

01;06.3;07

©1995

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ СО СЛОЯМИ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$

*Н.Г.Бегенин*

Распространение волн в периодических средах, содержащих полупроводниковые и диэлектрические слои, обладает рядом замечательных особенностей [1]. В настоящей заметке показывается, что использование в слоистых структурах не традиционных (германий, кремний, GaAs и т. д.), а магнитных полупроводников открывает новые возможности в практическом использовании такого рода материалов.

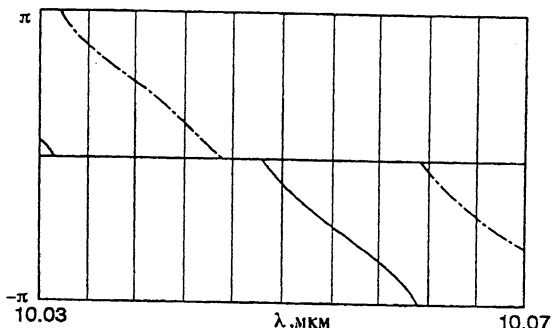
Шпинель  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  имеет довольно высокую ( $T_0 \simeq 110$  K) температуру Кюри. При  $T < T_C$  в инфракрасном диапазоне длин волн этот полупроводник характеризуется значительными фарадеевским вращением ( $\theta \sim 10^3$  град/см при длине волны  $\lambda$  порядка 10 мкм) при малом затухании [2].

Рассмотрим поперечные волны в среде, образованной чередованием пластин  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  с диэлектрическими. Будем считать, что сверхрешетка помещена в достаточно сильное постоянное магнитное поле  $\mathbf{H}$ , направленное параллельно оси  $z$  системы координат вдоль нормали к поверхностям раздела сред. Колебания будем полагать распространяющимися вдоль  $\mathbf{H}$ .

Собственными волнами являются волны правой ( $R$ ) и левой ( $L$ ) поляризации. Волновые векторы  $q_R$  и  $q_L$ , описывающие распространение колебаний в полупроводнике, различаются, причем  $\theta = (k_R - k_L)/2$ . В диэлектрике фарадеевское вращение считается отсутствующим, и распространение колебаний обеих поляризаций описывается одним волновым вектором  $q$ . Затуханием колебаний будем пренебрегать.

Волны, бегущие в бесконечной сверхрешетке, характеризуются блоховским волновым вектором  $Q_{R(L)}$ , который находится из уравнения [1]

$$\cos(Qd) = \cos(ka) \cos(qb) - \frac{1}{2} \left( \frac{k}{q} + \frac{q}{k} \right) \sin(ka) \sin(qb), \quad (1)$$



Зависимость  $Q'd$  от длины волны. Сплошная линия — правая поляризация, прерывистая — левая.

где  $a$  — толщина полупроводникового слоя,  $b$  — диэлектрического,  $d = a + b$  — период сверхрешетки, индекс поляризации для простоты опущен. Поскольку волновые векторы  $k_R$  и  $k_L$  не совпадают, может оказаться, что полосам пропускания волн правой поляризации, т. е. когда  $Q'_R \neq 0$ ,  $\pi$  и  $Q''_R = 0$ , соответствуют полосы непропускания волн левой поляризации, в пределах которых  $Q'_L = 0$  (или  $Q'_L = \pi$ ) и  $Q''_L = 0$ . В этом случае сверхрешетка действует как фильтр, пропускающий колебания только одной круговой поляризации. Поскольку фарадеевское вращение является нечетной функцией магнитного поля, изменяя направление  $\mathbf{H}$ , можно изменять поляризацию распространяющейся волны на противоположную.

В качестве примера был рассчитан спектр волн в сверхрешетке, состоящей из пластин  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  толщиной  $a = 500$  мкм, разделенных воздушными промежутками толщиной  $b = 103$  мкм. Для длин волн вблизи  $\lambda = 10$  мкм, для которых производился расчет, коэффициент преломления  $n = 3.25$ ,  $\theta = -800$  град/см. На рисунке показана зависимость величины  $Q'd$  от длины волны для колебаний с положительной групповой скоростью. Видно, что полосы прозрачности для право- и левополяризованных волн, действительно, почти не перекрываются; правда, эти полосы оказываются весьма узкими.

На практике приходится иметь дело с образцами, состоящими из конечного числа слоев, поэтому актуальным является вопрос о том, сколько слоев  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  должна содержать структура для эффективного выделения колебаний желаемой поляризации. Эту задачу удобно решать методом матрицы преобразования [1]. Матрица преобразования  $m_a$  полупроводникового слоя связывает значения электри-

ческого поля волны  $E$  и его производной  $\partial E/\partial z$  в начале слоя со значениями этих величин в его конце. Она дается формулой [1]

$$m_a = \begin{pmatrix} \cos(ka) & -\frac{\sin(ka)}{k} \\ k \sin(ka) & \cos(ka) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где, как и ранее, опущены индексы поляризации. Матрица преобразования  $m_b$  для диэлектрического слоя дается такой же формулой, нужно только заменить  $k$  на  $q$  и  $a$  на  $b$ . Матрица преобразования  $m$  для структуры, содержащей  $N$  слоев ферромагнитного полупроводника и  $N - 1$  слой диэлектрика, дается выражением

$$m = (m_a m_b)^{N-1} m_a. \quad (3)$$

Пусть на образец падает волна  $E_1(z) = E_i \exp(iq_0 z)$ , где  $q_0$  — волновой вектор, характеризующий внешнюю по отношению к рассматриваемой структуре среду. Записывая прошедшую сквозь все слои волну в виде  $E_t(z) = E_t \exp\{iq_0[z - (N-1)d - a]\}$ , для коэффициента прохождения  $T = E_t/E_i$  можно получить следующее выражение:

$$T = \frac{2}{m_{11} + m_{22} + iq_0 m_{12} + \frac{m_{21}}{iq_0}}. \quad (4)$$

Величина  $|T_L/T_R|$  была рассчитана для случая, когда электромагнитная волна падает из воздуха на образец, состоящий из  $N$  пластин  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ , разделенных воздушными промежутками. Параметры слоев считались совпадающими с указанными выше. Длина волны света  $\lambda = 10.054$  мкм, что соответствует примерно середине полос пропускания и непропускания для право- и левополяризованных колебаний соответственно. Результаты расчета представлены в таблице. Видно, что сверхрешеточные свойства проявляются уже при трех слоях ферромагнитного полупроводника, а при  $N = 5$  отношение  $|T_L/T_R|$  оказывается меньше 1%, что говорит об эффективном разделении колебаний разной поляризации.

Абсолютная величина отношения коэффициентов прохождения волн левой и правой поляризации при различном числе слоев  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$

$N$	1	3	5	7
$ T_L/T_R $	0.5698	0.0596	0.0057	0.0005

## Список литературы

- [1] Басс Ф.Г., Булгаков Ф.Ф., Тетервов В.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. М.: Наука, 1989. 288 с.
- [2] Лошкарева Н.Н., Суторуков Ю.П., Гижевский Б.А., Беботаев Н.М., Самохвалов А.А. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 3. С. 906-909.

Институт физики металлов  
УрО РАН  
Екатеринбург

Поступило в Редакцию  
10 января 1995 г.

---