

Непрямые электронные переходы в полупроводниках при рассеянии носителей заряда на дислокациях в квантующем магнитном поле

© Э.М. Казарян, К.А. Мхоян

Ереванский государственный университет,
375049 Ереван, Армения

(Получена 17 июля 1997 г. Принята к печати 13 октября 1997 г.)

Вычислен коэффициент поглощения света, обусловленный непрямыми электронными переходами в полупроводнике, находящемся в квантующем магнитном поле в предположении, что роль третьего тела играет краевая дислокация. Выявлены характерные для рассмотренного механизма зависимости коэффициента поглощения от частоты света и от величины магнитного поля.

Непрямые межзонные переходы в полупроводнике с дислокационным механизмом рассеяния носителей заряда (НЗ) при определенных условиях, накладываемых на температуру и на концентрацию дислокаций, могут конкурировать с прямыми переходами, обусловленными фоннным механизмом рассеяния [1,2].

В данной работе рассматриваются не прямые межзонные переходы НЗ в полупроводнике, находящемся в однородном магнитном поле, с краевыми дислокациями в роли третьего тела.

Коэффициент поглощения (КП) света, связанный с непрямыми электронными переходами, при наличии внешнего магнитного поля, вычисляется во 2-ом порядке теории возмущений:

$$\alpha(\omega, H) = \frac{2\pi\hbar c}{n_r\omega} \frac{n_D S}{|A_0|^2 \hbar V} \sum_{\substack{N, \mathbf{k} \\ N'', \mathbf{k}''}} \sum_{\substack{N', \mathbf{k}' \\ N''', \mathbf{k}'''}} \times \frac{|M^{\text{PHOT}}|^2 |M^{\text{DIS}}|^2}{[E_g^0 + \varepsilon_{N'}^c(k'_z) - \varepsilon_{N''}^v(k_z) - \hbar\omega]^2} \times \delta(E_g + \varepsilon_{N'''}^c(k''') - \varepsilon_{N''}^v(k_z) - \hbar\omega), \quad (1)$$

где ω и A_0 — частота и амплитуда падающей световой волны, n_r — показатель преломления среды, n_D — концентрация дислокаций на площади S , V — объем образца, E_g — ширина запрещенной зоны, E_g^0 — ширина запрещенной зоны в центре зоны Бриллюэна ($\mathbf{k} = 0$)¹: так как ось z системы координат выбрана по направлению магнитного поля \mathbf{H} , а вектор-потенциал — $\mathbf{A}(0, Hx, 0)$, то следовательно состояние электрона в зоне l (c или v) характеризуется набором $\{N, k_y, k_z, l\}$.

Во взаимодействиях краевой дислокации с НЗ электростатическая часть ее потенциала всегда преобладает над деформационной частью. Поэтому при вычислении матричного элемента электрон-дислокационного взаимодействия M^{DIS} можем ограничиться лишь электростатической частью. Этот потенциал в приближении

болтающихся связей имеет вид [3]

$$V(\boldsymbol{\rho}) = v_0 K_0(\lambda \rho), \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\rho}$ — перпендикулярный к линии дислокации двумерный радиус-вектор, $K_0(x)$ — модифицированная функция Бесселя 0 порядка, λ — обратная величина радиуса дебаевского экранирования,

$$v_0 = \frac{2e^2}{\varepsilon_S a} f, \quad (3)$$

где a — расстояние между болтающимися связями, f — коэффициент заполнения связей, ε_S — диэлектрическая постоянная полупроводника.

Вычисление матричного элемента M^{DIS} с помощью потенциала (2) показывает, что когда линия дислокации перпендикулярна направлению магнитного поля, для M^{DIS} получаем²

$$M^{\text{DIS}} = \frac{2\pi}{L_y L_z} \frac{v_0}{\lambda^2 + |\mathbf{k}'' - \mathbf{k}'|^2} \delta_{N', N''}, \quad (4)$$

где L_y и L_z — линейные размеры образца в соответствующих направлениях.

Используя (4), а также известное выражение для оптического матричного элемента M^{PHOT} , и переходя в (1) от суммирования по \mathbf{k}'' и \mathbf{k} к интегрированию, для КП окончательно получим

$$\alpha(\omega, h) = \frac{2\pi^2 n_D}{n_r \hbar \omega} \left(\frac{e}{m_0 c} \right)^2 (\mathbf{e} \mathbf{p}_{cv}(0))^2 \times v_0^2 \frac{(m_L^c m^v)^{1/2}}{\hbar^2} \frac{eH}{(\lambda^2 + k^2)^{3/2}} \times \sum_N \frac{\Theta(\hbar\omega - E_g - (N + \frac{1}{2})\hbar\omega_H^*)}{[E_g^0 + (N + \frac{1}{2})\hbar\omega_H - \hbar\omega]^2}, \quad (5)$$

где m_L^c — эффективная масса электрона в точке основного минимума \mathbf{k}_L ,

$$\omega_H = \frac{eH}{c} \left(\frac{1}{m^c} + \frac{1}{m^v} \right) \quad \text{и} \quad \omega_H^* = \frac{eH}{c} \left(\frac{1}{m_L^c} + \frac{1}{m^v} \right)$$

— приведенные циклотронные частоты.

¹ В формуле (1) учтено, что валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости пуста.

² Не трудно убедиться, что дислокации, ориентированные параллельно \mathbf{H} , в не прямых переходах не имеют вклада.

Как видно из (5), зависимость $\alpha(\omega, H)$ от $\hbar\omega - E_g$ для непрямозонного проводника у края фундаментального поглощения имеет ступенчатый характер. Скачки соответствуют значениям $\hbar\omega$, при которых включаются переходы между энергетически более удаленными уровнями.

Основными характерными особенностями рассмотренного механизма поглощения света в полупроводнике, находящемся во внешнем магнитном поле, в отличие от общепринятого фононного механизма [4], являются:

1. $\alpha(\omega, H) \sim H$, т.е. КП света пропорционален величине магнитного поля в первой степени в отличие от фононного, где зависимость квадратична.

2. Существует сильная зависимость КП от импульса передачи $\hbar\mathbf{k}_L$ ($\alpha \sim \frac{1}{k_L^3}$), что может дать дополнительную возможность экспериментального определения смещения минимума зоны проводимости относительно максимума валентной зоны.

3. КП пропорционален концентрации рассеивающих дислокаций n_D .

Приведенные численные оценки показывают, что, например, для GaP при концентрации $n_D \cong 3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ и величине магнитного поля $H \approx 10^2 \text{ Гс}$ уже при температуре $T \approx 100 \text{ К}$ дислокационный механизм может конкурировать с фононным механизмом.

Список литературы

- [1] А.А. Киракосян, М.К. Кумашян, К.А. Мхоян, А.А. Саркисян. Изв. НАН Армении. Физика, **30**, 208 (1995).
- [2] E.M. Kazaryan, K.A. Mkhoyan, H.A. Sarkisyan. Thin Sol. Films, **7**, 302 (1997).
- [3] В.Л. Бонч-Бруевич, В.Б. Гласко. ФТТ, **3**, 36 (1961).
- [4] B. Lax, S. Zwerdling. Progr. Semicond., **5**, 221 (1960).

Редактор В.В. Чалдышев

Indirect electronic transitions in semiconductors due to scattering of charge carriers by dislocations in quantizing magnetic field

E.M. Kazaryan, K.A. Mkhoyan

Erevan State University,
375049 Erevan, Armenia

Abstract A calculation has been made of the light absorption coefficient caused by indirect electronic transitions in the semiconductor in a quantizing magnetic field, the role of the third body being played by an edge dislocation. Characteristic for the mechanism considered dependencies of absorption coefficient on frequency of light and the magnetic field magnitude are obtained.