

УДК 621.384.3/5

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp,  
85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

## Исследование неоднородности состава КРТ матричных фотоприемных устройств

Р. В. Давлетшин, П. С. Лазарев, А. В. Никонов

*Проведено исследование пространственной неоднородности спектральных характеристик фоточувствительности матриц фоточувствительных элементов на основе твёрдых растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ) различных форматов. Описана методика исследования спектральных характеристик чувствительности. Приведено распределение длинноволновой границы чувствительности для линейки формата 6×576 фоточувствительных элементов (ФЧЭ). Проведен расчёт среднего состава и погрешности измерения состава КРТ для всех элементов линейки. Проведено сравнение вычисления погрешности длинноволновой границы чувствительности выбранного ФЧЭ с значениями границы в локальной области матрицы ФЧЭ. Показана эффективность экспресс-методики контроля качества матриц в части равномерности распределения состава КРТ по площади матрицы.*

*Ключевые слова:* спектральная характеристика чувствительности, неоднородность свойств, интерферограмма, КРТ, быстрое Фурье-преобразование, матрица ФЧЭ.

### Введение

Перед разработчиками современных фотоприемных устройств остро стоит задача контроля как параметров матричных фотоприемных устройств, так и характеристик гетероэпитаксиальных структур (ГЭС), на основе которых изготавливаются такие устройства [1]. На ухудшение выходных параметров фотоприемных устройств значительное влияние оказывают такие характеристики ГЭС, как неоднородность слоев структуры по толщине, неоднородность состава и концентрации неравновесных носителей в фоточувствительном материале, анизотропия оптических, электрических свойств, неравномерность скорости поверхностной рекомбинации. Актуальной задачей является совершенствование методик контроля оптических и электрофизических парамет-

ров используемых полупроводниковых структур на ранних этапах изготовления матричных фотоприемных устройств (МФПУ) с целью ранней отбраковки образцов полупроводниковых пластин и улучшения технологии изготовления современных фотоприемных устройств.

Целью данной работы является исследование пространственной неоднородности спектральных характеристик чувствительности фоточувствительных элементов МФПУ ИК-диапазона спектра.

### Методика исследования спектральных характеристик чувствительности

Применение классических методик контроля оптических свойств матричных фотоприемных устройств (МФПУ), в частности, дисперсионной рентгеновской спектроскопии известно достаточно давно [2, 3]. В свою очередь, измерение спектральных характеристик МФПУ посредством Фурье-спектроскопии обладает рядом преимуществ по сравнению с классическими методами, например, с дисперсионной рентгеновской спектроскопией: высокая интенсивность падающего излучения (выигрыш Жакино [4]), возможность регистрации сигнала с увеличенным временем накопления, возможность одновременной регистрации полного диапазона волновых чисел (выигрыш Фелжета [5]).

Давлетшин Ренат Валиевич<sup>1,2</sup>, инженер 2 кат., аспирант.  
Лазарев Павел Сергеевич<sup>1,2</sup>, ведущий инженер, ассистент.  
Никонов Антон Викторович<sup>1,2</sup>, начальник НИЦ,  
зам. зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.  
Тел. 8(499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,  
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2017 г.

© Давлетшин Р. В. Лазарев П. С., Никонов А. В., 2017

В нашем случае для снятия спектральных характеристик чувствительности в исследовании использовался ИК-Фурье-спектрометр на основе интерферометра Майкельсона [6]. Интерферограмма, снятая с каждого фоточувствительного элемента (ФЧЭ), подвергалась Фурье-преобразованию с использованием алгоритма Кули-Тьюки быстрого преобразования Фурье [7]. Для расширения диапазона интерферограммы применялись функции аподизации [8]. Путем сравнения различных алгоритмов аподизации установлено, что наиболее адаптированной для задач исследования является оконная функция Хемминга [9]. При проведении измерений спектральных характеристик чувствительности с низкими значениями отношения сигнал/шум по матрице ФЧЭ применялись методики фильтрации Савицкого-Голея [10].

### Пространственное распределение спектральных характеристик чувствительности по матрице ФЧЭ на основе КРТ

Ключевым объектом интереса в ходе измерений являлись значения границ чувствительности по уровню 0,5 и максимума чувствительности для фоточувствительных элементов исследуемых матриц. Объектом исследований являлись линейки и матрицы фоточувствительных элементов на основе тройных растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ) различных форматов (4×288, 6×576, 10×1024, 320×256, 640×512 элементов), чувствительных в ИК-диапазоне. Решена задача по экспресс-диагностике равномерности диапазонов чувствительности элементов по матрице. По результатам измерения спектральных характеристик чувствительности для каждого элемента матрицы вычислялось значение ширины запрещенной зоны,

связанное с длинноволновой границей чувствительности:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = 1,24 \frac{1}{E_g}.$$

В свою очередь, ширина запрещенной зоны КРТ связана с температурой измерений и составом  $x$  фоточувствительного материала  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  эмпирическим соотношением Хансена [11]:

$$E_g = -0,302 + 1,93x + (1 - 2x)5,35 \times 10^{-4}T - 0,810x^2 + 0,832x^3.$$

Таким образом, путем измерения спектральной характеристики чувствительности и последующего вычисления состава КРТ каждого фоточувствительного элемента можно судить об однородности состава по площади матрицы, и, как следствие, о характеристиках чувствительности матричного фотоприемного устройства в целом. Кроме того, разработанная на основе проведенного исследования методика измерения спектральных характеристик является эффективным инструментом межоперационного контроля матриц фоточувствительных элементов.

В качестве примера в данной работе приводятся результаты исследования для образца фоточувствительной линейки формата 6×576 спектрального диапазона 8–12 мкм, работающего в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Из-за особенностей конструкции измерялись интерферограммы каждого четвертого ФЧЭ на линейке с последующим Фурье-преобразованием и обработкой спектральной характеристики чувствительности. Зависимость значений границ и максимума чувствительности от порядкового номера фоточувствительного элемента показана на рис. 1.

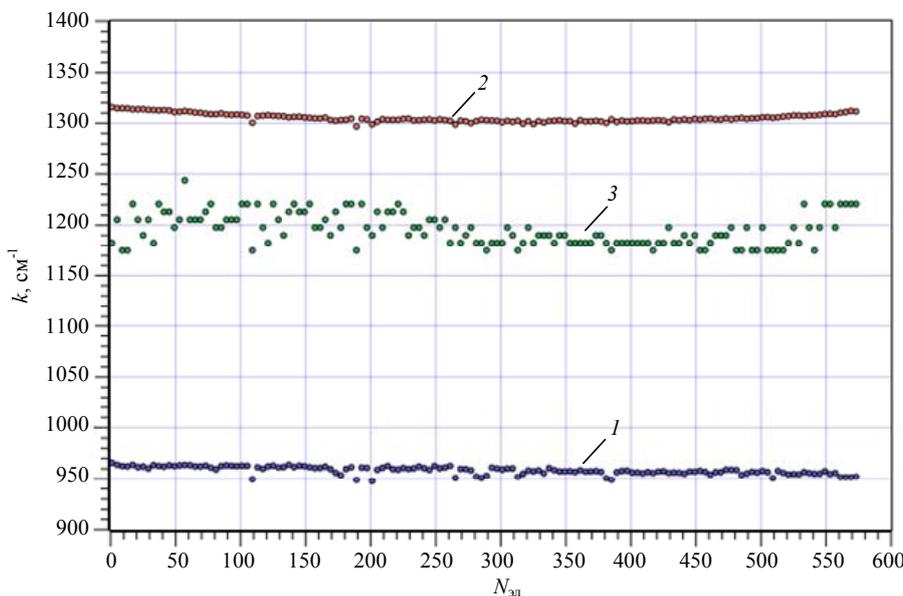


Рис. 1. Распределение границ и максимума чувствительности ВЗН канала № 2 линейки формата 6×576 (образец № 64/576). Кривые 1 – длинноволновая граница чувствительности, 2 – коротковолновая граница чувствительности, 3 – максимум чувствительности. По вертикальной оси отложены волновые числа  $k$ .

Полученное распределение длинноволновой границы чувствительности свидетельствует о наличии неоднородности состава КРТ по площади матрицы фоточувствительных элементов. Распределение коротковолновой границы зависит от особенностей конструкции МФПУ и спектральных характеристик (коэффициенты пропускания и поглощения) оптического фильтра.

Для всех ФЧЭ в линейке построено пространственное распределение длинноволновой

границы чувствительности (рис. 2). Из представленного распределения можно сделать заключение об однородности значений чувствительности по элементам матрицы, а также о качестве матрицы в целом: на рисунке чёрным цветом отмечены ФЧЭ, для которых спектральная характеристика не была измерена или значения длинноволновой границы выходили за пределы установленного допуска на длинноволновую границу чувствительности (10,26–10,67 мкм).

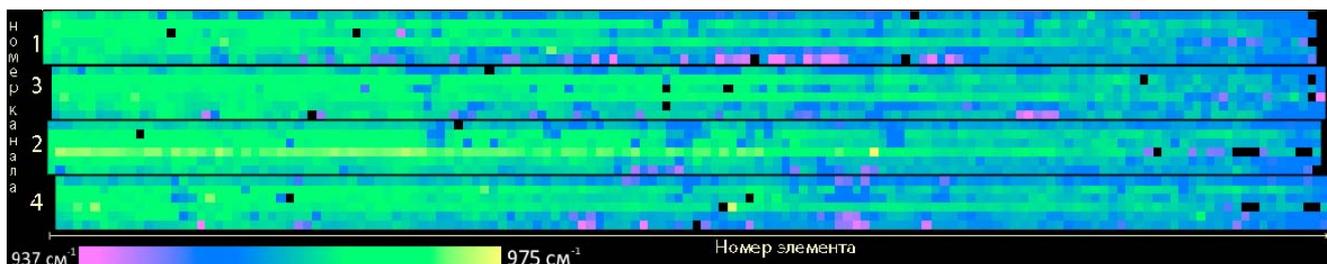


Рис. 2. Пространственное распределение длинноволновой границы фоточувствительности ФЧЭ по матрице.

Для контроля величины погрешности при проведении эксперимента по измерению спектральных характеристик фоточувствительности реализовано многократное измерение спектральной характеристики чувствительности выбранного ФЧЭ МФПУ. Из рис. 3 видно, что временная зависимость значения длинноволновой границы чувствительности незначительная. Расчетное значение состава КРТ для выбранного ФЧЭ составило

0,222 мол. дол., при этом погрешность вычисленного состава не превышает  $2,3 \times 10^{-2} \%$ .

Проведено также сравнение вычисления погрешности длинноволновой границы чувствительности выбранного ФЧЭ со значениями границы в локальной области матрицы ФЧЭ. Для этого проведено измерение спектральных характеристик фоточувствительности шестнадцати соседних элементов (рис. 4).

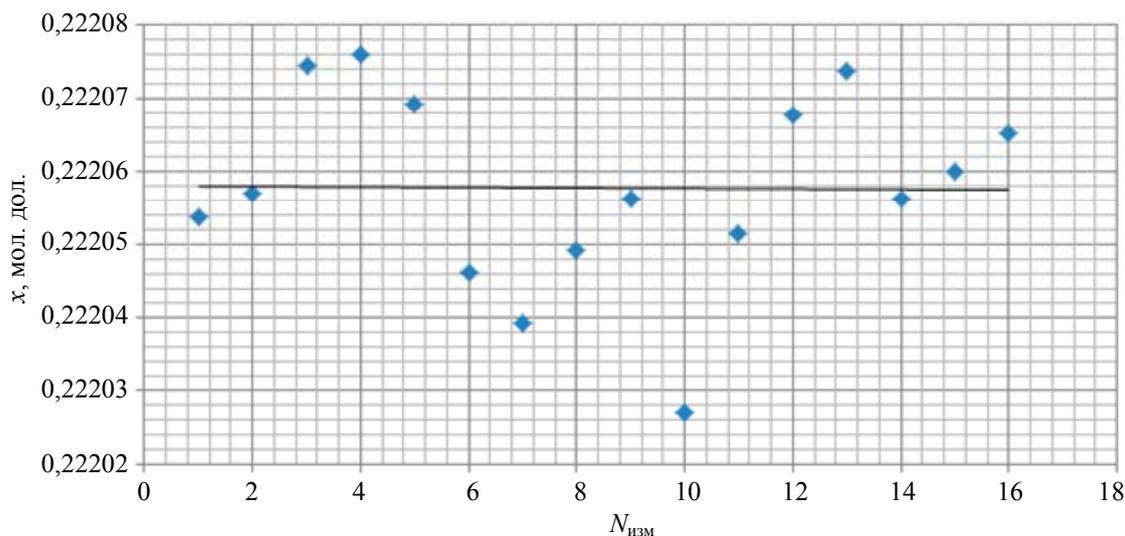


Рис. 3. Зависимость от номера измерения  $N_{изм}$  длинноволновой границы чувствительности выбранного ФЧЭ, определяемой значением  $x$ .

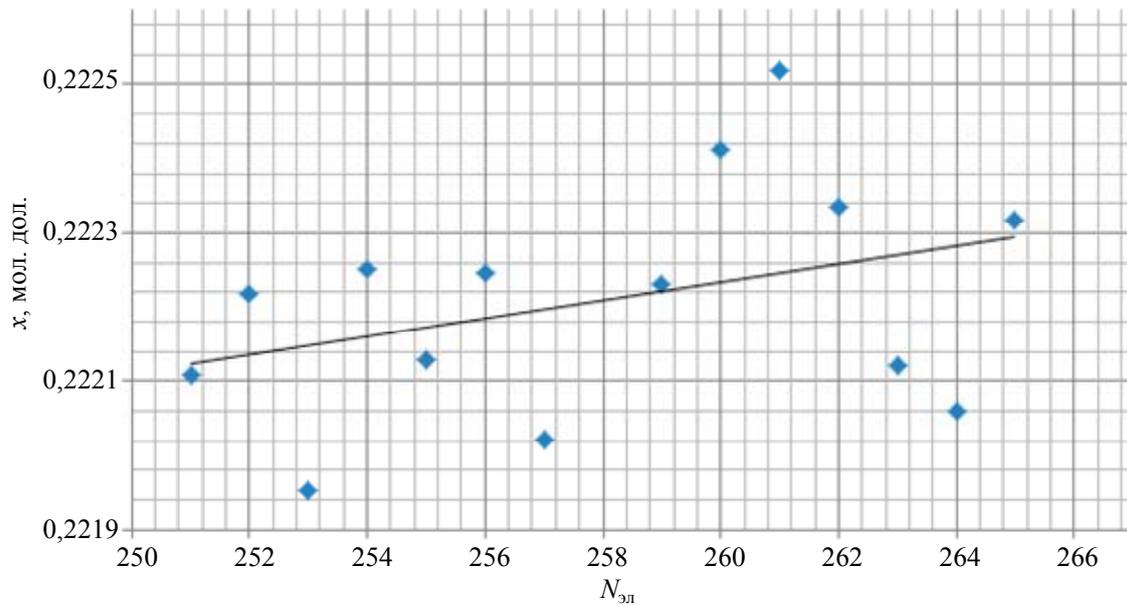


Рис. 4. Распределение длинноволновой границы чувствительности выбранных элементов в локальной области матрицы.

Результаты расчёта значений состава ФЧЭ в локальной области матрицы показали неравномерность состава  $5,62 \times 10^{-4}$  мол. дол., что составило 0,25 % от среднего состава по выбранным элементам 0,222 мол. дол. Таким образом, значения среднеквадратичного отклонения состава КРТ при многократных измерениях выбранного ФЧЭ на один порядок ниже расчетных значений состава КРТ для области смежных элементов.

Проведенное исследование показывает высокий уровень точности измерения спектральных характеристик чувствительности всех ФЧЭ на матрице.

### Заключение

Входной и межоперационный контроль спектральных характеристик матрицы фоточувствительных элементов играет существенную роль при оценке выходных параметров МФПУ в целом. Проведенное исследование показало надежность поэлементного считывания спектральных характеристик чувствительности, а также эффективность экспресс-методики контроля качества полупроводникового соединения КРТ в части состава фоточувствительного слоя и равномерности распределения состава по площади матрицы.

Разработанная методика позволяет рассчитывать состав КРТ фоточувствительных элементов с повышенной точностью и проводить отбраковку матриц по диапазону чувствительности в экспресс-режиме.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Burlakov I. D., Dirochka A. I., Korneeva M. D., Ponomarenko V. P., Filachev A. M. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. No. 10. P. 1166.
2. Верховодов П. А. Рентгеноспектральный анализ: вопросы теории и способы унификации. – Наукова Думка, 1984.
3. Петров В. И. Оптический и рентгеноспектральный анализ. – Металлургия, 1973.
4. Белл Р. Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. – М.: Мир, 1975.
5. Тарасов К. И. (ред.) Светосильные спектральные приборы. Сборник статей. – М.: Наука, 1988.
6. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. – М.: Наука, 2002.
7. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. – М.: Наука, 1984.
8. Егоров А. С. Инфракрасная Фурье-спектроскопия. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012.
9. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1987.
10. Никонов А. В., Давлетиин Р. В., Яковлева Н. И., Лазарев П. С. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 63.
11. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. – Новосибирск: Наука, 2003.

## Investigation of heterogeneity of the CdHgTe FPA composition

R. V. Davletshin<sup>1,2</sup>, P. S. Lazarev<sup>1,2</sup>, and A. V. Nikonov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received September 19, 2017

*Consideration is given to research of the spatial heterogeneity of photosensitive pixels in a focal plane array. The main objects of interest were FPAs of different formats (4×288, 6×576, 10×1024, 320×256, 640×512) based on CdHgTe. We present methodology of spectral response measurements based on the FFT interferogram with following filtration methods. Composition of CdHgTe was calculated for each pixel from dependence between long-wavelength photosensitivity limit and band-gap energy. Measurement series allow us to estimate a composition deviation for pixels in array and for selected pixel. Long-term stability of results for pixel was observed. The conclusion of uniformity of a composition in the array area was made. Analysis of the results shows the quality of photosensitive array.*

**Keywords:** spectral response, inhomogeneity of properties, interferogram, CdHgTe, fast Fourier transform, FFT, FPA.

### REFERENCES

1. I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Journal of Communications Technology and Electronics*. **61** (10), 1166 (2016).
2. P. A. Verkhovodov, *X-ray spectral analysis: theory questions and methods of unification* (Naukova Dumka, 1984) [in Russian].
3. V. I. Petrov, *Optical and X-ray spectral analysis* (Metallurgy, 1973) [in Russian].
4. R. Dzh. Bell, *Introduction to Fourier spectroscopy* (Mir, Moscow, 1975) [in Russian].
5. *High-power spectral devices*. Ed. By K. I. Tarasov (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
6. D. V. Sivukhin, *General course of physics, vol. IV. Optics* (Nauka, Moscow, 2002) [in Russian].
7. V. V. Voevodin, J.A. Kuznetsov, *Matrices and calculations* (Nauka, Moscow, 1984) [in Russian].
8. A. S. Egorov, *IR Fourier spectroscopy* (State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 2012) [in Russian].
9. R. V. Hamming, *Digital Filters* (Courier Corporation, 1989).
10. A. V. Nikonov, R. V. Davletshin, N. I. Iakovleva, and P.S. Lazarev, *Prikl. Fiz.* No. 4, 63 (2016).
11. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (CRC Press, 2000; Nauka, Novosibirsk, 2003).