

УДК 621.383.4/5

Исследования спектральных зависимостей коэффициента поглощения в слоях InGaAs

Н. И. Яковлева, А. В. Никонов

Проведены исследования и расчеты коэффициента поглощения для структур InGaAs, выращенных эпитаксией из металлоорганических соединений из газовой фазы (МОСVD), а также сравнение экспериментальных данных с теоретической моделью спектра поглощения, основанной на явлении собственного поглощения и общей теории прямых межзонных оптических переходов. Проведен графический расчет ширины запрещенной зоны по наклону экспериментальной характеристики поглощения.

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

Ключевые слова: InGaAs, МОСVD, диэлектрическая проницаемость, эпитаксия, коэффициент поглощения, зона Бриллюэна, расчет, экспериментальные данные.

Введение

В последние годы огромный интерес вызывают полупроводниковые гетероструктуры InGaAs различной архитектуры, используемые для фотоприемных устройств (ФПУ) с высокими фотоэлектрическими параметрами [1—3]. Спектральные характеристики токовой чувствительности фотоприемных устройств на основе InGaAs показывают, что на сегодняшний день это лучший материал коротковолнового ИК-диапазона спектра для приборов ночного видения и волоконно-оптических линий связи [4].

Тройные соединения InGaAs имеют ширину запрещенной зоны от 0,35 эВ (3,5 мкм) для InAs до 1,43 эВ (0,87 мкм) для GaAs. Изменяя состав раствора поглощающего слоя InGaAs, можно достичь максимума токовой чувствительности для желаемой длины волны при высоком отношении сигнал/шум.

Целью данной работы являлось исследование и расчет спектральной зависимости коэффициента поглощения для эпитаксиальных слоев InGaAs, а также сравнение экспериментальных данных с теоретической моделью спектра поглощения, основанной на явлении собственного поглощения и общей теории прямых межзонных оптических переходов. Это даст возможность проводить предварительную оценку качества и степени пригодности структур на основе InGaAs для изготовления многоэлементных ИК ФПУ коротковолнового диапазона спектра.

Исследуемые структуры

Исследуемые гетероэпитаксиальные структуры InGaAs выращивались эпитаксией из разреженной смеси газов металлоорганических соединений (МОСГЭ) при их термическом разложении и осаждении на нагретую подложку. Данная технология является одной из передовых при формировании сложных многокомпонентных структур полупроводниковых соединений групп A_3B_5 , например, таких как InGaAs и InGaAsP на подложках InP (100).

Мосгидридной эпитаксией выращиваются сверхтонкие слои с заданной концентрацией, причем этот процесс происходит при сравнительно низких температурах роста (620—650 °С). Известно, что основные трудности при выращивании ГЭС InGaAs методом МОСГЭ связаны с подготовкой подложек с необходимой морфологией поверхности, а именно, с обеспечением доступности

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹,
Никонов Антон Викторович, ведущий инженер НИЦ¹,
зам. зав. кафедрой².

¹ АО «НПО «Орион».

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

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

² Московский физико-технический институт

(государственный университет).

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

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2016 г.

© Яковлева Н. И., Никонов А. В., 2016

и чистоты исходных компонентов, с разработкой модели процесса роста, с возможностями контроля качества выращиваемых слоев непосредственно в ростовой камере.

Исследования края собственного поглощения структур InGaAs и обсуждение результатов

Область краевого поглощения в материалах группы A_3B_5 можно рассматривать с точки зрения квантово-механических приближений. В этом случае коэффициент поглощения рассчитывается через мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_2 , которая определяется волновыми функциями и собственными значениями энергии электронов для прямых разрешенных по симметрии межзонных переходов в идеальном кристалле [5, 6]. В этом приближении величину ϵ_2 можно представить как произведение сомножителей, одним из которых является комбинированная плотность состояний $\rho_{cv}(\hbar\omega)$, зависящая от энергетического спектра электронов и дырок вблизи краёв зон E_C и E_V , а другим — межзонный матричный элемент P_{CV} , связанный с вероятностью межзонных переходов.

Комплексная диэлектрическая функция представляется в виде формулы

$$\epsilon_2(\hbar\omega) = \frac{4\pi^2 e^2}{m_0^2 \omega^2} \langle |P_{CV}|^2 \rangle \rho_{CV}(\hbar\omega).$$

В данной формуле квадрат модуля матричного элемента оператора квазиимпульса определяется через амплитуды функций Блоха, описывающие состояние электронов вблизи дна зоны проводимости и потолка валентной зоны:

$$|P_{CV}|^2 = \left| k_0 \int u_C^*(r) \left(\frac{\hbar}{i} \nabla \right) u_V(r) dr \right|^2.$$

Комбинированная плотность состояний определяется как интеграл по всем состояниям в двух зонах с энергиями E_C и E_V , которые удовлетворяют закону сохранения энергии при оптическом переходе. Таким образом, справедливо следующее выражение:

$$\rho_{CV}(\hbar\omega) = \frac{2}{2\pi \cdot \hbar^3} \int_{S(\hbar\omega)} \frac{dS}{|\nabla_P(E_C - E_V)|}.$$

Данный интеграл берётся по поверхности постоянной разности энергий.

$$E_C - E_V = \hbar\omega.$$

В формуле для диэлектрической постоянной предполагается, что валентная зона полностью

заполнена электронами, а зона проводимости — пуста, т. е. функции заполнения соответствующих состояний равны $f_V = 1$, $f_C = 0$.

В случае простого параболического закона дисперсии и симметрии энергетических зон вблизи экстремумов зависимость энергии от квазиимпульса в обеих зонах может быть выражена через эффективные массы $2m_C^*$, $2m_V^*$. При вычислении коэффициента поглощения в данной модели используются законы дисперсии энергии для зоны проводимости $E_{(C)}(k)$ и валентной зоны $E_{(V)}(k)$, представленные формулами:

$$E_{(C)} = E_C + \frac{p^2}{2m_C^*},$$

$$E_{(V)} = E_V - \frac{p^2}{2m_V^*}; \quad dS = p^2 d\Omega$$

Таким образом, $E_{(C)} - E_{(V)} = \hbar\omega = E_g + \frac{p^2}{2 \cdot m_{CV}^*}$,

где $\frac{1}{m_{CV}^*} = \frac{1}{m_C^*} + \frac{1}{m_V^*}$ — эффективная масса.

Из последней формулы можно получить уравнение для импульса

$$p = \sqrt{2 \cdot m_{CV}^* \cdot (E_g - \hbar\omega)}.$$

Дифференцируя $\frac{\partial p}{\partial \omega}$, получим выражение:

$$\frac{\partial p}{\partial \omega} = \sqrt{2m_{CV}^*} \cdot \frac{\hbar}{2 \cdot \sqrt{(E_g - \hbar\omega)}}.$$

Собирая приведенные уравнения под знак интеграла, суммируя по всем возможным состояниям и интегрируя по телесному углу Ω , получим комбинированную плотность состояний в виде формулы:

$$\rho_{CV}(\hbar\omega) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_{CV}^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \cdot (\hbar\omega - E_g)^{1/2}.$$

Для полупроводниковых соединений на основе арсенидов с прямыми разрешёнными переходами ограничимся областью энергии вблизи краёв зоны проводимости и валентной зоны. При этом коэффициент поглощения в первом приближении пропорционален квадратному корню выражения $\sqrt{\hbar\omega - (E_C - E_V)}$.

Максимум валентной зоны и основной минимум зоны проводимости расположены в центре зоны Бриллюэна (в точке Г) (рис. 1). В зоне проводимости имеются также боковые, неосновные минимумы вблизи краёв зоны Бриллюэна в точках Х и L, которые влияют на спектр поглощения при больших значениях $\hbar\omega \gg E_g$. Для спектров вблизи E_g важно вырождение валентной зоны в точке Г, в которой соприкасаются две зоны — зона лёгких дырок с эффективной массой m_{Vl}^* и зона тяжёлых дырок с эффективной массой m_{Vh}^* . Вблизи максимума E_V имеется зона, возникшая за счет спин-орбитального взаимодействия с характерной энергией Δ_{SO} .

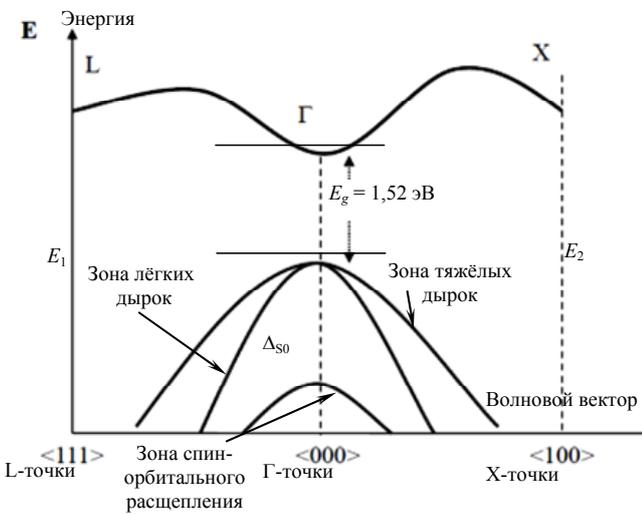


Рис. 1. Зонная диаграмма тройного соединения InGaAs.

Для данной структуры квадрат матричного элемента определяется из формулы:

$$\frac{2|P_{CV}|^2}{m_0} = E_g \left(\frac{m_0}{m_C^*} - 1 \right) \left(\frac{E_g + \Delta_{SO}}{E_g + \frac{2}{3}\Delta_{SO}} \right).$$

Численное значение отношения составляет

$$\frac{2|P_{CV}|^2}{m_0} \approx 23 \text{ эВ. С точностью до } 10\% \text{ при прямых}$$

межзонных переходах оно одинаково для всех соединений группы A_3B_5 со структурой цинковой обманки. Таким образом, в выбранном приближении значение ширины запрещенной зоны оказывается связанным с эффективной массой электронов.

Для прямозонной энергетической структуры полупроводникового соединения A_3B_5 , коэффициент поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ может быть представлен в виде формулы из работы [7] (стр. 27):

$$\alpha = \left(\frac{A}{\hbar\omega} \right) (\hbar\omega - E_g)^{1/2}.$$

При этом постоянная A , которая в общем случае зависит от параметров Δ_{SO} , E_g , m_C^* , может быть определена с помощью формулы из работы [8]:

$$A = 5,7 \cdot 10^5 \left[\frac{1}{n} \cdot \left(\frac{m_{CV}^*}{m_0} \right) \right]^{3/2}, \text{ [см}^{-1} \cdot \text{эВ}^{1/2}]$$

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента поглощения α от энергии кванта излучения $E = \hbar\omega$ для материала $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$ для трех значений состава $y = 0,1; 0,5; 1,0$ мол. дол., вычисленные по вышепредставленной формуле.

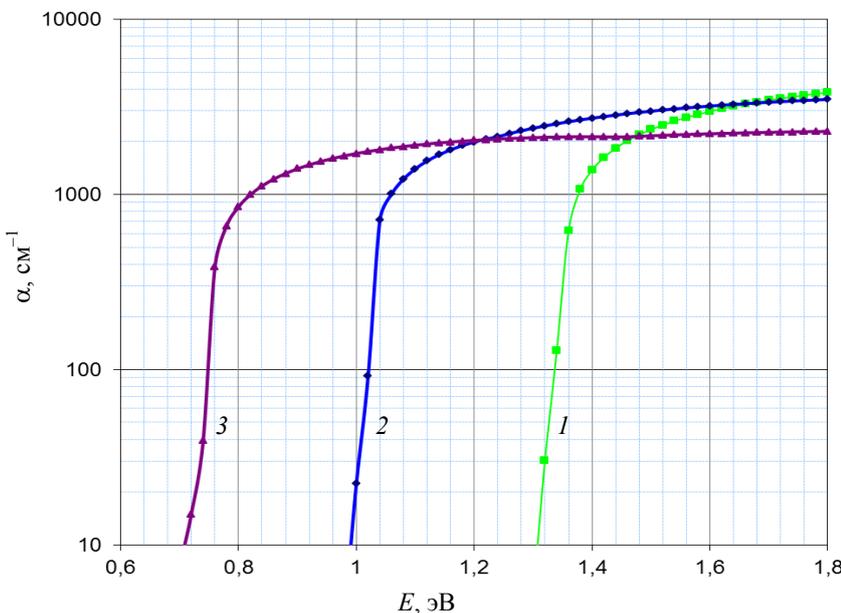


Рис. 2. Зависимость коэффициенты поглощения α от энергии кванта излучения E для материала $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$ для значений состава $y = 0,1; y = 0,5; y = 1,0$ мол. дол. (InAs) в области точки Г зонной диаграммы. Кривая 1 — $y = 0,1$; кривая 2 — $y = 0,5$; кривая 3 — $y = 1$.

Край оптического поглощения изучался на структурах InGaAs, выращиваемых методом МОСГЭ на подложках InP (100) в горизонтальном щелевом реакторе при пониженном давлении. Исследуемые образцы состояли из оптически прозрачной подложки InP (100) и *p-i-n*-структуры с поглощающим эпитаксиальным слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Фоновая концентрация легирующей примеси которого составляла $N_D = (0,7\text{—}2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а толщина $d \approx 2,0 \text{ мкм}$. Спектры пропускания и отражения

фоточувствительных структур измерялись на спектрофотометре Cary 6000 при одинаковых значениях волновых чисел в диапазоне от 400 до 7500 см^{-1} при температуре $T = 300 \text{ К}$.

На рис. 3 представлены спектры пропускания и отражения образца ГЭС InGaAs № V2072, выращенного методом МОСГЭ.

По экспериментальным данным спектров пропускания и отражения рассчитаны и построены экспериментальная и теоретическая зависимости коэффициента поглощения (рис. 4).

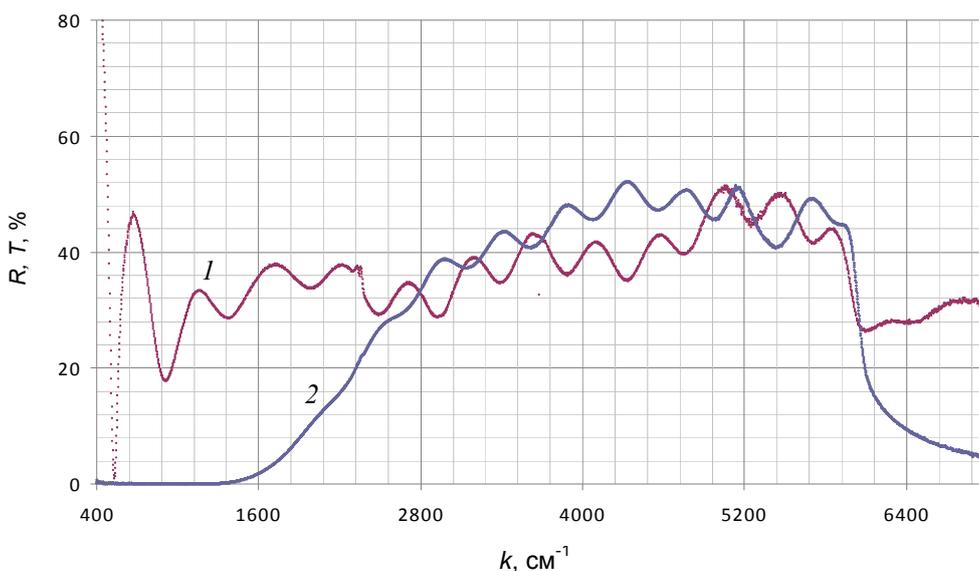


Рис. 3. Спектры пропускания и отражения образца ГЭС InGaAs № V2072 в зависимости от волнового числа k . Кривая 1 — коэффициент отражения R ; кривая 2 — коэффициент пропускания T .

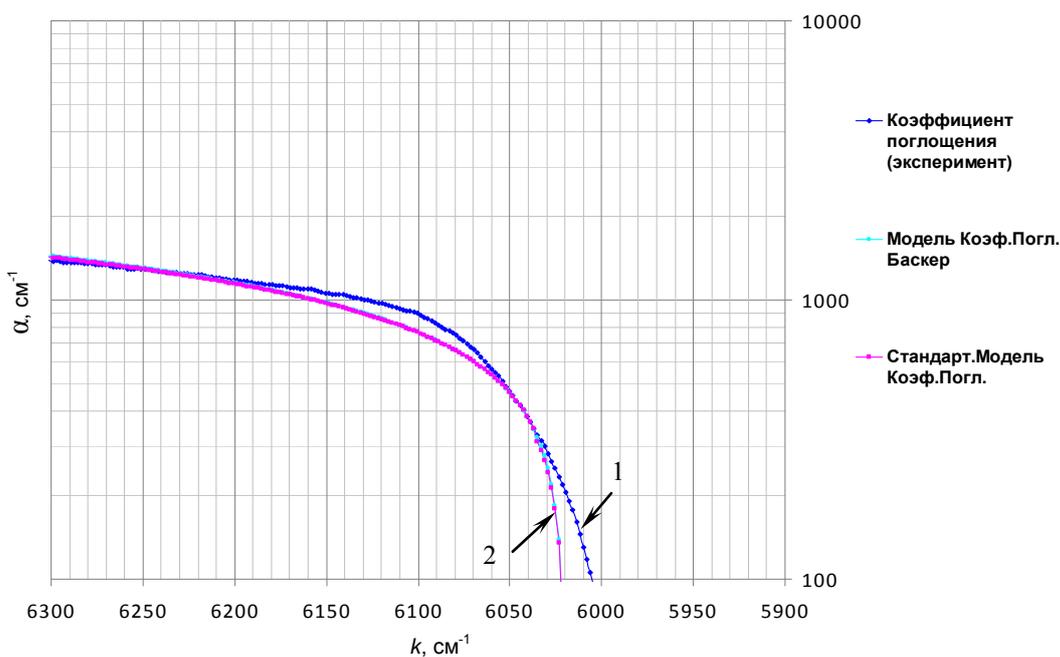


Рис. 4. Экспериментальный (1) и теоретический (2) спектр поглощения образца ГЭС InGaAs № V2072.

Теоретические зависимости спектра поглощения рассчитывались по формуле

$$\alpha = \left(\frac{A}{\hbar\omega} \right) (\hbar\omega - E_g)^{1/2}$$

и по эмпирическим формулам Адаши при моделировании коэффициента поглощения в окрестности точки Γ зоны Бриллюэна [9].

Из рис. 4 следует хорошее соответствие теории и эксперимента в рассмотренной области энергий и точке Γ зонной диаграммы для образца ГЭС InGaAs № V2072, выращенного методом МОСГЭ, что подтверждает высокое структурное совершенство полученного материала. Макси-

мальная производная достигается в точке со значением энергии $E_{opt} = 0,753$ эВ, что почти идеально соответствует теоретическому значению ширины запрещенной зоны $E_g = 0,75$ эВ для поглощающего слоя In_{0,53}Ga_{0,47}As.

По экспериментальным данным для измененного образца ГЭС InGaAs № V2072 графическим методом определена ширина запрещенной зоны. Для этого проведен расчет и построена экспериментальная зависимость $(\alpha \cdot \hbar\omega)^2$ от энергии квантов $\hbar\omega$, т. е. зависимость:

$$M = (\alpha \cdot \hbar\omega)^2 = A^2 \cdot (\hbar\omega - E_g),$$

которая представлена на рис. 5.

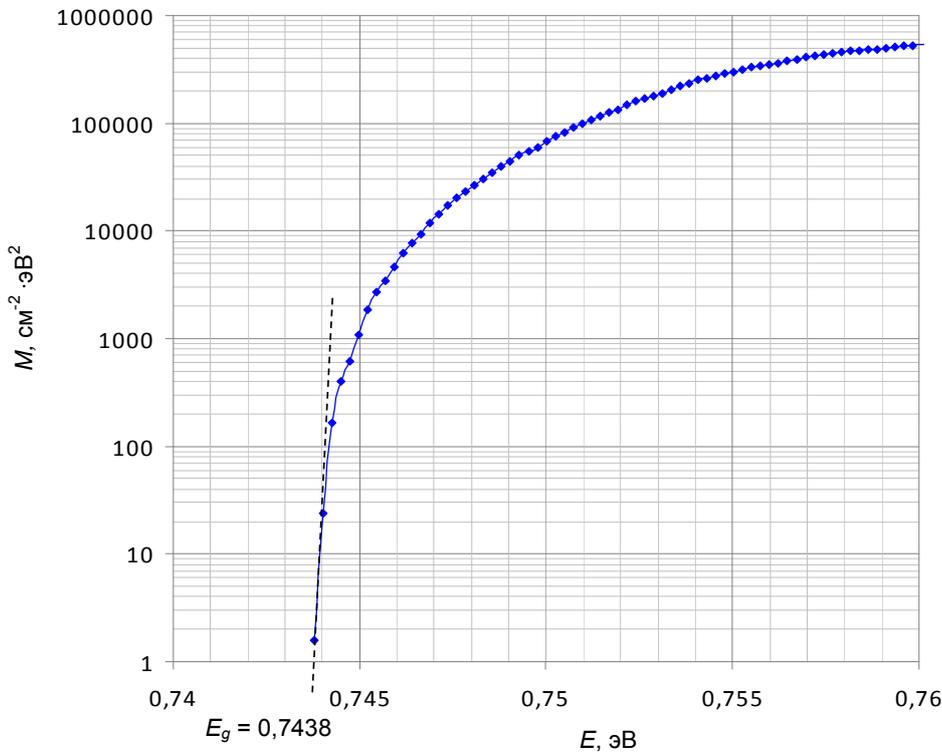


Рис. 5. Зависимость M от энергии кванта для прямых разрешенных переходов вблизи краев запрещенной зоны в точке Γ зоны Бриллюэна для образца ГЭС InGaAs № V2072.

Ширина запрещенной зоны образца ГЭС InGaAs № V2072 составила $E_g = 0,7438$ эВ, что дополнительно подтверждает структурное совершенство материала и отсутствие локальных неоднородностей состава в поглощающем слое In_{0,53}Ga_{0,47}As.

Заключение

Проведены исследования края собственного поглощения образцов ГЭС InGaAs, выращенных методом МОСГЭ на подложках InP. Показано хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных исследованных образцов, что указывает на кристаллическое совершенство

поглощающего слоя InGaAs. Получено почти полное совпадение значения ширины запрещенной зоны со значением E_{opt} (точки совмещения корневой и экспоненциальной зависимостей коэффициента поглощения). Графический расчет ширины запрещенной зоны $E_g = 0,7438$ эВ подтвердил правильность выводов и показал хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных при исследованиях материалов группы A_3B_5 .

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-2787.2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
3. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Лопухин А. А., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
4. Белкин М. Е., Сигов А. С. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901.
5. Лебедева В. В. Экспериментальная оптика. — М.: Изд. МГУ. 1994.
6. Юнович А. Э. Оптические явления в полупроводниках. — М.: Изд. МГУ. 1989. .
7. Войцеховский А. В., Ижнин И. И., Савчин В. П., Вакив Н. М. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. — Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013.
8. Юнович А. Э., Лукьянов Ф. А. Оптические явления в полупроводниках. — М.: Изд. МГУ. 2007.
9. Adachi Sadao // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 66. No. 12. P. 6030.

Investigation and calculation of the absorption spectra in epitaxial InGaAs structures

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

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

Received March 15, 2016

The absorption spectra of InGaAs structures grown by metal organic vapor deposition have been investigated on the basis of the fundamental absorption edge caused by transitions of electrons from the valence band to the conduction band. The value of an energy gap width has been calculated using the measured absorption spectrum.

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

Keywords: InGaAs, MOCVD, dielectric constant, epitaxy, absorption coefficient, Brillouin zone, calculation, experimental data.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. 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].
3. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, and N. I. Iakovleva, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 10 (2013).
4. M. E. Belkin and A. S. Sigov, *J. Commun. Techn. Electronics* **54**, 901 (2009).
5. V. V. Lebedeva, *Experimental Optics* (MGU, Moscow, 1994) [in Russian].
6. A. E. Yunovich, *Optical Phenomena in Semiconductors* (MGU, Moscow, 1989) [in Russian].
7. A. V. Voitsekhovskii, I. I. Izhnin, V. P. Savchin, and N. M. Vakiv, *Physical Bases of Semiconductor Photoelectronics* (Tomsk State Univer., Tomsk, 2013) [in Russian].
8. A. E. Yunovich and F. A. Luk'yanov, *Optical Phenomena in Semiconductors* (MGU, Moscow, 2007) [in Russian].
9. Sadao Adachi, *J. Appl. Phys.* **66**, 6030 (1989).