

# Исследование активации примеси в InP, имплантированном ионами бериллия, методом фотоотражения

© Л.П. Авакянц<sup>¶</sup>, П.Ю. Боков, А.В. Червяков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия

(Получена 17 мая 2004 г. Принята к печати 24 мая 2004 г.)

Методом спектроскопии фотоотражения исследован процесс активации примеси в кристаллах InP, имплантированных ионами  $\text{Be}^+$  с энергией 100 кэВ и дозой  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  и подвергнутых термическому отжигу в течение 10 с. При температурах отжига до  $400^\circ\text{C}$  в спектрах отсутствуют линии, характерные для кристаллического InP, что свидетельствует о разупорядочении кристаллической решетки вследствие ионной имплантации. При температурах отжига  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  в спектрах наблюдаются линии, связанные с фундаментальным переходом InP (1.34 эВ) и переходом между зоной проводимости и спин-орбитально отщепленной подзоной валентной зоны (1.44 эВ), что указывает на восстановление кристаллической структуры. Для образцов, отожженных при температуре  $800^\circ\text{C}$ , в спектре фотоотражения наблюдаются осцилляции Франца–Келдыша, что свидетельствует об активации примеси. По периоду осцилляций определена концентрация свободных носителей, которая составила  $2.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

## 1. Введение

Фосфид индия является важным полупроводниковым материалом, применяемым при изготовлении высокочастотных полевых транзисторов из-за высокой подвижности носителей и сравнительно широкой запрещенной зоны ( $\sim 1.35$  эВ при  $300^\circ\text{C}$ ). Одним из эффективных методов формирования полупроводниковых слоев с заданным профилем легирования является ионная имплантация с последующим отжигом. Внедрение в кристалл высокоэнергетичных ионов примеси сопровождается разупорядочением кристаллической решетки. Для устранения радиационных дефектов и электрической активации примеси применяется отжиг различного типа (тепловой, лазерный, быстрый термический). Поэтому актуальной задачей является исследование характеристик ионно-легированных слоев до и после отжига с целью выбора технологических режимов, обеспечивающих оптимальную активацию примеси.

В ряде работ (например, [1]) эта задача решалась с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света. Этот метод дает информацию как о структурных, так и об электрофизических свойствах вследствие связи продольного LO-фонона с плазменными колебаниями в полярных полупроводниках. Однако определение такого важного параметра как концентрация носителей с помощью комбинационного рассеяния для случая полупроводников  $p$ -типа (к числу которых относится InP, легированный бериллием) оказывается затруднительным из-за слабой зависимости частоты связанных фонон-плазмонных мод от концентрации носителей [2]. В настоящей работе для этих целей используется бесконтактный метод спектроскопии фотоотражения, который является чувствительным при исследовании как особенностей зонной структуры полупроводника, так и встроенных электрических полей, величины которых определяются профилем распределения примеси и ее концентрацией.

## 2. Образцы и методика эксперимента

Нами исследовались образцы нелегированного  $n$ -InP [ $n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ] с ориентацией поверхности (100). После механической полировки и химического травления полупроводниковые пластины имплантировались ионами бериллия с энергией 100 кэВ и дозой  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Далее образцы подвергались термическому отжигу в течение 10 с при температурах от  $300$  до  $800^\circ\text{C}$ . Спектры фотоотражения регистрировались на установке, описанной в работе [3]. Спектральная ширина щелей монохроматора составляла 1 мэВ. Модуляция отражения осуществлялась He–Ne-лазером (мощность 10 мВт, длина волны 632.8 нм) на частоте 370 Гц. Измерение спектров проводилось при комнатной температуре.

## 3. Результаты и обсуждение

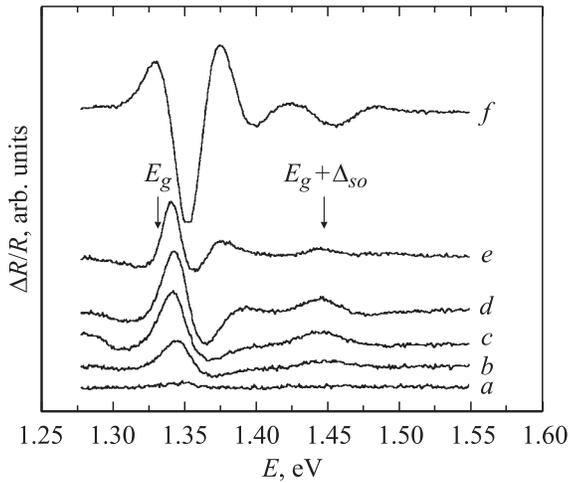
На рис. 1 приведены спектры ФО образцов InP, подвергнутых термическому отжигу при различных температурах. При температурах от  $400$  до  $700^\circ\text{C}$  в спектрах наблюдаются линии, связанные с фундаментальным переходом InP ( $E_g = 1.34$  эВ) и переходом между зоной проводимости и отщепленной подзоной валентной зоны ( $E_g + \Delta_{so} = 1.44$  эВ) в силу спин-орбитального взаимодействия (см. рис. 2). Как видно из рис. 1, по мере увеличения температуры отжига растет интенсивность этих линий и уменьшается их ширина. Кроме того, линия  $E_g$  смещается в область меньших энергий. Это может быть связано с восстановлением кристаллической структуры InP.

Для образцов с температурами отжига  $400\text{--}700^\circ\text{C}$  спектры ФО имеют вид, характерный для низкополевого случая, и могут быть описаны формулой Аспнеса [4]:

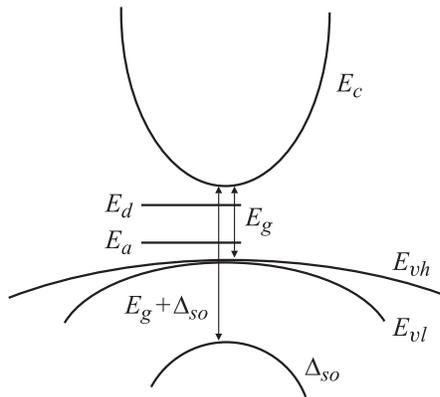
$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \text{Re} \left[ A e^{i\varphi} (E - E_i + \Gamma)^{-m} \right], \quad (1)$$

где  $A$ ,  $\varphi$  — амплитудный и фазовый параметры,  $E$  — энергия зондирующего излучения,  $E_i$  — положение

<sup>¶</sup> E-mail: avakants@genphys.phys.msu.ru



**Рис. 1.** Спектры фотоотражения InP ионно-имплантированным  $Vc^+$  с дозой  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  после 10-секундного термического отжига при температурах: *a* — 300, *b* — 400, *c* — 500, *d* — 600, *e* — 700 и *f* — 800 °C.



**Рис. 2.** Схема зонной структуры InP в окрестности точки  $\Gamma$ .  $E_c$  — зона проводимости,  $E_{vh}$  — подзона тяжелых дырок валентной зоны,  $E_{vl}$  — подзона легких дырок валентной зоны,  $\Delta_{so}$  — спин-орбитально отщепленная подзона валентной зоны,  $E_a, E_d$  — акцепторные и донорные уровни.

*i*-й спектральной особенности,  $\Gamma$  — феноменологический параметр уширения,  $m$  — параметр, определяемый видом критической точки и порядком производной диэлектрической проницаемости  $\epsilon(E)$  по энергии. В рассматриваемом случае  $m = 2$  [4]. Основные параметры спектральных линий были определены в результате аппроксимации низкополевых спектров суммой двух выражений (1) для линий  $E_g$  и  $E_g + \Delta_{so}$  соответственно.

На рис. 3 показана зависимость положения линии  $E_g$  от температуры отжига. Как видно, эта линия с ростом температуры отжига смещается в область меньших энергий. Подобные сдвиги наблюдались [5] при исследовании компенсации проводимости в *n*-GaAs при имплантации ионами  $B^+$ . Наблюдаемый сдвиг линии  $E_g$  нельзя связывать ни с размерными эффектами, ни с механическими напряжениями, так как каждый из ука-

занных случаев дал бы соответствующий вклад в сдвиг линии  $E_g + \Delta_{so}$  (см. рис. 2). В то же время по мере роста температуры отжига не наблюдается смещения линии  $E_g + \Delta_{so}$ . По-видимому, наблюдаемый сдвиг связан с тем, что в дополнение к донорным уровням у дна зоны проводимости добавляются акцепторные уровни около потолка валентной зоны ( $E_a$  на рис. 2). При этом, в силу появления акцепторных уровней, энергия перехода  $E_g$  будет уменьшаться на величину энергии активации акцептора  $E_a$ . В то же время появление этих уровней не должно влиять на энергию перехода  $E_g + \Delta_{so}$ .

Для образца, отожженного при температуре 800 °C, в спектре фотоотражения вблизи фундаментального края поглощения наблюдаются осцилляции Франца–Келдыша: спектр принимает так называемую среднеполевую форму и скачкообразно смещается в область меньших энергий (см. рис. 3), что свидетельствует об активации примеси.

Для описания среднеполевых спектров с осцилляциями Франца–Келдыша мы использовали приближение [4]

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \cos \left[ \frac{2}{3} \left( \frac{\hbar\omega - E_g}{\hbar\Omega} \right)^{3/2} + \frac{\pi(d-1)}{4} \right], \quad (2)$$

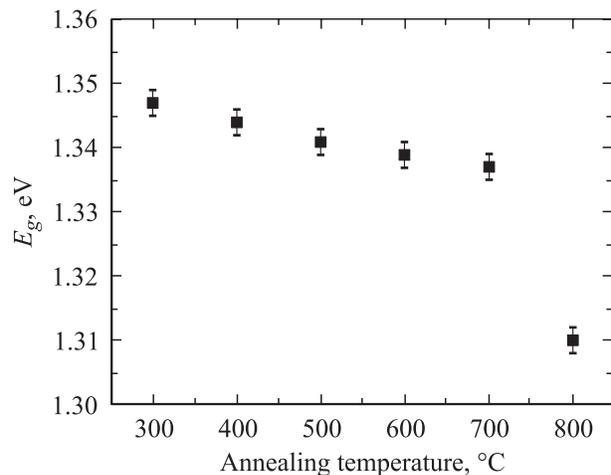
где  $\hbar\omega$  — энергия зондирующего излучения,  $E_g$  — энергия фундаментального перехода,  $\hbar\Omega$  — электрооптическая энергия:

$$\hbar\Omega = \left( \frac{e^2 E_s^2 \hbar^2}{8\mu} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

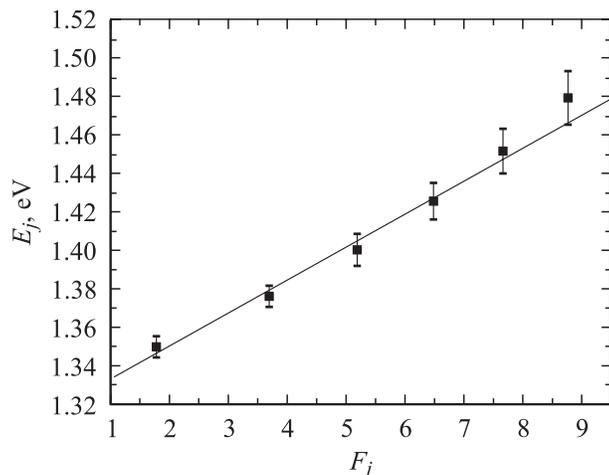
Здесь  $\mu$  — приведенная межзонная эффективная масса:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}, \quad (4)$$

$m_e^*, m_h^*$  — эффективные массы электрона в зоне проводимости и дырки в валентной зоне,  $E_s$  — встроенное поле



**Рис. 3.** Зависимость положения спектральной линии, соответствующей фундаментальному переходу InP ( $E_g$ ), от температуры отжига.



**Рис. 4.** Зависимость положения экстремумов  $E_j$  осцилляций Франца–Келдыша от  $F_j$  (6) для образца, отожженного при температуре 800°C. Точки — положения экстремумов осцилляций Франца–Келдыша, линия — результат обработки по методу наименьших квадратов.

полупроводника,  $d$  — размерность критической точки. Для прямых межзонных переходов в InP  $d = 3$ . При этом положения экстремумов осцилляций  $(\hbar\omega)_j$  даются выражением

$$(\hbar\omega)_j = \hbar\Omega(F_j) + E_g, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где

$$F_j \left[ 3\pi \frac{j - 1/2}{2} \right]^{2/3}. \quad (6)$$

На рис. 4 приведена зависимость положения экстремумов осцилляций Франца–Келдыша от  $F_j$  (6). Как видно из рисунка, зависимость хорошо аппроксимируется прямой линией, что хорошо согласуется с (5), (6). Считая межзонную эффективную массу  $\mu$  равной  $0.071m_e$  [6] для переходов между зоной проводимости и подзоной тяжелых дырок валентной зоны, мы определили величину встроенного поля  $E_s$  и энергию фундаментального перехода  $E_g$  для указанного образца. Эти величины составили  $E_s = 50$  кВ/см и  $E_g = 1.310$  эВ.

Известно [7], что величина встроенного электрического поля определяется приповерхностной областью пространственного заряда и зависит от концентрации носителей  $n$  и поверхностного потенциала  $V_s$  следующим образом:

$$E_s = \left[ \frac{2en(V_s - kT/e)}{\varepsilon\varepsilon_0} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon\varepsilon_0 = 12.4 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см,  $V_s = 0.64$  В — поверхностный потенциал и  $\varepsilon = 12.4$  — статическая диэлектрическая проницаемость InP (001) ( $\varepsilon$  и  $V_s$  взяты в [6]). Тогда рассчитанная из (7) величина встроенного поля соответствует концентрации носителей  $2.2 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ .

## 4. Заключение

Методом спектроскопии ФО проведено исследование процесса активации примеси в InP, имплантированном ионами Be $^+$  с энергией ионов 100 кэВ и дозой  $10^{13}$  см $^{-2}$ .

Наблюдаемые изменения в спектрах ФО (рост интенсивности и уменьшение ширины линий) можно связать с восстановлением кристаллической структуры InP. Появление в спектрах ФО осцилляций Франца–Келдыша свидетельствует об активации примеси, которая происходит при температуре 800°C. Для дозы бериллия  $10^{13}$  см $^{-2}$  концентрация носителей, определенная из периода осцилляций Франца–Келдыша, составила  $2.2 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ .

Полученные результаты показывают, что спектроскопия ФО может быть использована для оценки концентрации носителей и оптимизации режимов отжига в ионно-легированном InP.

## Список литературы

- [1] L.P. Avakyants, V.S. Gorelik, E.D. Obraztsova. J. Molecul. Struct., **219**, 141 (1991).
- [2] M. Gargouri, B. Prevot, C. Schwab. J. Appl. Phys., **62** (9), 3902 (1987).
- [3] Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, И.П. Казаков, А.В. Червяков. Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия, **4**, 48 (2002).
- [4] D.E. Aspnes. Surf. Sci., **37**, 418 (1973).
- [5] Л.П. Авакянц, В.С. Горелик, А.Б. Коршунов, Э.М. Темпер, А.В. Червяков. Кр. Сообщ. по физике ФИАН, вып. 2, 17 (1999).
- [6] P.J. Hughes, B.L. Weiss, T.J.S. Hosea. J. Appl. Phys., **77** (12), 6472 (1995).
- [7] R.N. Bhattacharya, H. Shen, P. Parayanthal, F.H. Pollak, T. Coutts, H. Aharoni. Phys. Rev. B, **37** (8), 4044 (1988).

Редактор Л.В. Беляков

## Photoreflexion investigations of the dopant activation in the InP doped with the beryllium ions

L.P. Avakyants, P.Yu. Bokov, A.V. Chervyakov

Lomonosov Moscow State University,  
119992 Moscow, Russia

**Abstract** The processes of the dopant activation in the InP crystals implanted with Be $^+$  ions (energy 100 keV, dose  $10^{13}$  cm $^{-2}$  and subsequent thermal annealing during 10 s) have been studied by means of photoreflexion spectroscopy. Spectral lines of the crystal InP were absent in the photoreflexion spectra of the samples annealed at temperatures less than 400°C. This fact is connected with the misordering of the crystal structure due to the ion implantation. In the temperature range 400–700°C the lines from InP band gap (1.34 eV) and conductance band-spin-orbit splitting valence subband (1.44 eV) have been observed due to the recovery of the crystal structure. In the photoreflexance spectra of a 800 annealed sample the Franz–Keldysh oscillations have been observed, which can be an evidence in favour of the dopant activation. Carrier concentration calculated from the period of Franz–Keldysh oscillations was equal to  $2.2 \cdot 10^{16}$  cm $^{-3}$ .