

УДК 621.383.4/5
DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-36-40
EDN: UHQYFN

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw



Исследование спектральных характеристик QWIP-фотоприёмников

Р. В. Давлетшин, К. О. Болтарь, А. В. Егоров

Проведено исследование спектральных характеристик фотоприёмных устройств на основе многослойных гетероэпитаксиальных QWIP-структур AlGaAs/GaAs. Измерения проводились на Фурье-спектрометре Bruker Vertex-70 с аналоговым входом для подключения внешних фотоприёмников. Максимум спектральной характеристики фоточувствительности для измеренных МФПУ находится в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 8,2\text{--}8,6$ мкм, что соответствует предварительным оценкам при моделировании гетероэпитаксиальных структур.

Ключевые слова: AlGaAs/GaAs, гетероструктура, спектральная характеристика, матричное фотоприёмное устройство, МФПУ.

1. Введение

Спектральные характеристики чувствительности матричных фотоприёмных устройств широко используются для оценки качества и оптимизации QWIP-структур. Для достижения высоких фотоэлектрических параметров максимум спектральной характеристики фоточувствительности должен соответствовать значению $\leq 8,5$ мкм. QWIP-структуры на основе полупроводников III и V групп из арсенида галлия/арсенида алюминия-галлия выращиваются на оборудовании фирмы «Riber» методом молекулярно-лучевой

эпитаксии (МЛЭ), который позволяет получать структуры с задаваемыми в процессе роста свойствами слоев, хорошей морфологией и плоскостностью поверхности, пригодной для дальнейших технологических операций. В АО «НПО «Орион» освоена технология выращивания таких структур для изготовления на их основе МФПУ длинноволнового ИК диапазона спектра.

В работе представлены результаты комплексного измерения спектральных характеристик МФПУ на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs, выращенных в АО «НПО «Орион» на подложках GaAs, в матрицах исследуется однородность распределения спектральных данных по фоточувствительным элементам.

2. Методика измерения приборов

Матричное фотоприёмное устройство формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм на основе гетероэпитаксиальной QWIP-структуры предназначено для работы в длинноволновом диапазоне спектра с максимумом чувствительности на длине волны $\sim 8,2$ мкм. Такой приёмник обладает узкой спектральной полосой и невысокой квантовой эффективностью [1].

Давлетшин Ренат Валиевич¹, инженер 1 кат.
Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, д.ф.-м.н.
Егоров Александр Васильевич¹, ученый секретарь,
доцент, к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: davletshin@phystech.edu

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 3.10.2023

После доработки 20.03.2023

Принята к публикации 8.11.2023

Измерения спектров фоточувствительности МФПУ проводились на Фурье-спектрометре Bruker Vertex-70 с аналоговым входом для подключения внешних фотоприёмных устройств. МФПУ подключалось к блоку электронной обработки, в конструкцию которого встраивался цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), позволяющий сопрячь цифровой сигнальный выход исследуемых МФПУ с аналоговым входом Фурье-спектрометра.

Одновременно ЦАП может работать только с одним элементом матрицы. При подключении блока электронной обработки к компьютеру, с помощью специального программного обеспечения (ПО) можно выбрать измеряемый элемент, сигнал которого будет анализироваться. В большинстве случаев проводятся измерения центрального элемента (позиция элемента $x: 192, y: 144$), а также двух элементов в противоположных углах ($x: 40, y: 40$) и ($x: 320, y: 220$) МФЧЭ.

Выбранный для измерения фотоэлемент засвечивается модулированным способом ИК-излучением. Часть модулированного излучения, находящегося за пределами спектральной чувствительности измеряемого фотоэлемента, отсекается, а поглощаемое излучение

преобразуется в фототок. Временная развёртка полученного сигнала представляет собой интерферограмму, которая с помощью математического Фурье-преобразования трансформируется в спектральную характеристику чувствительности фотоэлемента [5].

Полученная спектральная характеристика одного из элементов МФПУ показана на рис. 1. Интерес представляет длина волны максимума спектральной фоточувствительности, а также граничные длины волн, характеризующие рабочий спектральный диапазон данного прибора.

Спектральная характеристика элемента МФПУ имеет основной пик, соответствующий максимальному значению фоточувствительности и побочные пики, возникающие при интерференции в процессе отражения и прохождения излучения через структуру ФЧЭ с периодом от 15 до 50 см^{-1} . Побочные пики могут влиять на результаты измерений, смещая положение максимума спектральной чувствительности. Поэтому для более точного позиционирования пика, в качестве волнового числа, при котором достигается максимум спектральной чувствительности, берётся среднее значение волнового числа при спаде чувствительности на 0,5 от максимальной.

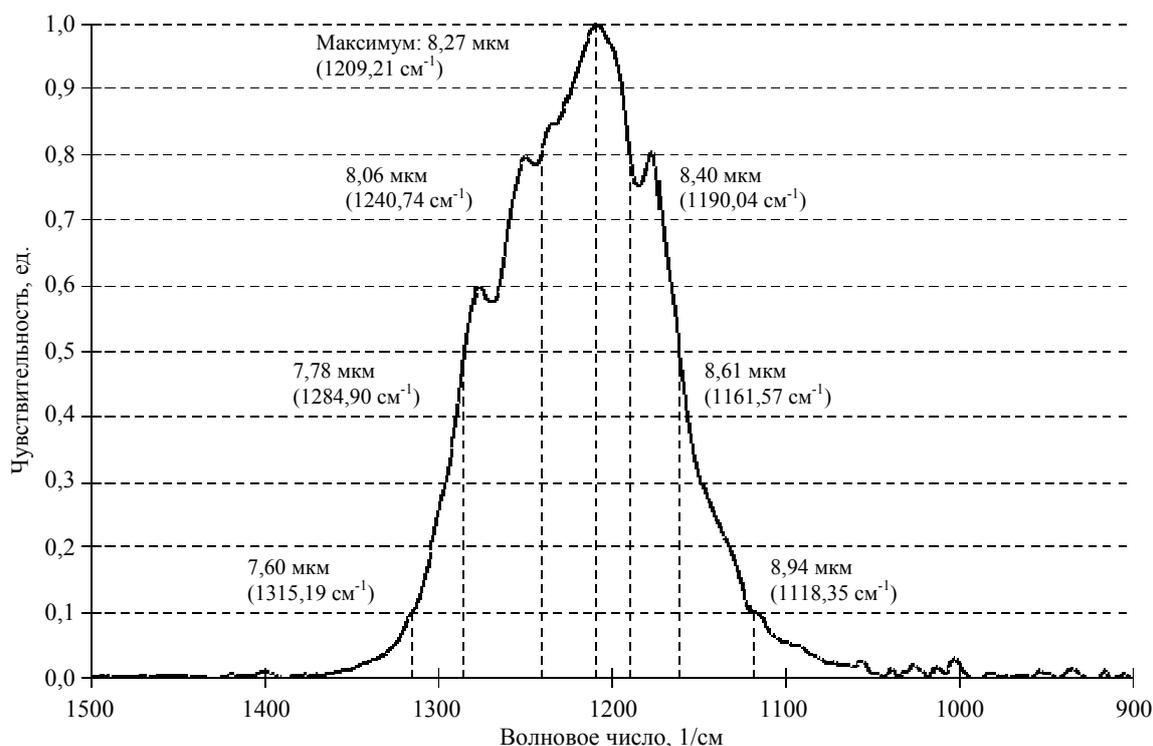


Рис. 1. Спектральная характеристики одного из приборов QWIP

Зная расстояние ΔK в волновых числах между побочными пиками можно рассчитать толщину структуры по формуле, определяющей интерференцию в тонких плёнках [3]

$$d = \frac{1}{2n \cdot \Delta K}$$

где $n = 3,5$ – показатель преломления для арсенида галлия [4].

3. Результаты измерения

На графике (рис. 2) приведены результаты измерений положения длинноволновой (3), коротковолновой (1) границ относительной спектральной чувствительности элементов

матрицы и её главного максимума (2) для центральной строки образца МФПУ формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм. Границами чувствительности выбраны волновые числа, при котором нормированная на максимум кривая спектральной чувствительности пересекает значение 0,5.

Из графика видна неравномерность значений длинноволновой и коротковолновой границы разных элементов, а также неравномерность значения максимума. При этом амплитуда отклонения у длинноволновой и коротковолновой границы составляет $\pm 0,1$ мкм, что в два раза ниже отклонения максимума. Это означает, что более точным будет определять максимум, как центр между коротковолновой и длинноволновой границами.

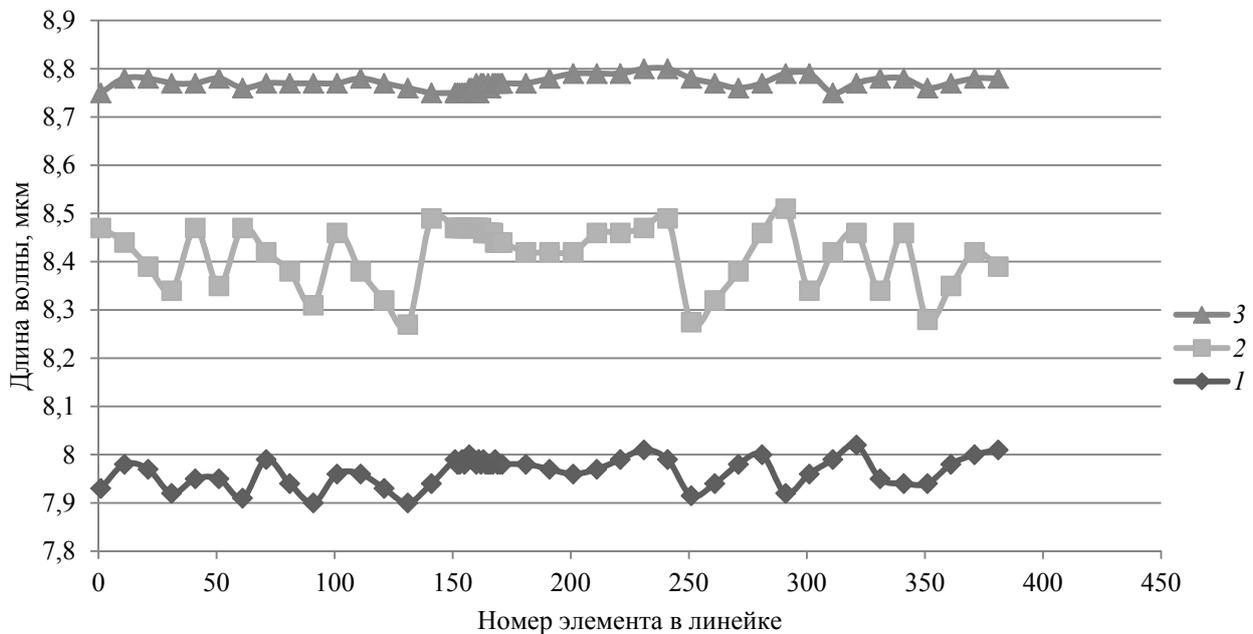


Рис. 2. График зависимости длинноволновой (1), максимума (2) и коротковолновой (3) границ спектральной чувствительности для МФПУ на основе QWIP-структуры

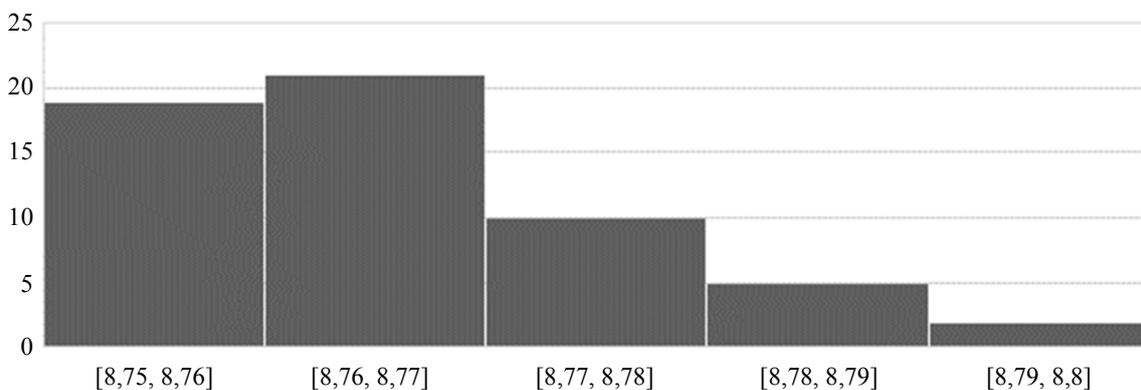


Рис. 3. Гистограмма значений длинноволновой границы спектральной чувствительности для МФПУ на основе QWIP-структуры

Таблица

№ Прибора	Пластина	λ_{\max} , мкм	$\lambda_{\text{ср}_0.5}$, мкм	$\lambda_{\text{лев}_0.5}$, мкм	$\lambda_{\text{пр}_0.5}$, мкм	d слоя, мкм
Q25-410	A448	8,64	8,55	8,11	9,00	55,00
Q25-362	A459	8,49	8,33	7,86	8,81	64,05
Q25-358	A476	8,56	8,58	8,05	9,11	46,08
Q25-351	A478	8,80	8,72	8,11	9,34	45,50
Q25-421	A494	8,88	8,79	8,09	9,49	35,65
Q25-413	A506	8,39	8,34	7,87	8,82	53,81
Q25-407	A531	8,54	8,53	8,22	8,85	23,62
Q25-444	A552	8,58	8,58	7,98	9,19	60,95
Q25-454	A594	8,22	8,14	7,76	8,52	31,90
Q25-456	A595	8,26	8,18	7,81	8,55	39,37

В таблице приведены результаты комплексного измерения спектральных характеристик фотоприёмных устройств на основе QWIP-структур.

Из таблицы видно, что несовпадение значений максимума и среднего значения между длинноволновой и коротковолновой границей спектральной чувствительности находится в диапазоне $\pm 0,2$ мкм. Также можно заметить небольшое несовпадение спектральных характеристик различных МФПУ выполненных из одной и той же гетероэпитаксиальной пластины, что объясняется небольшой вариацией толщин слоев QWIP-структуры, однако данный разброс в рамках одной пластины не является критичным.

4. Заключение

Представлены результаты исследований спектральных характеристик МФПУ на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs, выращенных в АО «НПО «Орион» методом МЛЭ на подложках GaAs. Определялись характерные параметры спектров: граничные длины волн и положение максимума фоточувствительности, исследовалась неоднородность

распределения спектральных данных по фоточувствительным элементам матриц.

Фоточувствительные элементы на основе гетероэпитаксиальных пластин AlGaAs/GaAs имеют заданный диапазон спектральной чувствительности [2], соответствующий окну прозрачности атмосферы 8–10,5 мкм. Амплитуда отклонения у длинноволновой и коротковолновой границы составляет $\pm 0,1$ мкм, что в два раза ниже отклонения максимума. Несоответствие значений максимума и среднего значения между длинноволновой и коротковолновой границей спектральной чувствительности находится в диапазоне $\pm 0,2$ мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Кузнецов С. А., Яковлев А. Ю. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 4. С. 351–380.
2. Давлетшин Р. В., Никонов А. В., Ковшов В. С., Залетаев Н. Б. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 571.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
4. Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения типа АПВВ) / под ред. Уиллардсона Р., Бира А. – М.: Мир, 1970.
5. Белл Р. Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. – М.: Мир, 1975.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Investigation of spectral responses of QWIP photodetectors

R. V. Davletshin¹, K. O. Boltar^{1,2} and A. V. Egorov¹

¹Orion R&P Association, ISC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: davletshin@phystech.edu

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 3.10.2023; revised 20.03.2023; accepted 8.11.2023

As a result of this research, it was found that photosensitive elements based on AlGaAs/GaAs heteroepitaxial structures have a spectral sensitivity range corresponding to the atmospheric transparency window of 8–10.5 μm . The amplitude of the deviation at the long-wave and short-wave boundaries is $\pm 0.1 \mu\text{m}$, which is two times lower than the deviation of the maximum. The discrepancy between the maximum and average values between the long-wave and short-wave spectral sensitivity is in the range of $\pm 0.2 \mu\text{m}$.

Keywords: infrared detectors, AlGaAs/GaAs, heterostructure, photodetector, spectral responsivity.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-36-40

REFERENCES

1. Burlakov I. D., Kuznetsov S. A. and Yakovlev A. Yu., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **10** (4), 351–380 (2022) [in Russian].
2. Davletshin R. V., Nikonov A. V., Kovshov V. S. and Zaletaev N. B., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **7** (6), 571 (2019) [in Russian].
3. Born M. and Wolf E., Principles of Optics, Moscow, Nauka, 1973.
4. Willardson R. K. and Beer A. C., Semiconductors and semimetals, Moscow, Mir, 1970.
5. Bell R. J., Introductory Fourier transform spectroscopy. Moscow, Mir, 1975.