная картина на рис. 2, з получена от образца, выращенного после предэпитаксиального отжига в парах As_4 при температуре 550 °С. Картина образована вертикальными, резкими дифракционными рефлексамии, что говорит о том, что выросший ZnTe имеет монокристаллическую структуру.

Дифракционные картины на рис. 2, б, в получены от образцов, выращенных после предэпитаксиального отжига в парах As_4 при температурах 300 и 450 °С, соответственно. Из рис. 2, в и з видно, что дифракционные картины полностью идентичны. Это означает, что температуры предэпитаксиального отжига, равной 450 °С, достаточно для роста монокристаллического ZnTe.

Влияние отжига в вакууме на пороговые напряжения и напряжения пробоя транзисторов мультиплексора МХ-4

$T, ^\circ\text{C}$	<i>n</i> -канал		<i>p</i> -канал		Примечания
	$U_{thr}, \text{В}$	$U_{br}, \text{В}$	$U_{thr}, \text{В}$	$U_{br}, \text{В}$	
20	+0,65	+15	-0,8	-15	
460	+0,7	+15	-0,85	-15	Внешний вид — без изменений
520	+0,7	+15	-0,9	-15	То же
580	0	0	-0,8	-15	Внешний вид — алюминий расплавлен (образовал эвтектику с кремнием)
640	0	0	-0,7	-7	<i>p</i> -канал — мягкий пробой, но транзистор работает нормально

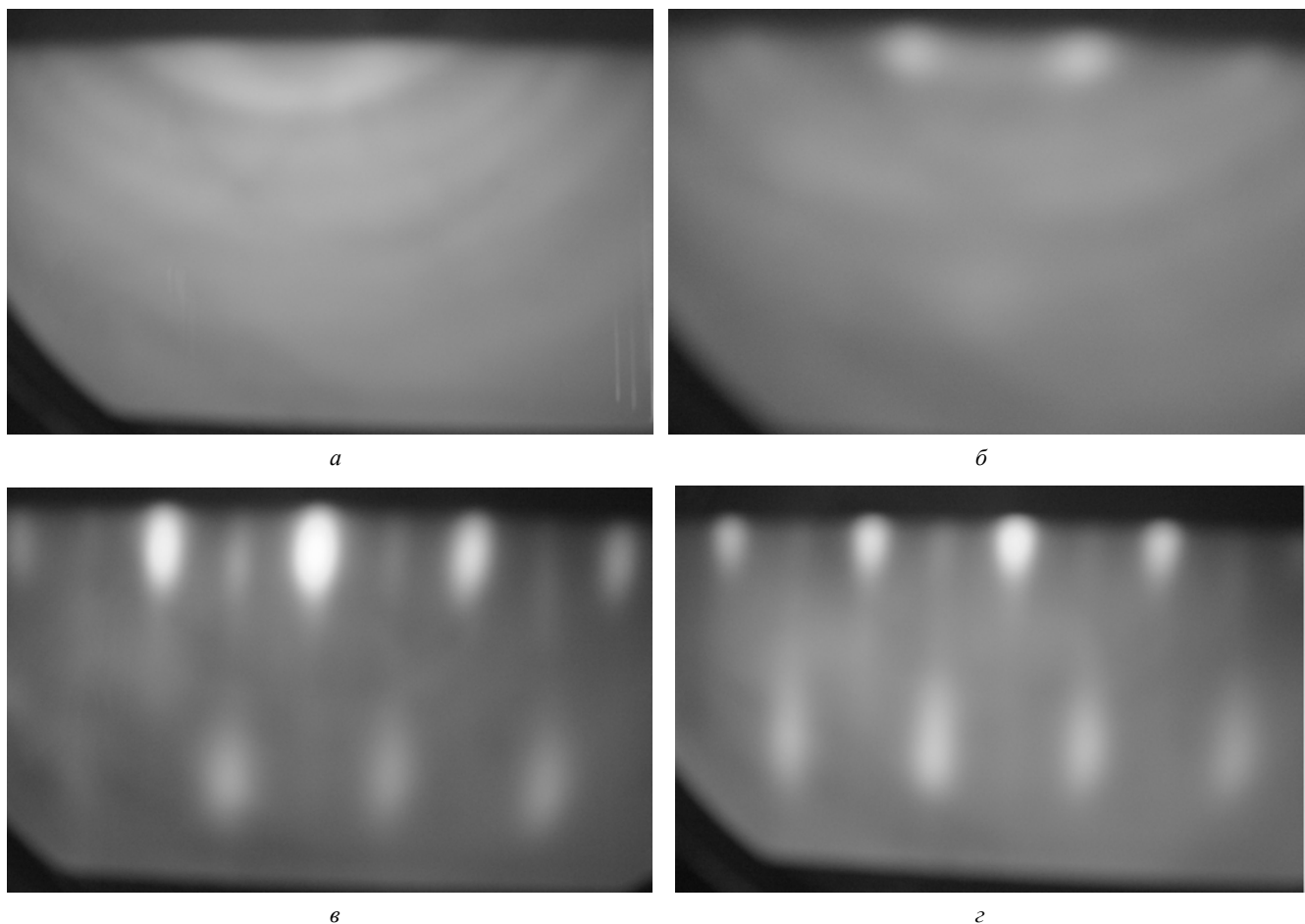


Рис. 2. Дифракционные картины от ZnTe, выращенного на поверхности As—Si(310) после предэпитаксиального отжига при различных температурах, °C:
 а — 20; б — 300; в — 450; г — 550

Селективный рост

Для проверки возможности роста слоев ZnTe, CdTe, CdHgTe в окнах, вскрытых в диэлектрике, был изготовлен специальный фотошаблон, состоящий из чередующихся в определенной последо-

вательности квадратных окон разных размеров. Размеры окон варьировались от 30×30 до 100×100 мкм. В центре шаблона для проведения эллипсометрических и дифракционных измерений было создано специальное окно размером 75×15 мм. Общий вид шаблона представлен на рис. 3.

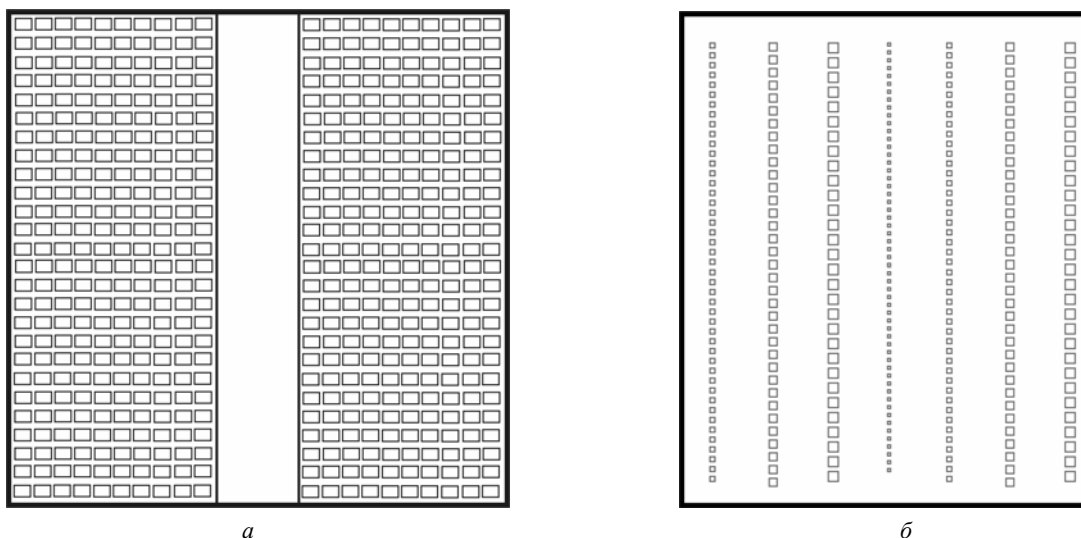


Рис. 3. Фотошаблон для селективного роста:
 а — общий вид; б — вид одного элемента

С использованием данного шаблона в слое SiO_2 толщиной 0,7 мкм, нанесенном на поверхность $\text{Si}(310)$, были вскрыты окна. Затем поверхность кремния в окнах была окислена в горячей азотной кислоте. Толщина окисла в окнах составляла 2—3 нм.

Перед загрузкой в вакуумную систему образцы погружали на 30 с в 0,5%-ный водный раствор плавиковой кислоты. Такая процедура позволяла удалить тонкий окисел в окнах и оставляла практически неизменным толстый окисел маски. Далее образцы сушили на центрифуге и загружали в установку МЛЭ. Затем на селективной подложке по стандартной методике [7] были выращены гетероструктуры КРТ, состоящие из слоев ZnTe , CdTe и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ толщиной 0,02; 6 и 7 мкм, соответственно. Мольная доля кадмия в КРТ в процессе роста поддерживалась на уровне $x = 0,3$.

На рис. 4 представлены фотографии поверхности КРТ, выросшего в окнах разных размеров. Данные фотографии совместно с дифракционными картинками, которые авторы наблюдали в процессе роста этих гетероструктур, свидетельствуют о том, что в окнах вскрытых в диэлектрике, вырос монокристаллический КРТ. Из рис. 4 видно, что V -дефекты образуются по периметру окна. Это означает, что возможно получение селективных гетероструктур КРТ без V -дефектов и что размеры окна не могут быть меньше определенной величины.

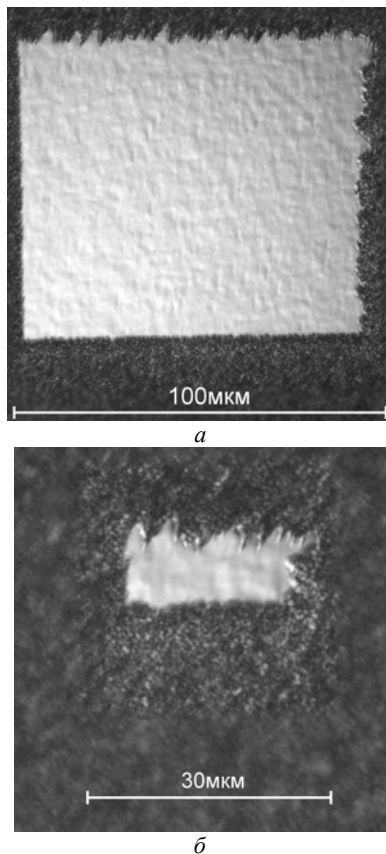


Рис. 4. Вид поверхности КРТ, выросшего в окнах, вскрытых в SiO_2 , нанесенном на поверхность $\text{Si}(310)$: а — окно размером 100×100 мкм; б — окно размером 30×30 мкм

Окно размером 75×15 мм в центре пластины было необходимо не только для контроля процессов роста КРТ, но и для измерения электрофизических параметров выросшего материала. Из материала, выросшего в окне размером 75×15 мм, было выколото несколько образцов произвольного размера. На этих образцах были измерены толщина и состав слоев, концентрация и подвижность основных носителей заряда. Мольная доля теллурида кадмия в образцах составляла $x = 0,3—0,31$. Образцы после роста имели n -тип проводимости и следующие электрофизические параметры (при 77 К): концентрация электронов — $(1—2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность $(1,0—1,5) \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Часть образцов затем была переведена в p -тип посредством отжига в инертной атмосфере при 225 °С. После отжига концентрация дырок составляла $(5—10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижность 200—400 $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Из структур p -типа с помощью ионной имплантации была изготовлена матрица фотодиодов размерностью 4×288 с длинноволновой границей фоточувствительности $\lambda_{1/2}(77 \text{ К}) = 4,87 \text{ мкм}$. Характерные вольт-амперные зависимости и дифференциальное сопротивление фотодиода в матрице представлены на рис. 5.

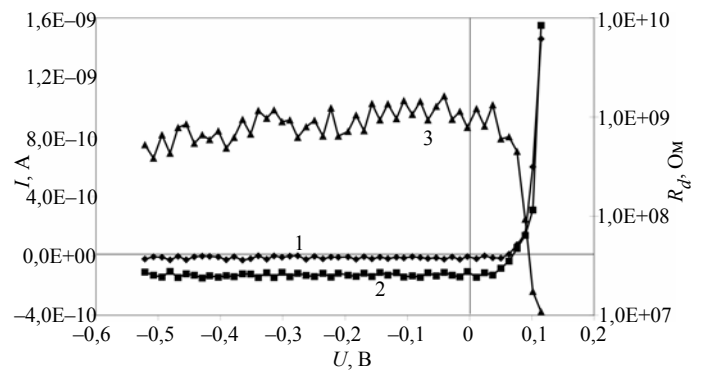
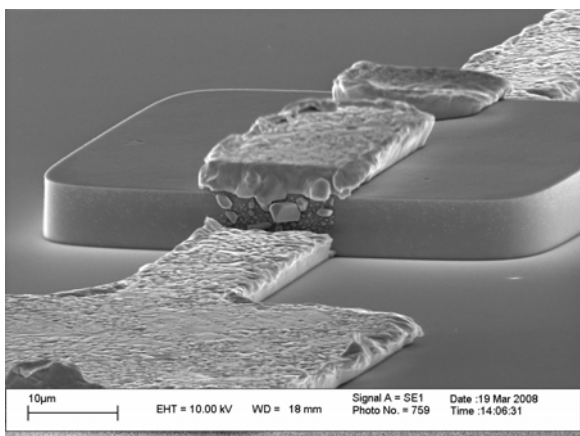


Рис. 5. Вольт-амперная зависимость (1, 2) и дифференциальное сопротивление (3) типичного диода в матрице фотодетекторов с размерностью 4×288, с длинноволновой границей фоточувствительности $\lambda_{1/2}(77 \text{ К}) = 4,87 \text{ мкм}$: 1 — без фоновой засветки; 2 — с фоновой засветкой

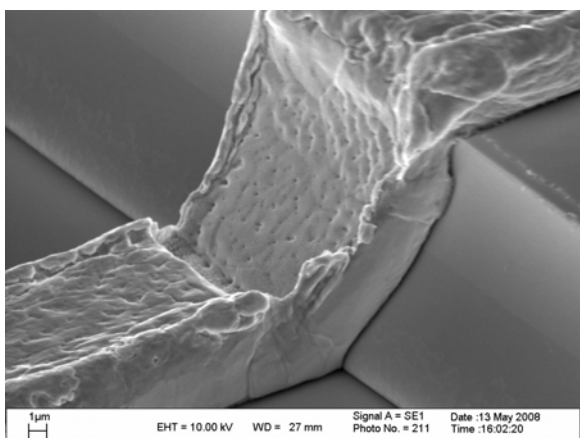
Отработка процессов создания меза-структур

После того как слой КРТ вырос на поверхности ИМСС, необходимо удалить поликристаллический слой, осевший на поверхность SiO_2 . Образовавшиеся в результате этого меза-структуры следует закрыть диэлектриком и создать контакты между фотодиодом и ИМСС. Так как высота меза-структуры составляет значительную величину (12—18 мкм), то возможен разрыв контактной дорожки на боковой стенке.

Контактные дорожки создавались напылением In с использованием взрывной фотолитографии. Напыление In проводили двумя способами: нормально к плоскости образца и двойное напыление с разных сторон под углом в 45°. На рис. 6 представлен внешний вид контактных дорожек, полученных со сканирующего электронного микроскопа. При нормальном напылении индия происходит разрыв контакта на боковых гранях, при двухстороннем напылении разрыва не происходит.



a



b

Рис. 6. Внешний вид контактных дорожек из In, полученных разными способами напыления под углом: a — 90°; б — 45°

Фотоприемный кристалл 1×32 для отработки технологии изготовления монолитного фотоприемника на основе КРТ

Авторами работы разработан тестовый мультиплексор КРТ-1 формата 1×32 элемента, предназначенный для отработки совмещенной технологии изготовления монолитного однокристалльного КРТ-фотоприемника.

Мультиплексор КРТ-1 содержит 32 ячейки, в каждой из них имеется участок для выращивания слоя КРТ и формирования фотодиода VD_i и n -канального МОП-транзистора VT_i ($i = 1, 2, \dots, 32$).

Принципиальная схема представлена на рис. 7. Топология ячейки спроектирована с перспективой использования в матричном 32×32-фотоприемнике и приведена на рис. 8. Размер ячеек составляет 150×150 мкм.

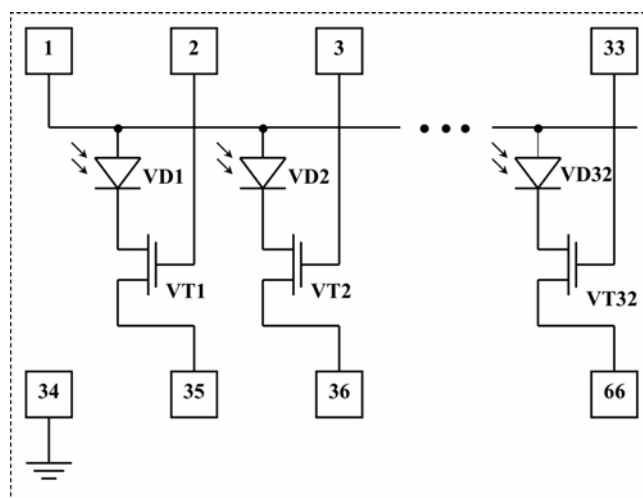


Рис. 7. Схема мультиплексора КРТ-1 для отработки технологии изготовления монолитного КРТ-фотоприемника

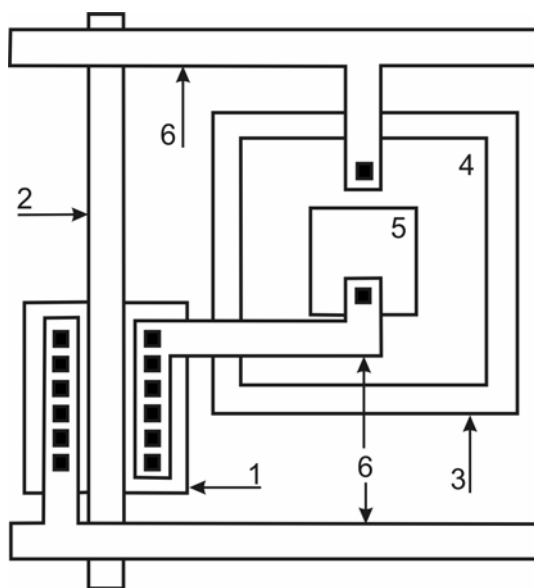


Рис. 8. Пример топологии ячейки схемы считывания для монолитного ИК-фотоприемника на КРТ-фотодиодах: 1 — рабочий окисел (стоки, истоки); 2 — поликремний; 3 — окно под КРТ; 4 — КРТ-диод (p -область); 5 — КРТ-диод (n -область); 6 — металл; ■ — контактные окна

Разработанный кристалл содержит также полный набор тестовых элементов для исследования качества операций совмещенного технологического маршрута и характеристик компонентов схемы. Размер кристалла составляет 3,05×7,40 мм (при ширине скрайберной дорожки 200 мкм). Кристалл изготавливался по n -МОП-технологии с поликремниевыми затворами и металлической разводкой на пластине кремния КДБ-10 с ориентацией (310).

Схема может работать в двух режимах. Первый режим — напряжение смещения КРТ-фотодиода

задается подачей напряжения на затвор считывающего МОП-транзистора, а сигнальный фототок считывается и преобразуется в выходное напряжение внешней схемой. Второй режим — МОП-транзистор полностью открыт, а напряжение смещения КРТ-фотодиода задается внешней прецизионной схемой, при этом сигнальный фототок считывается той же внешней схемой.

Заключение

Проведена разработка процессов предэпитаксиальной подготовки поверхности кремния с изготовленной системой считывания сигнала. Показано, что максимальная температура, при которой параметры схемы считывания остаются неизменными, составляет 520 °С. Установлено, что снижение температуры предэпитаксиального отжига до 450 °С не приводит к значительному ухудшению структурного совершенства слоев КРТ.

Проведены исследования роста слоев КТ и КРТ в окнах размерами от 30×30 до 100×100 мкм, вскрытых в SiO₂, нанесенном на поверхность Si(310). Показана принципиальная возможность выращивания монокристаллических слоев CdTe и CdHgTe в окнах, вскрытых в SiO₂.

Проведена разработка процессов создания фоточувствительных элементов по меза-технологии с

формированием индиевых контактов. Показана возможность получения индиевых спусков для меза-структур высотой до 15 мкм.

Разработаны электрическая схема и топология тестового *n*-канального мультиплексора формата 1×32 элемента на пластине Si(310) марки КДБ-10, предназначенного для отработки совмещенной технологии изготовления монокристаллического КРТ-фотоприемника.

Полученные результаты показывают принципиальную возможность создания монокристаллического приемника ИК-излучения.

Литература

1. Kinch M. A. // Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 566.
2. Baker I. M., Crimes G. J., Ard C. K. et al. // 4th Int. Conf. on Advanced Infrared Detectors and Systems: IEE Conf. Pub. 1990. No 321.
3. Velisu S., Lee T. S., Grien C. H. et al. // J. of Elec. Mat. 2005. V. 34. No 6. P. 820.
4. Fenner D. B., Biegelsen D. K., Bringans R. D. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. P. 419.
5. Hall D. J., Buckle L., Gordon N. T. et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. No 11. P. 2113.
6. Yao H., Woollam J. A., Alterovitz S. A. // Ibid. 1993. V. 62. No 25. P. 3324.
7. Якушев М. В., Бабенко А. А., Варавин В. С. и др. // Прикладная физика. 2007. No 4. С. 108.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

The technological operation processes for fabrication of monolithic integrated IR detectors

M. V. Yakushev, V. V. Vasiliev, S. A. Dvoretzky, T. I. Zahariyash, A. I. Kozlov,
Yu. G. Sidorov, B. I. Fomin, A. L. Aseev

A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

A. V. Vinogradov
URBVT&SP, Moscow, Russia

E. V. Degtyarev
The 22-nd Central Research Institute, Mytishci, Russia

We discuss the separate technology elements of fabricating of monolithic integrated HgCdTe infrared detectors. The following processes were investigated: 1 — ROIC and FPA models on (013)Si; 2 — the stability of ROIC to thermal annealing in vacuum; 3 — the development of low temperature thermal annealing of surface Si(310) substrate before epitaxial growth; 4 — the selective CdTe and HgCdTe growth onto Si(310) surface in SiO₂ windows of different sizes; 5 — the development of mesa technology and In contacts to the top of mesa. The results show the possibility to develop the whole technology of fabricating monolithic integrated focal plane arrays on the basis of photosensitive diodes grown in windows of ROIC.