

## ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУЦИРОВАННОГО ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРОПОГЛОЩЕНИЯ

Ю. В. Шалдин и Д. А. Белогуров

Указан метод измерения индуцированного двупреломления при наличии электропоглощения. Получены результаты по дисперсии электрооптического эффекта в кристаллах GaAs.

Применение методов индуцированного двупреломления (для целей электрооптической спектроскопии [1]) полупроводниковых кристаллов приводит к значительному разбросу экспериментальных результатов (вплоть до изменения знака), что существенно затрудняет интерпретацию полученных данных [2-5].

Ниже мы покажем, что наряду с сигналом, обусловленным наведенным двупреломлением, возникает сигнал, связанный с электропоглощением, и укажем способ разделения этих сигналов. Полученные ниже результаты были использованы при обработке экспериментальных данных, полученных при исследовании дисперсии нелинейного показателя преломления в кристаллах GaAs.

Рассмотрим прохождение циркулярно поляризованного света через пластинку поглощающего ацентрического кристалла, помещенную в квазистатическое электрическое поле.<sup>1</sup> Для простоты остановимся на кубическом кристалле типа 43m. Пусть циркулярно поляризованный свет падает на пластинку в направлении  $\langle 110 \rangle$ , а квазистатическое поле направлено по  $\langle 110 \rangle$ . Зададим поле циркулярно поляризованной вправо волны в виде вектора Джонса

$$G = \begin{pmatrix} E e^{i\epsilon_x} \\ E e^{i\left(\epsilon_x + \frac{\pi}{2}\right)} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_x$  — начальный фазовый сдвиг, который в дальнейшем положим равным нулю. Для удобства введем систему координат, связывающую направление распространения волны с ориентацией кристаллической пластинки (рис. 1). Тогда направление «индуцированных» осей в кристалле составит угол в  $45^\circ$  к осям  $x$  и  $y$ , а зависимость нелинейного показателя преломления будет описываться соотношением [7]

$$\delta n_{xy} = n^3 r_{321} E \sin 2\theta, \quad (2)$$

где  $\theta$  — угол, отсчитываемый от оси  $x$  в направлении, противоположном вращению часовой стрелки.

При приближении к электронной полосе поглощения становится ощутимым эффект Франца—Келдыша, что проявляется как увеличение поглощения, пропорционального квадрату поля. Формально электропогло-

<sup>1</sup> Речь идет об изотропном поглощении, наблюдаемом в отдельных точках кристалла. Величина анизотропного поглощения [9] существенно слабее и в направлениях  $x$  и  $y$  (рис. 1) равна нулю.

щение можно учесть, представив изменение показателя преломления в виде

$$\Delta n_{xy} = \delta n_{xy} + in\delta\alpha_{xy}, \quad (3)$$

где  $\delta n_{xy}$  определяется (2), а  $\delta\alpha_{xy} = g_{xyij} P_i P_j$ . В нашем случае  $\delta\alpha_{xy}$  не зависит от поляризации волны и определяется через коэффициент электропоглощения и суммарную поляризацию среды

$$P_1 = \bar{P}_{01} + E_1 \epsilon_0 (\epsilon - 1), \quad (4)$$

где  $\bar{P}_{01}$  — усредненное значение поляризации среды (допустим — за счет дефектов)  $\parallel E_1$ ;  $E_1$  — амплитуда внешнего поля;  $\epsilon_0$  и  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость вакуума и рассматриваемого кристалла. В таком случае изменение показателя преломления  $\sim E_1$  запишется в виде

$$\Delta n_{xy} = [n_0^2 r_{321} + 2in g_{11,11} P_1 \epsilon_0 (\epsilon - 1)] E_1. \quad (5)$$

Используя формализм матриц Джонса, который задает состояние поляризации, прошедшей через оптическую систему волны, получаем

$$G_p^i = \text{Arg } G_g^i = \frac{E_1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos(\gamma/2) + i \sin(\gamma/2) & 0 \\ 0 & \cos(\gamma/2) - i \sin(\gamma/2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где вектор-столбец задает циркулярную поляризацию падающего излучения; средняя матрица описывает результат взаимодействия излучения с исследуемой пластинкой с  $\gamma = k \Delta n_{xy} l$  ( $k$  — волновой вектор,  $\Delta n_{xy}$  определяется (3),  $l$  — толщина пластинки), первая задает ориентацию однородного линейного анализатора. В (2)  $\theta = \pm 45^\circ$ . Тогда интенсивность прошедшего света может быть

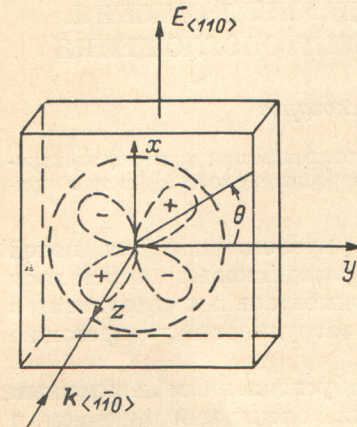


Рис. 1. Ориентация кристаллического образца относительно лабораторной системы координат.

$E_{\langle 110 \rangle}$  — вектор напряженности квазистатического поля,  $k_{\langle 110 \rangle}$  — волновой вектор падающего излучения.

найдена в виде произведения вектора-столбца с комплексно сопряженной последнему выбором-строкой Джонса

$$J_{12} = \langle G_{1p} G_{2p} \rangle = \langle E_{1x} E_{2x} \rangle [\cos(\gamma/2) + \sin(\gamma/2)] = \langle E_{0x} E_{0x}^* \rangle \times \\ \times [2e^{-2n\delta\alpha} \pm 2e^{2n\delta\alpha}] \sin \gamma \approx \frac{J_0}{2} (1 - 2kn\delta\alpha \mp k\delta n_{xy} l) = \\ = \frac{J_0}{2} \{1 - k [ng_{11,11} \bar{P}_1 \epsilon_0 (\epsilon - 1) \pm n^2 r_{321}] E_1\}. \quad (7)$$

Из анализа данного соотношения видно, что линеализованное электропоглощение не зависит от ориентации анализатора, а электрооптический сигнал изменяет знак при его повороте на  $90^\circ$ . Тогда полусумма сигналов для двух положений анализатора даст нам величину сигнала, соответствующего электропоглощению, а их полуразность будет соответствовать  $\delta n_{321}$ .

В качестве объекта исследования нами использованы кристаллы типа GaAs, которые готовились в виде плоскопараллельной пластинки размером  $(6 \times 4 \times 0.07)$ . Материалом для электродов служила серебряная паста, нанесенная на грани  $\langle 110 \rangle$ . Электрическое поле амплитудой до 2 кВ (частота 1 кГц) создавалось высоковольтным генератором. Циркулярно поляризованное излучение было получено при помощи сдвоенного ромба Френеля из кварца. Исследовалась статистическая и динамическая (за счет поля) интерференция лучей света в данной пластинке. На рис. 2 в относительных единицах показано изменение эффективной величины электро-

оптического сигнала  $J_{\sim}/J_{\sim}$  (при двух взаимно ортогональных положениях анализатора — кривые 1 и 2) и сигнала электропоглощения (кривая 3). Четко прослеживается неоднородность результата, обусловленная одновременной регистрацией электрооптического сигнала и сигнала линеализированного электропоглощения. На рис. 3 представлены результаты обработки экспериментальных зависимостей рис. 2 с целью получения информации о дисперсии нелинейного показателя преломления  $\delta n_{321}$  в арсениде галлия. Тот факт, что данные по дисперсии  $\delta n_{321}$  достаточно надежны, подтверждается зависимостью  $(\delta n_{321})^{-2}$  (кривая 2),

пропорциональной величине  $E_g - h\nu$  [8]. Такая зависимость характерна для прямых меж-

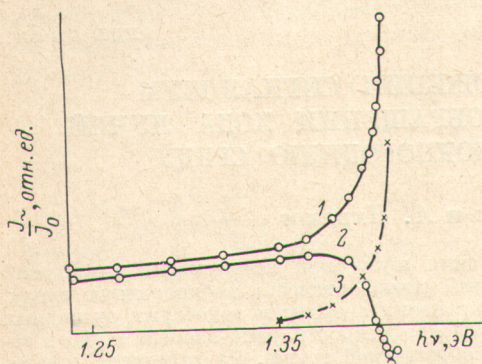


Рис. 2. Зависимость эффективного электрооптического сигнала (1, 2) и сигнала электропоглощения (3) при двух ориентациях анализатора  $0$  (1) и  $90^\circ$  (2).

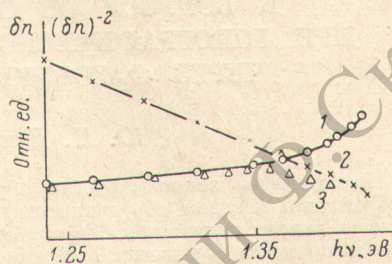


Рис. 3. Дисперсия величины нелинейного показателя преломления  $\delta n_{321}$  (1) и квадрата его обратного значения (2).

Для сравнения точками обозначены результаты [9] (3). Значение  $\delta n_{321}$  для  $h\nu = 1.24$  эВ составляет  $1.4 \cdot 10^{-8}$  ед. CGSE.

зонных переходов, которые наблюдаются в полупроводниках типа  $A_{III}B_{V}$ . Для сравнения полученных данных на рис. 3 указаны наиболее надежные (на наш взгляд) результаты работы [5], в которой систематической ошибкой за счет линеализированного электропоглощения пренебрегли.

Авторы благодарны С. Г. Семенчинскому за полезные обсуждения.

#### Литература

- [1] Ю. В. Шалдин. Тр. I Республ. симпозиума по модуляционной спектроскопии, 122. Изд. Инст. кибернетики, Тбилиси, 1973.
- [2] С. Ф. Вунгер, Л. Но. Appl. Opt., 2, 647, 1963.
- [3] E. H. Turner, I. P. Kaminow. J. Opt. Soc. Am., 53, 523, 1963.
- [4] A. W. Smith. Solid St. Electr., 8, 833, 1965.
- [5] В. С. Бараев, Ю. Н. Березовили, О. В. Гоголин, Б. Д. Копыловский. ФТП, 1, 1202, 1967.
- [6] У. Шерклиф. Поляризованный свет. «Мир», М., 1965.
- [7] Ю. В. Шалдин, Д. А. Белогуров. Опт. и спектр., 35, 693, 1973.
- [8] Л. В. Келдыш. Нелинейная оптика, 6. «Наука», Новосибирск, 1968.
- [9] Р. М. Акопян, Ю. Н. Березовили, А. В. Дундуа, Д. Ш. Лордкипанидзе. ЖЭТФ, 65, 2003, 1973.

Поступило в Редакцию 7 июля 1975 г.