

УДК 621.383.4

## InGaAs/AlGaAs гетероструктуры с квантовыми ямами для широкоформатных матриц, фоточувствительных в спектральном диапазоне 3÷5 мкм

А. Л. Дудин, Н. И. Кацавец, Д. М. Красовицкий, С. В. Кокин, В. П. Чалый, И. В. Шуков

*В настоящей работе представлены результаты исследования фотоэлектрических свойств механически напряженных InGaAs/AlGaAs гетероструктур с квантовыми ямами различной конструкции, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaAs подложке и предназначенных для средневолновых инфракрасных широкоформатных фотоприемных матриц, работающих в спектральном диапазоне 3÷5 мкм. Показано, что изменение состава барьерных слоев приводит к существенному сдвигу спектров фоточувствительности таких гетероструктур.*

PACS: 85.60.-q

*Ключевые слова:* гетероструктура, квантовая яма, фоточувствительность.

### Введение

Инфракрасные (ИК) фотодетекторы, работающие в «окнах» прозрачности атмосферы 3÷5 мкм и 8÷10 мкм, широко используются в тепловизионных системах целеобнаружения, целеуказания, астрономии, навигации и т.п. [1].

В настоящее время разрабатываются ИК тепловизионные системы нового поколения на основе широкоформатных фотоприемных матриц (ФПМ) [2]. Для средневолнового спектрального диапазона 3÷5 мкм одним из наиболее перспективных материалов для таких систем являются гетероструктуры (ГС) с квантовыми ямами (QWIP ГС) на основе InGaAs/AlGaAs [3]. Принцип фоточувствительности (ФЧ) QWIP ГС основан на «межподзонных» переходах носителей заряда в квантовой яме (КЯ) между двумя уровнями раз-

мерного квантования. Несмотря на то, что InGaAs/AlGaAs QWIP ГС механически напряжены, оптимизация их конструкции позволяет выращивать качественные и однородные ГС на GaAs подложке. При этом ФПМ на основе таких ГС могут быть сформированы с помощью стандартных технологических процессов, что значительно упрощает технологию и уменьшает стоимость их изготовления.

Впервые QWIP ГС для ФПМ средневолнового ИК-диапазона на основе напряженных InGaAs/AlGaAs КЯ ГС были предложены в середине 90-х годов [4], однако их конструкция и технология выращивания остаются предметом обсуждения до настоящего времени [5, 6].

В настоящей работе исследованы фотоэлектрические характеристики механически напряженных InGaAs/AlGaAs QWIP ГС различной конструкции (с различным составом барьерных слоев). Показано определяющее влияние состава барьерных слоев на спектры фоточувствительности таких ГС.

### Конструкция гетероструктур

InGaAs/AlGaAs QWIP ГС выращивались на «epi-ready» GaAs подложках диаметром 3 дюйма с помощью отечественной установки молекулярно-лучевой эпитаксии STE 3532 (изготовитель ЗАО «НТО», С.-Петербург, Россия). Конструкция ГС содержала массив КЯ (25 шт.), образованных на-

---

Дудин Анатолий Леонидович, начальник отдела.  
Кацавец Николай Иванович, начальник отдела.  
Красовицкий Дмитрий Михайлович, главный конструктор.  
Кокин Сергей Владимирович, начальник отдела.  
Чалый Виктор Петрович, генеральный директор.  
Шуков Иван Викторович, инженер-физик.  
ЗАО «Светлана-Рост».  
Россия, 194156, С.Петербург, Энгельса пр., д. 27.  
E-mail: a.dudin@svrost.ru; n.katsavets@svrost.ru;  
d.krasovitskij@svrost.ru; s.kokin@svrost.ru;  
v.chaly@svrost.ru; i.shukov@svrost.ru

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2016 г.

© Дудин А. Л., Кацавец Н. И., Красовицкий Д. М., Кокин С. В., Чалый В. П., Шуков И. В., 2016

пряженными высоколегированными ( $n = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ )  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,25$ ) слоями толщиной 35 Å, заключенными между специально нелегированными  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y = 0,30 \div 0,40$ ) барьерными слоями (барьерами), толщиной 400 Å. Концентрация Al в барьерах определялась из спектров фотолюминесценции (ФЛ) ГС с двойным ограничением, выращенных после калибровки потока Al. Массив КЯ ограничивался высоколегированными ( $n = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) контактными слоями, нижним и верхним, толщинами один мкм. В качестве легирующей примеси использовался кремний (Si). Выращенные ГС имели плотность поверхностных дефектов (размерами  $5 \div 10$  мкм) менее  $400 \div 500 \text{ см}^{-2}$ .

### Методики измерения

Степень качества материала QWIP ГС оценивалась по внутреннему квантовому выходу и полуширине спектров ФЛ при возбуждении  $\text{Nd}^{3+}$ -лазером с удвоением частоты генерации (длина волны излучения 532 нм). Возбуждение ФЛ производилось через «окно» с удаленным верхним контактными слоем. Плотность оптической мощности на образце составляла величину порядка  $500 \text{ Вт/см}^2$ .

Измерения фотоэлектрических характеристик ГС проводились на тестовых фотоприемниках (ФП), представляющих собой сформированные с помощью плазменного травления мезаструктуры размером  $500 \times 500 \text{ см}^2$ . Открытая поверхность мезаструктуры защищалась пленкой  $\text{SiN}_x$  толщиной 1500 Å. На поверхности верхнего контактного слоя ФП для увеличения поглощения ИК-излучения [7] формировалась двумерная дифракционная решетка с периодом 1,4 мкм. В качестве материала омических контактов использовались многослойные покрытия Au/Ge/Ni, нанесенные методом электронного испарения с последующим вжиганием в вакууме. ФП помещался в азотный криостат, установленный на выходе монохроматора МДР-4. В качестве источника излучения использовался глобар (SiC-стержень). Фотовозбуждение проводимости осуществлялось через GaAs подложку.

### Экспериментальные результаты

Измерения спектров ФЛ QWIP ГС различной конструкции показали, что на спектрах ФЛ наблюдается только одна полоса, соответствующая «межзонным» переходам электронов между первыми уровнями размерного квантования зоны проводимости и подзоны тяжелых дырок в ва-

лентной зоне  $e1-h1$  [8], максимум и ширина которой практически не зависели от состава барьеров. Образцы имели внутренний квантовый выход ФЛ порядка  $40 \div 50 \%$  с полушириной спектра 30 нм (45 мэВ) при  $T = 300 \text{ К}$  и близкий к  $100 \%$  с полушириной 15 нм (25 мэВ) при  $T = 77 \text{ К}$ .

На рис. 1 изображен типичный спектр ФЛ QWIP ГС при комнатной и азотной температуре. Высокий квантовый выход  $\eta$  ФЛ говорит о низкой концентрации центров безызлучательной рекомбинации в материале КЯ и высоком качестве гетеропереходов КЯ—барьер. При этом полуширина спектров ФЛ QWIP ГС практически равна полуширине спектров ФЛ одиночной InGaAs КЯ с AlGaAs барьерами [9], но существенно превышает таковую в QWIP ГС на основе системы материалов GaAs/AlGaAs [10], что, по-видимому, связано с влиянием механических напряжений, обусловленных неизоморфизмом системы InGaAs/AlGaAs.

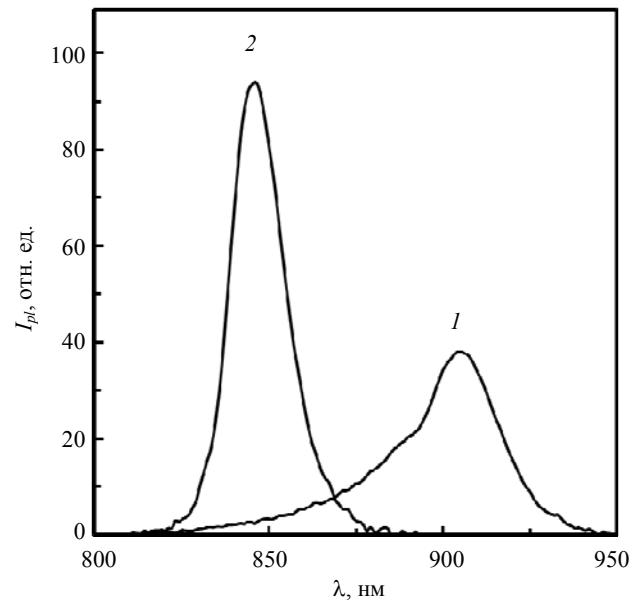


Рис. 1. Типичные спектры ФЛ InGaAs/AlGaAs QWIP ГС при различных температурах (кривая 1 — 300 К; 2 — 77 К).

На рис. 2 представлены зависимости темного тока  $I_{dark}$  тестовых ФП от обратной температуры для QWIP ГС различной конструкции. Температурные зависимости темного тока для всех ГС имеют экспоненциальный характер, определяемый выражением  $I_{dark} \sim T \exp(-\Delta E/kT)$  [11], где  $\Delta E = E_c - E_F$  — энергия активации,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $E_c$  — энергия электронов на дне зоны проводимости барьера,  $E_F$  — уровень Ферми в КЯ. На рис. 3 и 4 представлены спектры и зависимости ФЧ от величины приложенного электрического напряжения ( $U_{bias}$ ) для QWIP ГС различной конструкции.

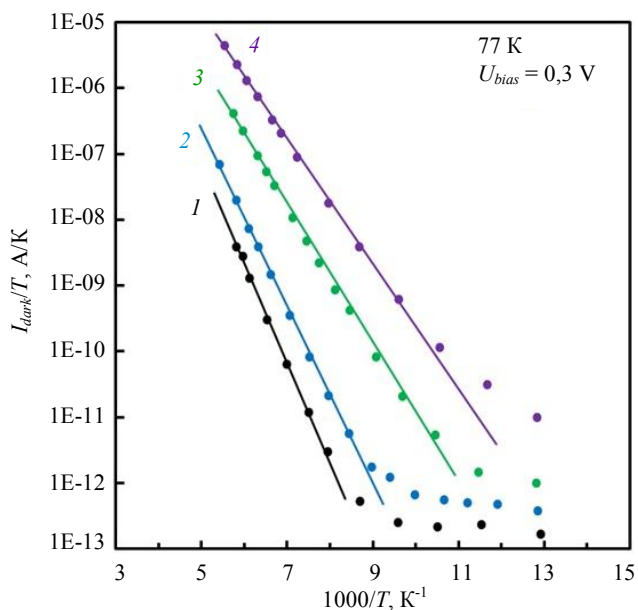


Рис. 2. Зависимости темного тока InGaAs/AlGaAs QWIP ГС с различной концентрацией Al в барьерах (1 — 40 %, 2 — 37 %, 3 — 35 %, 4 — 30 %) от температуры.

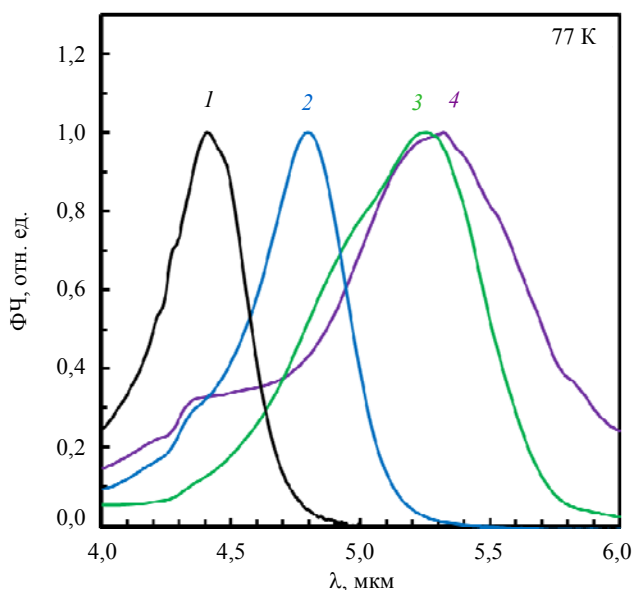


Рис. 3. Спектры ФЧ InGaAs/AlGaAs QWIP ГС с различной концентрацией Al в барьерах (кривая 1 — 40 %, 2 — 37 %, 3 — 35 %, 4 — 30 %).

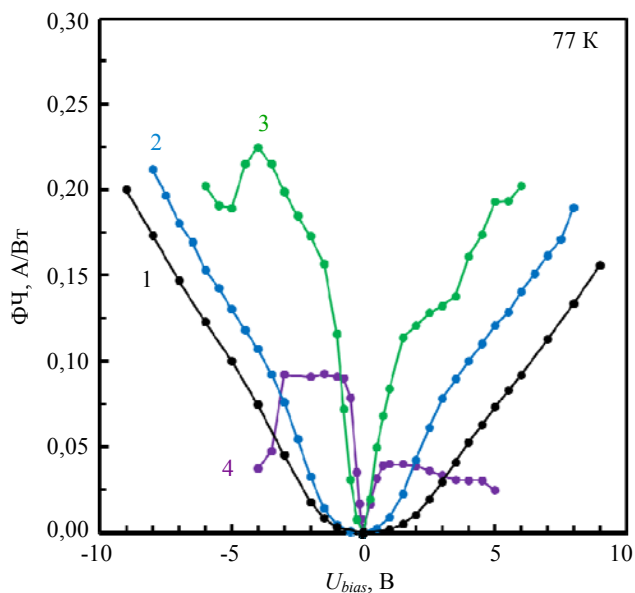


Рис. 4. Зависимости ФЧ InGaAs/AlGaAs QWIP ГС с различной концентрацией Al в барьерах (кривая 1 — 40 %, 2 — 37 %, 3 — 35 %, 4 — 30 %) от напряжения смещения.

Экспериментальные данные по максимуму  $\lambda_{max}$  и полуширине  $\Delta\lambda$  спектра ФЧ, а также энергии активации темного тока приведены в таблице.

Таблица

№ ГС	Конц. Al, %	$\Delta E$ , мэВ	$\lambda_{max}$ , мкм	$\Delta\lambda$ , мкм
1	40	305	4,40	0,38
2	37	275	4,75	0,42
3	35	225	5,25	0,72
4	30	195	5,35	0,85

Как видно из экспериментальных данных, энергия активации темного тока с уменьшением

концентрации Al монотонно уменьшается, что, по-видимому, связано с понижением энергетической «высоты» барьера. Одновременно максимум спектра ФЧ сдвигается в длинноволновую область с существенным расширением области ФЧ. При этом, если при 40 % концентрации Al в барьерах величина ФЧ монотонно растет с увеличением приложенного электрического напряжения положительной (плюс на верхнем контактном слое) или отрицательной полярности (рис. 4), то уменьшение концентрации Al сопровождается увеличением «крутизны» этих зависимостей с дальнейшим появлением насыщения и спадом (при 30 % концентрации Al).

Сдвиг максимума ФЧ в длинноволновую область спектра ФЧ с уменьшением концентрации Al в барьерах можно объяснить уменьшением энергетического «зазора» между первым и вторым уровнями размерного квантования при уменьшении энергетической «высоты» барьера, однако, увеличение ширины спектра ФЧ и изменение характера зависимости ФЧ от приложенного напряжения имеет более сложную природу и, по аналогии с QWIP ГС на основе GaAs/AlGaAs, может быть объяснено различной степенью локализации второго уровня размерного квантования  $E_2$  при изменении его положения относительно дна зоны проводимости [12]. При  $E_2 < E_c$  — уровень  $E_2$  относительно локализован, наблюдаются так называемые «bound-to-bound» квантовые переходы, при  $E_2 > E_c$  — уровень  $E_2$  делокализован, наблюдаются «bound-to-continuum» квантовые переходы. При этом уменьшение степени локализации второго квантового уровня приводит к существенному расширению спектров ФЧ [12] и, как видно из экспериментальных данных настоящей работы, более крутой зависимости ФЧ от величины приложенного электрического напряжения.

### Заключение

В представленной работе исследованы фотоэлектрические свойства механически напряженные InGaAs/AlGaAs QWIP ГС различной конструкции, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии и предназначенные для широкоформатных фоточувствительных матриц, работающих в средневолновом спектральном диапазоне. Показано, что уменьшение концентрации Al в барьерах с 40 % до 30 % приводит к сдвигу максимума ФЧ в длинноволновую область и сопровождается существенным увеличением ширины области ФЧ.

Разработанная технология выращивания InGaAs/AlGaAs QWIP ГС на GaAs подложке совместима с технологией выращивания AlGaAs/GaAs QWIP ГС в одном процессе, что открывает возможность получения монолитных двухспектральных матриц фоточувствительных в средне- и длинноволновом диапазонах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58114X0006).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Downs C., Vandervelde T. E. / Proceeding of International Conference on Sensors (IEEE Sensors 13. Baltimore. 2013). P. 5054—5098.
2. Rogalski A. // Journal of Modern Optics. 2010. Vol. 57. No. 18. P. 1716.
3. Shi Z., Wang L., Zhen H., Wang W., Chen H. // Nano-scale Res. Lett. 2013. Vol. 8. No. 1. P. 310.
4. Fiore A., Roseneher E., Bois P., Nagle J. and Laurent N. // Appl. Phys. Lett. 1994. No. 64. P. 478.
5. Lu X. Q., Tong X., Lan N., Xiong D. Y. / Proceeding of 15-th International Conference on Numerical Simulation of Opto-electronic Devices (Nusod. Taipei. Taiwan. 2015). P. 181.
6. Manissadjian A., Gahier D., Costard E., Nedelcu A. / Proceeding of SPIE. Infrared Technology and Application. XXXII (Kissimmee, Florida, USA. 2006). P. 62060-E1.
7. Wang J., Chen X., Li Z., Lu W. // J. Opt. Soc. Am. 2010. B. Vol. 27. No. 11. P. 2428.
8. Гуляев Д. В., Журавлев К. С., Бокаров А. К., Торпов А. И. // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 2. С. 230.
9. Хабибуллин Р. А., Васильевский И. С., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Пономарев Д. С., Гладков В. П., Кульбачинский В. А., Клочков А. Н., Юзеева Н. А. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 5. С. 666.
10. Бутягин О. Ф., Кацавец Н. И., Коган И. В., Красовицкий Д. М., Куликов В. Б., Чалый В. П., Дудин А. Л., Черденченко О. Б. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 9. С. 81.
11. Levin B. F., Bethea C. C., Hasnain G., Shen V. O., Pelve E., Abbott R. R., Hsieh S. J. // Appl. Phys. Lett. 1990. No. 56. P. 851.
12. Levin B. F. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. No. 8. P. R1.

## InGaAs/AlGaAs QWIP heterostructures for the large format 3÷5 μm focal plane arrays

*A. L. Dudin, N. I. Katsavets, D. M. Krasovitsky, S. V. Kokin, V. P. Chaly, and I. V. Shukov*

Svetlana-Rost, JSC

27 Engels av., St.Petersburg, 194156, Russia

E-mail: a.dudin@svrost.ru; n.katsavets@svrost.ru; d.krasovitskij@svrost.ru;  
s.kokin@svrost.ru; v.chaly@svrost.ru; i.shukov@svrost.ru

**Results on photoelectrical property study of stressed InGaAs/AlGaAs QWIP heterostructures grown on GaAs substrate by MBE method are presented in this publication. These heterostructures with different**

***design had photosensitive spectra in mid-wavelength infrared (MWIR) spectrum region of 3÷5  $\mu\text{m}$ . Photosensitivity spectrum were significantly changed by varying of barrier composition. They will be used for large format MWIR focal plane arrays.***

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* heterostructure, quantum well, photo sensitivity.

#### REFERENCES

1. C. Downs and T. E. Vandervelde, in *Proceeding of Intern. Conference on Sensors* (IEEE Sensors 13. 2013), p. 5054.
2. A. Rogalski, *Journal of Modern Optics*, No. 18, 1716 (2010).
3. Z. Shi, L. Wang, H. Zhen, W. Wang, and H. Chen, *Nanoscale Res. Lett.*, No. 1, 310 (2013).
4. A. Fiore, E. Roseneher, P. Bois, J. Nagle, and N. Laurent, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 478 (1994).
5. X.Q. Lu, X. Tong, N. Lan, and D.Y. Xiong, in *Proceeding of 15-th International Conference on Numerical Simulation of Opto-electronic Devices* (Nusod 2015. International Conference), p. 181.
6. A. Manissadjian, D. Gahier, E. Costard, and A. Nedelcu, in *Proceeding of SPIE* (Infrared Technology and Application XXXII. 2006). p. 62060-E1.
7. J. Wang, X. Chen, Z. Li, and W. Lu, *J. Opt. Soc. Am.*, No. 11, 2428 (2010).
8. D. V. Gulyaev, K. S. Zhuravlev, A. K. Bakarov, and A. I. Toropov, *Semiconductors* **2**, 224 (2015).
9. R. A. Khabibullin, I. S. Vasil'evskii, G. B. Galiev, E. A. Klimov, D. S. Ponomarev, V. P. Gladkov, V. A. Kulbachinskii, A. N. Klochkov, and N. A. Uzeeva, *Semiconductors* **5**, 657 (2011).
10. O. F. Butyagin, N. I. Katsavets, I. V. Kogan, D. M. Krasovitsky, V. B. Kulikov, V. P. Chaly, A. L. Dudin, and O. V. Cherednichenko, *Technical Physics Letters* **9**, 436 (2012).
11. B. F. Levin, C. C. Bethea, G. Hasnain, V. O. Shen, E. Pelve, R. R. Abbott, and S. J. Hsieh, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 851 (1990).
12. B. F. Levin, *J. Appl. Phys.* **74** (8), R1 (1993).