

## БИЕНИЯ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

Л. И. Магарилл, Э. М. Скок, С. А. Студеникин

В настоящей заметке мы сообщаем о первом наблюдении биений осциллирующего коэффициента отражения от плоскопараллельного образца антимонида индия, помещенного в магнитное поле в геометрии Фарадея. Анализ показал, что причина, лежащая в основе этого явления, носит общий характер и использованная нами методика может быть применена для исследования широкого круга оптических эффектов вблизи различных резонансов, перестраиваемых каким-либо внешним воздействием, например электрическим полем или давлением.

Для определенности рассмотрим ситуацию, когда на плоскопараллельную полупроводниковую пластину толщиной  $d$ , помещенную в квантующее магнитное поле  $\mathbf{B}$ , падает линейно-поляризованная монохроматическая оптическая волна с волновым вектором в вакууме  $\mathbf{k}_0 \parallel \mathbf{B}$  и энергией  $\hbar\omega$  вблизи некоторого резонансного перехода. Пусть задняя сторона образца, представляющего собой по сути резонатор Фабри—Перо, покрыта металлической пленкой, обеспечивающей стопроцентное отражение луча внутрь образца. Тогда можно показать, что с учетом многократного отражения гранями образца магнитополевая зависимость коэффициента отражения  $R$  от передней поверхности имеет вид

$$R = \frac{(R_1 + D^2)(1 + D^2 R_1) - 2D\sqrt{R_1}(1 + D^2 + R_1 + D^2 R_1) \cos \varphi \cos \psi + 2D^2 R_1 (\cos 2\varphi + \cos 2\psi)}{(1 + D^2 R_1)^2 - 4D\sqrt{R_1}(1 + D^2 R_1) \cos \varphi \cos \psi + 2D^2 R_1 (\cos 2\varphi + \cos 2\psi)}, \quad (1)$$

где

$$\varphi(B) = 2k_0 n(B) d, \quad \psi(B) = 2k_0 \Delta(B) d, \quad n(B) = \frac{1}{2}(n_+ + n_-), \\ \Delta(B) = \frac{1}{2}(n_+ - n_-), \quad R_1 = ((n - 1)^2 + \kappa^2)/((n + 1)^2 + \kappa^2), \quad D = \exp(-\alpha d),$$

$n_+$  — показатель преломления InSb;  $\kappa$  — коэффициент экстинкции, связанный с коэффициентом поглощения  $\alpha$  соотношением  $\alpha = 2k_0 \kappa$ . Индексы относятся к волнам правой и левой циркулярной поляризации соответственно. При выводе формулы (1) было положено, что волны с правой и левой циркуляцией, через которые можно представить линейно-поляризованный свет в образце, поглощаются одинаково, т. е.  $\alpha_+ = \alpha_- = \alpha$ .

Из (1) видно, что вблизи резонанса, когда показатели преломления  $n_{\pm}$  испытывают сильное изменение, отражение представляет собой осциллирующую функцию магнитного поля, причем с двумя периодами, определяемыми фазами  $\varphi$  и  $\psi$ . Фаза  $\varphi$  описывает резонаторный эффект [1], а  $\psi$  связана с эффектом Фарадея [2]. Исходя из общих соображений, заранее нельзя сказать, период каких осцилляций больше: определяемых фазой  $\varphi$  или  $\psi$ .

Поведение фаз  $\varphi$  и  $\psi$  зависит от конкретного вида резонанса: например имеем ли мы дело с циклотронным резонансом, с межзонными переходами и т. д. Биения будут описываться той фазой, которая имеет более медленную скорость изменения.

Экспериментальную проверку описанного явления мы провели вблизи межзонного резонанса на образце  $n$ -InSb длиной  $d = 8.4$  мм с плоскопараллельными зеркально-полированными гранями  $1.5 \times 1.5$  мм ( $n_0 = 1.1 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $\mu_0^2 = 5 \cdot 10^5$  см $^2$ /В·с). Задняя грань была покрыта алюминием. Как показала оценка, амплитуда отражения от границы раздела InSb—Al близка по модулю к единице, а ее фаза близка к нулю. Кристалл укреплялся на

олодном пальце и сверхпроводящем соленоиде. Линейно-поляризованное излучение СО-лазера с дискретно-перестраиваемой частотой падало нормально на поверхность образца, а отраженный луч проходил через монохроматор и фиксировался Ge(Au)-приемником.

На рисунке показана зависимость коэффициента отражения от магнитного поля. Видно, что действительно коэффициент отражения носит осциллирующий характер с биениями.

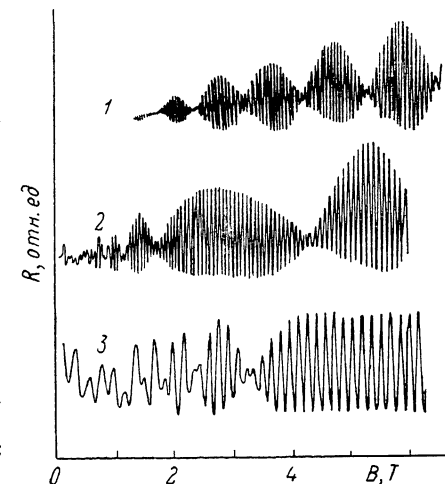
Поскольку причиной биений является различие фазовых скоростей двух собственных мод, то биения не должны возникать в случае монохроматической волны, состоящей из одной собственной моды. В нашем эксперименте использование света с поляризацией, близкой к круговой, приводило к существенному уменьшению амплитуды биений.

Узлы на рисунке соответствуют условию  $\cos \psi = 0$ . Из положения двух узлов можно найти приращение межзонного угла Фарадея на единицу длины

$$\theta(B_2) - \theta(B_1) = \pi/2d. \quad (2)$$

Магнитополевая зависимость коэффициента отражения от плоскопараллельного образца  $n$ -InSb в геометрии Фарадея.

Длина волны падающего излучения (мкм):  
1 — 5.28, 2 — 5.34, 3 — 5.52.  $T = 12$  К.



Величина отражения в узле  $R_y$  однозначно характеризует коэффициент поглощения при этом поле

$$\alpha = \frac{1}{2d} \ln \left( \frac{1 - R_y R_1}{R_y - R_1} \right). \quad (3)$$

Для получения более полной информации о поведении оптических параметров ( $n$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ) необходимо провести подгонку на ЭВМ теоретической формулы (1) под эксперимент. Анализируя полученные из такой подгонки зависимости оптических коэффициентов на основе какой-либо модели энергетического спектра, можно определить зонные параметры материала. Заметим, что соотношение (1) справедливо также в условиях одноосной деформации [3] или при воздействии на образец электрическим полем [4]. При этом  $n_{\pm}$  имеют смысл показателей преломления для собственных мод в некоторой симметричной геометрии эксперимента.

В заключение авторы благодарят В. И. Сапцова за помощь, оказанную при подготовке эксперимента.

#### Список литературы

- [1] Магарилл Л. И., Сапцов В. И., Скок Э. М., Студеникин С. А. // ФТП. 1987. Т. 21. № 11. С. 2044—2048.
- [2] Boswarva I. M., Howard R. E., Lidiard A. B. // Proc. Roy. Soc. 1962. V. A269. P. 125—141.
- [3] Бир Г. Л., Пикус Г. Е. // Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М., 1972. 488 с.
- [4] Мосс Т., Барелл Г., Эллис Б. // Полупроводниковая оптоэлектроника: Пер. с англ. М., 1975. 389 с.

Институт физики полупроводников СО АН СССР  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
14 мая 1990 г.  
В окончательной редакции  
10 сентября 1990 г.