

УДК 621.315.592

М. А. Демьяненко, О. Р. Копп, Г. Л. Курышев, И. И. Ля,
В. Н. Овсяк, В. Г. Половинкин, А. П. Савченко,
И. М. Субботин, А. И. Торопов, В. В. Шашкин

(Новосибирск)

**МАТРИЧНЫЙ ИК-ФОТОПРИЕМНЫЙ МОДУЛЬ
НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР
С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ GaAs/AlGaAs**

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 GaAs/AlGaAs и оригинального кремниевого процессора. Пороговая мощность излучения $P_{\text{пор}}$ для фотоприемной матрицы с максимумом фоточувствительности при $7,8 \text{ мкм}$ составляет $P_{\text{пор}} = 5 \cdot 10^{-13} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ при температуре 78 К и $P_{\text{пор}} \approx 4 \times 10^{-14} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ при температуре 65 К . Кремниевый процессор имеет рекордную зарядовую емкость накопления $2 \cdot 10^8$ электронов и обеспечивает работоспособность модуля в широком диапазоне температур и темповых токов.

Введение. Высокий уровень фонового излучения в диапазоне температур $0 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ в дальней ИК-области прозрачности атмосферы ($8 - 12 \text{ мкм}$) и более низкий, чем в среднем ИК-диапазоне ($3 - 5 \text{ мкм}$), температурный контраст полезного излучения предъявляют более жесткие требования к матричным фотоприемным устройствам (ФПУ) дальнего ИК-диапазона. Требуется высокая однородность ФПУ в целом и большая емкость накопления матричного процессора, обеспечивающего считывание и выделение полезного фотосигнала из фона.

Благодаря высокой однородности фоточувствительности, многослойные структуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs становятся основными типами фотоприемников для широкоформатных матричных тепловизионных систем в диапазоне $8 - 12 \text{ мкм}$ [1]. Для широкоформатных ФПУ диапазоном $8 - 12 \text{ мкм}$ величина квантовой эффективности фотоприемников менее существенна, так как из-за фоновых ограничений и ограничения зарядовой емкости устройств ввода кремниевых процессоров время накопления τ_n в тепловизионных системах с фотоприемниками, имеющими высокую квантовую эффективность, как правило, много меньше кадрового времени τ_k : $\tau_n \sim 0,01 \tau_k$ [2]. Поэтому потери в фотосигнале вследствие меньшей квантовой эффективности фотоприемников на структурах с

квантовыми ямами GaAs/AlGaAs по сравнению с HgCdTe-фотодиодами могут быть полностью компенсированы путем увеличения времени накопления.

Фотоприемные элементы на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ) GaAs/AlGaAs представляют собой периодическую структуру из узкозонного легированного GaAs и широкозонного твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, окруженных проводящими слоями GaAs. Энергетическая диаграмма фоточувствительного слоя МСКЯ и оптические переходы изображены на рис. 1. При толщине слоев GaAs меньше или порядка длины свободного пробега происходит квантование движения электронов в направлении оси роста и расщепление энергетических состояний в зоне проводимости GaAs на мини-зоны с энергией $E_n \approx p_{\parallel}^2/2m^* + (\hbar^2\pi^2/2m^*a^2)n^2$, где p_{\parallel} – импульс электрона в плоскости слоев; m^* – эффективная масса; a – ширина квантовой ямы GaAs; \hbar – постоянная Планка, $n = 1, 2, \dots$ – целое число. Фотопроводимость в такой структуре обеспечивается оптически активными переходами, разрешенными только для поляризации света, перпендикулярной квантово-размерным слоям, между нижней заполненной мини-зоной и разрешенными связанными состояниями внутри ямы GaAs или несвязанными состояниями над потенциальным барьером (край зоны проводимости AlGaAs). Параметры фотоприемника (квантовая эффективность, величина темнового тока) зависят от положения уровней квантования относительно друг друга и потенциального барьера, величины тянущего электрического поля, концентрации электронов в яме GaAs, рабочей температуры и размеров отдельного фотоприемного элемента.

Приведены результаты работ по исследованию параметров фотоприемной матрицы размерностью 128×128 и созданию гибридного фотоприемного модуля в составе фотоприемной матрицы и кремниевого процессора.

Фотоприемная матрица. Фоточувствительные структуры изготавливались молекулярно-лучевой эпитаксией на установке "Riber 32P". В качестве подложек использовался полужолирующий GaAs АГЧП-10 диаметром 51 мм. Расчетная толщина слоев GaAs и состав x барьеров $Al_xGa_{1-x}As$ выбирались таким образом, чтобы второй уровень в квантовой яме (КЯ) GaAs находился ниже края зоны проводимости $Al_xGa_{1-x}As$. В этом случае обеспечивались оптимальные параметры фотоприемного элемента по фоточувствительности и темновому току. Точность изготовления состава барьеров $Al_xGa_{1-x}As$ и его однородность по площади подложки выдерживались в пределах $(x - x_0) < 0,01$ (где $x_0 \approx 0,3$ – состав, заданный предварительным расчетом). Толщина квантово-размерных слоев GaAs выдерживалась с точностью до одного монослоя и составляла 19 монослоев GaAs. Толщина барьер-

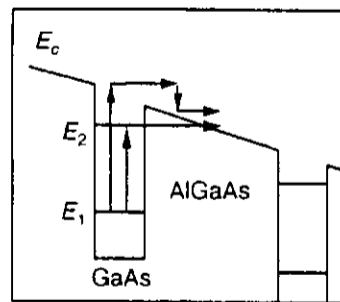


Рис. 1. Энергетическая диаграмма зоны проводимости МСКЯ: E_1 и E_2 – уровни квантования для поперечного движения электронов; E_c – край зоны проводимости объемного материала. Стрелками обозначены возможные пути выброса электрона из ямы при поглощении фотона

ных слоев AlGaAs составляла 500 \AA и выбиралась 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 $60\text{--}80 \text{ K}$. Фоточувствительный слой состоял из 50 периодов КЯ GaAs и барьеров $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. С обеих сторон фоточувствительного слоя изготавливались проводящие контакты из GaAs : Si толщиной 1 мкм . Концентрация Si в проводящих контактных слоях составляла $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Концентрация Si в квантово-размерных слоях GaAs выбиралась в пределах $(4 - 5)10^{11} \text{ см}^{-2}$, что близко к оптимальной концентрации для МСКЯ-фоторезисторов [3]. Во избежание накопления примесного Si на границах раздела GaAs/AlGaAs легирование квантовых ям проводилось в центральных частях GaAs на расстоянии двух монослоев от гетерограниц.

Матрица фотоприемников изготавливалась методами фотолитографии и представляет собой периодически расположенные мезоструктуры, полученные жидкостным травлением, размером $40 \times 40 \text{ мкм}$ и периодом 50 мкм . Электронно-микроскопическое изображение фрагмента матрицы фотоприемников, полученное с помощью "Nanoscan-50", приведено на рис. 2. Нижний контактный слой GaAs : Si – общий для всех элементов. 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 изготавливалась двумерная дифракционная решетка в виде шахматной доски с периодом $2,9 \text{ мкм}$. Травление решетки осуществлялось в плазме CCl_2F_2 на глубину $0,7 \text{ мкм}$. Для сборки фотоприемной матрицы с кремниевым мультиплексором на поверхности омического контакта изготавливались In-столбы высотой 7 мкм (см. рис. 2). Однородность фоточувствительности и обнаружительной способности матрицы фотоприемников зависела как от исходного качества выращенной структуры, так и от качества изготовления дифракционных элементов ввода излучения. На рис. 3, 4 изображены гистограммы фоточувствительности R матрицы фотоприемников и темнового тока. Измерение величины R проводилось при освещении матрицы фотоприемников излучением от абсолютно черного тела с температурой 500 K . Температура матрицы при измерениях составляла 78 K .

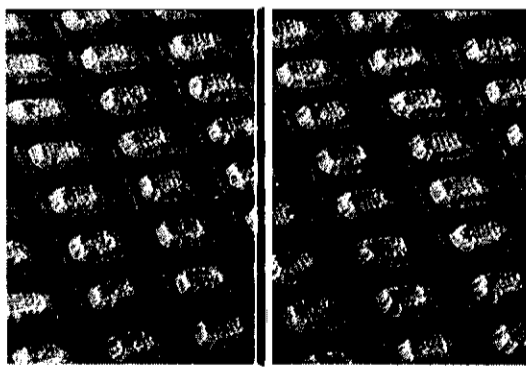


Рис. 2. Фрагмент фотоприемной матрицы 128×128 с In-столбами на каждом элементе

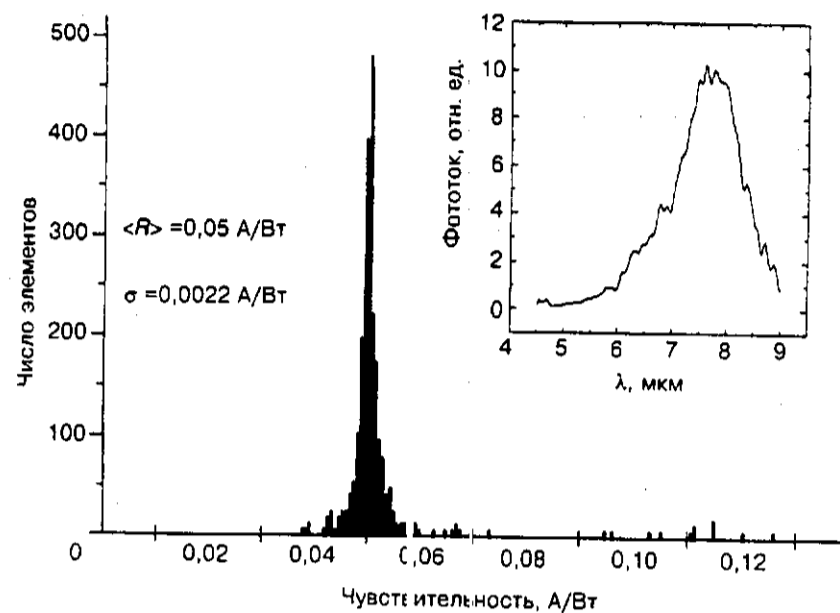


Рис. 3. Гистограмма распределения фоточувствительности по элементам матрицы фотоприемников 128×128 . На вставке изображена спектральная зависимость фоточувствительности

Величина R определялась как отношение фототока к мощности излучения черного тела в спектральной полосе фоточувствительности фотоприемника (вставка на рис. 3). Наличие элементов с R больше чем среднее значение $\langle R \rangle = 0,05 \text{ A/Вт}$ связано с дефектами изготовления в виде «слипшихся» элементов. Неоднородность величины темновых токов по элементам матрицы мы связываем с дефектами изготовления и ростовыми дефектами,

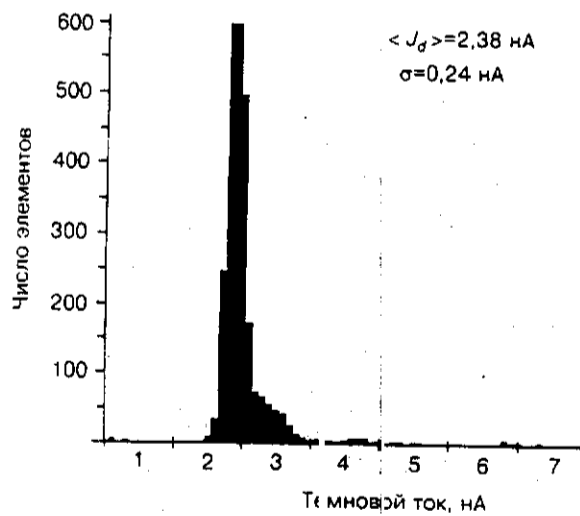


Рис. 4. Гистограмма темнового тока элементов матрицы фотоприемников 128×128 при $T = 80 \text{ К}$

природа и внутренняя структура которых пока еще недостаточно ясны, но корреляцию между числом дефектов на отдельных элементах и темновыми токами мы наблюдали на некоторых образцах.

Процессор для матричного ФПУ. Особенности ИК-излучения в диапазоне 8–12 мкм определяют требования к кремниевому процессору для матричных ИК ФПУ.

1. Максимально возможная зарядовая емкость входных устройств. Известно, что при прочих равных условиях обнаружительная способность растет как корень квадратный от времени накопления. В работах [4, 5] описан процессор с рекордной зарядовой емкостью входных устройств 7,9 пК, тем не менее именно ограничение по зарядовой емкости не позволило реализовать в полной мере преимущества HgCdTe -фотодиодов с $\lambda_{\text{гр}} = 10$ мкм, так как процессор дает возможность накапливать только 1/140 часть фотосигналов ($\tau_n = 100$ мкс при $\tau_k = 14,3$ мкс). Технологические возможности увеличения зарядовой емкости устройств считывания практически исчерпаны (в вышеприведенных работах использовались современные технологии с проектными нормами 0,5–0,8 мкм). Ограничения по зарядовой емкости обусловлены необходимостью размещения многоэлектродной структуры в каждой ячейке устройств считывания процессора. В этом случае накопительная емкость занимает не более 20–30 % площади одной ячейки.

2. Высокая однородность передаточных характеристик матрицы входных устройств вследствие более низкой контрастности изображения в длинноволновом диапазоне по сравнению с диапазоном 3–5 мкм.

3. Уровень собственных шумов процессора, не превышающий шума, обусловленного флуктуациями фоновое излучения, или собственных шумов фотоприемника, т. е. обеспечение возможности получения предельно возможной чувствительности ФПУ.

В настоящей работе использовался оригинальный процессор с входными прямоинжекционными устройствами ввода [6, 7]. На рис. 5 представлена принципиальная схема процессора 128×128 , отличительной особенностью которого является построение матрицы из фрагментов, состоящих из четырех входных устройств с прямой инжекцией заряда (цифрами 1–4 обозначены входные диоды с первой по четвертую ячейку входных устройств фрагмента соответственно, 5–8 – первые входные затворы, 9–12 – вторые входные затворы, 13–15 – общий для фрагмента затвор накопления, затвор переноса и выходной диод, 16–21 – шины управления, 22 – вертикальный сдвиговый регистр, 23 – формирователь строчных управляющих напряжений, 24 – столбцовая шина считывания, 25 – линейка предусилителей, 26 – горизонтальный сдвиговый регистр). Временная диаграмма внешних управляющих напряжений приведена на рис. 6. Накопление фотосигналов происходит одновременно во всех фрагментах матрицы в тех ячейках фрагмента, на которые одновременно на первые и вторые входные затворы поданы высокие открывающие напряжения. Как видно из рис. 6, эти условия выполняются последовательно с первой по четвертую ячейку фрагмента. Блок формирователя строчных управляющих напряжений 23 обеспечивает построчное считывание фотосигналов с фрагментов, а линейка предусилителей 25 – последовательный вывод сигналов на общий выход. Таким образом, последовательно выводятся фрагменты кадра с первых по четвертые ячейки входных устройств фрагментов. Программное обеспечение при выводе на монитор формирует полный кадр в режиме реального времени. Объединение затворов

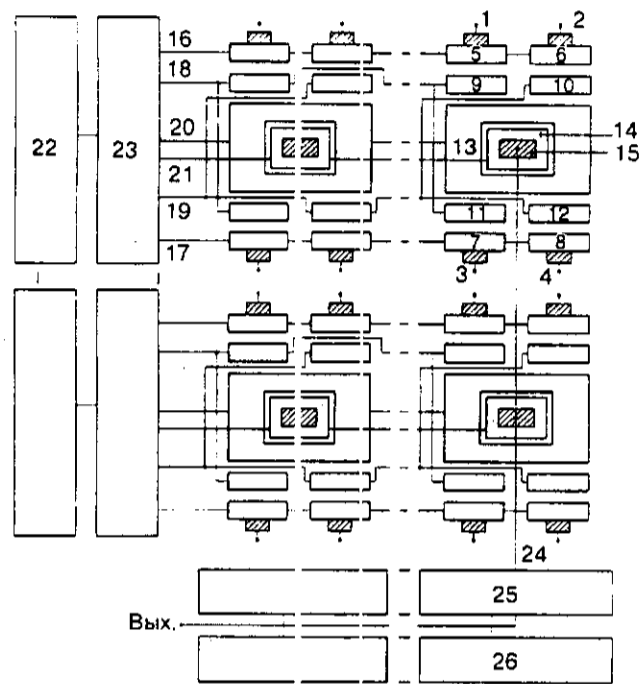


Рис. 5. Принципиальная схема процессора размерностью 128 × 128

накопления и переноса и выходного диода четырех ячеек фрагмента позволяет увеличить площадь затвора накопления до двух-трех площадей элементарной ячейки. В нашем случае процессор спроектирован по трехмикронным топологическим нормам, элементарная ячейка с шагом 50×50 мкм и толщиной подзатворного диэлектрика 500 Å имеет зарядовую емкость приблизительно $2 \cdot 10^8$ эле тронов (~ 30 пК).

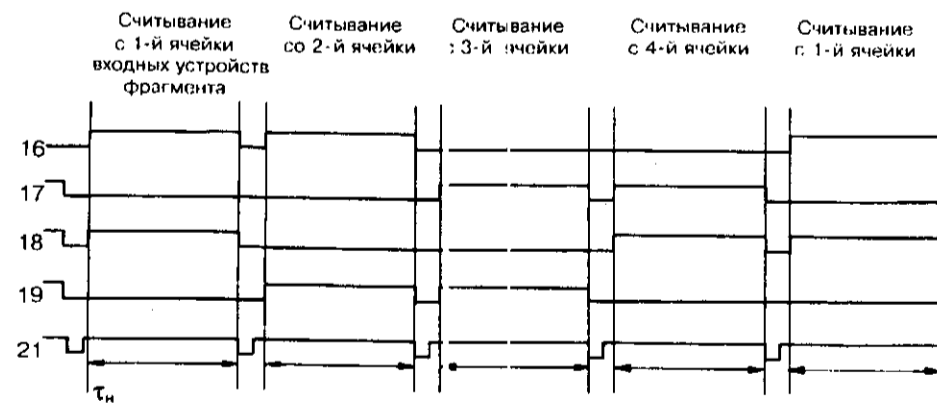


Рис. 6. Временные диаграммы управляющих напряжений

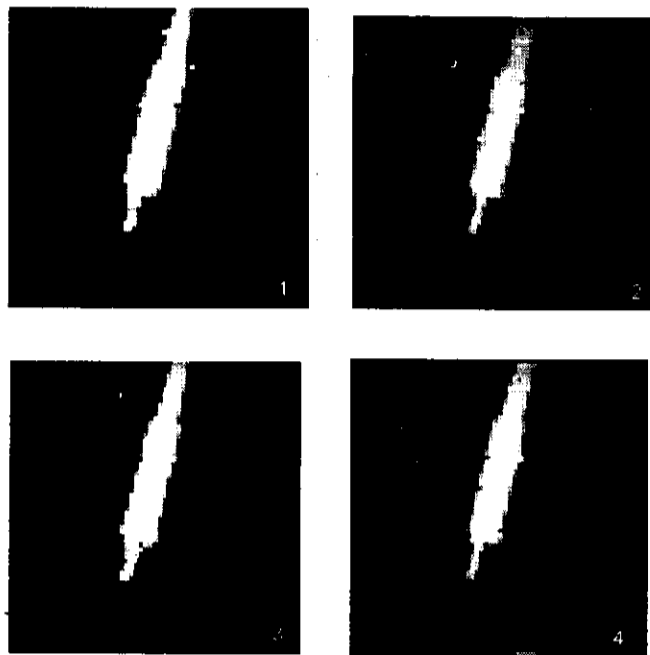


Рис. 7. Тепловые изображения паяльника размерностью 64×64 , считываемые последовательно с ячеек фрагмента 1–4

На рис. 7, 8 приведены тепловые изображения, полученные с помощью МСКЯ фотоприемного модуля, имеющего максимум фоточувствительности на длине волны $7,8 \text{ мкм}$. Изображение проецировалось на фотоприемную матрицу со стороны подложки с помощью ZnSe объектива с фокусным расстоянием 70 мм и относительным отверстием $1 : 1,4$. Для устранения перекрестной оптической связи между фотоприемными элементами GaAs подложка утонялась по всей рабочей площади матрицы до 1 мкм . Фотоприемный модуль был установлен на колодном пальце азотного криостата. Температура пальца при откачке азота составляла 72 К . Время накопления $\tau_{\text{н}} = 5 \text{ мс}$. На рис. 7 приведены тепловые изображения паяльника размерностью 64×64 , где цифрами 1–4 обозначены изображения с первых по четвертые ячейки фрагмента.

На рис. 8 представлено тепловизионное изображение размерностью 128×128 , в котором программно сведены четыре фрагмента размерностью 64×64 . Расчетное температурное разрешение NEDT при пропускании всего оптического тракта, оцененного в 20% , и напряжении



Рис. 8. Тепловое изображение, полученное с фотоприемным модулем на основе МСКЯ GaAs/AlGaAs. Рабочая температура 72 К

смещения на фотоприемной матрице 3 В составляет при рабочей температуре модуля $T_{\text{раб}} = 72 \text{ К}$ $\text{NEDT} = 0,08 \text{ К}$ и $\text{NEDT} = 0,015 \text{ К}$ при $T_{\text{раб}} = 65 \text{ К}$. Реальное температурное разрешение несколько хуже рассчитанного значения для 72 К. Обусловлено это тем, что температура фотоматрицы на работающем модуле выше температуры пальца криостата на 3–4 град, что вызывает переполнение накопительной емкости процессора при оптимальном напряжении смещения на фотоматрице в 2–3 В. Поэтому тепловые изображения, приведенные на рис. 7, 8, получены при напряжении смещения на фотоматрице 0,8 В, при котором расчетное значение $\text{NEDT} = 0,16$ соответствует экспериментально наблюдаемому тепловому контрасту на рис. 8.

Заключение. В настоящей работе изложены основные результаты по разработке гибридного фотоприемного модуля для дальнего ИК-диапазона спектра размерностью 128×128 , состоящего из матрицы фоторезистивных элементов на основе МСКЯ GaAs/AlGaAs и кремниевого процессора с рекордно высокой зарядовой емкостью накопления ($2 \cdot 10^8$ электронов). Показано, что разработанная технология позволяет получать многоэлементные фотоприемники с высокой однородностью по пороговой мощности излучения $P_{\text{пор}}$ не хуже $5 \cdot 10^{-13} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ при рабочей температуре $T_{\text{раб}} = 78 \text{ К}$ и $P_{\text{пор}} \approx 4 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ при $T_{\text{раб}} = 65 \text{ К}$. Представленные параметры фотоприемного модуля в целом не являются предельными. Просветление поверхности фоточувствительной матрицы и оптимизация дифракционного элемента ввода излучения должны по предварительным оценкам увеличить квантовую эффективность в 2–3 раза и соответственно уменьшить во столько же раз NEDT .

В заключение авторы выражают благодарность С. П. Супруну за предоставление снимков фотоприемной матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gunapala S. D., Lui J. K., Sundaran M. S. et al. Long-wavelength 256 × 256 QWIP hand-held camera // Infrared Detectors and Focal Plane Arrays IV /Eds. E. L. Dereniak, R. E. Sampson; Proc. SPIE. 1996. 2746. P. 124.
2. Destefanis G., Audebert P., Mottin E., Ramlaud P. High performance LWIR 256 × 256 HgCdTe focal plane array operating at 81 K // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 111.
3. Kane M. J., Millige S., Emeny M. T. et al. Intersubband Transitions in Quantum Wells /Eds. E. Rosencher, B. Vinter, B. Levin. Cargèse, France. Sept. 9–14 1991. N. Y.: Plenum, 1992.
4. Mottin E., Pantigny P., Boch R. An improved architecture of IRFPA readout circuits // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 117.
5. Fossum E. R. Infrared readout electronics for space science sensors: state of the art and future directions // Proc. SPIE. 1993. 2020. P. 121.
6. Положительное решение на заявку 96102300/25(004006). Устройство ввода на приборах с зарядовой связью для двумерных приемников изображения /И. И. Ли. Принято 07.02.96.
7. Кунакбаева Г. Р., Ли И. И. Выбор спектрального диапазона тепловизионных систем на основе многоэлементных $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -фотодиодов // Автометрия. 1996. № 5. С. 21.

Поступила в редакцию 1 июня 1998 г.