

УДК 62.315.5

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

Исследование оптических характеристик эпитаксиальных слоев AlGaAs

А. В. Никонов, П. С. Скробнева, Н. И. Яковлева

Проведено исследование и моделирование спектральных зависимостей коэффициента поглощения и показателя преломления эпитаксиальных слоев AlGaAs различного состава. В рамках модели зонной структуры соединений группы A^3B^5 установлена зависимость диэлектрической проницаемости от критических энергий прямых и непрямых переходов.

Ключевые слова: алюминий-галлий-арсенид, диэлектрическая проницаемость, матричный элемент перехода, показатель преломления, коэффициент поглощения.

Введение

Одним из наиболее перспективных методов регистрации инфракрасного излучения в настоящее время является ИК-детектирование на основе гетероэпитаксиальных структур с множественными квантовыми ямами (КЯ) или Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIP),

Использование фотоприемников на основе QWIP-структур позволяет создавать крупноформатные матричные фотоприемные устройства. Матрицы на квантовых ямах (QWIP-матрицы) составляют серьезную конкуренцию фотоприемникам, выполненным на основе теллурида кадмия-ртути (КРТ) в диапазоне 8–12 мкм [1].

Наибольшее распространение получили квантово-размерные гетероструктуры на основе соединений группы A^3B^5 . В частности, наибольшую перспективу для применения в технологии создания фотоприемных устройств на основе QWIP-структур имеют твердые растворы на основе арсенида галлия. Потенциальная перспективность таких гетероструктур заключается в высоком уровне развития технологии выращивания

эпитаксиальных слоев GaAs различными эпитаксиальными методами (молекулярно-лучевая и жидкофазная эпитаксии), а также в возможности высокого уровня интеграции фотоприемных элементов и электронных элементов обработки сигналов. Решающим преимуществом матриц на квантовых ямах, по сравнению с КРТ, является существенно меньшая стоимость исходного материала и более низкие затраты на их производство.

На рис. 1 показано характерное изображение, полученное с тепловизионной камеры на основе гетероэпитаксиальной структуры арсенида галлия с квантовыми ямами.



Рис. 1. Городской пейзаж, полученный ИК ФПУ на основе QWIP-структур формата 640x512 элементов длинноволнового диапазона спектра, $T = 75$ К, шаг 25 мкм, NETD = 30 мК (фирма Thales).

В настоящее время продолжают интенсивные исследования разнообразных характеристик QWIP-структур. Данная работа посвящена исследованию электрофизических и оптических характеристик (диэлектрическая проницаемость, коэффициент поглощения, показатель преломления) эпитаксиальных слоев тройных твердых растворов AlGaAs с варьируемым составом.

Никонов Антон Викторович^{1,2}, начальник НИЦ, зам. зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

Скробнева Полина Станиславовна¹, инженер 2 кат.

Яковлева Наталья Ивановна¹, главный научный сотрудник. АО «НПО «Орион».

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

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

²Московский физико-технический институт

(государственный университет).

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

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.

© Никонов А. В., Скробнева П. С., Яковлева Н. И., 2017

Энергетическая структура квантовых ям

Квантовые ямы в QWIP-структурах образуются путём выращивания тонких ($\sim 1\div 10$ нм) высоколегированных слоев твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и слаболегированных слоев GaAs . Как правило, в технологии изготовления гетероэпитаксиальных структур используются тройные соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ состава $x = 0,15\text{--}0,35$ мольных долей [2]. С увеличением мольной доли арсенида алюминия увеличивается ширина запрещенной зоны, достигая максимального значения 2,17 эВ в бинарном соединении AlAs . Ширина запрещенной зоны в арсениде галлия составляет 1,42 эВ. На рис. 2 представлена диаграмма распределения энергетических уровней на примере единичной квантовой ямы.

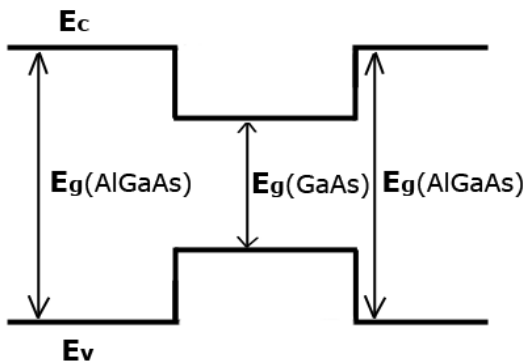


Рис. 2. Диаграмма распределения энергетических уровней на примере единичной квантовой ямы.

При выращивании квантовых ям в процессе роста меняется химический состав атомов, лежащих на растущий слой. На слое полупроводника с широкой запрещенной зоной (AlGaAs) последовательно выращиваются эпитаксиальные слои узкозонного соединения GaAs и широкозонного AlGaAs .

Несмотря на все достоинства ИК-фотоприемников на основе QWIP-структур, вопросы их моделирования разработаны недостаточно полно. В отличие от микроэлектронного производства, в полной мере обеспеченного инструментальной базой проектирования, для QWIP-структур системы моделирования, направленные на широкомасштабное инженерное использование, остаются редкими. В условиях перехода к промышленному и полупромышленному производству фотоприемников с QWIP-структурами указанные проблемы не позволяют в полной мере использовать описанные достоинства ИК-фотоприемников на их основе.

Особенно важную роль имеет анализ оптических характеристик ФПУ с QWIP-структурами, в частности, таких как спектры пропускания, отражения и поглощения. Фундаментальные свойства

используемых в технологии полупроводниковых соединений в значительной степени определяют характеристики приборов, что тем самым подчеркивает актуальность данной тематики.

Конструкции ФЧЭ на QWIP

Квантовая эффективность является одной из ключевых характеристик QWIP-структур. Во многом её распределение и значения определяются конструкцией фоточувствительных элементов.

Анализ литературных источников [3–5] показал, что наиболее распространенными в технологии создания фоточувствительных элементов на QWIP-структурах являются четыре формы: призматическая, пирамидальная, коническая и с дифракционной решеткой. Установлено, что квантовая эффективность при призматической форме конструкции достигает значений порядка $\eta = 25\%$. Нанесение антиотражающего покрытия на подложку позволяет повысить значение квантовой эффективности до 30 % в широком диапазоне длин волн. В случае использования пирамидальной конструкции ФЧЭ квантовая эффективность может достигать значений порядка 31 %, а с нанесением антиотражающего покрытия происходит увеличение значения квантовой эффективности до 39 %. Проведено сравнение зависимостей квантовой эффективности ФЧЭ с конструкцией конической формы (см. рис. 3) от длины волны излучения с учетом и без учета антиотражающего покрытия. На рис. 4 показано влияние антиотражающего покрытия на значения пропускания подложки, за счёт этого подавляется амплитуда осцилляций. При этом квантовая эффективность достигает значений порядка 34 %. В случае использования QWIP-структур с дифракционными решетками периодом 3 или 5 мкм и глубиной 0,75 мкм максимальное значение квантовой эффективности не превышает 13–14 %.

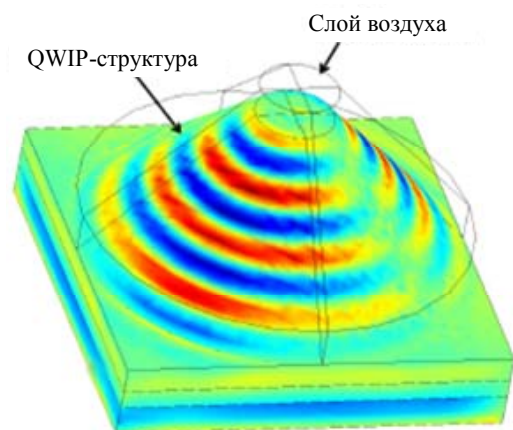


Рис. 3. Коническая форма ФЧЭ на основе QWIP-структуры.

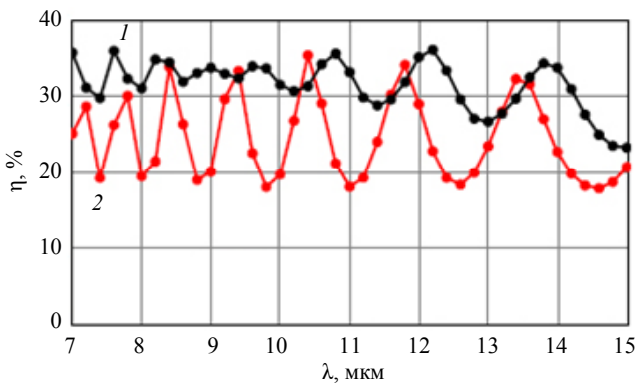


Рис. 4. Сравнение распределения квантовой эффективности η для ФЧЭ конической формы с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) антиотражающего покрытия.

Моделирование оптических параметров эпитаксиальных слоев AlGaAs

Для разработки модели квантовой эффективности необходимо учитывать фундаментальные оптические свойства исходных полупроводниковых соединений [6]. В ходе проведенного исследования использовался метод расчёта комплексного показателя преломления и коэффициента поглощения объемного материала AlGaAs из значений диэлектрической проницаемости. Тройное соединение алюминий-галлий-арсенид относится к полупроводниковым материалам группы A^3B^5 со структурой цинковой обманки. Модель диэлектрической проницаемости учитывает наличие прямых переходов Γ -, L- и X-типов при нулевом волновом векторе и по направлениям $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ соответственно [7–9], а также не прямых Γ -L и Γ -X переходов [10]:

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_{\Gamma}(\lambda) + \varepsilon_L(\lambda) + \varepsilon_X(\lambda) + \varepsilon_{\Gamma-L}(\lambda) + \varepsilon_{\Gamma-X}(\lambda)x.$$

Для расчёта параметров тройного соединения $Al_xGa_{1-x}As$ использовались модели квадратичной и кубической аппроксимации:

$$V_{AlGaAs}(x) = x \times V_{AlAs} + (1-x) \times V_{GaAs} + x^2(1-x) \times C_1 + x(1-x)^2 \times C_2,$$

где V_{AlGaAs} , V_{AlAs} , V_{GaAs} – значения энергий переходов из валентной зоны в зону проводимости для соответствующих материалов; x – мольная доля арсенида алюминия в тройном соединении, C_1 , C_2 – силовые коэффициенты нелинейности.

На основе данных моделей нами получены зависимости ширины запрещенной зоны и энергии переходов по направлению $\langle 100 \rangle$ от состава соединения:

$$E_0(x) = 1,424 + 1,721x - 1,437x^2 + 1,310x^3,$$

$$E_1(x) = 2,924 + 0,808x - 0,778x^2 + 0,935x^3.$$

Данные энергетические зависимости использовались при расчете действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, связанных между собой известными соотношениями Крамерса-Кронига:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega),$$

$$\varepsilon_1(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \varepsilon_2(\omega')}{(\omega')^2 - \omega^2} d\omega',$$

$$\varepsilon_2(\omega) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon_1(\omega')}{(\omega')^2 - \omega^2} d\omega'.$$

В свою очередь, ключевые оптические параметры исследуемых соединений – показатель преломления и коэффициент поглощения – связаны с диэлектрической проницаемостью следующим образом:

$$n = \sqrt{\frac{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} + \varepsilon_1}{2}},$$

$$k = \sqrt{\frac{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} - \varepsilon_1}{2}},$$

где k – коэффициент экстинкции, пропорциональный коэффициенту поглощения α :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k}{\lambda}.$$

Сравнение полученных зависимостей показателя преломления эпитаксиальных слоев AlGaAs для различных составов с существующими моделями сторонних исследователей показало корректность и состоятельность модели. В то же время представленные результаты являются более универсальными, так как ранние модели оптических характеристик функционируют на узких спектральных диапазонах. Моделирование показателя преломления проводилось с учётом переходов не только в центре зоны Бриллюэна, но также и других видов переходов. На рис. 5 показано полученное распределение с учётом основных прямых переходов для составов от 0 до 0,5. На рис. 6 показан частный случай нелинейности исследуемой зависимости – пики на графиках, возникающие от прямых X-переходов, в ближнем ИК-диапазоне от 0,7 до 1,0 мкм.

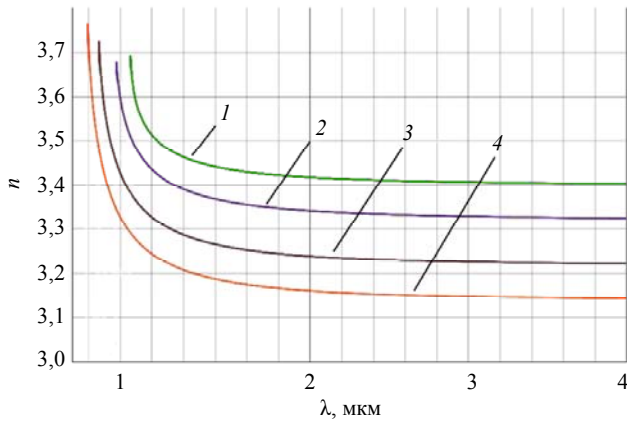


Рис. 5. Зависимость показателя преломления n от длины волны излучения λ (приближение E_g -переходов: кривая 1 – $x = 0,0$; 2 – $x = 0,15$; 3 – $x = 0,35$; 4 – $x = 0,5$).

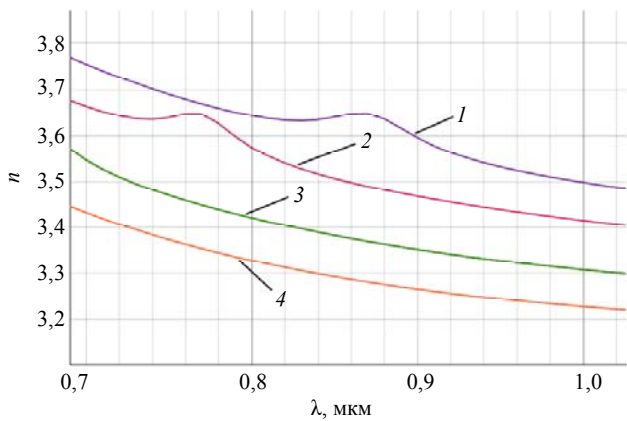


Рис. 6. Влияние переходов направления $\langle 100 \rangle$ на распределение показателя преломления: кривая 1 – $x = 0,0$; 2 – $x = 0,15$; 3 – $x = 0,35$; 4 – $x = 0,5$.

Проведено моделирование распределения коэффициента поглощения по энергиям падающего излучения для различных составов материала. На рисунках приведено сравнение графиков для составов 0,5 и 0,8. Сложный характер графиков объясняется особенностями кристаллической структуры соединений. Наибольшие значения коэффициента поглощения достигаются при энергиях больших 4 эВ, что соответствует длинам волн менее 500 нм. На рис. 7 показано распределение коэффициента поглощения эпитаксиальных слоев соединений $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$ и $Al_{0,8}Ga_{0,2}As$.

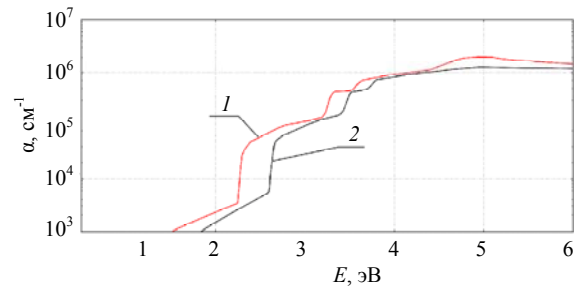


Рис. 7. Распределение коэффициента поглощения α эпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}As$ различного состава на диапазоне энергий излучения $E = 0,5-6,0$ эВ.

Заключение

На основании проведенного обзора различных конструкций фоточувствительных элементов с QWIP-структурами установлено, что наиболее высокие значения квантовой эффективности достигаются на фоточувствительных элементах конической формы. Разработаны и построены модели оптических параметров (коэффициента поглощения, показателя преломления) объемного материала $Al_xGa_{1-x}As$ на полном диапазоне состава соединения. Данные модели являются перспективными для разработки теоретической модели квантовой эффективности QWIP-структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 509.
2. Aspnes D. E., Kelso S. M., Logan R. A., Bhat R. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. No. 2. P. 754.
3. Kan Y., Nagai H., Yamanishi M., Suemune I. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1987. Vol. QE-23. No. 12. P. 2167.
4. Gonzalez-Cuevas J. A., Refaat T. F., Abedin M. N., Elsayed-Ali H. E. // J. Appl. Phys. 2007. No. 102. P. 014504-1.
5. Choi K. K., Jhabvala M. D., Forrai D. P., Waczynski A., Sun J., Jones R. // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 80120R-1.
6. Никонов А. В., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 70.
7. Никонов А. В., Куляхтина Н. М., Яковлева Н. И., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 21.
8. Никонов А. В., Скребнева П. С., Яковлева Н. И., Пономаренко В. П. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 5. С. 481.
9. Яковлева Н. И., Никонов А. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 4. С. 394.
10. Никонов А. В., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 73.

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

Optical properties of the AlGaAs epitaxial layers

A. V. Nikonov^{1,2}, P. S. Skrebneva¹, and N. I. Iakovleva¹

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

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

Received December 15, 2016

Spectral distributions of an absorption coefficient and refractive index were researched and modeled due to different compositions of the AlGaAs epitaxial layers. The influence of direct and indirect transitions in the Brillouin zone on a dielectric constant of zinc-blende A^3B^5 semiconductors was considered.

Keywords: AlGaAs, dielectric constant, momentum matrix element, refractive index, absorption coefficient.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, et al., Usp. Prikl. Fiz. **2**, 509 (2014).
2. D. E. Aspnes, S. M. Kelso, et al., J. Appl. Phys. **2** (60), 754 (1986).
3. Y. Kan, H. Nagai, et al., IEEE J. Quantum Electronics **12** (QE-23), 2167 (1987).
4. J. A. Gonzalez-Cuevas, T. F. Refaat, et al., J. Appl. Phys. **102**, 014504-1 (2007).
5. K. K. Choi, M. D. Jhabvala, et al., Proc. of SPIE **8012**, 80120R-1 (2011).
6. A. V. Nikonov, K. O. Boltar, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 3, 70 (2012).
7. A. V. Nikonov, N. M. Kulyahtina, N. I. Iakovleva, and K. O. Boltar, Prikl. Fiz., No. 5, 21 (2015).
8. A. V. Nikonov, P. S. Skrebneva, N. I. Iakovleva, and K. O. Boltar, Usp. Prikl. Fiz. **3**, 481 (2015).
9. N. I. Iakovleva and A. V. Nikonov, Usp. Prikl. Fiz. **4**, 394 (2016).
10. A. V. Nikonov and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 4, 73 (2016).