

06;12

## Субматричный фотоприемный модуль на основе гетероструктуры HgCdTe/Si(310)

© М.В. Якушев, В.С. Варавин, В.В. Васильев, С.А. Дворецкий,  
А.В. Предеин, И.В. Сабинаина, Ю.Г. Сидоров, А.В. Сорочкин,  
А.О. Сусяков

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,  
Новосибирск  
E-mail: yakushev@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 1 сентября 2010 г.

Впервые продемонстрирована возможность изготовления на основе гетероструктуры  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Si}(310)$  линейчатого инфракрасного фотоприемника формата  $288 \times 4$  для длинноволновой ( $8\text{--}12\ \mu\text{m}$ ) области инфракрасного спектра.

Развитие сканирующих инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП) с чувствительностью в спектральном диапазоне  $8\text{--}12\ \mu\text{m}$  на основе твердых растворов теллуридов кадмия и ртути (КРТ) проводится в направлении замещения фоторезистивных линейчатых ИК-ФП с небольшим (до двухсот) количеством элементов на фотодиодные субматричные ИК-ФП с форматами от  $288 \times 4$  до  $576 \times 8$  [1–3]. В субматричных ИК-ФП каждый фоточувствительный канал состоит из 4–8 пикселей, и используется режим временной задержки и накопления (ВЗН) сигнала от каждого пикселя одного канала внутри кремниевого мультиплексора. Такая конструкция сканирующего диодного ИК-ФП позволяет увеличить его чувствительность в  $\sqrt{n}$  раз, где  $n$  — число пикселей в канале. Разработка фотодиодных ИК-ФП связана с развитием эпитаксиальных методов выращивания КРТ, и в первую очередь

метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на согласованных подложках из теллурида кадмия и цинка. Такие субматричные ИК-ФП имеют высокие, практически близкие к теоретическому пределу, фотоэлектрические параметры, ограниченные фоновым излучением. ИК-ФП для спектрального диапазона  $8\text{--}12\ \mu\text{m}$  работают при температуре жидкого азота и имеют ограничения по длительности эксплуатации. Это связано с различием коэффициентов термического расширения (КТР) материалов подложки (CdZnTe) фоточувствительной структуры и кремниевого мультиплексора.

Использование подложек из кремния позволяет получать матричные фоточувствительные элементы, согласованные по коэффициенту термического расширения с кремниевой интегральной микросхемой считывания сигнала (мультиплексором).

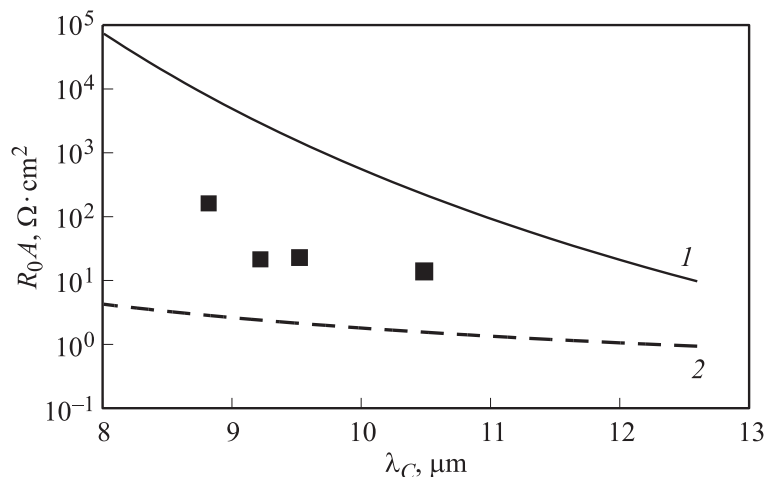
В силу того что КРТ и кремний рассогласованы по параметру и различаются по типу кристаллической решетки, эпитаксия КРТ приборного качества с высокими электрофизическими параметрами на кремниевой подложке требует решения многих научных и технических задач, которые становятся более сложными при выращивании материала для длинноволновых (более  $8\ \mu\text{m}$ ) ИК-ФП.

В данной работе впервые приведены фотоэлектрические параметры линейчатого ИК-ФП формата  $288 \times 4$  для спектрального диапазона  $8\text{--}12\ \mu\text{m}$  на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из Si(310), и характеристики диодов, изготовленных ионной имплантацией бора из ГЭС КРТ МЛЭ (Si).

Рост гетероэпитаксиальных структур HgCdTe/Si(310) осуществлялся методом МЛЭ на многокамерной сверхвысоковакуумной установке „Обь“. Подробности предэпитаксиальной подготовки подложек и режимов роста описаны в работе [4].

Выращенные структуры с составом 0.22–0.24 мольных долей теллурида кадмия имеют электронный тип проводимости и следующие электрофизические параметры при 77 К. Концентрация электронов составляет  $(5\text{--}10) \cdot 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ , подвижность  $(3\text{--}7) \cdot 10^4\ \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  и времена жизни неосновных носителей заряда  $\tau = 0.2\text{--}1\ \mu\text{s}$ .

Структуры дырочного типа проводимости получены изотермическим отжигом в атмосфере гелия. Концентрация и подвижность дырок при 77 К составили  $(5\text{--}15) \cdot 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$  и  $200\text{--}400\ \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  соответ-



**Рис. 1.** Зависимость произведения  $R_0A$  от граничной длины волны для фотодиодов на основе HgCdTe/Si(310) при 77 К.

ственно. Время жизни не основных носителей достигает  $\tau = 10\text{--}20$  ns при низких концентрациях дырок.

Из структур КРТ  $p$ -типа с помощью ионной имплантации бора были изготовлены матричные фоточувствительные элементов (ФЧЭ) для спектрального диапазона  $8\text{--}12\ \mu\text{m}$  формата  $288 \times 4$  стандартной топологии [5] с размерами пикселя  $28 \times 25\ \mu\text{m}$  и шагом сканирования  $43\ \mu\text{m}$ , и измерены их вольт-амперные характеристики (ВАХ). Из измеренных ВАХ были рассчитаны произведение  $R_0A$  дифференциального сопротивления при нулевом смещении  $R_0$  на его оптическую площадь  $A$ , значение которого используют для характеристики фотодиодов. Дифференциальное сопротивление  $R_0$  при нулевом смещении рассчитывалось непосредственно из измеренных ВАХ. Оптическая площадь  $A$  оценивалась исходя из величины фототока по методике, описанной в работе [4]. Полученные значения  $R_0A$  представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, фотодиоды на основе HgCdTe/Si(310), работающие при температуре 77 К в диапазоне длин волн  $8\text{--}12\ \mu\text{m}$ , имеют произведение  $R_0A$  ниже предельных значений, рассчитанных в предположении ограничения тепловой генерацией (кривая 1), но

значительно превосходящие значения, необходимые для реализации режима ограничения фоновыми шумами (кривая 2) [6]. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о высоком качестве материала, необходимым для проведения разработки многоэлементных ИК-ФП.

Из матриц фотодиодов методом гибридной сборки этих матриц с мультиплексором были изготовлены матричные фотоприемники формата  $288 \times 4$  для спектрального диапазона  $8-12 \mu\text{m}$  ( $\lambda_c(77 \text{ K}) = 9.5 \mu\text{m}$ ).

Разработанный кремниевый мультиплексор для ИК-ФП формата  $288 \times 4$  имеет оригинальную схему и конструкцию, особенностями которой являются полностью цифровое управление с помощью параллельного и последовательного портов, деселекция любой дефектной ячейки, реализация функции двунаправленного сканирования, возможность тестирования аналоговых параметров мультиплексора.

Мультиплексор изготовлен по серийной одномикронной КМОП-технологии с двумя уровнями металла и двумя уровнями поликремния [7]. Толщина подзатворного и межслойного окисла составляла соответственно 40 и 90 nm при их удельных емкостях  $8.65 \cdot 10^{-4}$  и  $3.8 \cdot 10^{-4} \text{ pF}/\mu\text{m}^2$ . В качестве транзистора прямой инжекции использовался *n*-канальный транзистор с подлегированием, с пороговым напряжением  $\sim 0.7 \text{ V}$  и увеличенной до  $2.4 \mu\text{m}$  длиной канала. Это позволило получить разброс напряжений смещения на диодах не более 10 mV.

Мультиплексор разбит на четыре идентичных блока по  $72 \times 4$  канала, мультиплицируемых на 4 выхода. Триггер деселекции и входное устройство обеспечивают отключение дефектных диодов и 8-кратное изменение коэффициента усиления. Коммутатор обеспечивает переключение направления сканирования и режим прямого доступа к диодам, минуя тракт ВЗН. Зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) осуществляет преобразование заряд/напряжение, а устройство выборки-хранения — усиление и запоминание аналогового сигнала на время мультиплексирования. Зарядовая емкость мультиплексора более 2.5 pC при нелинейности лучше 2%.

Параметры мультиплексора по основным функциональным и электрическим характеристикам близки к параметрам мультиплексора BD TL015-XX-V3 фирмы Sofradir, используемым в ФПУ PLUTON LW  $288 \times 4$ .

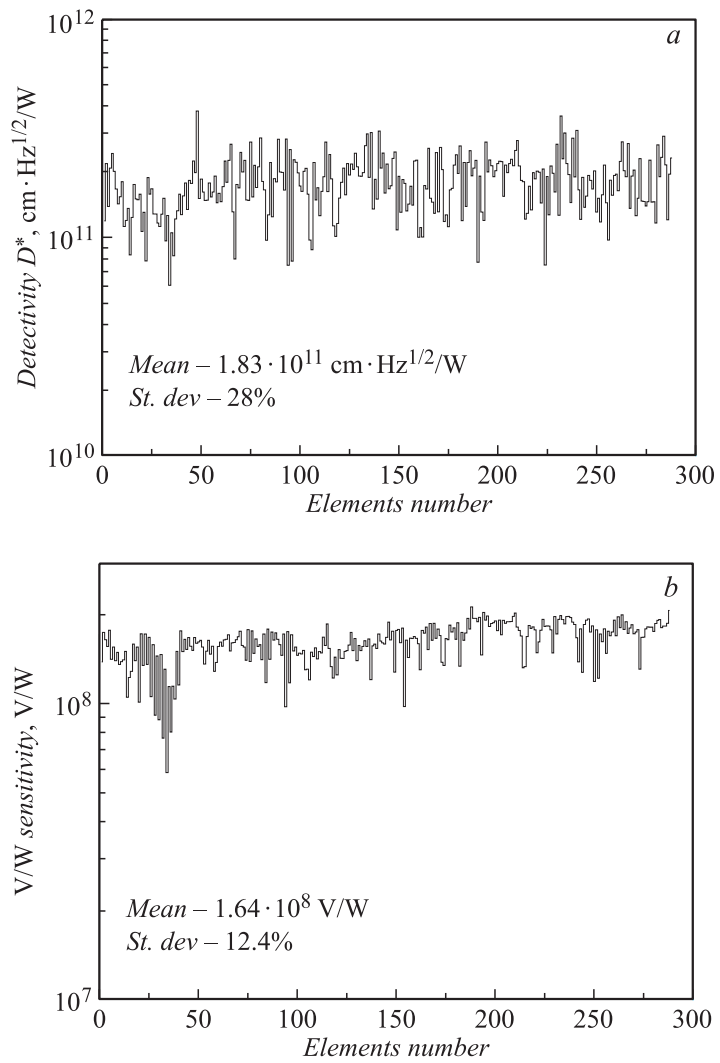
Были проведены измерения параметров ИК-ФП. При измерениях температура образца, фона и абсолютно черного тела (АЧТ) составляла 7, 293 и 501 K соответственно. Измерения проводились в апертурном

угле  $30^\circ$ , частота опроса выходного сигнала составляла 4.0 МГц и время накопления  $18 \mu\text{s}$ . При измерениях использовался отрезающий фильтр с длинноволновой границей по уровню 0.5–8.0  $\mu\text{m}$ .

На рис. 2 представлены параметры ИК-ФП формата  $288 \times 4$  элементов, изготовленного на основе ГЭС КРТ МЛЭ(Si) с  $\lambda_c(77 \text{ K}) = 9.5 \mu\text{m}$ . Из представленных рисунков видно, все 288 каналов обладают фоточувствительностью и по своим характеристикам не сильно уступают параметрам аналогичных ИК-ФП, изготовленных из КРТ, выращенного на согласованных подложках из CdZnTe. Так, средняя величина удельной обнаружительной способности ( $D^*$ ) ИК-ФП формата  $288 \times 4$  на основе гетероструктуры HgCdTe/Si(310) составляет  $1.83 \cdot 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$  при среднеквадратическом отклонении (СКО) 28%, а средняя величина вольтовой чувствительности составляет  $1.64 \cdot 10^8 \text{ V/W}$  при СКО — 12.4%. Те же параметры для ИК-ФП на основе КРТ на подложках из CdZnTe не более чем на 5% превосходят полученные значения [1].

При использовании в системах технического зрения к линейчатым ИК-ФП предъявляются дополнительные требования по однородности параметров. Так, для длинноволновых ИК-ФП дефектными принято считать каналы с удельной обнаружительной способностью менее  $5 \cdot 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ . По этому критерию в представляемом ИК-ФП формата  $288 \times 4$  элементов, изготовленном на основе ГЭС КРТ МЛЭ(Si), дефектные каналы отсутствуют, так как минимальное значение удельной обнаружительной способности одного канала для данного ФП составляет  $6 \cdot 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ . Другим критерием дефектности каналов является вольтовая чувствительность, которая должна лежать в интервале  $\pm 30\%$  от среднего значения. По такому критерию в представляемом ИК-ФП дефектными считаются 12 каналов. Однако если границы допустимых значений вольтовой чувствительности расширить от +30 до  $-60\%$ , то в этом случае количество дефектных каналов будет равно нулю.

Мы полагаем, что субматричный ИК-ФП будет иметь высокую стабильность параметров при циклических изменениях температуры от 77 до 300 К. Действительно, ранее такие исследования были проведены для ИК-ФП формата  $288 \times 4$ , для спектрального диапазона 3–5  $\mu\text{m}$  на основе HgCdTe/Si(310). Показано, что такие ИК-ФП обладают высокой стабильностью при термоциклировании и не изменяют свои фотоэлектрические параметры после 1250 циклов „охлаждения–нагрев“ [4].



**Рис. 2.** Топограмма удельной обнаружительной способности (a) и вольтовой чувствительности (b) каналов ФП формата  $288 \times 4$  элементов, изготовленного на основе ГЭС КРТ МЛЭ(К) с  $\lambda_c (77 \text{ K}) = 9.5 \mu\text{m}$ .

Таким образом, тестирование ИК-ФП формата  $288 \times 4$  для длинноволнового диапазона показало, что нелегированные образцы КРТ состава  $x = 0.23$  дырочного типа проводимости, выращенные на подложках из Si(310), обеспечивают высокие фотоэлектрические параметры ИК-ФП, ограниченные фоновым излучением.

## Список литературы

- [1] *Manissadjian A., Tribolet P., Chorier P., Costa P.* // Proc. SPIE. 2000. V. 4130. P. 1–16.
- [2] *Weiss E.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7298. P. 72982W1-15.
- [3] *Kobayash M., Wada H., Okamura T., Kudo J., Tanikawa K., Hikida S., Miyamoto Y., Miyazaki S., Yoshida Y.* // Opt. Eng. 2002. V. 41. P. 1876–1885.
- [4] *Якушев М.В., Брунев Д.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Предеин А.В., Сабина И.В., Сидоров Ю.Г., Сорочкин А.В., Сусяков А.О.* // Автометрия. 2009. Т. 45. В. 4. С. 23–31.
- [5] *Vasiliev V.V., Klimenko A.G., Marchishin I.V., Ovsyuk V.N., Talipov N.Kh., Zakhar'yash T.I., Golenkov A.G., Derkach Yu.P., Reva V.P., Sizov F.F., Zabudsky V.V.* // Infrared Physics & Technology. 2004. V. 44. P. 13–23.
- [6] *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
- [7] *Sizov F.F., Vasil'ev V.V., Suslyakov A.O., Reva V.P., Golenko A.G.* // Optoelectron. review. 2006. V. 14. P. 67–74.