

Дисперсия показателя преломления в кристаллах $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$)

© А.Н. Георгобiani[†], А.Х. Матиев^{†*}, Б.М. Хамхоев*

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
117924 Москва, Россия

* Ингушский государственный университет,
386100 Магас, Россия

(Получена 23 ноября 2004 г. Принята к печати 25 ноября 2004 г.)

Изучена дисперсия показателя преломления в кристаллах $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$) путем исследования собственной интерференции. Показано, что в исследованных кристаллах существуют области аномальной дисперсии при длинах волн, незначительно превышающих те, которые соответствуют экситонным пикам. Установлено, что при помощи анализа собственной интерференции можно обнаружить экситоны в этих кристаллах при комнатной температуре. Обнаружена модуляция интерференционных картин и предложено объяснение этого явления.

Интерес к изучению экситонных состояний в полупроводниках с анизотропной кристаллической структурой связан с возможностью проверить справедливость ряда расчетов, проведенных в рамках модели двумерного экситона. В связи с этим исследование оптических свойств полупроводников, кристаллизующихся в слоистой структуре, представляет как научный, так и практический интерес. В частности, широко исследуются экситонные состояния бинарных соединений группы $A^{III}B^{VI}$ ($GaSe$, GaS и т.д.) и твердых растворов на их основе методом интерференции проходящего света [1].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований дисперсии показателя преломления в кристаллах $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$) в области края собственной полосы поглощения. Выращенные методом Бриджмена–Стокбаргера монокристаллы кристаллизуются в моноклинной решетке типа $TlGaSe_2$ [2,3] и являются слоистыми. Это дает возможность получать тонкие, плоскопараллельные пластинки простым откалыванием их от монокристаллического слитка.

Исследования дисперсии показателя преломления в кристаллах $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$) проводили в области края собственного поглощения на образцах толщиной 5–20 мкм на основании интерференционных полос [1,4], полученных на спектрально-вычислительном комплексе СДЛ-2, приспособленном для этих целей. В качестве примера на рис. 1 приведена интерференционная картина пропускания $TlGaSe_2$ при $T = 300$ К, а на рис 2 — зависимости nd от λ , построенные по формулам [1,4]

$$n = \sqrt{\sin^2 i + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 (\Delta M)^2}{4d^2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2}}, \quad (1)$$

$$n = \sqrt{\sin^2 i + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2}{16d^2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2}}, \quad (2)$$

где ΔM — разность фаз соседних максимумов, λ_1, λ_2 — длины волн, соответствующие смежным экстремумам: максимуму и ближайшему к нему минимуму, d — толщина монокристаллической пластинки, n — показатель преломления.

Как видно из рис. 2 кривые $n = f(\lambda)$ представляют собой своеобразное усреднение зависимостей показателя преломления от частоты. Помимо аномальных дисперсий, лежащих в непосредственной близости от экситонных пиков, имеют место резкие колебания показателя преломления (т.е. аномальная дисперсия), не связанные со свободными экситонами. Любая область аномальной дисперсии связана с какими-либо видами поглощения. Области аномальной дисперсии, которые, судя по их расположению, не связаны с экситонами, имеющими различные квантовые числа, могут быть связаны с экситонами разных сортов, с наличием поляритонных состояний или наличием длинноволнового края поглощения.

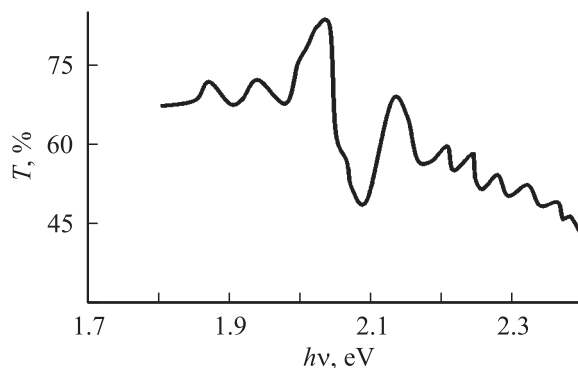


Рис. 1. Интерференционная картина пропускания кристаллов $TlGaSe_2$ при $T = 300$ К.

[†] E-mail: georg@sci.lebedev.ru

^{†*} E-mail: Ing_gu@southnet.ru

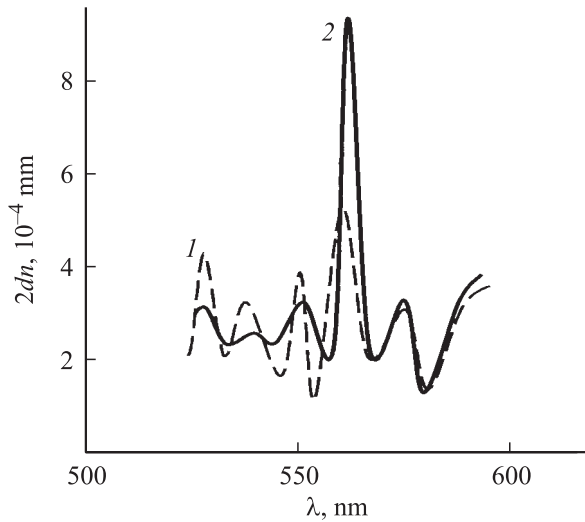


Рис. 2. Дисперсия показателя преломления в кристаллах TiGaSe_2 при $T = 300 \text{ K}$: 1 — построена по формуле (1), 2 — построена по формуле (2).

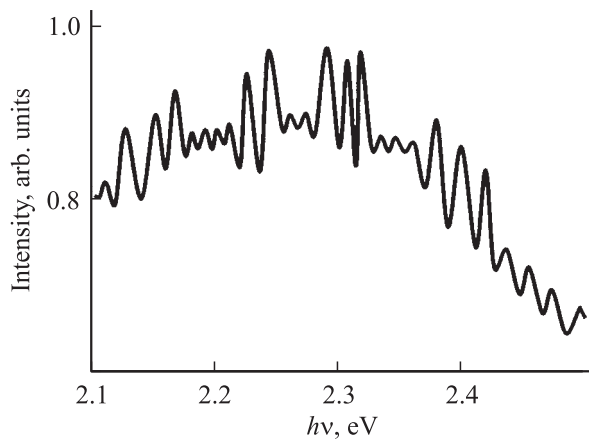


Рис. 3. Модуляция интенсивности проходящего света в кристаллах TiGaSe_2 при $T = 300 \text{ K}$.

В работе [5] показано существование поляритонных состояний в слоистых кристаллах типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$. Ясно, что вычисление показателя преломления по формуле (2) является усреднением в интервале длин волн, соответствующих смежных экстремумам. Однако эта усредненная картина отражает истинный ход дисперсионной кривой. Обнаруженные резкие изменения n являются закономерными и позволяют судить о характере дисперсии в веществе. Аналогичные результаты были получены при исследовании дисперсии показателя преломления в кристаллах $\text{Ti}_{1-x}\text{Cu}_x\text{GaSe}_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $\text{Ti}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InS}_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$). Как было указано выше, можно предполагать, что эта область аномальной дисперсии обусловлена экситонами. Экситонные линии поглощения наблюдаются в спектрах поглощения кристаллов $\text{Ti}_{1-x}\text{Cu}_x\text{GaSe}_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $\text{Ti}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InS}_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$) лишь при низких температурах. Однако

чувствительность метода собственной интерференции, по-видимому, позволяет обнаружить экситоны при комнатной температуре.

При исследовании интерференции в слоистых полупроводниках типа TiGaSe_2 и TlInS_2 , как и в кристаллах типа GaS [6], бывают случаи, когда наблюдается модуляция колебаний интенсивности света, прошедшего сквозь образец, т.е. амплитуда колебаний интенсивности света периодически меняется. Вид интерференционной картины в этом случае для соединения TiGaSe_2 представлен на рис. 3. Аналогичные интерференционные картины наблюдаются и в кристаллах твердых растворов $\text{Ti}_{1-x}\text{Cu}_x\text{GaSe}_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $\text{Ti}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InS}_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$). Указанные интерференционные картины существенно отличаются от обычных интерференционных картин, представленных на рис. 1, 2. Аналогичные картины получали и другие авторы [6–8] для Bi_2S_3 , In_2Se и GaS . Они считают, что причиной получения интерференционной картины с „биениями“ является естественное или искусственное двулучепреломление.

В работе [8] наблюдаемая модуляция интерференционной картины в $\text{GaS}(\text{Se})$ объясняется явлением фотоупругости [9]. Авторы полагают, что благодаря остаточным напряжениям в кристалле имеет место двулучепреломление, т.е. имеется обыкновенный и необыкновенный лучи. Можно предполагать, что для обоих лучей получаются интерференционные картины, но они несколько отличаются друг от друга. Между собой обыкновенный и необыкновенный лучи не интерферируют. Однако наличие двух различных интерференционных картин приводит к тому, что энергия прошедшего света меняется с длиной волны таким образом, что получаются модулированные колебания. Если вышеприведенное объяснение модуляции интерференционной картины верно, то при поляризованном свете амплитуда модуляции должна зависеть от того, как ориентирована плоскость поляризации падающего света. Кроме вышеуказанного объяснения, верным кажется предположение о нарушении связи между какими-то слоями внутри кристалла. В этом случае выходящие лучи можно мысленно разделить на два пучка. Обоим пучкам лучей удовлетворяет формула [1,4]

$$T = (1 - R^2)[1 - 2R^2 \cos 2\delta + R^4]^{-1}, \quad (3)$$

где R — коэффициент отражения поверхности, δ — изменение фазы, возникающее при однократном отражении.

Для одного пучка лучей разность фаз определяется толщиной образца d :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd. \quad (4)$$

Для второго пучка, связанного с отраженным от отслойки (нарушенного слоя), разность фаз определяется толщиной отслойки d_1 :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd_1. \quad (5)$$

Если причиной модуляции является отслойка, то модуляция интерференционной картины не должна зависеть от того, поставлен ли после выхода луча из образца поляризатор или нет, тогда как при двулучепреломлении поляризатор должен влиять на интерференционную картину. Проведенные опыты по схеме образец→анализатор→приемник показали, что проведенный анализ модуляции интерференционной картины имеет место в кристаллах $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$. Излучение, выходящее из кристаллов $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) и $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$) через поляризатор, не влияло на интерференционную картину. Таким образом, можно утверждать, что модуляция интерференционной картины в нашем случае связана с нарушенными слоями (отслойками) образцов.

Список литературы

- [1] С.Г. Абдулова, Г.Л. Беленький, Н.Т. Мамедов. ФТП, **15**, 943 (1981).
- [2] D. Muller, H. Nahn. Zs. Anorg. Allgem. Chem., **438**, 258 (1978).
- [3] А.У. Мальсагов. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **25**, 25 (1989).
- [4] Ю.И. Уханов. *Оптические свойства полупроводников* (М., Наука, 1977) гл. 2, с. 68.
- [5] Л.Н. Курбатов, Л.И. Дирочка, В.А. Сосин. ФТП, **13**, 75 (1979).
- [6] А.М. Малик, З.Д. Ковалик, Г.Б. Джевский. Изв. вузов, Физика, **3**, 144 (1975).
- [7] А.Н. Борец, И.М. Стахира. УФЖ, **9**, 1074 (1964).
- [8] И.Б. Бандривчак, М.Н. Былый. Опт. и спектр., **40**, 1078 (1976).
- [9] Т. Нарасимхамурти. *Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов* (М., Мир, 1984) гл. 5, с. 285.

Редактор Т.А. Полянская

Dispersion of refraction index in the crystals $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) and $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$)

A.N. Georgobiani, A.Kh. Matiyev, B.M. Khamhoyev

The Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
117924 Moscow, Russia
Ingush State University,
386100 Magas, Russia

Abstract Studied has been the refraction index dispersion in $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ ($0 \leq x \leq 0.02$) and $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$ ($0 \leq x \leq 0.015$) crystals by means of their own interference. It is found that there are areas of an anomalous dispersion in crystals investigated under waves-lengths lightly exceeding those corresponding to excitonic peaks. It is suggested that excitations in these crystals can be discovered at room temperature by means of their interference. It is also claimed the existence of a modulation the fringe patterns and an explanation phenomenon is suggested.