

УДК 621.382.4

## Арсенид галлиевые ФПУ УФ-диапазона для многоспектральных оптоэлектронных систем

В. Н. Легкий, Б. В. Галун, М. В. Киселев, О. П. Толбанов, Д. Ю. Мокеев, А. В. Тяжев

*В работе описан и исследован прототип 128-канального модуля на основе GaAs детекторов ультрафиолетового излучения. Лабораторные испытания модуля показали высокое значение токовой чувствительности арсенид-галлиевого фотоприемника, равное 60—120 мА/Вт в диапазоне 220—320 нм.*

PACS: 81.05.Ea, 85.30.-z, 85.60.Gz

*Ключевые слова:* арсенид галлия, полупроводниковые фотодетекторы, ультрафиолетовое излучение, токовая чувствительность.

### Введение

В настоящее время интенсивно развиваются полупроводниковые преобразователи ультрафиолетовой (УФ) области спектра применительно к следующим областям:

- многоспектральные пеленгация и мониторинг (экология, контроль техпроцессов);
- биотехнологии (в частности синтез витаминов D2 и D3);
- медицина (физиотерапия, аутоотрансфузия крови, профилактика простудных заболеваний, контроль интенсивности УФ-излучения).

Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи на основе структур с потенциальным барьером имеют высокую эффективность, небольшую массу и габариты, нечувствительны к магнитным полям, имеют большую надежность, чем вакуумные фотоэлементы, обладают способностью к накоплению заряда и интегрированию детектируемого сигнала.

Для разработки УФ-детекторов используются три вида материалов:

- широкозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны  $E_g$  близкой к 3,2 эВ, такие как GaN, AlGaIn, 6Si—SiC, 4H—SiC;
- непрямозонные полупроводники с величиной  $E_g$ , существенно меньшей чем 3,2 эВ, но с пороговой энергией прямых переходов  $E_o$ , близкой к этой величине, например GaP ( $E_g = 2,26$  эВ,  $E_o = 2,8$  эВ); при этом предполагается, что коэффициент поглощения света при  $E_o > hv$  должен быть достаточно мал, а при  $E_o < hv$  — достаточно велик;
- хорошо освоенные промышленностью полупроводники Si и GaAs с применением полосовых УФ-фильтров.

Перспективными для регистрации УФ-излучения являются полупроводниковые приемники на основе широкозонных полупроводников, таких как GaN, AlGaIn, SiC, ZnO, TiO<sub>2</sub>, алмаз [1—4]. Основным преимуществом этих фотоприемников является отсутствие чувствительности в видимой и инфракрасной областях спектра. Однако в настоящее время многоэлементные фотоприемные устройства (ФПУ) на основе данных полупроводниковых материалов, а тем более системы визуализации на их основе только начинают разрабатываться. Известны зарубежные системы на основе многоэлементных кремниевых фотоприемников. В 2002 г. была опубликована работа по исследованию характеристик 32-канального линейного фотоприемника на основе GaAs [5], где отсутствуют данные по фоточувствительности, но высказывается предположение о перспективности использования GaAs-фотоприемников в качестве УФ-детекторов. Дополнительным стимулом к исследованиям в этой области является необходимость повышения эффективности систем двойного применения за счет использования УФ-канала в составе многоспектральных комплексированных оп-

Легкий Владимир Николаевич, профессор.

Галун Борис Васильевич, доцент.

Киселев Михаил Владимирович, доцент.

Новосибирский государственный технический университет.

Россия, 630092, г. Новосибирск, пр. Маркса, 20.

Тел.: (383 ) 226-54-77, 346-26-23. E-mail: sniios@mail.ru

Толбанов Олег Петрович, зав. научно-образовательным центром.

Мокеев Дмитрий Юрьевич, научный сотрудник.

Тяжев Антон Владимирович, зав. лабораторией.

Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

© Легкий В. Н., Галун Б. В., Киселев М. В., Толбанов О. П., Мокеев Д. Ю., Тяжев А. В., 2011

тико-электронных средств пеленгации, целеуказания, сопровождения и селекции (распознавания) объектов. Здесь GaAs-приемники с идентичными интегральными характеристиками могут работать в УФ, ближнем ИК- и видимом диапазонах длин волн с последующим компилированием изображения.

В данной работе исследован прототип 128-канального модуля на основе GaAs-детекторов УФ-излучения.

### Технология и конструкция фотоприемного модуля

За базовый материал взят эпитаксиальный арсенид галлия, который хорошо зарекомендовал себя как материал для детекторов низкоэнергетического рентгеновского и гамма-излучений, работающих в фотовольтаическом режиме [6]. Выбор оптимального материала сделан на основе измерений токовой чувствительности тестовых образцов (рис. 1). Измерения проводились для трех длин волн — 220, 300, 400 нм. В табл. 1 представлены результаты измерений.

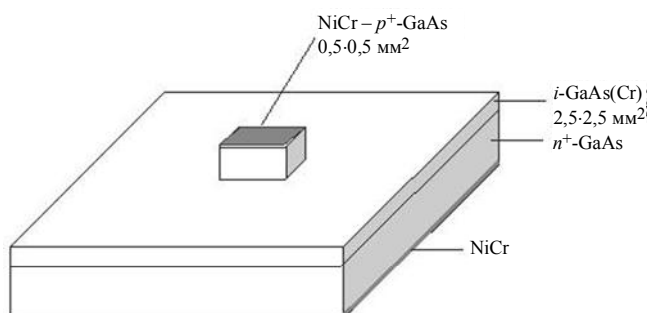


Рис. 1. Конструкция тестового образца

Наибольшей чувствительностью обладает структура № 1 на основе нелегированного активного слоя. Основным недостатком таких структур является низкая воспроизводимость параметров, что связано с технологическими трудностями получения высокочистых слоев GaAs. В отличие от

чистых слоев структуры с активным слоем на основе GaAs:Cr имеют хорошую технологическую воспроизводимость, а, следовательно, высокий процент выхода годных изделий на их основе. Кроме того, анализ экспериментальных данных позволяет утверждать, что чувствительность структур № 2 всего на 10 % ниже, чем у образцов на основе структур № 1. Стоит отметить, что структуры на основе высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом, имеют относительно большую толщину активного слоя, что приводит к снижению электрической емкости такого фотоприемника, а это, в свою очередь, позволяет добиться более высокого быстродействия. С учетом изложенного для дальнейших исследований выбран активный слой на основе GaAs:Cr.

Коэффициент поглощения УФ-излучения составляет порядка  $10^6 \text{ см}^{-1}$ , это приводит практически к полному поглощению его в поверхностном слое толщиной менее 100 нм. Чтобы как можно большая часть поверхности активной области фотоприемника была открыта, применена топология многоэлементного фотоприемника, показанная на рис. 2.



Рис. 2. Топология многоэлементного фотоприемника

Разработанный многоэлементный фотоприемник представляет собой линейку p-i-n-диодов, содержащую 128 каналов (стрипов). Омическим контактом фотоприемника является сплав ванадий—золото.

Фоточувствительная площадь составляет 63 % от общей площади стрипа. Элементы в линейке разделены на полную глубину чувствительного слоя.

Таблица 1

Токовая чувствительность тестовых образцов

| Номер структуры | Активный слой                                       | Толщина активного слоя, мкм | $S_i^{220\text{nm}}$ , А/Вт | $S_i^{300\text{nm}}$ , А/Вт | $S_i^{400\text{nm}}$ , А/Вт |
|-----------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1               | На основе нелегированного арсенида галлия           | 30                          | 0,091                       | 0,077                       | 0,114                       |
| 2               | На основе арсенида галлия, компенсированного хромом | 45                          | 0,069                       | 0,070                       | 0,069                       |

Размеры линейки с числом каналов 128:

- шаг элементов — 200 мкм;
- ширина элемента — 160 мкм;
- длина элемента — 4 мм;
- длина линейки — 25,6 мм.

В качестве устройства первичной обработки применен 64-канальный интегральный усилитель-мультиплексор K1269ПП1АН4 (LN6), обеспечивающий режим вычитания темнового тока. Каждый канал мультиплексора состоит из зарядочувствительного усилителя-интегратора с двумя разделенными буферизуемыми устройствами выборки и хранения.

Многоэлементный УФ-фотоприемник и устройство первичной обработки, собранные на керамической подложке, образуют первичный фотодетекторный модуль (рис. 3). Минимальная ширина керамической подложки с "front-end" электроникой и фотодетектором составляет 25 мм. Модуль с двумя чипами LN6 и 128-канальным фотоприемником содержит три керамические микроплаты 1—3, чип 4, фотодетектор 5 и фильтр питания 6. Модульная структура позволяет наращивать количество каналов, увеличивая число модулей.

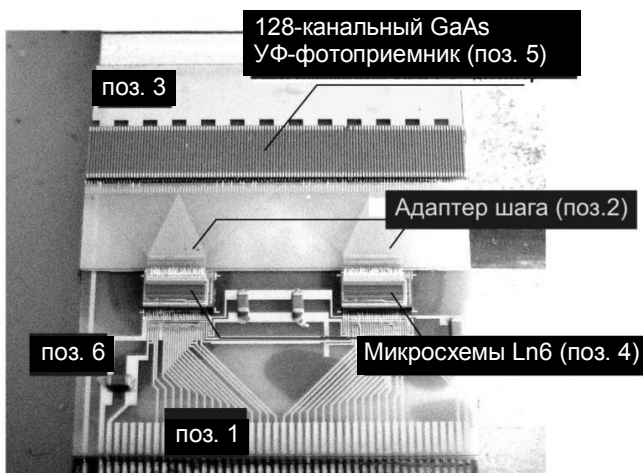


Рис. 3. Детекторный модуль

### Характеристики фотоприемного модуля

Измерение чувствительности многоэлементного фотоприемника к УФ-излучению в диапазоне 200—400 нм проводилось с использованием интерференционных фильтров производства фирмы Omega Optics (США) для ослабления излучения в ИК- и видимой областях спектра. Коэффициенты пропускания фильтров в диапазоне длин волн 220—320 нм, измеренные спектрофотометром Solar CM2203, представлены в табл. 2.

Таблица 2

### Характеристики интерференционных фильтров

| Номер фильтра | $\lambda_{\text{max}}$ , нм | $T_{\lambda_{\text{max}}}$ , % | Полоса FWHM, нм |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 220BP10       | 221,0                       | 13,1                           | 14,1            |
| XB201         | 242,6                       | 11,2                           | 18,0            |
| 260BP10       | 264,4                       | 16,1                           | 12,8            |
| 280BP10       | 281,7                       | 12,0                           | 11,4            |
| 300BP10       | 297,2                       | 14,9                           | 10,3            |
| 320BP10       | 320,0                       | 12,9                           | 13,5            |

Калибровка оптической мощности, попадающей на многоэлементный фотоприемный модуль, осуществлялась с помощью тестового кремниевого фотоприемника ФДУК-13У, спектральная характеристика чувствительности которого представлена на рис. 4.

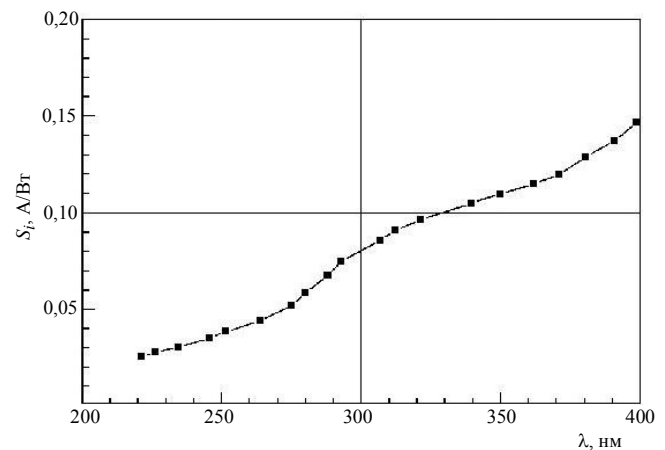


Рис. 4. Спектральная зависимость чувствительности ФДУК-13У

Результаты измерений токовой чувствительности многоканального фотоприемного модуля представлены на рис. 5.

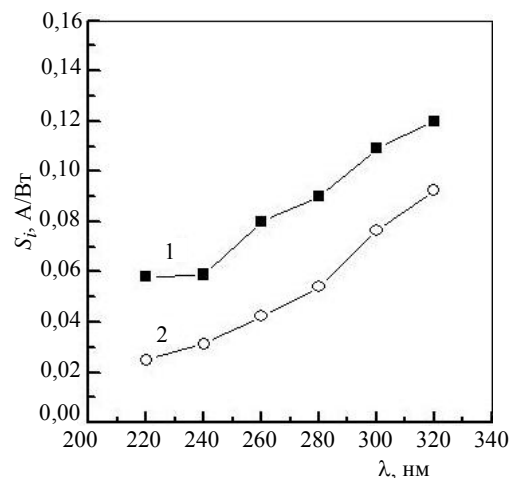


Рис. 5. Спектральная зависимость токовой чувствительности для многоэлементного GaAs-фотоприемника (1) и кремниевого фотодиода (2)

Чувствительность многоэлементного фотоприемника на основе арсенида галлия, компенсиро-

ванного хромом, на длине волны 260 нм составила 0,08 А/Вт, что в два раза выше аналогичного параметра кремниевого фотоприемника. Величина пороговой мощности, ограниченная темновым током, составляет  $8,7 \cdot 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Оптическая система ФПУ для исследования структуры сигналов применительно к многоспектральным оптико-электронным системам представляет собой объектив, построенный по двухзеркальной схеме Кассегрена с диаметром входного зрачка 140 мм и фокусным расстоянием 750 мм, с экранированием центральной части зрачка диаметром 70 мм. Объектив совмещен с четырехкратным оптическим прицелом ПО4х24. Между объективом и фотоприемником установлена кассета для сменных интерференционных фильтров.

### Заключение

В ходе проведенных исследований создан научно-технологический задел для разработки многоэлементных УФ-приемников на основе GaAs. Проведены экспериментальные исследования линеек УФ-диапазона на основе арсенида галлия, компенсированного примесями с глубокими уров-

нями, которые обладают высокой чувствительностью в данном диапазоне спектра. Результаты показывают, что в спектральном диапазоне 200–400 нм структуры на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, обладают токовой чувствительностью до 0,1 А/Вт, пороговой чувствительностью — не хуже  $10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Может быть создан функциональный ряд фотоприемных модулей УФ-диапазона линейного и матричного типов формата 128×1, 256×1, 128×2, 256×2, 512×2, 8×8, 4×16 с размерами чувствительного элемента 50—120 мкм для многоспектральных систем.

### Литература

1. Asif Khan M. // J. Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. No. 18. P. 2455.
2. Yan F., Xin X., Aslam S., Zhao Y., Franz D., Zhao J., Weiner M. // J. Quant. Elect. 2004. V. 40. No. 9. P. 2455.
3. Кривченко В. А., Лопачев Д. В., Пащенко П. В. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 8. С. 107.
4. Faggio G., Messina G., Santangelo S. // Microsystem Technologies. 1999. No. 6. P. 23.
5. Caria M., Lai A., D'Auria S., Dubecky F. // J. Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. No. 8. P. 1506.
6. Айзенштат Г. И., Вилисова М. Д., Другова Е. П. и др. // ЖТФ. 2006. Т. 78. № 8. С. 46.

## Gallium-arsenide photodetective assemblies of the UV range for multispectral optoelectronic systems

V. N. Legky, B. V. Galun, M. V. Kiselev

Novosibirsk State Technical University, 20 Marx av., Novosibirsk, 630092, Russia  
E-mail: sniios@mail.ru

O. P. Tolbanov, D. Yu. Mokeev, A. V. Tyazhev

Tomsk State University, 36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

*The UV range gallium-arsenide PDA prototype has been investigated in this work. A laboratory test obtained high grade of the PDA current sensitivity in the 220—320 nm range.*

PACS: 81.05.Ea, 85.30.-z, 85.60.Gz

*Keywords:* gallium-arsenide, semiconductor photodetectors, ultraviolet radiation, current sensitivity.

Bibliography — 6 references.

Received November 22, 2010