

**ИНФРАКРАСНОЕ ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО
НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР GaAs/AlGaAs
С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

Д. Г. Есаев¹, И. В. Марчишин¹, В. Н. Овсяк¹, А. П. Савченко¹,
В. А. Фатеев¹, **В. В. Шашкин¹**, А. В. Сухарев²,
А. А. Падалица², И. В. Будкин², А. А. Мармалюк²

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: esaev@thermo.isp.nsc.ru

²ФГУП НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха, Москва

Разработано, изготовлено и исследовано инфракрасное фотоприемное устройство (ФПУ) 320 × 256 элементов, чувствительное в диапазоне 7,5–10 мкм. Фотоприемная матрица на основе многослойных структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами выращивалась методом гидридной эпитаксии из металлоорганических соединений. Пик чувствительности достигался при длине волны 9,3 мкм и составлял 340 мА/Вт. Гибридное ФПУ изготовлено методом холодной сварки индиевых столбов фотоприемной матрицы и кремниевого мультиплексора. При рабочей температуре 68 К получено температурное разрешение 29,4 мК.

Введение. Инфракрасные фотоприемники (ИК ФП) нашли применение в различных областях как военного, так и гражданского назначения [1, 2]. Широкое распространение получили приемники на основе тройного соединения кадмий–ртуть–теллур (КРТ) [3] и многослойных структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами (МСКЯ) [4]. Первые имеют высокую чувствительность и относительно высокую стоимость. Вторые – меньший квантовый выход, высокую однородность и низкую стоимость. Однако при реальных фоновых нагрузках и в силу конструктивного ограничения входной емкости схемы считывания квантовая эффективность не является критическим параметром, так как разница квантовых эффективностей может быть компенсирована путем увеличения времени накопления полезного сигнала. Поэтому при использовании широкоформатных матриц с большим числом элементов температурное разрешение приемников на основе КРТ и МСКЯ оказывается сопоставимым. Наибольшее распространение получили приемники на МСКЯ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [5]. Однако этому методу присущи низкая скорость роста слоев и высокая стоимость оборудования. Новая методика выращивания слоев из металлоорганических соединений методом гидридной эпитаксии (МОС ГЭ) в значительной степени лишена этих недостатков [6].

Для широкого применения структур, выращенных методом МОС ГЭ, и фотоприемников на их основе необходимо исследование параметров фотоприемников.

Цель данной работы – показать основные технологические моменты выращивания слоев методом МОС ГЭ, методику контроля их свойств и параметры фотоприемников на основе таких слоев.

Изготовление фотоприемного устройства. Фоточувствительная структура на основе МСКЯ выращивалась методом МОС ГЭ при пониженном давлении на подложках полуизолирующего GaAs с ориентацией (100). Температура роста составляла 770 °С, давление в реакторе поддерживалось на уровне 60 мм рт. ст. В качестве источников элементов группы III использовались триэтилгаллий (TEGa) и триметилалюминий (ТМАl), а для элементов группы V – 100 %-ный AsH₃. Моносилан SiH₄ применялся в качестве источника для атомов донорной примеси. Газ-носитель – водород с точкой росы не выше –100 °С.

Фоточувствительная структура состояла из верхнего и нижнего контактных слоев n^+ -GaAs, между которыми выращивалась активная область из 50 периодов слоев GaAs и AlGaAs (квантовая яма/барьер). Контактные слои легировались кремнием до уровня $1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщина верхнего контактного слоя составляла 1,55 мкм, нижнего – 0,98 мкм. Толщина нелегированного барьерного слоя 47 нм (молярная доля AlAs в барьере $x = 0,24$). Ширина квантовой ямы 5,3 нм, слоевая концентрация легирующей примеси (кремний) $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Между подложкой и фотоактивной структурой выращивался стопорный слой Al_{0,42}Ga_{0,58}As для облегчения последующего травления подложки.

Из структур, выращенных жидкостным травлением в полирующих травителях, была изготовлена матрица мезаструктур размером 320 × 256. Площадь каждого элемента составляла 23 × 23 мкм. Двумерная дифракционная решетка, преломляющая падающее ИК-излучение для эффективного взаимодействия с электронами в квантовых ямах, изготавливалась методом фотолитографии в верхнем n^+ -GaAs слое. Период решетки 2,8 мкм, глубина около 1 мкм. Засветка фотоприемного модуля осуществлялась со стороны подложки.

Омические контакты к индивидуальным элементам матричной структуры и общему базовому контакту формировались термическим напылением слоев Ge–Au–Ni с последующим отжигом в атмосфере азота.

Сборка фотоприемной матрицы с кремниевым мультиплексором осуществлялась методом холодной сварки индиевых столбов, изготовленных методом фотолитографии на индивидуальных элементах фотоприемной матрицы и мультиплексора [7]. Общая высота индиевых столбов после сборки модуля составляла около 10 мкм, что удовлетворяет требованиям долговечности гибридных сборок в процессе термоциклирования.

На последнем этапе изготовления ФПУ производится удаление подложки GaAs жидкостным травлением до общего контактного слоя n^+ -GaAs. Удаление подложки позволяет практически исключить перекрестную оптическую связь между элементами матрицы и при охлаждении снижает в фотоприемном модуле механические напряжения, возникающие вследствие различных коэффициентов термического расширения подложки GaAs и кремниевого мультиплексора.

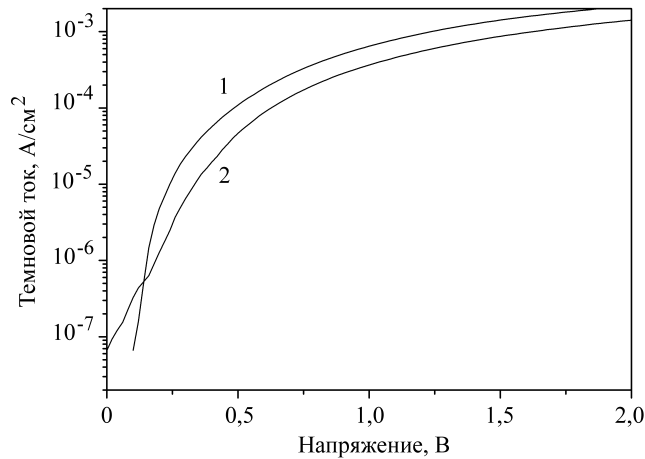


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика фоточувствительного элемента при двух полярностях приложенного напряжения на верхнем контакте: кривая 1 – плюс, кривая 2 – минус

Результаты измерения вольт-амперных характеристик при положительной и отрицательной полярностях приложенного напряжения на верхнем электроде приведены на рис. 1 и демонстрируют преобладающий термоэлектронный характер темнового тока. Небольшая асимметрия вольт-амперной характеристики, по-видимому, связана с асимметрией квантовых ям и вызвана особенностью их выращивания методом МОС ГЭ [6].

Контроль профиля концентрации носителей заряда в легированных квантовых ямах осуществляется путем измерения вольт-фарадных характеристик с использованием ртутного зонда. В приближении обедненного слоя концентрация носителей на глубине X находится из соотношения [8]

$$N(X) = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1},$$

где q – заряд электрона; C – измеряемая емкость; V – приложенное напряжение; S – площадь ртутного контакта; ϵ и ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость полупроводника и вакуума соответственно. Глубина X , на которой определяется концентрация свободных носителей, составляет $X = S\epsilon\epsilon_0/C(V)$.

Результаты измерения профиля распределения электронов в структурах представлены на рис. 2. Верхний контактный слой был предварительно удален. Максимальная глубина измерения профиля определяется шириной области пространственного заряда при максимальном напряжении, соответствующем электрическому пробоему структуры, и равна 4,5–5,0 мкм. Измерения показывают, что концентрация носителей в ямах и период ям соответствуют величинам, закладываемым в технологическом процессе роста структур. Концентрация носителей достаточна для заполнения основного уровня в квантовых ямах при рабочих температурах.

Для контроля содержания алюминия в барьерных слоях AlGaAs используется методика измерения спектра пьезомодулированного отражения от структуры в видимом спектральном диапазоне при температуре жидкого азота. В этом случае образец жестко крепится на пластину из пьезоэлектрической керамики, к которой прикладывается синусоидальное напряжение.

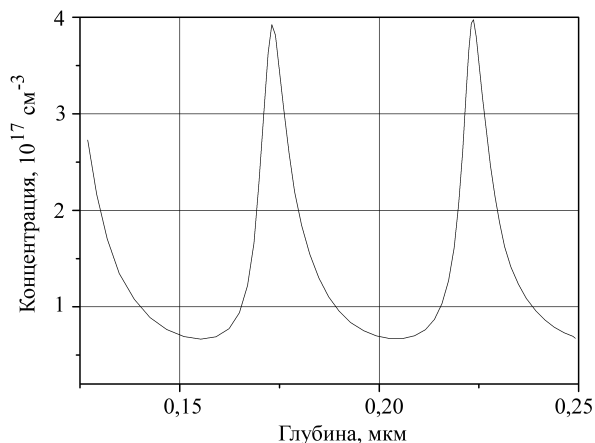


Рис. 2. Профиль распределения концентрации носителей заряда по глубине МСКЯ

Колебания керамической пластины вызывают модуляции механических напряжений в исследуемой структуре, действительной $\Delta\epsilon_r$ и мнимой $\Delta\epsilon_i$ частей диэлектрической проницаемости и, как следствие, коэффициента отражения. Вариация отражения ΔR связана с вариацией диэлектрической проницаемости соотношением [9]

$$\Delta R/R = \alpha \Delta\epsilon_r + \beta \Delta\epsilon_i.$$

Здесь α и β – коэффициенты Серафина.

Энергетическое положение пиков в спектре пьезоотражения соответствует электронным переходам в исследуемой структуре. Спектр пьезоотражения от гетероструктуры, аналогичный полученному в [10], приведен на рис. 3. Пик при энергии фотона 1,484 эВ соответствует фотовозбуждению электронных переходов с уровней остаточных акцепторов (нейтральные атомы углерода) в зону проводимости в подложке GaAs. Ширина запрещенной зоны GaAs E_g при температуре жидкого азота 77 К равна 1,508 эВ [11], а глу-

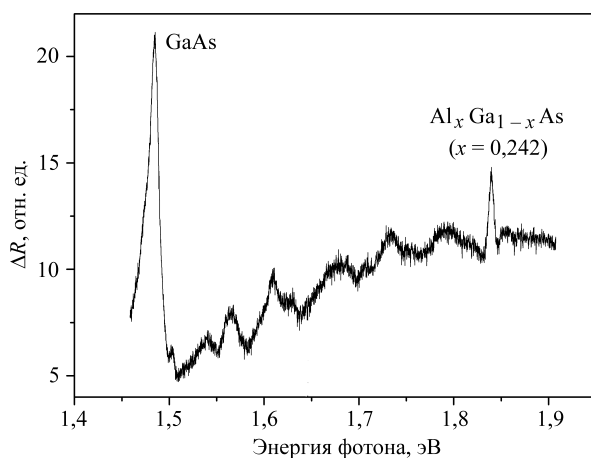


Рис. 3. Спектр пьезомодулированного отражения

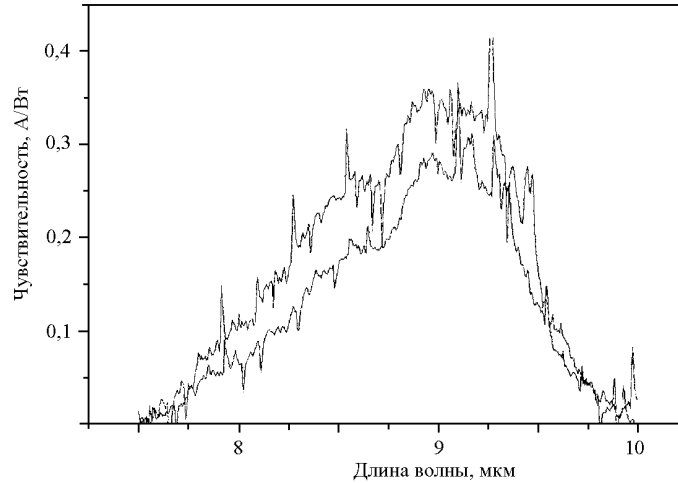


Рис. 4. Спектральные зависимости фоточувствительности элементов модуля для двух полярностей приложенного напряжения: кривая 1 – плюс, кривая 2 – минус

бина залегания акцепторного уровня атома углерода $\Delta = 25$ мэВ. Поэтому рассчитанная энергия перехода должна составлять $E_g - \Delta = 1,483$ эВ, что хорошо соответствует экспериментальному результату.

Пик с энергией 1,839 эВ соответствует возбуждению связанных экситонов в барьерных слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Промежуточные пики между энергией фотонов 1,484 и 1,839 эВ соответствуют электронным переходам между уровнями квантования дырок (легких и тяжелых) и электронов в слоях квантовых ям [10]. Энергетическое положение экситонного пика при энергии 1,839 эВ позволяет определить молярную долю алюминия в барьерных слоях из соотношения, связывающего ширину запрещенной зоны с молярным содержанием алюминия x . Проведенные исследования показали, что наиболее адекватно барьерные слои описываются эмпирической формулой $E_g(x) = E_g(0) + 1,427x + 0,041x^2$ [12]. В нашем случае содержание алюминия со-

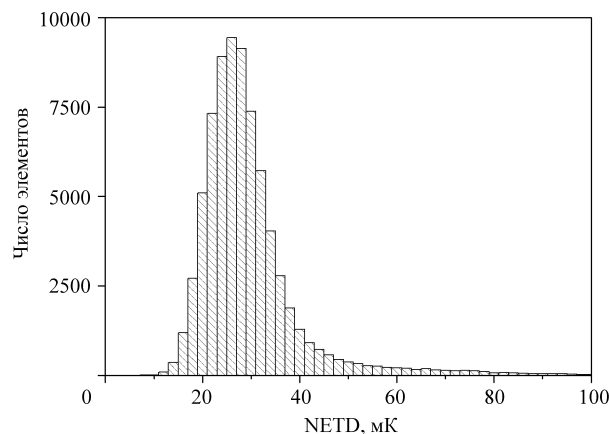


Рис. 5. Гистограмма распределения NETD по элементам модуля (среднее NETD 29,4 мК, среднеквадратичное отклонение 31 %)



Рис. 6. Пример теплового изображения.

ставило $x = 0,242$. Неопределенность энергии связи экситона (6–8 мэВ) приводит к вычисляемой неопределенности состава $\Delta x = \pm 0,002$. Видно, что содержание алюминия в барьерах хорошо соответствует закладываемым технологическим параметрам.

Относительная спектральная чувствительность элементов измерялась с помощью монохроматора THR-1000 фирмы “Jobin Yvon” на тестовых элементах. Выходной сигнал нормировался на опорный сигнал фотоприемника МГ-32, который помещен в параллельный канал, полученный путем отщепления части падающего ИК-излучения. Абсолютная чувствительность пересчитывалась с использованием кривой относительной чувствительности и величины интегрального фототока под действием излучения модели абсолютно черного тела при температуре 500 К (рис. 4).

В состав модуля входил кремниевый мультиплексор размером 320×256 с шагом 30 мкм, изготовленный по КМОП-технологии. Накопительная емкость в каждой ячейке составляла $18 \cdot 10^6$ электронов при шуме считывания 700 электронов. Регулируемое время накопления могло варьироваться от 5 мкс в течение всей длительности развертки кадра. Потребляемая электрическая мощность при частоте кадров 60 Гц не превышала 30 мВт.

Гистограмма распределения эквивалентной шуму разности температур (NETD) по элементам фотоприемного модуля показана на рис. 5. Засветка модуля осуществлялась моделью абсолютно черного тела при температуре 500 К. Модуль размещался в азотном криостате с входным окном, изготовленным из ZnSe. Откачка паров азота позволила понизить температуру модуля до 68 К. Угол зрения на тепловой фон комнатной температуры составлял 60° .

Пример теплового изображения, полученного с использованием германиевого объектива с апертурой $D/F = 1,0 : 1,3$, иллюстрирует рис. 6. В правом стекле очков видно дополнительное отраженное изображение руки человека (коэффициент отражения от стекла около 4 %).

Заключение. В данной работе приведены технологические особенности изготовления фотоприемного модуля для ИК-диапазона 8–10 мкм на основе МСКЯ, изготовленных методом МОС ГЭ. Описаны основные методики контроля качества слоев и приведены фотоэлектрические параметры. Прове-

монстрировано высокое качество теплового изображения и высокое температурное разрешение. Показано, что основные параметры ИК-устройства сопоставимы с параметрами устройства на основе слоев, выращенных по традиционной технологии МЛЭ. Очевидна перспективность метода МОС ГЭ, имеющего повышенную производительность по сравнению с технологией МЛЭ, для изготовления ИК-фотоприемных модулей в составе тепловизионных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rogalski A.** Optical detectors for focal plane arrays // Optoelectronics Rev. 2004. **12**. P. 221.
2. **Курьшев Г. Л., Ковчавцев А. П., Вайнер Б. Г. и др.** Медицинский тепловизор на основе матричного ФПУ 128×128 , работающий в диапазоне спектра 2,8–3,05 мкм // Автометрия. 1998. № 4. С. 5.
3. **Васильев В. В., Есаев Д. Г., Захарьяш Т. И. и др.** Матричное фотоприемное устройство 128×128 на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs // Там же. С. 27.
4. **Rogalski A.** Quantum well photoconductors in infrared detector technology // Journ. Appl. Phys. 2003. **93**. P. 4355.
5. **Levine B. F.** Quantum-well infrared photodetectors // Journ. Appl. Phys. 1993. **74**. P. R1.
6. **Куликов В. Б., Автисян Г. Х., Василевская Л. М. и др.** Фоточувствительность структур с квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, при нормальном падении излучения // Прикладная физика. 2003. № 4. С. 65.
7. **Клименко А. Г., Воинов В. Г., Новоселов А. Р. и др.** Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на основе CdHgTe // Автометрия. 1998. № 4. С. 105.
8. **Брунков П. Н., Усов С. О., Мусихин Ю. Г. и др.** Определение профиля распределения концентрации носителей заряда в слабосвязанных сверхрешетках GaAs/AlGaAs // ФТП. 2004. **38**. С. 469.
9. **Seraphin B. O., Bottka N.** Band-structure analysis from electro-reflectance studies // Phys. Rev. 1966. **145**. P. 628.
10. **Lee Y. R., Ramdas A. K., Moretti A. L. et al.** Piezomodulated reflectivity spectra of GaAs/Al_xGa_{1-x}As single-parabolic-quantum-well heterostructures // Phys. Rev. B. 1990. **41**. P. 8380.
11. **Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R.** Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // Journ. Appl. Phys. 2001. **89**. P. 5815.
12. **Pollak F. H., Shen H.** Modulation spectroscopy characterization of MOCVD semiconductors and semiconductor structures // Journ. Cryst. Growth. 1989. **98**, N 1–2. P. 53.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.