

Исследование оптических характеристик гетероэпитаксиальных слоёв InGaAsP

Н.М. Куляхтина^{1,2}, А.В. Никонов^{1,2}, Н.И. Яковлева¹¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Четверные гетероэпитаксиальные структуры InGaAsP, выращенные на подложке InP, активно используются в р-і-n-фотодиодах для создания нового поколения лавинных фотоприемников оптического диапазона 0,9–1,7 мкм [1-2]. Данный материал является предпочтительным благодаря прямой структуре энергетических зон, что обеспечивает высокий коэффициент поглощения, а также высокое структурное совершенство с минимальной плотностью дефектов. Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) InGaAsP/InP показывают высокую эффективность в технологии производства лазерных оптико-электронных систем пеленгации, дальнометрии, наведения и обнаружения, систем оптической связи.

Перед разработчиками фотоприемных устройств остро стоит задача контроля и трактовки оптических параметров полупроводниковых ГЭС InGaAsP/InP. Важнейшими оптическими характеристиками при энергиях фотонов вблизи ширины запрещенной зоны, обеспечивающими высокие фотоэлектрические параметры фотоприемников, изготовленных на их основе, являются показатель преломления и коэффициент оптического межзонного поглощения. В работах прошлых лет [3] проводились исследования эмпирических зависимостей показателя преломления для различных составов эпитаксиальных слоёв $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. Полученные зависимости описывают поведение оптических характеристик на энергиях, значения которых меньше ширины запрещенной зоны.

В проведенном исследовании реализовано моделирование оптических характеристик четверных растворов InGaAsP и бинарных соединений InP для контроля параметров фотодиодов на основе ГЭС InGaAsP/InP на широком диапазоне длин волн. Модель диэлектрической проницаемости полупроводниковых соединений группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ описывает вклады переходов в критических точках зоны Бриллюэна:

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

где ε – полная диэлектрическая проницаемость, ε_{Γ} , ε_L , ε_X – соответствующие вклады в диэлектрическую проницаемость от Γ -, L- и X-переходов. Критические точки данных Γ -переходов являются трёхмерными точками M_0 -типа (зонные уровни в окрестностях точек имеют параболический вид). Используя соотношения Крамерса-Кронига, получено значение вклада Γ -переходов в диэлектрическую проницаемость. Критические точки L-переходов

относятся к трёхмерному M_1 типу. Так как продольные эффективные массы трёхмерных критических точек M_1 типа значительно больше, чем поперечные эффективные массы, влиянием поперечного направления можно пренебречь, и для данных точек в исследовании используется приближение двухмерных точек M_0 -типа. С учётом данного фактора получен суммарный вклад L-переходов в значение реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Точки X-типа не являются локализованными критическими точками, и зависимость их вкладов в диэлектрическую проницаемость нельзя описать моделями M_0 и M_1 -точек в спектральном диапазоне энергий, близких к энергии E_2 . Наилучшее приближение описывается с помощью модели затухающего гармонического осциллятора.

На основании решения уравнений Крамерса-Кронига разработаны модели показателя преломления и коэффициента поглощения тройных и четверных соединений группы $A^{III}B^V$. Сравнение полученных зависимостей для бинарных соединений с экспериментальными результатами сторонних исследователей [4] показало состоятельность модели.

Разработанные методы являются перспективными для решения ключевой задачи построения оптимальной топологии многослойных гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InGaAsP/InP (количество слоев, состав, толщина рабочих фоточувствительных, буферных, варизонных слоев), применяемых в технологии производства матричных фотоприемных устройств для лазерных опико-электронных систем пеленгации, дальнометрии, наведения и обнаружения.

Литература

1. Корнеева М.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотозлектроники. – Прикладная физика. – 2011. – № 2. – С. 47-60.
2. Яковлева Н.И., Болтарь К.О., Седнев М.В. Исследование фотодиодных лавинных элементов матричных фотоприемных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs. – Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – № 4. – С. 374-382.
3. Kelso S.M., Aspnes D.E., Pollack M.A., Nahory R.E. Optical properties of $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ from 1.5 to 6.0 eV determined by spectroscopic ellipsometry. – Phys. Rev. B. – 1982. – V. 26. – № 12. – P. 6669-6681.
4. Adachi S. Physical properties of III-V semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP. – John Wiley & Sons, 1992. – 318 p.