

06

## Диффузия бериллия и его влияние на люминесцентные и электрические свойства InP

© В.В. Агаев, И.Н. Арсентьев, С.Г. Метревели,  
С.П. Старосельцева, Г.И. Яблочкина

Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Владикавказ

E-mail: skgtu@skgtu.ru

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург

E-mail: arsentyev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 февраля 2006 г.

Исследовалась диффузия бериллия в InP. Установлена температурная зависимость коэффициента диффузии бериллия в InP, которую можно представить выражением  $D = 6.3 \cdot 10^{-5} \exp(-\frac{1.4}{kT})$ ,  $\text{cm}^2/\text{s}$ , по которому величина коэффициента при температуре  $768^\circ\text{C}$  составляет  $D = 1.07 \cdot 10^{-11} \text{cm}^2/\text{s}$ . Проведенные люминесцентные и электрические исследования подтвердили, что бериллий является мелким акцептором с энергией активации  $0.03 \pm 0.005 \text{meV}$ .

PACS: 66.30.-h, 78.55.-m

Фоточувствительность полупроводниковых структур на основе фосфида индия давно привлекает исследователей в плане создания высокоэффективных фотопреобразователей, чувствительных в ультрафиолетовой области.

В большинстве оптоэлектронных приборов используется  $p-n$ -переход. Для создания  $p$ -слоя пленку InP, как правило, легируют цинком или кадмием, однако они обладают высокой скоростью диффузии [1,2], что затрудняет создание  $p-n$ -перехода на определенной глубине от поверхности структуры. Как известно, положение  $p-n$ -перехода существенно влияет на чувствительность фотоприемников, особенно работающих в ближней ультрафиолетовой области спектра [3]. Значительно меньшую скорость диффузии по сравнению с цинком и кадмием имеет бериллий [4] и, следовательно, с большей точностью можно задать положение  $p-n$ -перехода. Поэтому имеет смысл исследовать диффузию и влияние бериллия на электрические и люминесцентные свойства InP.

Так как Ве не имеет стабильных радиоактивных изотопов, мы не могли для исследования его диффузионного профиля воспользоваться широко известным методом „меченых атомов“. Распределение Ве исследовалось двумя методами: 1) методом послойного сошлифовывания с последующим измерением электропроводности кристалла, 2) методом  $p$ - $n$ -перехода.

Сущность первого метода состоит в том, что если известна электропроводность  $\sigma$  тонкого диффузионного слоя толщиной  $\Delta x$ , то концентрация носителей тока  $p$  в этом слое может быть найдена по известной формуле

$$\sigma = e p \mu \Delta x. \quad (1)$$

Электропроводность тонкого слоя может определяться как разность электропроводностей образца до и после сошлифовывания

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2.$$

Определение концентрации носителей по формуле (1) требует знания подвижности  $\mu$  как функции концентрации. Такая зависимость может быть хорошо аппроксимирована по экспериментальным данным, приведенным в работе [5] следующей эмпирической формулой:

$$\mu = 4.6 \cdot 10^5 p^{-0.21}. \quad (2)$$

Учитывая, что из измерений электропроводности мы получим лишь избыточную концентрацию носителей, из формул (1) и (2):

$$p = n + \left[ \frac{I}{4.6 \cdot 10^5 e \Delta x} \left( \frac{1}{U_1} - \frac{1}{U_2} \right) \right]^{1.27}, \quad (3)$$

где  $p$  — концентрация дырок в слое  $\Delta x$ ,  $n$  — концентрация электронов в исходном образце  $\approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $U_1, U_2$  — падение напряжения на зондах до и после сошлифовывания слоя  $\Delta x$ .

Концентрационный профиль диффузии исследовался также методом  $p$ - $n$ -перехода. При этом в ампулу для отжига одновременно закладывалось 10–15 образцов InP различной концентрации с напыленным слоем Ве,  $p$ - $n$ -переход выявлялся травлением, а его глубина измерялась на микроскопе МИМ-8. Если считать, что глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода определяется равенством концентрации электронов и дырок, можно

получить распределение концентрации диффузанта в зависимости от глубины  $p$ - $n$ -перехода.

Концентрационная зависимость  $Ve$  в InP аналогична концентрационной зависимости Zn и Cd. При концентрациях атомов бериллия  $10^{18} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  эта зависимость может удовлетворительно описываться функцией ошибок. Рассчитан коэффициент диффузии  $D$ , который равен  $D = 1.07 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$  (для  $768^\circ\text{C}$ ).

Коэффициент диффузии бериллия, определенный по глубине залегания  $p$ - $n$ -перехода, определялся по приближенной формуле  $D = \frac{x^2}{30t}$  и для температуры  $768^\circ\text{C}$  составлял  $D = 1.36 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ , что хорошо согласуется с предыдущим значением. Температурную зависимость коэффициента диффузии бериллия в InP можно аппроксимировать формулой

$$D = 6.3 \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{1.4}{kT}\right) \text{ cm}^2/\text{s}. \quad (4)$$

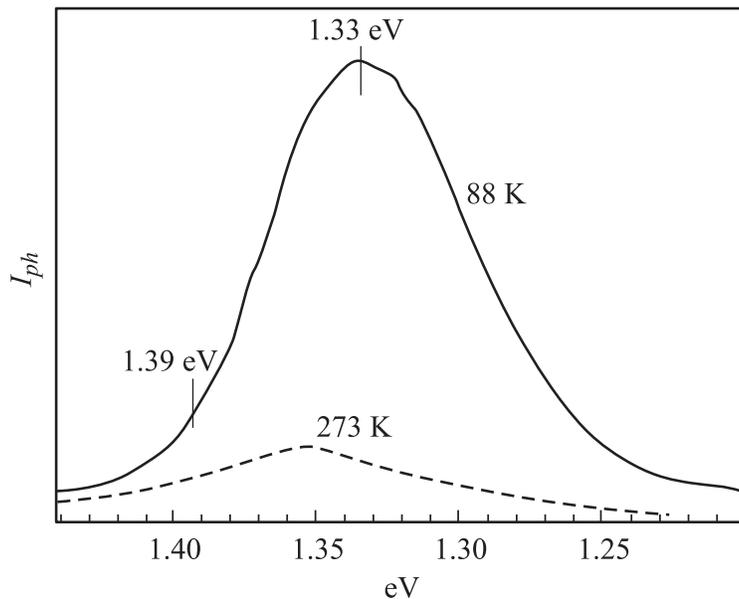
В данной работе исследовались электрические свойства образцов фосфида индия, легированные бериллием, полученные зонной плавкой [5], а люминесцентные в эпитаксиальных пленках, полученных методом жидкофазной эпитаксии [6]. При легировании фосфида индия навеска бериллия помещалась в кварцевый тигель с индием и в процессе вакуумного отжига индия при температуре  $800^\circ\text{C}$  бериллий перемешивался с индием периодическим наклоном ампулы.

При введении 0.02% (мольных процентов) бериллия получался фосфид индия электронного типа проводимости с концентрацией электронов  $n = 1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , а при 0.53% и выше — дырочного типа проводимости, с концентрацией дырок  $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Следует отметить, что хотя бериллий обладает достаточно высокой растворимостью в InP, однако при концентрациях  $Ve$  более 1% становится пористым и хрупким.

Температурные зависимости коэффициента Холла  $R$  и удельной электропроводности  $\sigma$  в образцах  $p$ -InP- $Be$  с концентрацией дырок  $p = 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  исследовались в интервале температур 80–300 К.

Ход кривых  $R\left(\frac{10^3}{T}\right)$  и  $\sigma\left(\frac{10^3}{T}\right)$  пологий, почти параллельный оси температур, из чего следует, что бериллий в InP является мелкой акцепторной примесью. Подвижность дырок плавно возрастает от  $\mu = 23 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  при 80 К до  $\mu = 30 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  при 300 К.



**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции InP–Be при температурах  $T = 88$  К и  $T = 273$  К.

На рис. 1 представлен спектр люминесценции эпитаксиальных пленок InP–Be при 80 К — сплошная линия, и при комнатной температуре — пунктирная линия. Спектры люминесценции получены по методике [7]. Как видно из рисунка, при азотной температуре спектр люминесценции имеет широкий пик, энергия которого  $h\nu = 1.33$  eV меньше ширины запрещенной зоны. Поскольку виден только один максимум, то, вероятнее всего, он связан с бериллием, образующим в запрещенной зоне InP мелкий акцепторный уровень. Мы полагаем, что процесс рекомбинации при этой температуре происходит именно через этот уровень.

Гашение интенсивности люминесценции в температурном интервале 80–300 К, приведенное на рис. 2, позволило вычислить энергию активации уровня Be в InP [8]. Энергия активации Be, рассчитанная по наклону прямой рис. 2, оказалась равной  $0.03 \pm 0.005$  meV,

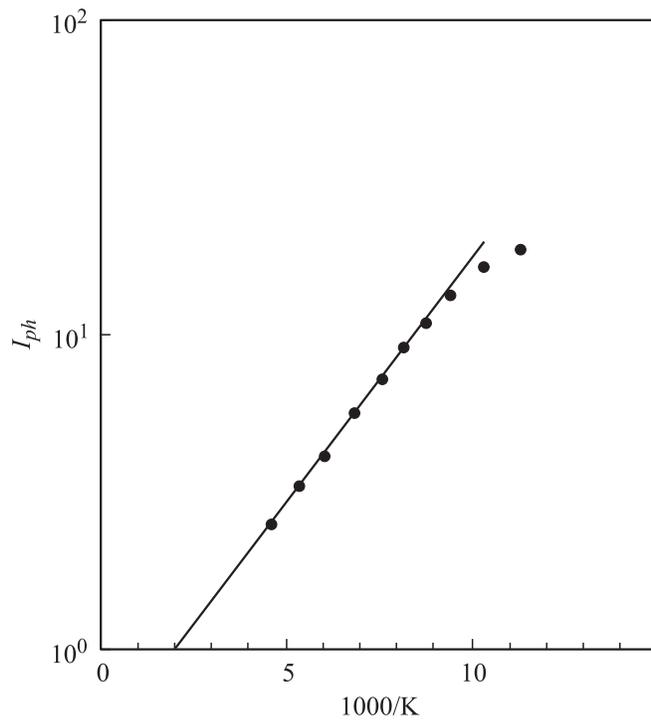


Рис. 2. Температурная зависимость максимума интенсивности люминесценции.

что соответствует мелкому акцепторному уровню. Как следует из электрических измерений, бериллий является акцепторной примесью в InP. Можно предположить, что наблюдаемый пик фотолюминесценции при низких температурах вызван переходами акцептор—зона.

## Список литературы

- [1] *Abrams E.B., Sumski S., Bonner W.A., Coleman J.J.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 50 (6), P. 4469–4470.
- [2] *Ohtsuka K., Yamazoe Y., Nishino T.* // Jap. J. of Appl. Phys. 1981. V. 20. N 6. P. 1113–1116.

- [3] Гореленок А.Т., Гореленок А.Т., Груздов В.Г., Тарасов И.С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 10. С. 2047–2059.
- [4] Kawamura Y., Ashi H., Nagai H. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54 (2). P. 841–846.
- [5] Метревели С.Г., Старосельцева С.П., Кулов В.С. // Электронная техника „Материалы“. 1977. В. 3. С. 62–63.
- [6] Гарбузов Д.З., Агаев В.В., Гореленок А.Т. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 9. С. 1538–1542.
- [7] Агаев В.В., Созаев В.А., Яблочкина Г.И. // „ПЛЕНКИ-2002“ / Материалы Международной НТК. 26–30 ноября 2002 г. Москва. М.: МИРЭА, 2002. Ч. 2. С. 62–64.
- [8] Агаев В.В., Метревели С.Г., Старосельцева С.П., Яблочкина Г.И. // Труды Международной конференции. „ФИЭМ’05“. Калуга: КГПУ, 2005. Т. 1. С. 175.