

УДК 621.315.592

Матричные ИК-фотоприемники на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs

М. А. Демьяненко, И. В. Марчишин, А. Г. Клименко,
А. И. Козлов, В. Н. Овсяк, А. П. Савченко,
А. И. Торопов, В. В. Шашкин

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Приведены экспериментальные результаты по разработке матричного фотоприемного модуля дальнего ИК-диапазона спектра размерностью 128×128. Модуль представляет собой гибридную сборку фотоприемной матрицы на основе многослойной структуры с квантовыми ямами (МСКЯ) GaAs/AlGaAs и кремниевого процессора. Температурное разрешение фотоприемного модуля NETD = 0,067 К при T = 65 К.

В стандартной гибридной сборке матричный фотоприемник — кремниевая интегральная схема, емкость накопления в кремниевой ячейке считывания размерами 40×40 мкм не превышает 10^7 – 10^8 электронов/элемент [1]. При потоке излучения $(0,8$ – $1,6) \cdot 10^{12}$ фотонов/элемент (что соответствует излучению фона 10–40 °С) и фотоприемном элементе с квантовой эффективностью $\eta \approx 1$ на основе, например КРТ, наблюдаются избыточность фототока и переполнение ячейки считывания при полнокадровом времени накопления [1]. Это одно из главных обстоятельств, позволяющих считать МСКЯ на основе соединений $A^{III}B^V$ альтернативной КРТ в качестве материала для создания матричных полноформатных фотоприемных устройств (ФПУ) (480×640, 512×512 элементов) дальнего ИК-диапазона спектра [2] несмотря на сравнительно низкое значение $\eta \approx 0,05$. Дополнительным стимулом для развития работ в этом направлении является отработанная технология на основе соединений $A^{III}B^V$ и как следствие этого — высокий процент выхода однородных по площади матриц фоторезисторов при сравнительно низкой себестоимости изготовления.

Фотоприемные элементы на основе МСКЯ GaAs/AlGaAs представляют собой периодическую структуру из узкозонного легированного квантово-размерного слоя GaAs (толщиной 5—7 нм) и широкозонного твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, окруженных проводящими слоями GaAs. Фотопроводимость в такой структуре обеспечивается оптически активными переходами, разрешенными только для поляризации света перпендикулярной оси роста, между нижней заполненной мини-зоной и разрешенными связанными состояниями внутри ямы GaAs или несвязанными состояниями над потенциальным барьером (край зоны проводимости AlGaAs). Параметры фотоприемника (спектральная квантовая эффективность, величина темнового тока) зависят от положения уровней квантования в яме (КЯ) GaAs, от величины тянущего электрического поля, концентрации электронов в слое GaAs, от рабочей температуры и размеров отдельного фотоприемного элемента [3].

В настоящей работе приведены результаты работ по исследованию параметров фотоприемной матрицы размерностью 128x128 и созданию гибридного фотоприемного модуля в составе фотоприемной матрицы и кремниевого процессора.

Фоточувствительные структуры изготавливались молекулярно-лучевой эпитаксией на установке Riber 32P. В качестве подложек использовался полупроводниковый GaAs АГЧП-10 диаметром 2". Расчетная толщина слоев GaAs и состав барьеров $Al_xGa_{1-x}As$ выбирались таким образом, чтобы второй уровень в КЯ GaAs находился ниже края зоны проводимости $Al_xGa_{1-x}As$ на 5—10 мВ. В этом случае обеспечиваются оптимальные параметры фотоприемного элемента по фоточувствительности и темновому току, но необходима высокая точность воспроизведения состава барьеров $Al_xGa_{1-x}As$ и толщины КЯ.

В наших экспериментах однородность состава по площади подложки выдерживалась в пределах $(x - x_0) < 0,01$ (где $x_0 \approx 0,3$, состав задан предварительным расчетом). Толщина слоев GaAs выдерживалась с точностью одного монослоя. Контроль за тем, чтобы состав x и ширина КЯ соответствовали расчетным значениям, осуществлялся измерением спектра фотопроводимости в слабом и сильном тянущем полях. На рис. 1 приведены спектральные зависимости фотопроводимости МСКЯ ($x = 0,31$ и толщина КЯ GaAs $d = 50$ А), в тянущих полях они составляли 10^3 и $7,3 \cdot 10^3$ В/см. Расчеты показывают, что максимум при 7,5 мкм соответствует переходам между связанными состояниями в КЯ и максимум при 6 мкм — переходу с основного уровня в состоя-

ние над барьером AlGaAs. Толщина барьерных слоев AlGaAs составляла 500 Å и была выбрана с таким расчетом, чтобы туннельная составляющая тока между основными уровнями квантования в соседних ямах была пренебрежимо мала по сравнению с термоактивационным током в диапазоне температур 60—80 К. Фоточувствительный слой состоял из 50 периодов КЯ GaAs и барьеров $Al_xGa_{1-x}As$. С обеих сторон фоточувствительного слоя изготавливались проводящие контакты из GaAs:Si толщиной 1 мкм. Концентрация Si в проводящих контактных слоях составляла $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³; концентрация донорного кремния $N_{Si} = (4-5) \cdot 10^{11}$ см⁻² в квантово-размерных слоях GaAs выбиралась оптимальной для МСКЯ фоторезисторов [3]. Во избежание накопления Si на границах раздела GaAs/AlGaAs легирование КЯ проводилось в центральных частях GaAs на расстоянии двух монослоев от гетерограниц.

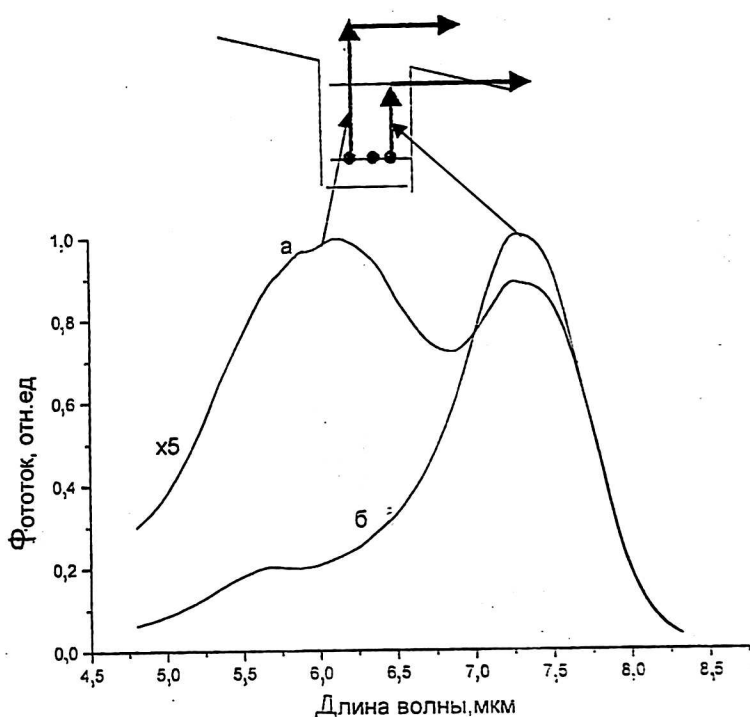


Рис. 1. Экспериментальные зависимости фототока для МСКЯ $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0,31$, толщина квантовой ямы $GaAs:Si$ $d = 50 \text{ \AA}$) при напряжениях смещения на структуре $0,3 \text{ В}$ (а) и 2 В (б).

Пиковые значения фототока при $7,5$ и 6 мкм соответствуют переходам в связанное состояние и в состояния над барьером $Al_xGa_{1-x}As$

Матрица фотоприемников изготовлялась методами фотолитографии и представляет собой периодически расположенные мезоструктуры, полученные селективным жидкостным травлением, размером $40 \times 40 \text{ мкм}$ и периодом 50 мкм . Для обеспечения однородной толщины фоточувствительного слоя по всей площади шайбы между верхним проводящим слоем $GaAs:Si$ и МСКЯ введен стоп-слой, останавливающий травление. Омические контакты к проводящим слоям $GaAs:Si$ созданы вжиганием $Ge/Au/Ni/Au$. Для того чтобы обеспечить поглощение ИК-излучения в МСКЯ при нормальном падении света на матрицу фотоприемников со стороны подложки, на каждом фотоприемном элементе матрицы методами электронной и оптической литографии изготовлялась двумерная дифракционная решетка в виде шахматной доски с периодом $2,9 \text{ мкм}$. Травление решетки осуществлялось в плазме CCl_2F_2 на глубину $0,7\text{--}0,8 \text{ мкм}$.

Сборка фотоприемной матрицы с кремниевым мультиплексором осуществлялась через In -столбы высотой $5\text{--}7 \text{ мкм}$. Однородность фоточувствительности матрицы фотоприемников зависела в основном от качества изготовления дифракционных элементов ввода излучения. Неоднородность величины темновых токов по элементам матрицы мы связываем с ростовыми "овальными" дефектами, природа которых и внутренняя структура пока еще недостаточно ясны, но можно наблюдать корреляцию между числом крупных дефектов (размером более 2 мкм) и темновым током отдельных МСКЯ фоторезисторов (рис. 2).

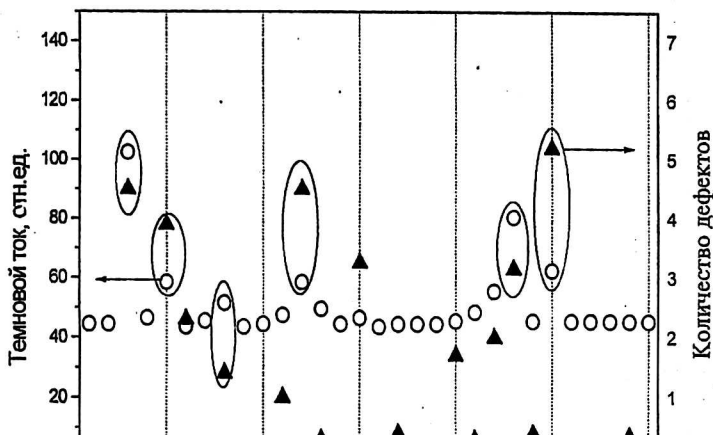


Рис. 2. Зависимости количества ростовых дефектов на отдельных элементах фоточувствительных структур МСКЯ GaAs/AlGaAs ($x = 0,3$) размером 75×75 мкм и темнового тока этих же элементов

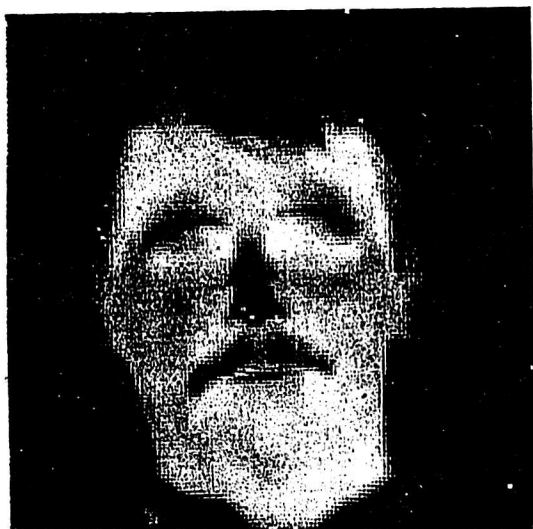
Мультиплексор разработан и изготовлен по КМОП/ПЗС технологии с n -карманом. Схема считывания позволяет регулировать время накопления при фиксированном времени кадра, что обеспечивает увеличение динамического диапазона при высоком уровне входных токов. Мультиплексор состоит из матрицы 128×128 ячеек считывания, горизонтального и вертикального регистров, схемы управления временем накопления и выходного узла. Каждая ячейка считывания мультиплексора непосредственно соединена с фоторезистором через индиевый столб и содержит входной транзистор, емкость накопления и два ключа, затворы которых присоединены к адресным шинам. Фототок интегрируется на емкости ПЗС под затвором накопления. Емкость накопления составляет 1 пФ. Минимальное время накопления равно времени считывания двух строк, максимальное — времени кадра. Режим “электронной заслонки”, предусмотренный в мультиплексоре, позволяет расширить динамический диапазон входных сигналов в 64 раза по сравнению со случаем интегрирования фототока в течение всего времени кадра. Максимальный входной ток мультиплексора составляет 0,3–20 нА для максимального и минимального времени накопления, соответственно.

Сборка матричных фотоприемных модулей на основе осуществлялась методом холодной сварки под давлением индиевых микростолбов [5]. Заключительной операцией изготовления фотоприемного модуля являлось удаление подложки GaAs шлифовкой, химико-механической полировкой и окончательным жидкостным травлением. После этих операций со стороны подложки оставался только нижний проходящий слой GaAs:Si толщиной 0,6–0,8 мкм. Эта операция исключает оптическую связь между элементами матрицы и увеличивает квантовую эффективность в 1,5–2 раза вследствие волноводного эффекта.

Исследование фотоэлектрических характеристик изготовленных модулей проводилось в проточном He-криостате CF-104. Фотоприемный модуль устанавливался на холодном пальце криостата, температура которого регистрировалась с точностью 0,1 К. Калибровка температуры непосредственно модуля осуществлялась по темновому току образца, помещенного в жидкий азот. Измерение параметров производилось при температуре пальца криостата, соответствующей температуре модуля $T \approx 65$ К. На рис. 3 приведен пример

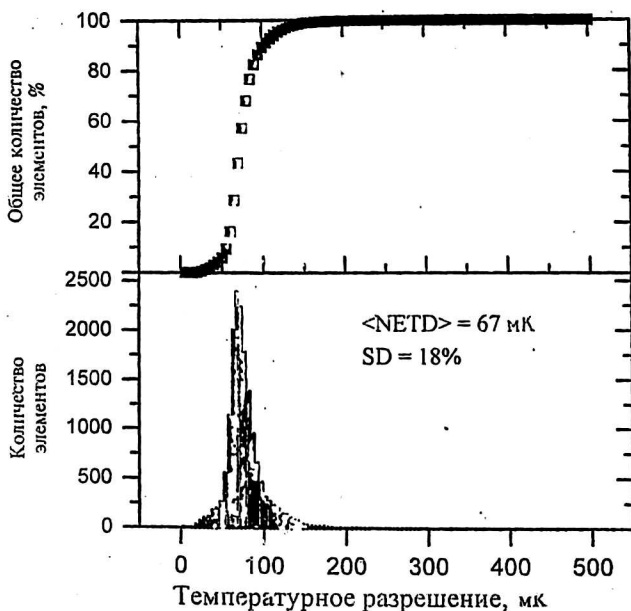
теплового изображения, полученного с модулем МСКЯ GaAs/AlGaAs. Максимум фоточувствительности при 8 мкм: объектив F/1,6; частота кадров 50 Гц. Изображение представлено 16138 пикселями, или 98,5 % всех элементов фотоприемного модуля.

Рис. 3. Пример теплового изображения формата 128x128 в спектральном диапазоне 7,5–8,5 мкм



На рис. 4 приведена гистограмма температурного разрешения NETD этого модуля при указанной выше температуре. Величина NETD рассчитывалась из ампер-ваттной чувствительности и суммарного шумового сигнала на выходе мультиплексора. Сравнительно большая полуширина $\sigma = 18\%$ величины NETD является следствием избыточных шумов и неоднородностью кремниевого мультиплексора. Полуширины гистограмм распределения фоточувствительности σ_F и темнового тока σ_D фотоматрицы, полученного с помощью мультиплексора с произвольным доступом (матрица ключей), составляют $\sigma_F = 4,4\%$ и $\sigma_D = 3,2\%$, соответственно.

Рис. 4. Гистограмма распределения температурного разрешения по элементам фотоприемного модуля размерностью 128x128 на основе МСКЯ GaAs/AlGaAs. Рабочая температура 65 К



Заключение

В настоящей работе изложены основные результаты по разработке гибридного фотоприемного модуля для дальнего ИК-диапазона спектра размерностью 128x128, состоящего из матрицы фоторезистивных элементов на основе МСКЯ GaAs/AlGaAs и кремниевого мультиплексора. Показано, что разработанная технология позволяет получать многоэлементные фотоприемники с высокой однородностью. Представленные параметры фотоприемного модуля в целом не являются оптимальными. Просветление поверхности фоточувствительной матрицы, использование кремниевого мультиплексора более высокого качества должны, по предварительных оценкам, уменьшить NETD в 2—3 раза при высоком проценте выхода годных фотоприемных модулей.

Литература

1. Destefanis G., Audebert P., Mottin E., Rambaud P. High performance LWIR 256x256 HgCdTe focal plane array operating at 88 K//SPIE. 1997. V. 3061. P. 111.
2. Beck W. A., Faska T. S. Current status of quantum well focal plan array//Ibid. V. 2744. P. 130.
3. Levine D. F. Quantum well infrared photodetectors//J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. R1-R81; Mottin E., Pantigny P., Boch R. An improved architecture of IRFPA readout circuits//SPIE. 1997. V. 3061. P. 117.
4. Rosencher E., Vinter B., Levine B. Intersubband transition in quantum wells. Sept. 9—14. 1991. — Cargese, France (Plenum, New York, 1992); Fossum E. R. Infrared Readout Electronics for Space Science Sensors: State of the Art and Future Directions//SPIE. 1993. V. 2020. P. 121.
5. Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. П. и др. Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на основе CdHgTe//Автометрия. 1998. № 4. С. 105.

Focal plane infrared photodetector array based on MQW GaAs/AlGaAs

M. A. Demyanenko, I. V. Marchishin, A. G. Klimenko,
A. I. Kozlov, V. N. Ovsyuk, A. P. Savchenko,
A. I. Toropov, V. V. Shashkin
Institute Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

Results of the development 128x128 pixels long IR region photodetector array are produced. The fabrication involves hybridizing GaAs/AlGaAs MQW chips to CMOS readout chips. Temperature resolution NETD — 0,067 K at operating temperature 65 K.