

Исследование влияния зонной структуры на диэлектрическую проницаемость
эпитаксиальных слоев соединений $A^{III}B^V$

Н.М. Куляхтина^{1,2}, А.В. Никонов^{1,2}, Н.И. Яковлева¹

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Матричные фотоприемники на основе четверного соединения InGaAsP являются отличным выбором для систем формирования изображений в коротковолновой области ИК-диапазона вследствие высокой квантовой эффективности и зрелости технологии их изготовления [1]. Благодаря прямой структуре энергетических зон данного материала обеспечиваются высокий коэффициент поглощения и высокое структурное совершенство с низкой плотностью дефектов.

Перед разработчиками фотоприемных устройств остро стоит задача контроля и трактовки характеристик ГЭС InGaAsP/InP вблизи края фундаментального поглощения: диэлектрической проницаемости, коэффициента поглощения, показателя преломления. Рассматриваемые характеристики изучались в ранних работах [2], но проведенные исследования характеризуют оптические свойства эпитаксиальных слоев на ограниченном диапазоне энергии излучения.

В данной работе реализовано моделирование диэлектрической проницаемости эпитаксиальных слоев соединений группы $A^{III}B^V$, в частности, четверных соединений InGaAsP на длинах волн 0,5-4,0 мкм. Для построения модели проведен анализ энергетических переходов в зоне Бриллюэна материалов со структурой цинковой обманки. Особенностью такой структуры является наличие точек высокой симметрии (критических точек) в зоне Бриллюэна. Ключевые критические точки позиционируются в центре зоны (Г-точки), а также на пересечении осей $\langle 111 \rangle$ (L-точки) и $\langle 100 \rangle$ (X-точки) с краем зоны. При росте энергии появляется вероятность переходов через L- и X-точки, и вклад Г-переходов в значение диэлектрической проницаемости уменьшается.

Для расчёта оптических и электрофизических параметров четверного соединения InGaAsP применим закон интерполяции Вегарда – аппроксимированное эмпирическое правило, согласно которому свойства кристаллической решетки сплава линейно зависят от концентрации отдельных элементов сплава [3]. В соответствии с законом Вегарда, установлена связь между параметрами $Q(x, y)$ четверного соединения $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ и соответствующими параметрами бинарных составляющих InGaAsP: InP, GaP, GaAs, InAs:

$$Q(x, y) = (1-x)yB_{InAs} + (1-x)(1-y)B_{InP} + \\ + xyB_{GaAs} + x(1-y)B_{GaP}$$

Соотношения Крамерса-Кронига являются удобным инструментом для исследования оптических констант полупроводниковых материалов [4]. Они описывают связь между действительной и мнимой частями комплексной диэлектрической постоянной:

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

Мнимая часть диэлектрической постоянной ε_2 рассчитывается из фундаментальных соотношений, описывающих зонную диаграмму в материале InGaAsP:

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{4h^2 e^2}{\pi m^2 \omega^2} \int dk |e \cdot M_{cv}|^2 \delta(E_c - E_v - h\omega),$$

где $|e \cdot M_{cv}|^2$ – квадрат матричного элемента перехода из валентной зоны в зону проводимости. В проведенном исследовании модель диэлектрической проницаемости четверного соединения InGaAsP включает в себя вклады переходов в критических точках зоны Бриллюэна.

Разработанная модель диэлектрической проницаемости имеет существенную перспективу для расчетов показателя преломления, коэффициента экстинкции, коэффициента поглощения эпитаксиальных слоев, входящих в состав сложных ГЭС InGaAs/InGaAsP/InP.

Литература

1. Бурлаков И.Д., Дирочка А.И., Корнеева М.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. Твердотельная фотоэлектроника. Современное состояние и прогноз развития. – Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – № 5. – С. 509-519.
2. Fiedler F., Schlachezki A. Optical parameters of InP-based waveguides. – Solid-State Electronics. – 1987. – V. 30. – № 1. – P. 73-83.
3. Denton A.R., Ashcroft N.W. Vegard's law. – Phys. Rev. A. – 1991. – № 43. – P. 3161-3164.
4. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: пер. с англ. / под ред. А.В. Войцеховского. – Новосибирск: Наука, 2003 – 635 с.