

УДК 535. 337

ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАЮЩИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Поволяев И.А., Головкина М.В.

*ФГБОУ ВО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, e-mail: nauka77@yandex.ru*

Рассматриваются различные типы излучающих гетероструктур, которые используются для создания полупроводниковых лазеров. Основной задачей создания полупроводниковых гетероструктур является изменение ширины запрещенной зоны активного слоя с целью создания источников излучения для различных спектральных диапазонов. Наличие небольшого количества гетеропар для изготовления гетероструктур приводит к необходимости изменения ширины запрещенной зоны путем введения квантовых ям или квантовых точек. В качестве дополнительного подхода в работе рассматриваются сверхрешетки, образованные чередующимися слоями полупроводника и диэлектрика. Для расчета электродинамических характеристик сверхрешеток учитывается частотная зависимость компонент тензора диэлектрической проницаемости полупроводника. Исследовано дисперсионное уравнение рассматриваемых сверхрешеток. Проведены расчеты дисперсионных характеристик сверхрешеток полупроводник – диэлектрик, находящихся в магнитном поле. Показано, что изменение магнитного поля приводит к сдвигу фотонных запрещенных зон в области, соответствующей области циклотронного резонанса полупроводника. Полученные результаты могут использоваться для создания полупроводниковых гетероструктур, параметрами которых можно управлять путем изменения внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: гетероструктура, полупроводник, сверхрешетка, квантовая яма

THE FEATURES OF DISPERSION CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES

Povolyaev I.A., Golovkina M.V.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications & Informatics, Samara, e-mail:
nauka77@yandex.ru*

Various types of radiating heterostructures for creating of semiconductor lasers are considered. The problem of the semiconductor heterostructures creating is the change the band gap in active layer to construct radiation sources for different spectral ranges. The presence of a small number of heteropairs to create heterostructures complicates the problem. It is required to change the width of the band gap by introducing quantum wells or quantum dots. The paper deals with superlattices formed by alternating layers of a semiconductor and a dielectric. To calculate the electrodynamic characteristics of superlattices, the frequency dependence of the components of the dielectric tensor of the semiconductor is taken into account. The dispersion equation of the superlattices under is considered. The dispersion characteristics of semiconductor-insulator superlattices in the external magnetic field are calculated. It is shown that the change of magnetic field leads to the shift in the photonic band gap in the region of cyclotron resonance. The result obtained in the work can be used to create semiconductor heterostructures, the parameters of which can be controlled by changing the external magnetic field.

Keywords: heterostructure, semiconductor, superlattice, quantum well

Создание полупроводниковых гетероструктур открыло путь в современной науке к изготовлению полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре и доступных для промышленного применения в оптоволоконной связи. Большая часть двойных гетероструктур создана на основе арсенидов галлия и алюминия, которые составляют практически идеальную гетеропару, что позволяет получать гетероструктуры высокого качества методом эпитаксиального роста. Ширина запрещенной зона арсенида

галлия соответствует длине волны излучения 830 нм, поэтому первым окном прозрачности, используемым для оптоволоконной связи, было окно на длине волны 850 нм. Несмотря на большой промежуток времени, который отделяет современных ученых от момента создания первого полупроводникового лазера, количество гетеропар, пригодных для создания излучающих гетероструктур, нельзя назвать большим. Основной проблемой при изготовлении гетеропар является несоответствие постоянных кристаллических решеток, что мешает созданию качественного контакта между отдельными слоями в гетероструктуре. Поэтому гетероструктуры на основе арсенидов галлия и алюминия по-прежнему привлекают пристальное внимание исследователей. Но длина волны, излучаемая такими гетероструктурами, не может сильно изменяться. Длина волны, излучаемая в полупроводнике, зависит главным образом от ширины запрещенной зоны в излучающем слое, которая в свою очередь может изменяться при легировании полупроводниковых материалов. Однако для нужд современной отрасли телекоммуникаций необходимы источники излучения, способные излучать на различных длинах волн, определяемых в первую очередь параметрами оптического волокна, а именно длиной волны нулевой дисперсии и минимумом потерь в оптическом волокне. Успехи в изготовлении квантовых ям, квантовых нитей и квантовых точек позволили изменять ширину запрещенной зоны за счет наличия квантово-размерных эффектов, что привело к тому, что на настоящем этапе наука способна удовлетворить требования инженеров и создать гетероструктуры с квантовыми ямами или квантовыми точками, способными излучать на заранее заданной длине волны.

Гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми ямами вызывают значительный интерес благодаря их широкому применению в современной оптоэлектронике. В последнее время возрос интерес к источникам излучения в различных областях инфракрасного диапазона [6]. Принцип действия подобных источников во многих случаях основан как на межзонных, так и на межподзонных переходах в квантовых ямах. Однако энергетические характеристики и излучающие свойства структур весьма чувствительны к распределениям состава и упругих деформаций, которые определяются деталями процесса роста [6].

Целью данной работы является исследование электродинамических характеристик многослойной гетероструктуры на основе GaAsAl. Ширина запрещенной зоны чистого GaAs соответствует длине волны излучения 830 нм. В работе рассматривается влияние квантово-размерных эффектов на спектральные характеристики гетероструктуры, а также учитываются свойства периодических полупроводниковых сверхрешеток.

Квантовая яма — это одномерная потенциальная яма, которая ограничивает подвижность частиц в одном измерении. Квантовой ямой может служить очень тонкий слой

материала, причем толщина слоя должна быть настолько мала, чтобы квантовые эффекты были существенными. В квантовой яме из-за квантово-размерных эффектов возникают энергетические уровни, спектр которых рассчитывается по формуле

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}, \quad (1)$$

где n – номер уровня,

m – эффективная масса носителей,

L – толщина квантовой ямы.

Энергия отсчитывается от дна зоны проводимости (для электронов). Дополнительные энергетические уровни, которые возникают из-за влияния вторичного квантования, накладываются на зонную диаграмму полупроводника и увеличивают ширину запрещенной зоны полупроводника и, следовательно, изменяют длину волны излучения. Таким образом, меняя толщину квантовой ямы, можно влиять на спектральные характеристики гетероструктуры.

С другой стороны, наличие большого числа слоев в гетероструктуре создает полупроводниковую сверхрешетку [7]. Периодическое чередование различных слоев разной толщины в сверхрешетке создает так называемые одномерные фотонные запрещенные зоны. Если подобрать параметры гетероструктуры, образующей сверхрешетку, соответствующим образом, то можно получить дополнительные фотонные запрещенные зоны в требуемом диапазоне длин волн [5].

Рассмотрим слоистую сверхрешетку, образованную периодическим повторением слоев полупроводника и диэлектрика. Дисперсионное уравнение для такой сверхрешетки имеет вид [1], [3]:

$$\begin{aligned} \cos(kd) = \\ = \cos(k_{z1}d_1) \cos(k_{z2}d_2) - \frac{\varepsilon_{f1}\varepsilon_2}{2k_{z1}k_{z2}} \left[\left(\frac{k_{z1}}{\varepsilon_{f1}} \right)^2 + \left(\frac{k_{z2}}{\varepsilon_2} \right)^2 - k_x^2 \left(\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{f1}} \right)^2 \right] \sin(k_{z1}d_1) \sin(k_{z2}d_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь d_1 и d_2 – толщины чередующихся слоев,

ε_{f1} – фойгтовская диэлектрическая проницаемость [2] :

$$\varepsilon_{f1} = \varepsilon_{\parallel} + \frac{\varepsilon_{\perp}^2}{\varepsilon_{\parallel}}, \quad (3)$$

ε_{\perp} и ε_{\parallel} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости полупроводника,

k_{z1} и k_{z2} – продольное волновое число для слоя 1 и слоя 2,

k – блоховское волновое число,

d – период структуры.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости полупроводника выражаются через циклотронную частоту, которая определяется следующим выражением (в системе СГС):

$$\omega_c = \frac{qH}{m^*c}, \quad (4)$$

где H – внешнее магнитное поле, в котором находится структура, m^* - эффективная масса носителей (электронов).

Зависимость циклотронной частоты от магнитного поля позволяет влиять на дисперсионные характеристики периодической структуры [4].

Рассмотрим результаты расчетов дисперсионных характеристик сверхрешетки GaAsAl – диэлектрик (рис. 1), находящейся во внешнем магнитном поле. Толщины слоев: $d_1=100$ нм, $d_2=200$ нм. На рисунке 1 хорошо видно наличие фотонных запрещенных зон, которые возникают из-за наличия чередующихся слоев (это области, где отсутствуют дисперсионные кривые на графике). В районе частоты $1,3 \cdot 10^{15}$ рад/с наблюдается изменение дисперсионных характеристик. Эта область вызвана наличием циклотронного резонанса в полупроводнике. Необходимо помнить: меняя внешнее магнитное поле, можно изменять частоту циклотронного резонанса (формула (4)).

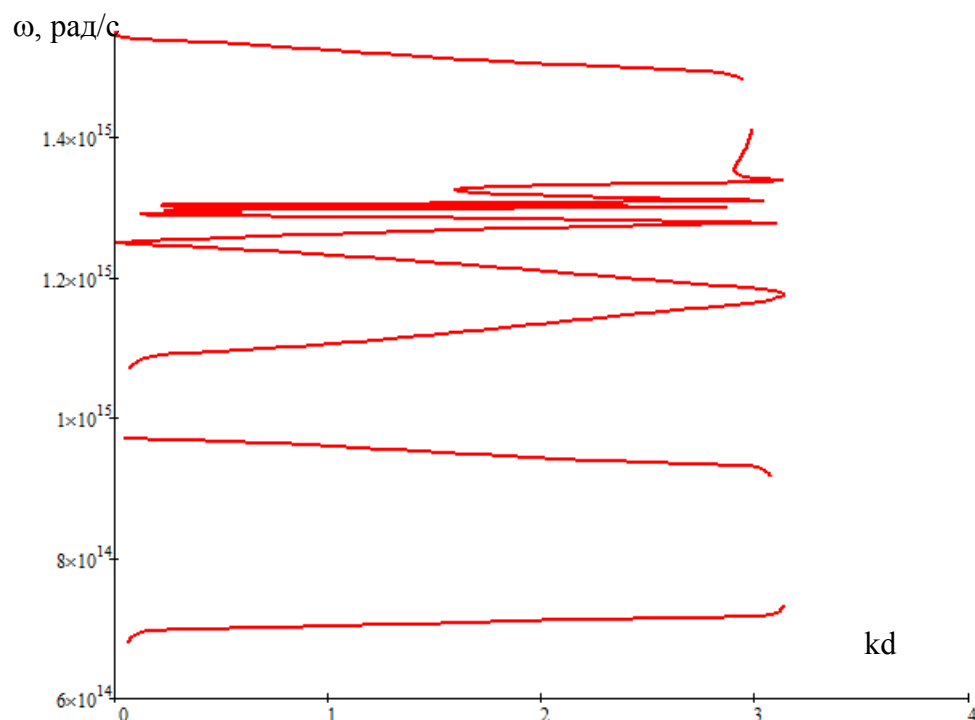


Рис.1. Дисперсионные характеристики для структуры полупроводник - диэлектрик

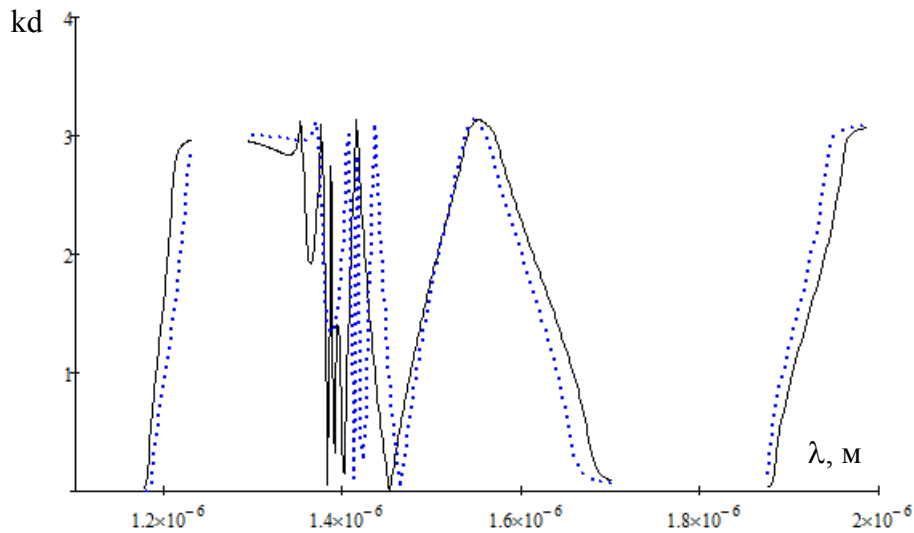


Рис.2. Дисперсионные характеристики для структуры полупроводник – диэлектрик. Влияние магнитного поля. Сплошная кривая: $B=3$ Тл, пунктирная кривая: $B=2,8$ Тл

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчетов дисперсионных характеристик сверхрешетки GaAsAl – диэлектрик для разных значений магнитного поля. Как видно из рисунка 2, небольшое изменение магнитного поля B ведет к изменению дисперсионных характеристик и сдвигу полосы, соответствующей циклотронному резонансу в полупроводнике (от длины волны 1,39 мкм до длины волны 1,42 мкм). Применение сильных магнитных полей и большее изменение внешнего магнитного поля B (рисунок 3) приводит к более сильному сдвигу полосы, соответствующей циклотронному резонансу (от длины волны 1,3 мкм до длины волны 1,47 мкм).

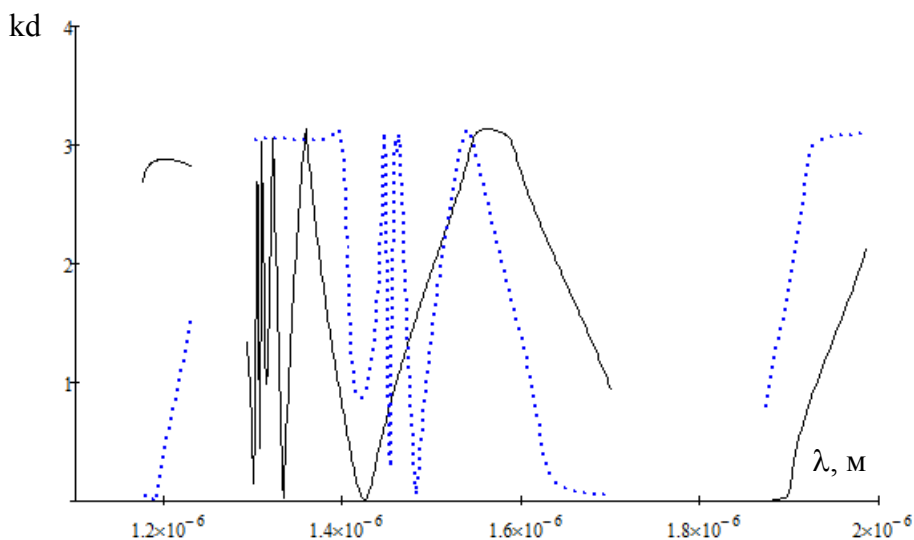


Рис.3. Дисперсионные характеристики для структуры полупроводник – диэлектрик. Влияние магнитного поля. Сплошная кривая: $B=4$ Тл, пунктирная кривая: $B=2$ Тл

Таким образом, помещение полупроводниковой сверхрешетки во внешнее магнитное поле приводит к изменению ее дисперсионных характеристик, сдвигу фотонных запрещенных зон в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Данный результат может использоваться для создания излучающих полупроводниковых гетероструктур, спектральными характеристиками которых можно управлять путем изменения внешнего магнитного поля.

Выводы

В работе рассмотрены излучающие полупроводниковые гетероструктуры на основе GaAsAl. Показано, что использование квантовых ям и квантовых точек является основным способом изменения спектральных характеристик гетероструктур. Рассмотрен дополнительный подход, учитывающий наличие фотонных запрещенных зон в одномерной сверхрешетке. Проведены расчет дисперсионных характеристик сверхрешеток полупроводник – диэлектрик. Показано, что изменение внешнего магнитного поля влияет на положение фотонных запрещенных зон из-за наличия циклотронного резонанса в полупроводнике.

Список литературы

1. Басс Ф. Г. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками / Ф. Г. Басс, А. А. Булгаков, А. П. Тетервов – М.: Наука, 1989. – 288 с.
2. Булгаков А.А. Исследование коэффициента отражения от полупроводниковой сверхрешётки, помещённой в магнитное поле / А.А. Булгаков, О.В. Шрамкова // Физика и техника полупроводников. – 2000. - № 6. – С. 712 – 718.
3. Булгаков А. А. Сравнительная характеристика зонных спектров периодических структур, образованных слоями различных материалов во внешнем магнитном поле / А. А. Булгаков, С. И. Ханкина, О. В. Шрамкова // Радиопизика и электроника. – 2008. – том 13, № 2. – С. 190-199.
4. Рыгалова Д.А. Расчет намагниченности разбавленного магнитного полупроводника / Д.А. Рыгалова, М.В. Головкина // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-4. – С. 442-443.
5. Султанов А. Х. Оптический переключатель на основе перестраиваемого многослойного диэлектрического селективного зеркала / А. Х. Султанов, В. Х. Багманов, С. В. Костров // Вестник УГАТУ. – 2014. – том 18, № 1. – С. 84-94.

6. Туннельно-связанные квантовые ямы InGaAs/GaAs: структура, состав и энергетический спектр / С.В. Хазанова [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2012, – Т. 46. – Вып. 12. – С. 1510 – 1514.
7. Golovkina M.V. Periodic semiconductor structures with metamaterials. Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009. Tomsk, 2009. – С. 133-137.