

Фотоэлектроника

УДК 621.383.4/5

Анализ оптических параметров эпитаксиальных слоев и многослойных гетероструктур на основе InGaAsP/InP

П. С. Скребнева, А. В. Никонов, Н. И. Яковлева, В. П. Пономаренко

Разработана модель диэлектрической проницаемости для полупроводников со структурой цинковой обманки. Проведен расчет и построены модели показателя преломления и коэффициента поглощения гетероэпитаксиальных слоев соединений группы $A^{III}B^V$ в расширенном диапазоне энергии излучения, а именно, 0,4—6,0 эВ.

PACS: 07.57.Kp, 42.25.Bs, 42.70.Nq, 42.79.Pw, 78.20.Ci, 85.60.Gz

Ключевые слова: лавинные фотоприемники, InGaAsP, гетероэпитаксиальные структуры, показатель преломления, коэффициент поглощения.

Введение

Для обеспечения создания современной фотоэлектроники в России сегодня необходимы матричные лавинные фотоприемные устройства нового поколения с высокими фотоэлектрическими параметрами на основе четверных соединений индий-галлий-арсенид-фосфор [1]. В интересах повышения работоспособности и улучшения характеристик лавинных матричных фотоприемных устройств, чувствительных в оптическом диапазоне 0,9—1,7 мкм, крайне важной и актуальной является задача совершенствования контроля свойств гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на основе четверных соединений InGaAsP [2, 3]. Особый интерес представляет контроль состава и толщины рабочих фоточувствительных слоев

InGaAsP в составе сложных ГЭС посредством ряда методик, в первую очередь, спектроскопической эллипсометрии, а также контроля спектров пропускания и отражения ГЭС.

Корректность измерений необходимо подтверждать теоретическими расчетами оптических параметров эпитаксиальных слоев двойных, тройных и четверных полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$, в частности, показателя преломления, коэффициента поглощения, коэффициента экстинкции. Проведенный в работах [4, 5] эмпирический анализ данных параметров имеет ограничения по диапазону энергий излучения.

Целью данной работы являлось проведение моделирования показателя преломления и коэффициента поглощения в расширенном диапазоне E , а именно, 0,4—6,0 эВ, с использованием теоретического анализа соотношений Крамерса-Кронига применительно к исследуемым соединениям.

Модель диэлектрической проницаемости соединений $A^{III}B^V$

Соединения группы $A^{III}B^V$ обладают кристаллической структурой типа цинковой обманки (сфалерита). В зоне Бриллюэна данные материалы имеют точки высокой симметрии: к ним относятся Γ -точки, расположенные в центре зоны; L -точки, расположенные на пересечении края зоны с осью $\langle 111 \rangle$; X -точки, соответствующие пересечению оси $\langle 100 \rangle$ с краем зоны. Классическое исследование энергетических переходов включает в себя исследование влияния Γ -переходов на оптические и электрофизические параметры материала, так как переходы через ширину запрещенной зоны дают основной вклад в значение диэлектрической

Скребнева Полина Станиславовна, инженер 2 категории НИЦ¹.

Никонов Антон Викторович, ведущий инженер НИЦ¹, доцент².

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

Пonomаренко Владимир Павлович, главный конструктор по программному и перспективному развитию¹, профессор², главный конструктор³.

¹АО «НПО «Орион».

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

Тел. 8 (499) 374-82-51. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт (Государственный университет).

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

³АО «Швабе-Фотоприбор».

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

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2015 г.

© Скребнева П. С., Никонов А. В., Яковлева Н. И., Пономаренко В. П., 2015

проницаемости. Данным переходам соответствует наименьший уровень зоны проводимости, при котором значение волнового вектора равно нулю. В случае увеличения энергии падающего излучения увеличивается вероятность переходов в L - и X -направлениях. Таким образом, полное значение диэлектрической проницаемости соединений группы $A^{III}B^V$ формируется из трёх составляющих:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\Gamma} + \varepsilon_L + \varepsilon_X,$$

где ε_{Γ} , ε_L и ε_X — соответствующие вклады Γ -, L - и X -переходов.

Диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной, действительная и мнимая части которой связаны между собой соотношениями Крамерса-Кронига:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\omega) &= \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega) \\ \varepsilon_1(\omega) &= 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \varepsilon_2(\omega')}{(\omega')^2 - \omega^2} d\omega' \\ \varepsilon_2(\omega) &= -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon_1(\omega')}{(\omega')^2 - \omega^2} d\omega'. \end{aligned}$$

Нами выведены значения вкладов переходов в диэлектрическую проницаемость с учетом характеристических особенностей критических точек. Вклады Γ -переходов описываются зависимостями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Gamma 1}(\omega) &= \frac{A}{E_0^{1.5}} \left(f(\varphi_{00}) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_0}{E_0 + \Delta_0} \right)^{1.5} \cdot f(\varphi_{01}) \right), \\ \varepsilon_{\Gamma 2}(\omega) &= \frac{A}{(\hbar\omega)^2} \left(H(\varphi_{00} - 1) \sqrt{\hbar\omega - E_0} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cdot H(\varphi_{01} - 1) \sqrt{\hbar\omega - E_0 - \Delta_0} \right), \end{aligned}$$

где E_0 соответствует ширине запрещенной зоны при нулевом волновом векторе; Δ_0 — энергия расщепления валентной зоны на подуровни; A — силовой параметр переходов E_0 и $E_0 + \Delta_0$, зависящий от состава соединения; φ_{00} и φ_{01} — безразмерные величины энергии в виде соотношений:

$$\varphi_{00} = \frac{E}{E_0}, \quad \varphi_{01} = \frac{E}{E_0 + \Delta_0};$$

$f(\varphi)$ — функция, зависящая от безразмерной величины энергии:

$$f(\varphi) = \frac{1}{\varphi^2} \left(2 - \sqrt{1 + \varphi} - H(1 - \varphi) \cdot \sqrt{1 - \varphi} \right),$$

где $H(\varphi)$ — функция Хевисайда:

$$H(\varphi) = \begin{cases} 1, & \varphi \geq 0 \\ 0, & \varphi < 0 \end{cases}.$$

Для критических точек L -переходов используется приближение двухмерных точек M_0 -типа, и значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{L2}(\omega) &= \frac{\pi B_1}{\Phi_{10}^2} H(\varphi_{10} - 1) + \frac{\pi B_2}{\Phi_{11}^2} H(\varphi_{11} - 1), \\ \varepsilon_{L1}(\omega) &= -\frac{B_1}{\Phi_{10}^2} \ln(1 - \varphi_{10}^2) - \frac{B_2}{\Phi_{11}^2} \ln(1 - \varphi_{11}^2). \end{aligned}$$

Здесь B_1, B_2 — силовые параметры, зависящие от структурных особенностей полупроводниковых соединений; $\varphi_{10} = E / E_1$, $\varphi_{11} = E / (E_1 + \Delta_1)$ — безразмерные величины энергии.

Наилучшее приближение вкладов X -переходов в диэлектрическую проницаемость описывается с помощью модели затухающего гармонического осциллятора:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{X1}(\omega) &= \frac{C(1 - \varphi_2^2)}{(1 - \varphi_2^2)^2 + (\varphi_2\gamma)^2}, \\ \varepsilon_{X2}(\omega) &= \frac{C\varphi_2\gamma}{(1 - \varphi_2^2)^2 + (\varphi_2\gamma)^2}, \end{aligned}$$

где C и γ — силовые параметры переходов, $\varphi_2 = E / E_2$.

Особенностью представленной теоретической модели является её применимость как к бинарным соединениям группы $A^{III}B^V$ (InP, GaAs), так и к тройным (InGaAs) и четверным соединениям (InGaAsP). В случае тройных и четверных соединений силовые параметры переходов рассчитываются посредством закона интерполяции Вегарда [6] из эмпирически установленных значений силовых параметров бинарных соединений [4]. Данный теоретический расчет находится в качественном согласии с экспериментальными результатами, полученными сторонними исследователями [7], что говорит об эффективности и корректности применяемой модели.

Модель ширины запрещенной зоны эпитаксиальных слоев InGaAsP, согласованных с подложкой InP

В литературе для четверных соединений InGaAsP используется зависимость ширины запре-

щенной зоны от составов x и y при температуре 300 К [8]:

$$E_g = 1,35 + 0,668x - 1,17y + 0,758x^2 + 0,18y^2 - 0,069xy - 0,332x^2y + 0,03xy^2.$$

Особый интерес представляют соединения, кристаллические решетки эпитаксиальных слоев которых согласованы с оптически прозрачной подложкой InP. Для InGaAsP между составами эпитаксиальных слоев наиболее часто применяется формула:

$$x \approx \frac{0,1894y}{0,4184 - 0,013y}, \quad 0 \leq y \leq 1.$$

При этом ширина запрещенной зоны зависит только от состава y (рис. 1):

$$E_g = 1,35 - 0,72y + 0,12y^2$$

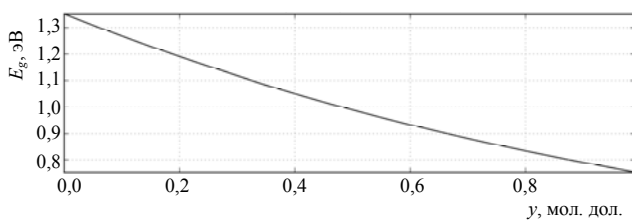


Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g от состава y эпитаксиального слоя InGaAsP на подложке InP ($T = 300$ К)

Особый интерес для исследований представляют собой гетероэпитаксиальные структуры $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$, находящие активное применение в технологии изготовления лавинных фотодиодов для формирователей сигналов трехмерного изображения. В эпитаксиальных слоях с составом $y = 1$ (связан с составом арсенида) достигается наименьшая ширина запрещенной зоны, что способствует усилению фоточувствительности рабочих слоев.

Методика расчета и моделирования оптических параметров эпитаксиальных слоев

Поведение коэффициента межзонного поглощения эпитаксиальных слоев InGaAsP может быть описано с помощью эмпирических моделей, полученных сторонними исследователями для Γ -точки зонной диаграммы [9]. Но данные модели имеют существенные ограничения по точности проводимых измерений и ограниченности спектрального диапазона. В рамках проведенного исследования использовалась зависимость коэффициента по-

глощения от энергии излучения, полученная из соотношений Крамерса-Кронига. Безусловное преимущество полученной модели заключается в её применении в полном диапазоне длин волн излучения.

Из соотношений Крамерса-Кронига получены теоретические зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и коэффициента поглощения. Комплексный показатель преломления характеризуется зависимостью:

$$n^*(\omega) = n(\omega) + ik(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)},$$

где $n(\omega)$ — действительная часть показателя преломления, $k(\omega)$ — коэффициент экстинкции. Связь этих параметров с действительной и мнимой частями диэлектрической постоянной описывается как:

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

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

Мнимая часть показателя преломления k , называемая коэффициентом экстинкции, связана с коэффициентом межзонного поглощения $\alpha(\lambda)$, соответствующим длине волны λ , при помощи соотношения:

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

Проведено моделирование зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения четверного соединения $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ от длины волны и энергии излучения при различных составах материала x и y . Особое внимание уделено поведению данных параметров при энергиях фотонов вблизи ширины запрещенной зоны, так как они оказывают сильное влияние на фотоэлектрические характеристики фотоприемных устройств. На рис. 2 представлено сравнение распределений показателя преломления для материалов InAs, GaAs, $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

При уменьшении энергии излучения и, соответственно, повышении длины волны показатели преломления рассматриваемых соединений принимают стабильные значения порядка 3,2, что соответствует экспериментальным исследованиям [5]. На графиках присутствуют четко выраженные пики на диапазоне 0,3—1,5 эВ, соответствующие переходам E_0 и $E_0 + \Delta_0$ исследуемых соединений. При дальнейшем повышении энергии показатель преломления увеличивается и достигает значений 4,5—5 на энергиях переходов E_1 и $E_1 + \Delta_1$, соответствующих характеристикам исследуемых мате-

риалов. Пики, возникающие на энергиях порядка 4,5 эВ, соответствуют переходам с энергиями E_2 .

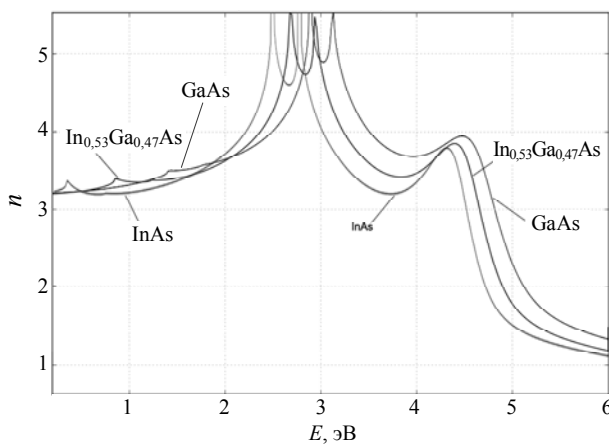


Рис. 2. Сравнение распределений показателя преломления n материалов GaAs, InAs, $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ от энергии излучения E

Реализована и построена модель коэффициента поглощения четверного соединения $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ с промежуточными значениями составов. На рис. 3 приведено сравнение зависимостей коэффициента поглощения от энергии излучения E для материалов $\text{In}_{0,89}\text{Ga}_{0,11}\text{As}_{0,24}\text{P}_{0,76}$ и $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

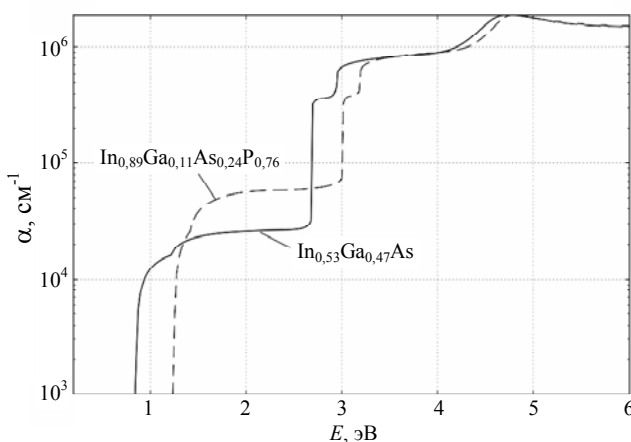


Рис. 3. Сравнение распределений коэффициента поглощения

Максимальное значение коэффициента поглощения достигает величин $(2-3) \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ на энергиях 4,6—4,7 эВ. По мере уменьшения энергии излучения наблюдаются два явных перегиба на графиках, соответствующих переходам через L -точки зоны Бриллюэна. Край фундаментального поглощения смещается при увеличении состава y соединения в сторону больших длин волн.

Разработанные методы в перспективе их применения совместно с методикой вычисления спек-

тров пропускания и отражения многослойных ГЭС [10] позволяют контролировать и предсказывать состав и толщины эпитаксиальных слоёв, входящих в состав сложных ГЭС, применяемых при производстве матричных фотоприемных устройств для лазерных оптико-электронных систем пеленгации, дальнометрии, наведения и обнаружения.

Заключение

Проведена оценка влияния вкладов прямых Γ -, L - и X -переходов в значение диэлектрической проницаемости для полупроводников со структурой цинковой обманки. Проведен расчет оптических характеристик гетероэпитаксиальных слоёв InGaAsP . Реализованы математические модели диэлектрической проницаемости, показателя преломления, коэффициента межзонного поглощения двойных, тройных и четверных полупроводниковых соединений группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ в расширенном диапазоне энергии излучения (0,4—6,0 эВ). Разработанные методы являются перспективными для решения ключевой задачи построения оптимальной топологии гетероэпитаксиальной структуры (количество слоёв, состав, толщина рабочих фоточувствительных, буферных, варизонных слоёв) путем использования эмпирически измеренных оптических характеристик совместно с представленными в данной работе теоретическими зависимостями.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787-2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. — М.: Физматкнига, 2012.
2. Акимов В. М., Андреев Д. С., и др. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 50.
3. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 3. С. 301.
4. Adachi S. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. No. 12. P. 6030.
5. Henry C. H., et al. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1985. V. 21. No. 12. P. 313.
6. Denton A. R., Ashcroft N. W. // Phys. Rev. A. 1991. No. 43. P. 3161.
7. Adachi S. // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. No. 17. P. 12612.
8. Adachi S. Physical properties of III-V semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP. — John Wiley & Sons, 1992.
9. Reid B., Maciejko R., Champagne A. // Can. J. Phys. 1993. V. 71. No. 9–10. P. 410.
10. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Никонов А. В. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 100.

Optical parameters of the InGaAsP/InP epitaxial layers and heteroepitaxial structures

P. S. Skrebneva¹, A. V. Nikonov^{1,2}, N. I. Iakovleva¹, and V. P. Ponomarenko^{1,2,3}

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

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

³Shvabe-Photosystem, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

Received September 30, 2015

A method is described for calculation of the dielectric function of crystals with the zinc-blende arrangement. Methods for modeling the index of refraction and the absorption in III-V compounds are completed over an extended practical energy range.

PACS: 07.57.Kp, 42.25.Bs, 42.70.Nq, 42.79.Pw, 78.20.Ci, 85.60.Gz

Keywords: avalanche photodiodes, InGaAsP, heteroepitaxial structures, dielectric function, index of refraction, absorption coefficient.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-state Photoelectronics. Photoresistors and Photodetectors*. (Fizmatkniga, Moscow, 2012) [in Russian].
2. V. M. Akimov, D. S. Andreev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 50 (2014).
3. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, et al., *Uspekhi Prikladnoy Fiziki* **3**, 301 (2015).
4. S. Adachi, *J. Appl. Phys.* **66**, 6030 (1989).
5. Henry C.H., et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*. **21**, 313 (1985).
6. A. R. Denton and N. W. Ashcroft, *Phys. Rev. A*. **43**, 3161 (1991).
7. S. Adachi, *Phys. Rev. B*. **39**, 12612 (1989).
8. S. Adachi, *Physical properties of III-V semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP* (John Wiley & Sons, 1992).
9. B. Reid, R. Maciejko, and A. Champagne, *Can. J. Phys.* **71**, 410 (1993).
10. K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, and A. V. Nikonov, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 100 (2011).