

УДК 621.383.4/5

Лавинный матричный фотомодуль формата 320×256 элементов на основе тройных соединений группы A_3B_5 с поглощающим слоем InGaAs и барьерным слоем InAlAs

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, М. В. Седнев, А. А. Лопухин, Е. Д. Коротаев

Проведено исследование лавинного матричного фотомодуля формата 320×256 элементов на основе тройных соединений группы A_3B_5 с поглощающим слоем InGaAs на спектральный диапазон 0,9—1,7 мкм и барьерным слоем InAlAs. Матрица лавинных фотодиодов формата 320×256 элементов изготавливалась в n Vr-наногетероструктуре по мезотехнологии. Измерены количество неработоспособных элементов, зависимость темнового тока от напряжения смещения и коэффициент лавинного усиления.

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

Ключевые слова: InGaAs, коротковолновый диапазон спектра, инфракрасный, наногетероструктуры, лавинный фотодиод, матрица фоточувствительных элементов, лавинный фотомодуль.

Введение

В последние годы активно проводятся разработки в направлении создания оптико-электронных систем активного формирования 3D-изображений высокого разрешения в инфракрасном диапазоне спектра, позволяющих проводить обнаружение и распознавание объектов на больших расстояниях в неблагоприятных внешних условиях [1, 2]. Актуальность применения лавинных матричных фотомодулей на основе гетероэпитаксиальных структур A_3B_5 с поглощающим слоем InGaAs в системах активного формирования изображений заключается в том, что такие модули имеют высокую эффективность преобразования оптического излучения, высокие фотоэлектрические параметры, малые вес, рассеиваемую мощность и габариты, не чувствительны к магнитным полям, обладают способностью к накоплению и интегрированию сигнала [3].

Достижение максимального коэффициента умножения при минимальном значении темновых токов и шум-фактора в лавинных фотомодулях достигается за счет выбора и конструирования оптимальной многослойной наногетероструктуры с разделенными областями поглощения и умножения на основе тройных соединений InGaAs/InAlAs на подложках InP [4—6].

Для согласования кристаллических структур полупроводниковых материалов InGaAs и InAlAs используется тонкий эпитаксиальный слой на основе четверного соединения InAlGaAs, который уменьшает напряжение кристаллических решеток и обеспечивает плавное изменение электрического поля внутри наногетероструктуры. Введение в структуру тонких δ -слоев InGaAs/InAlAs различного типа проводимости приводит к сглаживанию потенциального барьера зонной диаграммы структуры для дырок и увеличению коэффициента сбора фотогенерированных неосновных носителей заряда. При этом с помощью оптимизации толщины и концентрации носителей заряда в δ -слоях можно добиться увеличения коэффициента сбора фотогенерированных носителей по сравнению со структурой без δ -слоев. Концентрация примеси δ -слоев InGaAs/InAlAs не должна превышать критического значения, приводящего к рекомбинации носителей заряда и последующему уменьшению квантовой эффективности.

Целью данной работы являлось построение и исследование лавинных матричных фотомодулей формата 320×256 элементов на основе тройных соединений группы A_3B_5 с поглощающим слоем InGaAs и барьерным слоем InAlAs, предна-

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка¹.

Лопухин Алексей Алексеевич, начальник участка¹.

Коротаев Евгений Дмитриевич, инженер-электроник 1 кат¹.

¹ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2014 г.

© Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Лопухин А. А., Коротаев Е. Д., 2015

значенных для построения активных оптоэлектронных систем нового поколения.

Конструкция наногетероструктуры

Достижение максимального коэффициента умножения лавинного матричного модуля при минимальном значении темновых токов и шумов достигается за счет выбора и конструирования оптимальной наногетероструктуры. Наиболее перспективной структурой для построения лавинного фотомодуля на сегодняшний день считается структура с разделенными областями поглощения и умножения [4—6]. В данной работе предлагается использовать наногетероструктуру, которая помимо слоя умножения имеет дополнительный барьерный слой и образует nVp -структуру [7]. Использование широкозонного барьерного слоя $InAlAs$ в наногетероструктуре имеет огромное значение, т. к. его наличие решает проблему пассивации поверхности матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ), что подразумевает эффективное устранение поверхностных токов утечки и туннелирования.

Конструкция лавинной наногетероструктуры на основе тройных соединений группы A_3B_5 с поглощающим слоем $InGaAs$ и барьерным слоем $InAlAs$ представлена на рис. 1. Данная структура предназначена для изготовления лавинных матриц фоточувствительных элементов с использованием меза-технологии [8]. Это подразумевает, что активная фоточувствительная наногетероструктура формируется при выращивании, а затем методом ионного травления формируются отдельные фоточувствительные элементы.

Контактный слой $p^+-In_{0,53}Ga_{0,47}As:Zn$	$4 \cdot 10^{19}$	0,054 мкм
Барьерный слой $p^+-In_{0,53}Ga_{0,47}As:Zn$	$1,6 \cdot 10^{18}$	0,107 мкм
Слой умножения $p-Al_{0,48}InAs$	$< 1 \cdot 10^{15}$	0,107 мкм
δ -слой $p-Al_{0,48}InAs$	$7 \cdot 10^{17}$	0,0054 мкм
Переходный слой $n-AlIn_{0,53}GaAs$	$< 1 \cdot 10^{15}$	0,054 мкм
δ -слой $n-In_{0,53}Ga_{0,47}As$	$7 \cdot 10^{17}$	0,0054 мкм
Поглощающий слой $n-In_{0,53}Ga_{0,47}As$	$2,5 \cdot 10^{16}$	2,143
Буферный слой (InP) n -типа	$5 \cdot 10^{17}$	0,34 мкм
Оптически прозрачная подложка из фосфида индия InP (100) n -типа, \varnothing 50,8 мм	$2 \cdot 10^{18}$	350 мкм

Рис. 1. Конструкция наногетероструктуры $InAlAs/InGaAs$ для матрицы лавинных фотодиодов

Наногетероструктура состоит из оптически прозрачной подложки из фосфида индия InP n -типа проводимости. Уровень легирования подложки достигает 10^{18} см^{-3} , толщина подложки составляет несколько сотен микрон. Дополнительно подложка InP включает тонкий, менее 1 мкм, легирован-

ный буферный слой n -типа проводимости. Он необходим для обеспечения плавного перехода от высоколегированной подложки к нелегированному поглощающему слою $In_{0,53}Ga_{0,47}As$.

Для области поглощения традиционно используется тройное соединение арсенида индия-галлия ($In_{0,53}Ga_{0,47}As$), состав арсенида индия в котором равен $x = 0,53$ мол. доли. Поглощающий слой выращивается на буферном слое и имеет тот же тип проводимости, что и подложка. Поглощающий слой может иметь легирование n -типа или p -типа проводимости с уровнем не выше 10^{16} см^{-3} , в зависимости от того реализуется nVp - или pVn -структура. Толщина слоя поглощения составляет около 2 мкм, что позволяет достигать максимального значения квантовой эффективности при работе в режиме лавинного усиления.

Переходный слой между слоями поглощения и умножения изготавливается на основе четверного соединения $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ и может быть нелегированным или легированным фоновой примесью n -типа проводимости. Переходный слой необходим для минимизации напряжений между слоями поглощения и умножения за счет изменения состава и согласования кристаллических решеток данных слоев. В нем же происходит градиентное изменение напряженности электрического поля, которое необходимо для создания рабочего значения напряженности электрического поля в зоне умножения. Толщина слоя составляет порядка 50 нм. Выращивание градиентного слоя, разделяющего слои поглощения и умножения, начинается с роста высоколегированного δ -слоя ($7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) n -типа проводимости. Данный δ -слой имеет толщину порядка 5 нм, он понижает потенциальный дырочный барьер в валентной зоне. Второй δ -слой, сформированный после градиентного слоя толщиной порядка 5 нм, имеет полярность p -типа. Наличие его обеспечивает плавное изменение энергетического уровня валентной зоны.

Следующим за переходным слоем располагается слой умножения на основе тройного соединения арсенида индия-алюминия $In_{0,52}Al_{0,48}As$. Он является широкозонным и имеет состав индия $x = 0,52$ мольных долей. Напряженность электрического поля в слое умножения составляет более 10^5 В/см при напряжении смещения 3—5 В, обеспечиваемом КМОП интегральной схемой считывания сигнала.

Барьерный слой формируется за слоем умножения, в зависимости от полярности структуры он блокирует электронную (nVp -структура) или дырочную (pVn -структура) составляющую тока, и, таким образом, существенно уменьшает темновые токи модуля.

В режиме фотодетектирования *n*-контакт формируется к слою поглощения *n*-In_{0,53}Ga_{0,47}As, *p*-контакт присоединяется к контактному слою *p*⁺-In_{0,53}Ga_{0,47}As.

На рис. 2 показана зонная диаграмма наногетероструктуры на основе тройных соединений In_{0,53}Ga_{0,47}As/In_{0,52}Al_{0,48}As (буферный и δ-слои не показаны).

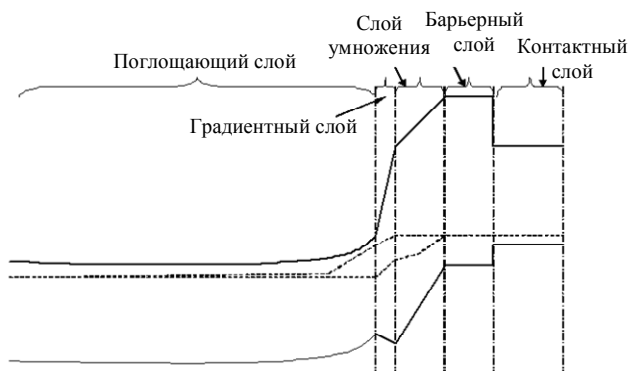


Рис. 2. Зонная диаграмма наногетероструктуры на основе тройных соединений In_{0,53}Ga_{0,47}As/In_{0,52}Al_{0,48}As

Выращивание структуры проводилось методом моcгидридной эпитаксии (МОСГЭ) [9]. В качестве легирующий примеси *n*-типа использовался кремний, в качестве легирующей примеси *p*-типа использовался цинк. Переходный слой формировался с помощью выращивания чередующихся слоев InGaAs и InAlAs различной толщины, поэтому на одном краю слоя ширина запрещенной зоны соответствовала узкозонному тройному соединению InGaAs, а на другом краю — широкозонному тройному соединению InAlAs.

Расчетное моделирование зонной диаграммы для наногетероструктуры In_{0,53}Ga_{0,47}As/In_{0,52}Al_{0,48}As основывалось на решении системы уравнений Шредингера и Пуассона в приближении эффективной массы [10]. В модели использовались значения эффективных масс: для InP $m^* = 0,075m_0$, для In_{0,53}Ga_{0,47}As — $m^* = 0,043m_0$, и для In_{0,52}Al_{0,48}As — $m^* = 0,075m_0$. Разрыв дна зоны проводимости между In_{0,53}Ga_{0,47}As/In_{0,52}Al_{0,48}As составил $\Delta E_c = -0,7$ эВ [11]. Значение потенциала на поверхности принималось равным $\phi_s = 0,5$ эВ.

Результаты экспериментальных исследований

Проведены исследования количества и плотности дефектов поверхности НГЭС InGaAs Ø = 50,8 мм с помощью автоматизированного оптического анализатора поверхности Candela CS 10R фирмы KLA-Tenkor (США). На рис. 3 представлены карта распределения дефектов по поверхности НГЭС InGaAs и гистограмма распределения линейных размеров дефектов.

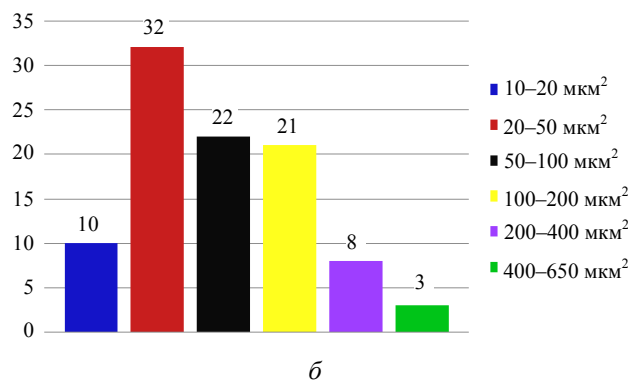
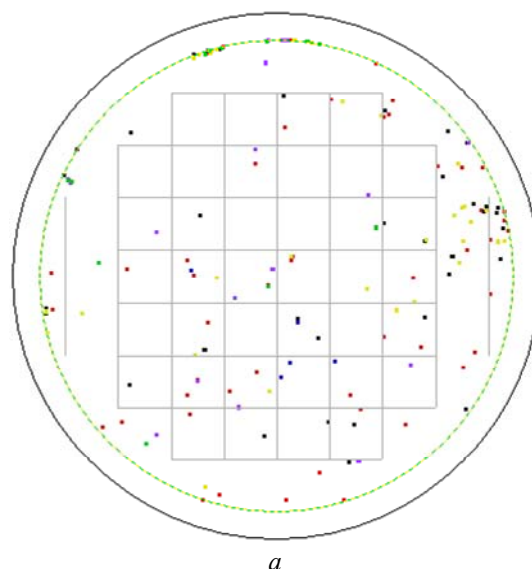


Рис. 3. Анализ дефектов по НГЭС InGaAs Ø = 50,8 мм: а — карта распределения дефектов по поверхности; б — гистограмма распределения дефектов по линейным размерам

В таблице представлены сводные данные по дефектности образца НГЭС InGaAs.

Таблица

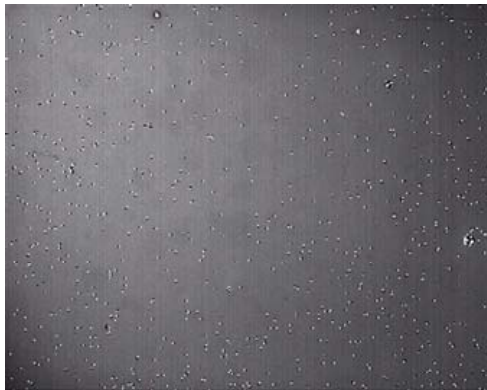
Размер дефекта, мкм ²	Количество дефектов, шт.
10—20	10
20—50	32
50—100	22
100—200	21
200—400	8
400—650	3
10—650	96

Общее количество дефектов по пластине НГЭС InGaAs Ø = 50,8 мм составило ~96 шт., что находится на уровне лучших зарубежных образцов.

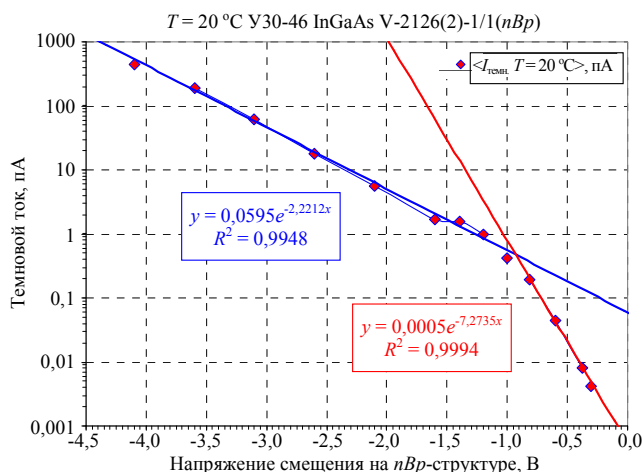
Проведено исследование морфологии поверхности гетероэпитаксиальных слоев InGaAs, выращенных методом МОСГЭ. Морфология поверхности исследовалась при помощи метода атомно-силовой микроскопии на атомно-силовом микроскопе Integra Maximus и на интерференционном профилометре Sensofar PLu NEOX. Изме-

рение морфологии показало, что нанощероховатость поверхности образца, выращенного методом МОСГЭ, составила 0,76 нм. Максимальное значение шероховатости составило 3,48 нм.

Матрицы фоточувствительных элементов на основе НГЭС InGaAs изготавливались по мезотехнологии. Распределение темновых токов по МФЧЭ и график зависимости темнового тока от напряжения смещения в *nVp*-структуре представлены на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Распределение темновых токов по МФЧЭ формата 320×256 элементов: а — диаграмма распределения темновых токов; б — зависимость темнового тока от напряжения смещения на *nVp*-структуре

Общее количество неработающих элементов составило ~180 шт., что в процентном соотношении по матрице лавинных фотодиодов формата 320×256 элементов соответствует 0,22 %. Коэффициент усиления при напряжении смещения — 3,5 В составил ~30.

Анализ полученных экспериментальных результатов подтверждает показанную при теоретическом анализе необходимость пространственного

разделения областей поглощения и умножения и существенного уменьшения толщины области умножения в 10—20 раз для уменьшения напряжения на подложке МФЧЭ до напряжений смещений порядка -5 В и уменьшения коэффициента шума. Квантовая эффективность в диапазоне напряжений смещения -0,4 ÷ 2,0 В составила 35 %. Дальнейшее увеличение квантовой эффективности будет достигнуто при оптимизации наногетероструктуры и δ -слоев. Достигнутый уровень темнового тока ~400 пА при напряжении смещения $U_{см} = -4$ В доказывает эффективность использования барьерного слоя при температуре окружающей среды $T = 20$ °С и возможность дальнейшего уменьшения темновых токов на один-два порядка при охлаждении термоэлектрическим охладителем.

Заключение

Проведены разработка и исследования лавинных матричных фотомодулей формата 320×256 элементов на основе тройных соединений группы A_3B_5 с поглощающим слоем InGaAs и барьерным слоем InAlAs, работающих в режиме лавинного усиления с коэффициентом усиления выше 30. Использование барьерного слоя в наногетероструктуре InAlAs/InGaAs/InP позволяет дополнительно уменьшить токи утечек и туннелирования, которые крайне нежелательны для режима лавинного усиления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
3. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
4. Enriquez M. D., Blessinger M. A., Groppe J. V., et al. // Proc. SPIE. 2008. P. 6940-21.
5. Campbell J., Demiguel S., Ma F., et al. // IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron. 2004. V. 10. No. 4. P. 777.
6. Stéphane Demiguel // Proc. of SPIE. 2009. V. 7298. P. 729836.
7. Klem J. F., Kim J. K., Cich M. J., et al. // J. Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 031112-1.
8. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
9. Мармалюк А. А. // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2005. № 1. С. 17.
10. Галиев Г. Б., Васильевский И. С., Климов Е. А. и др. // ФТП. 2006. Т. 40. № 12. С. 1479.
11. Weiner G. S., Chemia D. S., Miller A. B. et al. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. No. 7. P. 619.

320×256 ADP FPA based on A_3B_5 heterostructures with InGaAs absorber layer and InAlAs barrier layer

N. I. Iakovleva¹, K. O. Boltar^{1,2}, M. V. Sednev¹, A. A. Lopuhin¹, and E. D. Korotaev¹

¹Orion R&P Association Inc.
46/2 Enthusiasts highway, 111123, Moscow, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskii al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received December 29, 2014

320×256 ADP SWIR FPA based on A_3B_5 heterostructures with InGaAs absorber layer and InAlAs barrier layer have been investigated and analyzed. ADP photodiodes have been formed using mesa-technology in nB p nanoheterostructure. Critical characteristic of ADP photodiode have been measured including number of defect elements, dark current vs. voltage bias characteristic, multiplication coefficient.

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

Keywords: InGaAs, SWIR, IR, nanoheterostructures, avalanche photodiode, FPA.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenlo, A. I. Dirochka, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 131 (2014).
4. M. D. Enriquez, M. A. Blessinger, J. V. Groppe, et al., *Proc. SPIE*. 6940-21 (2008).
5. J. Campbell, S. Demiguel, F. Ma, et al., *IEEE J. of Selec. Topics in Quantum Electron.* **10**, 777 (2004).
6. Stéphane Demiguel, *Proc. of SPIE* **7298**, 729836 (2009).
7. J. F. Klem, J. K. Kim, M. J. Cich, et al., *J. Appl. Phys. Lett.* **95**, 031112-1 (2009).
8. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopuhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 10 (2013).
9. A. A. Marmalyuk, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Electron. Tekhn.*, No. 1, 17 (2005).
10. G. B. Galiev, I. S. Vasil'evsky, E. A. Klimov, et al., *Semiconductors* **40**, 1479 (2006).
11. G. S. Weiner, D. S. Chemia, A. B. Miller, et al., *Appl. Phys. Lett.* **46**, 619 (1985).