

УДК 621.383.49 : 621.793.162

Е. В. Сусов, Ю. Г. Сидоров, В. Н. Северцев, А. А. Комов, Г. В. Чеканова,
С. А. Дворецкий, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов, Л. И. Дьяконов

(Москва — Новосибирск)

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ОХЛАЖДАЕМЫЙ ФОТОРЕЗИСТОР НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР HgCdTe

Изготовлены многоэлементные линейчатые фоторезисторы для области спектра 8—12 мкм на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из арсенида галлия. Размер фоточувствительных элементов 50×50 мкм, шаг 100 мкм. Число элементов в линейках $N = 16—23$. Темновое сопротивление R_T , вольт-ваттная чувствительность $S_u(\lambda_{\max})$ и обнаружительная способность $D^*(\lambda_{\max})$ элементов в максимуме чувствительности составили: $R_T = 51—65$ Ом, $S_u(\lambda_{\max}) = (4,5—7,5)10^4$ В/Вт, $D^*(\lambda_{\max}) = (2,6—3,7)10^{10}$ см · Гц^{1/2} · Вт⁻¹ соответственно. Апертура ограничена стенками криостата и составляет 180°. Граница шумов с частотной зависимостью спектральной плотности шума типа $1/f$, 1—1,5 кГц.

Введение. Разработка технологии изготовления объемных монокристаллов HgCdTe (КРТ) высокого совершенства для фотоприемников для области спектра 8—14 мкм потребовала больших затрат и времени. Физико-химические свойства твердых растворов тройной системы кадмий—ртуть—теллур определили низкий процент выхода объемных монокристаллов с требуемыми свойствами и, следовательно, исключительно высокую стоимость.

Для снижения себестоимости материала активно разрабатываются альтернативные технологии получения КРТ: метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и газовой эпитаксии с применением металлоорганических соединений (МОПФЭ). Ожидается, что развитие этих методов позволит сделать фотоприемники из КРТ доступными по цене для ряда применений в различных областях: в медицине, при контроле экосистем и энергообъектов, охране объектов и т. д. За рубежом лидером в разработке эпитаксиальной технологии получения гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ для фотоприемников являются США, вкладывающие в ЖФЭ огромные средства. Из-за сложности технических проблем методам МЛЭ и МОПФЭ уделялось гораздо меньшее внимание.

В настоящее время ряд фирм в Европе и США изготавливает методом ЖФЭ слои КРТ для фотодиодов для области спектра 8—14 мкм. Стоимость таких слоев незначительно отличается от стоимости объемных монокристаллов из-за высокой стоимости подложек CdZnTe.

Технология изготовления фоторезисторов (ФР) для области спектра 8—12 мкм на основе монокристаллов КРТ, используемая при серийном изготовлении фотоприемников и фотоприемных устройств, не обеспечивает высокой воспроизводимости параметров ФР из-за повышенной чувствительности монокристаллических пластин КРТ к механическим, тепловым воздействиям и загрязнениям поверхностей. Превращение толстых (1 мм) пластин КРТ в тонкий, около 10—20 мкм, слой фоточувствительного элемента (ФЧЭ) при-

водит к безвозвратной потере порядка 98 % материала. Использование ГЭС КРТ для изготовления ФР исключает этот процесс и устраняет потери, которые возникают при приклейке монокристаллических пластин КРТ к подложке.

Целью данной работы является исследование фотоэлектрических характеристик многоэлементных ФР, изготовленных из ГЭС КРТ, выращенных методом МЛЭ, с применением элементов технологии, используемой для монокристаллических пластин КРТ.

Изготовление многоэлементных ФР. МЛЭ превосходит другие методы выращивания пленок КРТ благодаря следующим преимуществам:

1. Рост пленок КРТ проводится при более низких температурах (180—190 °С), чем в других методах. Снижение температуры резко уменьшает диффузию основных компонентов и примесей из подложки и фоновое легирование вследствие снижения растворимости примесей с температурой при одинаковой чистоте исходных материалов. Содержание примесей в пленке КРТ в методе МЛЭ окажется на порядок—полтора ниже, чем в других методах.

2. Оборудование для МЛЭ позволяет использовать аналитические методики, осуществляющие непрерывный контроль процесса роста пленки, в том числе прецизионное измерение ее состава. Последнее обстоятельство имеет решающее значение для разработки воспроизводимой технологии, так как требования к точности задания и поддержания состава пленок КРТ чрезвычайно жесткие. Непрерывный контроль и управление составом растущей пленки позволяют выращивать ГЭС КРТ с заданным распределением состава по толщине, в том числе и для приборов принципиально новых классов.

3. В методе МЛЭ отсутствует агрессивная среда в отличие от ЖФЭ, что позволяет использовать для выращивания эпитаксиальных пленок КРТ альтернативные подложки, такие как подложки из арсенида галлия и кремния. Использование альтернативных подложек дает возможность увеличить площадь эпитаксиальных структур по сравнению с выращиваемыми на подложках из теллурида кадмия, повысить производительность и существенно снизить стоимость.

4. Метод МЛЭ является экологически чистым, не имеет вредных выбросов (процесс проводится в замкнутом объеме), не использует в отличие от МОПФЭ опасные и высокотоксичные вещества.

Реализация преимуществ МЛЭ КРТ требует преодоления сложных научных и технических проблем. Нами эти проблемы решены за счет прецизионного измерения состава растущих пленок КРТ [1], создания оригинальной системы молекулярных источников, обеспечивающих высокую однородность состава по площади подложки без вращения образца, выбора ориентации подложки, облегчающей протекание поверхностных процессов при эпитаксии КРТ при низких температурах [2], выбора технологических режимов [3], обеспечивающих получение КРТ с приборными параметрами [4].

Для изготовления многоэлементного ФР использовались ГЭС КРТ на подложке (130)GaAs с буферным слоем CdZnTe, выращенные методом МЛЭ в ИФП СО РАН. Выращивание проводилось на многокамерной установке «Обь», включающей сверхвысоковакуумные камеры загрузки—выгрузки; камеру отжига подложек для удаления окислов с поверхности, образующихся после химического травления; камеру выращивания буферных слоев CdZnTe и камеру выращивания ГЭС КРТ, оснащенную автоматическим эллипсометром ЛЭФ-701. Установка камер в одну линию позволяет одновременно проводить технологические процессы в различных камерах, осуществлять быстрое транспортирование из камеры в камеру, что обеспечивает высокую эффективность выращивания ГЭС КРТ.

На рис. 1 приведено распределение состава по толщине типичной ГЭС КРТ, используемой для изготовления многоэлементного ФР. На границе буферного слоя и поверхности пленки КРТ имеются широкозонные слои. Толщина и состав рабочего активного слоя составляют 7,2 мкм и $X_{\text{CdTe}} = 0,21$ соответственно.

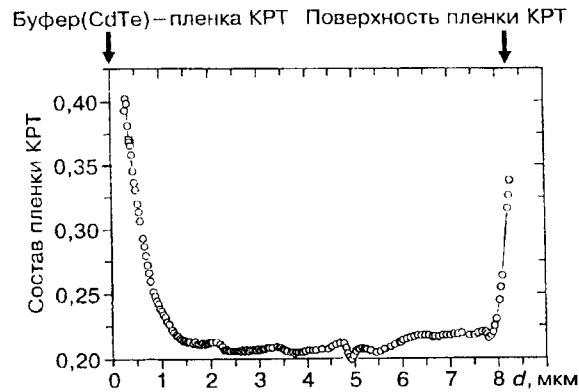


Рис. 1

Конструкция фоточувствительного элемента разработана, исходя из требований к фотоприемникам для тепловизионной техники:

- однорядная линейка или двухрядная с шахматным расположением ФЧЭ;
- размер ФЧЭ 50×50 мкм с допуском ± 5 мкм, шаг в линейке 100 мкм;
- количество ФЧЭ в линейке определялось размерами образца и составляло от 16 до 23.

ФЧЭ формировались с помощью фотолитографии, ионного или химического травления и механической резки на отдельные линейки.

Контактная система получена методом электрохимического осаждения индия. Были приняты специальные меры для снижения влияния вытягивания носителей (запирающие контакты). ФЧЭ защищались специальным покрытием. Для измерений фотоэлектрических характеристик ФЧЭ с числом площадок 16 был установлен в лабораторный вакуумный криостат с торцевым входным окном из просветленного германия.

Фотоэлектрические характеристики ФР. Результаты измерений темнового сопротивления (R_T), вольт-ваттной чувствительности (S_v), обнаружительной способности (D^*) в максимуме чувствительности, напряжение сигнала (U_c), напряжение шума ($U_{ш}$) на частоте 1000 Гц и их отношение при охлаждении жидким азотом для многоэлементного ФР приведены в таблице. Сопротивление нагрузки (R_H) 51 Ом. Напряжение смещения ($U_{см}$) 0,2—0,3 В. Обнаружительная способность определена из величины сигнала и шума при апертуре приблизительно 180° на фон 293 К. Уменьшение апертуры до $30\text{—}45^\circ$ привело к уменьшению фоновой нагрузки, снижению шума и увеличению обнаружительной способности в 1,3—2,5 раза. Величина обнаружительной способности в большинстве случаев близка к фоновому ограничению для апертуры 180° . Вольт-ваттная чувствительность в ряде случаев (ФЧЭ 5, 10) достигает предельных значений, ограниченных временем «пролета» носителей тока. Из таблицы видно, что темновые сопротивления имеют незначительный разброс, что может быть связано с особенностями технологии изготовления ФР.

На рис. 2 показана частотная зависимость спектральной плотности напряжения шума, которая указывает на небольшой вклад избыточных шумов на частотах выше 1000—1500 Гц. На меньших частотах преобладает $1/f$ -шум, что типично для приборов на основе КРТ [5]. Точка перегиба на зависимости спектральной плотности шума от частоты лежит в диапазоне приблизительно 1000—1500 Гц.

Качество контактной системы подтверждается почти линейным характером вольт-амперных характеристик, приведенных на рис. 3.

Результаты измерений фотоэлектрической взаимосвязи между соседними площадками ФЧЭ показывают, что она, как правило, не превосходит 10 % и

**Фотоэлектрические параметры 16-элементной линейки,
изготовленной из МЛЭ ГЭС КРТ**

Номер ФЧЭ	R_T , Ом	R_H , Ом	U_{CM} , В	$U_{Ш}$, мкВ	U_c , мкВ	$U_c/U_{Ш}$	$S_y(\lambda_{max})$, 10^4 В/Вт	$D^*(\lambda_{max})$, 10^{10} см · Гц ^{1/2} · Вт ⁻¹
1	58	51	0,2	0,048	4,6	96	4,8	2,9
2	59	51	0,2	0,050	4,9	98	5,2	2,9
3	56	51	0,2	0,070	6,1	87	6,3	2,6
4	52	51	0,2	0,048	5,0	104	5,0	3,1
5	53	51	0,3	0,06	7,4	123	7,5	3,7
6	58	51	0,3	0,052	5,0	96	5,3	2,9
7	65	51	0,2	0,050	4,5	90	5,0	2,7
8	62	51	0,2	0,075	5,0	67	5,4	2,0
9	52	51	0,3	0,054	5,2	96	5,2	2,9
10	51	51	0,3	0,056	7,2	129	7,1	3,9
11	53	51	0,2	0,042	4,6	110	4,5	3,3
12	53	51	0,2	0,046	5,6	123	5,6	3,7
13	56	51	0,2	0,044	4,9	111	5,1	2,9
14	64	51	0,2	0,048	4,6	96	5,1	2,9
15	64	51	0,2	0,048	5,0	104	5,5	3,1

находится в пределах погрешности измерения фотоэлектрических параметров.

Толщина рабочего слоя КРТ гетероэпитаксиальной структуры в процессе изготовления в ФЧЭ не меняется. Спектральное распределение вольт-ваттной чувствительности трех ФЧЭ показано на рис. 4. Видно, что спектральные характеристики вольт-ваттной чувствительности достаточно близки.

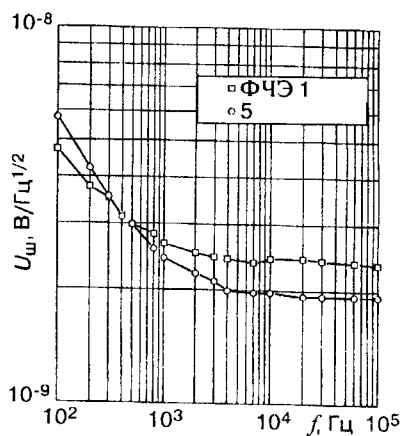


Рис. 2

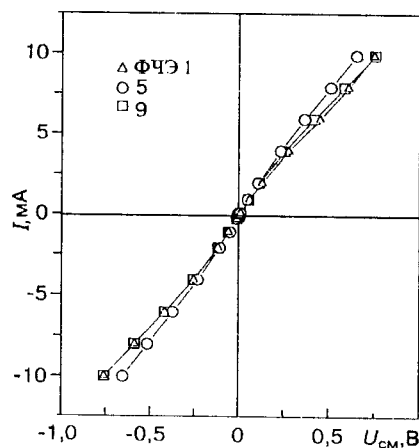


Рис. 3

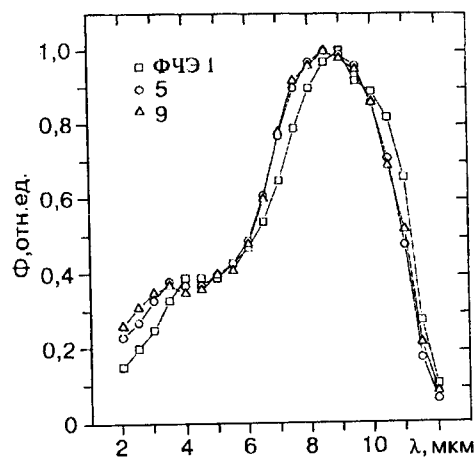


Рис. 4

ВЫВОДЫ

Полученные результаты дают основание сделать вывод о пригодности ГЭС КРТ, выращенных методом МЛЭ, для разработки высококачественных многоэлементных охлаждаемых фоторезисторов для области спектра 8—12 мкм для тепловизионной техники.

Определены пути решения научных и технических проблем при выращивании ГЭС КРТ методом МЛЭ для реализации объективных фундаментальных преимуществ МЛЭ перед другими методами и получен материал приборного качества.

Показана принципиальная возможность использования отдельных элементов действующей технологии изготовления ФЧЭ из объемных монокристаллов КРТ для разработки технологии изготовления многоэлементных ФР на основе ГЭС КРТ МЛЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свиташев К. К., Швец В. А., Мардежов А. С. и др. Эллипсометрия *in situ* при выращивании пленок твердых растворов кадмий—ртуть—теллур методом МЛЭ // ЖТФ. 1995. Вып. 165. С. 110.
2. Сидоров Ю. Г., Варавин В. С., Дворецкий С. А. и др. Рост пленок и дефектообразование в HgCdTe при молекулярно-лучевой эпитаксии // Рост кристаллов. 1995. 20. С. 43.
3. Svitashov K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G. et al. Growth of high-quality MCT films by MBE using *in situ* ellipsometry // Palaise Des. Congress Opto-95. Paris, France, 1995. P. 127.
4. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al. The controlled growth of high-quality mercury cadmium telluride // Thin Solid Films. 1995. 267. P. 121.
5. Zheng W.-J., Zhu X.-C. Experimental studies on low frequency noise of Hg_{0,8}Cd_{0,2}Te photoconductors // Infrared Phys. 1992. 33. P. 27.

Поступила в редакцию 29 апреля 1996 г.