

Видно, что с увеличением числа суммирований пороговая мощность уменьшается как  $P_{\lambda_m} \sim N^{(0,44-0,45)}$  до  $N \cong 20$  при  $dU_{com} = -1,18$  В и до  $N = 32$  — при  $dU_{com} = -1,16$  В, что близко к идеальному закону  $P_{\lambda_m} \sim N^{0,5}$ . Очевидно, что такое отличие в числе шагов ВЗН обусловлено отличием спектрального распределения шума в зависимости от  $dU_{com}$ . При числе суммирований  $N = 32$  пороговая мощность лежит в диапазоне  $P_{\lambda_m} \cong (3-4) \cdot 10^{-15}$  Вт/эл.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бурлаков И. Д., Голубков А. В., Дирочка А. И., Касаткин И. Л., Лопухин А. А., Пасеков В. Ф., Пономаренко В. П., Чижко В. Ф. Матричные фотоприемники из антимонида индия для гибридных матричных фотоприемных устройств// Прикладная физика. 2005. № 2. С. 16—21.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир. 2001. Т. 2. С. 54.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## InSb 288×32 FPA with digital TDI for low background application

*V. F. Chishko, I. L. Kasatkin, I. D. Burlacov, A. A. Lopukhin,  
V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev*  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*D. V. Borodin, Yu. V. Osipov*  
RTK IMPEKS Ltd., Co., Moscow, Russia

*V. V. Karpov*  
SAPFIR Ltd., Co., Moscow, Russia

*A. M. Kroshin*  
GNPRKC "CSKB PROGRESS", Samara, Russia

*Indium antimonide photodiode 288×32 FPA with thick base region for low background application has been developed and fabricated. Photoelectrical properties at background flow  $5 \cdot 10^{-7}$  W·cm<sup>-2</sup> and dark current at various temperatures were investigated.*

УДК 535.247.049.7:621.383.52

## Многоэлементное фотоприемное устройство на основе матрицы МДП ИК-фотодиодов на InAs для регистрации импульсных оптических сигналов

*И. И. Ли, В. М. Базовкин, Н. А. Валишева, А. А. Гузев, В. М. Ефимов,  
А. П. Ковчавцев, Г. Л. Курьшев, В. Г. Половинкин*  
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Разработано и изготовлено фотоприемное устройство (ИК-ФПУ) на основе МДП фотоприемников на автоэпитаксиальном слое InAs формата 8×8 элементов. Показано, что данное ИК-ФПУ обеспечивает определение координаты и времени прихода оптических импульсных сигналов с энергией  $8 \cdot 10^{-17}$  Дж/эл и точностью не хуже 100 нс.*

Задача регистрации координаты и времени прихода слабых импульсных сигналов, необходимых в системах лазерной локации, — одна из самых технически сложных проблем в оптоэлектронике

нике. В ИК-области эта задача усложняется тем, что, как правило, уровень фонового излучения сцены на 2—3 порядка превышает уровень информационных сигналов. В этих условиях исключена возможность использования традиционных структурных решений построения устройств считывания с многоэлементных матричных фотоприемников.

### Кремниевое устройство считывания

Для решения задачи регистрации координат и времени прихода импульсных оптических сигналов в ИК-области спектра устройство считывания должно удовлетворять следующим требованиям:

- фотосигнал с каждой фотоприемной ячейки без задержки во времени передается на выходные строчные и столбцовые шины;
- ячейка устройства считывания должна содержать усилитель и фильтр высоких частот для подавления низкочастотных неинформационных компонент сигналов, обусловленных фоновым излучением и темновыми токами фотоприемников.

Структурная схема устройства считывания, удовлетворяющая этим требованиям, приведена на рис. 1, а. Транзистор Т1 необходим для подачи напряжения смещения и формирования режима неравновесного обеднения МДП фотодиода. Транзисторы Т2 и Т3 подключают каждую фотоприемную ячейку к выходным строчным и столбцовым шинам.

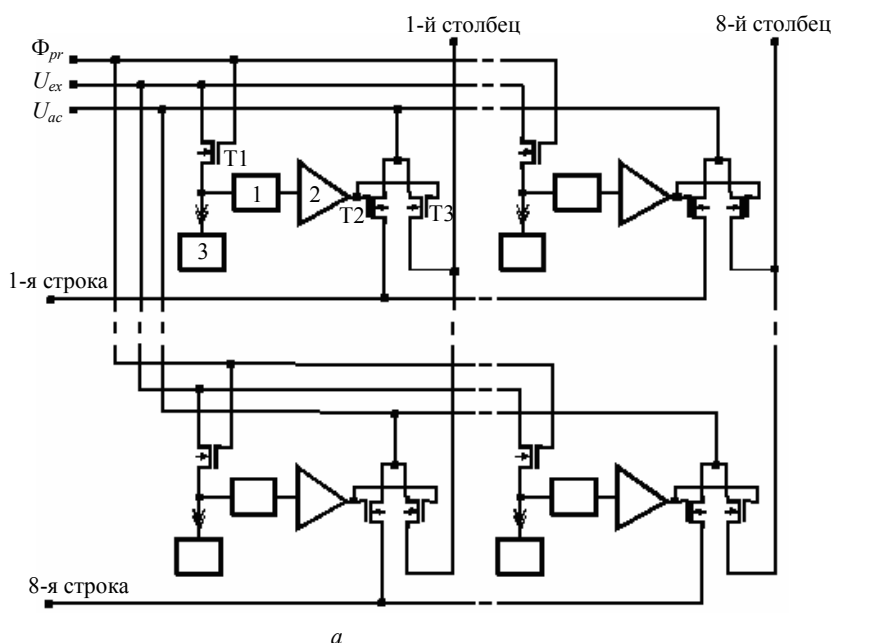
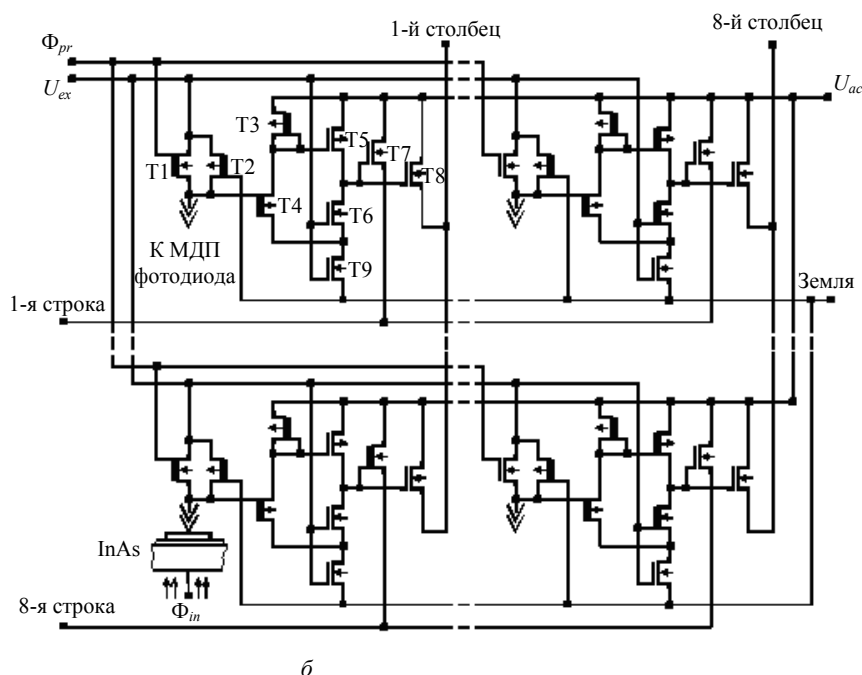


Рис. 1. Схема кремниевого устройства считывания для матрицы МДП фотодиодов 8×8 элементов:

- а — структурная;
- 1 — фильтр высоких частот;
- 2 — предусилитель;
- 3 — МДП фотодиод;
- б — принципиальная



Принципиальная схема кремниевого устройства считывания приведена на рис. 1, б. Цепочка, содержащая подзатворную емкость МДП фото диода и  $p$ -канальный транзистор Т2, образует RC-фильтр высокой частоты [1]. Дифференциальный усилитель, образованный  $p$ -канальными транзисторами Т3, Т5 и  $n$ -канальными транзисторами Т4, Т6 и Т9, а также  $n$ -канальные транзисторы Т7 и Т8 обеспечивают усиление и передачу сигналов на строчные и столбцовые шины считывания. Для работы кремниевого устройства считывания, кроме 5-вольтового источника питания  $U_{ac}$ , необходимы один регулируемый источник питания  $U_{ex}$  и два импульсных управляющих напряжения, обеспечивающих работу МДП фотодиодов в режиме неравновесного обеднения —  $\Phi_{pr}$  и  $\Phi_{in}$ .

С началом импульса  $\Phi_{pr}$ , открывающего  $n$ -канальный транзистор Т1, на МДП фотодиод подается напряжение  $U_{ex}$ . Во время импульса  $\Phi_{pr}$  на подложку InAs МДП фотодиодов подается импульс отрицательной полярности  $\Phi_{in}$  (для подложки InAs  $n$ -типа проводимости), с окончанием которого МДП фотодиоды одновременно переводятся в режим неравновесного обеднения. С окончанием импульса  $\Phi_{pr}$  на обоих входах дифференциального усилителя (затворы МДП транзисторов Т4 и Т6) устанавливается напряжение  $U_{ex}$ . При подаче импульсного сигнала на затвор транзистора Т4 усиленный сигнал передается на затворы транзисторов Т7 и Т8.

Отметим, что использование емкости подзатворного диэлектрика МДП структур в качестве составной части RC-фильтра является важным преимуществом. При использовании фотоприемных структур на основе  $p$ - $n$ -перехода емкость RC-фильтра ( $C = 0,4$  пФ) пришлось бы размещать на кремниевом кристалле. Это заняло бы значительную часть площади в ячейке устройства считывания на кремниевом кристалле и существенно ограничило бы возможности выбора принципиальной схемы и оптимизации топологии устройства считывания.

Расчетные зависимости коэффициента усиления дифференциального усилителя устройства считывания (кривые 1—3) и устройства считывания с усилителем и RC-фильтром высоких частот (кривые 4 и 5) от частоты и напряжения смещения  $U_{ex}$  в качестве параметра приведены на рис. 2. Как видно из этих зависимостей, RC-фильтр обеспечивает подавление низкочастотных компонент сигналов. С увеличением напряжения смещения  $U_{ex}$  увеличивается проводимость канала МДП транзистора Т2, что приводит к сдвигу передаточных характеристик RC-фильтра в область более высоких частот. В области частот выше 2—3 МГц уменьшение коэффициента усиления устройства считывания обусловлено высокочастотной границей

полосы пропускания дифференциального усилителя. Увеличение напряжения смещения  $U_{ex}$  также приводит к изменению режима работы усилителя. Высокочастотная граница полосы пропускания усилителя смещается в область более высоких частот. Оптический сигнал в ФПУ преобразуется в заряд, который интегрируется в области неравновесного обеднения МДП фотодиода.

Таким образом, при моделировании устройства считывания импульсный оптический сигнал можно представить ступенькой напряжения на внутренней обкладке емкости подзатворного диэлектрика МДП фотодиода с длительностью переднего фронта, равной длительности сигнального прямоугольного оптического импульса.

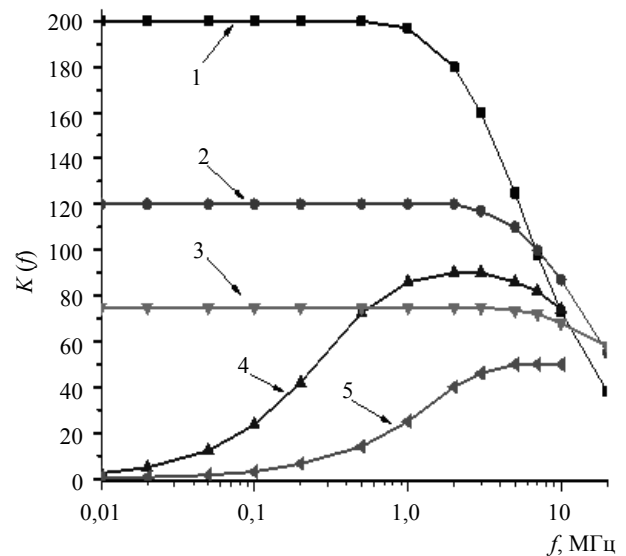


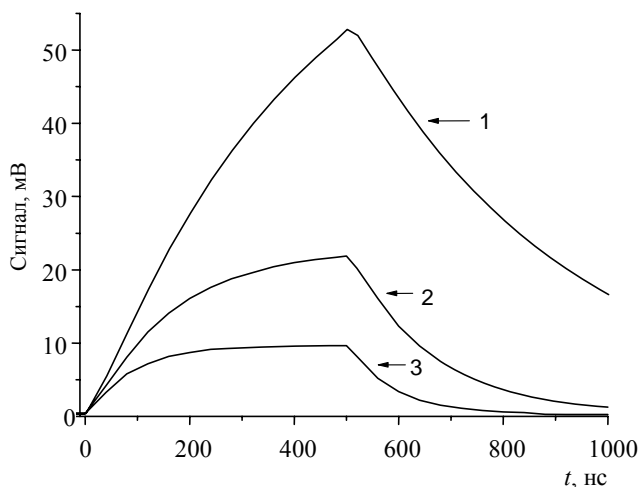
Рис. 2. Частотные передаточные характеристики дифференциального усилителя устройства считывания (кривые 1—3) и устройства считывания с RC-фильтром высоких частот (кривые 4, 5) в зависимости от напряжения смещения:

1 —  $U_{ex} = 2,0$  В; 2 —  $U_{ex} = 2,3$  В; 3 —  $U_{ex} = 2,8$  В;  
4 —  $U_{ex} = 2,3$  В; 5 —  $U_{ex} = 2,8$  В

На рис. 3 приведены расчетные зависимости сигнала на выходе предусилителя (на затворах буферных транзисторов Т7, Т8 (см. рис. 1) для трех значений напряжений смещения: 2,3; 2,5 и 2,8 В (см. кривые 1—3, соответственно). При этом на внутреннюю обкладку емкости подзатворного диэлектрика подается ступенька импульса напряжения с амплитудой 1 мВ и длительностью фронта 500 нс. Начальные напряжения сигналов для кривых 1, 2 и 3 равны 2,5; 2,2 и 1,75 В, соответственно.

Входной сигнал с амплитудой в 1 мВ соответствует информационному заряду  $2,5 \cdot 10^3$  электронов на емкости МДП фотодиода, равной 0,4 пФ, или оптическому импульсному сигналу с энергией

$1,6 \cdot 10^{-16}$  Дж/эл для фотонов с длиной волны 3 мкм при квантовой эффективности ИК-ФПУ, равной 1.



**Рис. 3.** Результаты численного моделирования матрицы устройств считывания 8×8 элементов при подаче на внутреннюю обкладку емкости подзатворного диэлектрика МДП фотодиода импульса напряжения с амплитудой 1 мВ и длительностью переднего фронта 500 нс от напряжения смещения

С увеличением напряжения смещения  $U_{ex}$  амплитуда сигнала на выходе предусилителя уменьшается с 52 (см. рис. 3, кривая 1) до 9,2 мВ (кривая 3) вследствие уменьшения коэффициента усиления и смещения передаточных характеристик РС-фильтра в область более высоких частот. При этом за счет увеличения высокочастотной границы полосы пропускания предусилителя с увеличением  $U_{ex}$  улучшается временное разрешение.

### Изготовление образцов ИК-ФПУ формата 8×8 и экспериментальные результаты

На основе предложенных схемотехнических решений были изготовлены кремниевые устройства считывания по КМОП-технологии с топологическими нормами 0,8 мкм и двумя уровнями металлизации.

Габаритные размеры кремниевого кристалла устройств считывания 6×6 мм, кристалла матрицы МДП фотодиодов — 3,4×3,6 мм.

В центре кремниевого кристалла располагается матрица 8×8 ячеек устройств считывания с шагом по обеим координатам 50 мкм. Размер МДП фотодиода 40×40 мкм. По обеим сторонам так же, как и в матрице фоточувствительных элементов, расположено по 9 блоков 6×22 индиевых крепежных столбов для обеспечения механической прочности фотоприемного модуля.

Матрица МДП фотодиодов формата 8×8 элементов изготовлена на автоэпитаксиальных струк-

турах InAs [2]. ИК-излучение от объекта исследования падает на непланарную сторону сильнолегированной подложки  $n^{++}$ -InAs. За счет сдвига края фундаментального поглощения (эффект Бурштейна-Мосса) излучение в спектральном диапазоне 2,4—3,05 мкм проходит и поглощается в тонком эпитаксиальном слое InAs, выращенном методом газотранспортной эпитаксии на подложках  $n^{++}$ -InAs.

Таким образом, сильнолегированная подложка матрицы является узкополосным фильтром и определяет спектральный диапазон ИК-ФПУ 2,4—3,05 мкм. Малая толщина эпитаксиального слоя InAs ( $\approx 5$  мкм) обеспечивает оптическую развязку соседних фотоприемных элементов матрицы не хуже 2 % при диаметре светового пятна  $\sim 27$  мкм [3, 4].

Сборку модулей ФПУ проводили методом flip-chip. Собранные модули монтировали в заливной криостат, обеспечивающий температуру  $\sim 80$  К. Уровень фонового излучения ФПУ ограничивается холодной диафрагмой диаметром отверстия 2,5 мм, расположенной на расстоянии 11 мм от поверхности МДП фотодиодов. При выбранной геометрии холодной диафрагмы уровень фонового излучения в спектральном диапазоне 2,4—3,05 мкм и температуре фона 300 К составляет  $2,3 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>.

ИК-ФПУ формата 8×8 элементов в заливном криостате, оснащенный германиево-кремниевым объективом с фокусным расстоянием 20 мм и диаметром входного отверстия 12 мм, монтировали на станине инструментального микроскопа ИМЦЛ-100×50,А. На микрометрическом столике смонтирован импульсный светоизлучающий диод с апертурной диафрагмой. Механическая система микроскопа обеспечивает возможность сфокусировать оптический импульс от ИК-светодиода с длительностью 500 нс и периодом 20 мс на произвольном фоточувствительном элементе ФПУ формата 8×8 элементов.

Источником импульсного оптического сигнала являлся светоизлучающий диод InAsSbP/InAs, изготовленный на предприятии Physipex при Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург) [5]. Калибровку светодиода выполняли на ИК-ФПУ формата 128×128 на InAs, в котором технология изготовления МДП фотодиодов и тип подложки идентичны [4].

Отношение величины сигнала к шумовой полосе на экране осцилографа для всех фотоприемных каналов ИК-ФПУ формата 8×8 элементов при энергии оптического сигнала  $\sim 6 \cdot 10^{-15}$  Дж/эл было не менее 12.

## Обсуждение экспериментальных результатов

Из анализа расчетных зависимостей, приведенных на рис. 2 и 3, следует, что для повышения коэффициента усиления в 2—3 раза и повышения чувствительности ИК-ФПУ необходимо введение дополнительного управляющего напряжения, позволяющего независимо регулировать напряжение смещения на усилителе с целью выбора оптимальной рабочей точки предусилителя и сопротивления канала транзистора T2 (см. рис. 1, б) для оптимизации передаточной характеристики RC-фильтра высоких частот. Этого можно достичь, соединив затворы *p*-канального транзистора T2 (см. рис. 1, б) с дополнительным регулируемым источником питания. Минимально обнаруживаемая энергия для импульсных оптических сигналов также уменьшается с уменьшением их длительности. Так, для оптического сигнала с длительностью 200 нс амплитуда сигналов на выходе кремниевого устройства считывания увеличивается приблизительно в два раза.

Дополнительной возможностью улучшения чувствительности ФПУ является оптимизация технологии изготовления МДП фотодиодов. В изготовленном модуле ИК-ФПУ толщина подзатворного диэлектрика составляет 140 нм. Уменьшение толщины подзатворного диэлектрика со 140 до 100 нм позволит увеличить емкость RC-фильтра высоких частот и тем самым оптимизировать его передаточную характеристику. Тогда как возможность увеличить сопротивление RC-фильтра ограничивается доступной площадью ячейки устройства считывания.

## Выводы

1. Разработанный ИК-ФПУ формата 8×8 элементов обеспечивает регистрацию оптического импульса с пороговой энергией  $\sim 8 \cdot 10^{-17}$  Дж/эл (считаем, что ширина шумовой полосы примерно равна 6 значениям среднеквадратичного шума).

2. Точность времени прихода оптического сигнала, определяемая как длительность фронта сигналов на выходах ФПУ при достижении амплитуды сигналов, равных 6 уровням среднеквадратичного шума, не хуже (50—100) нс.

3. Анализ результатов показывает, что можно увеличить чувствительность ИК-ФПУ до величины (2—4)·10<sup>-17</sup> Дж/эл, для чего необходимо ввести дополнительное регулируемое напряжение и провести коррекцию топологии предусилителя, оптимизировать технологию изготовления МДП фотодиодов, в частности, уменьшить толщину подзатворного диэлектрика со 140 до 100 нм.

## Литература

1. Курьшев Г. Л., Ли И. И. Устройство считывания с МДП фотоприемников: Положительное решение по заявке на изобретение № 20005110459/28(012251); приоритет от 11.04.05.
2. Bazovkin V. M., Lee I. I. et al. 1×384 Hybrid linear infrared focal plane arrays on InAs MOS structure for spectrometric applications// SPIE, Proceedings XVII international conference on photoelectronics and night vision. — Moscow, 2002. P. 27—31.
3. Vainer V. G. Excess photo-response caused by technological and constructive defects in the IR-sensitive hybrid microcircuits// Journal of Cristal Growth. 2000. № 210. P. 356—360.
4. Курьшев Г. Л., Ковчавцев А. П. и др. Медицинский тепловизор на основе матричного ФПУ 128×128 для диапазона длин волн 2,8—3,05 мкм// Автометрия. 1998. № 4. С. 5—12.
5. www.ioffeled.com, [www.mirdog.spb.com](http://www.mirdog.spb.com)

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## The focal plane array based on MIS-photodiodes on InAs for pulse optical data registration

I. I. Lee, V. M. Bazovkin, N. A. Valisheva, A. A. Guzev, A. P. Kovchavtsev,  
G. L. Kuryshchev, V. G. Polovinkin

Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Science,  
Novosibirsk, Russia

*The focal plane array (IR FPA) on the basis of metal-insulator-structure (MIS) photodetectors on InAs auto-epitaxial substrate of 8×8 elements is designed and fabricated. It is shown, that the IR FPA provides definition of coordinate and time of arrival of optical pulse signals with energy  $8 \cdot 10^{-17}$  J/element and accuracy not worse 100 ns.*