

**ФОТОПРОВОДИМОСТЬ InSe ЗА КРАЕМ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО
ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

А.Г.КЯЗЫМ-ЗАДЕ, В.М.САЛМАНОВ, А.А.САЛМАНОВА, А.М.АЛИЕВА¹

*Бакинский государственный университет
AZ 1148, Баку, ул.З.Халилова, 23
Институт физики НАН Азербайджана¹
AZ 1143, Баку, пр.Джавида,33*

Экспериментально наблюдается фотопроводимость в слоистых кристаллах InSe за краем фундаментального поглощения. Особенности фотопроводимости в области больших энергий объясняются влиянием гиперболических экситонов, генерированных лазерным светом.

Ранее нами в слоистых кристаллах InSe экспериментально исследовалось нелинейное поглощение света и его временная эволюция в области экситонного резонанса у края основной полосы поглощения при высоких уровнях возбуждения [1]. Было показано, что наблюдаемая временная зависимость коэффициента поглощения и его зависимость от интенсивности возбуждения определяется экситон-экситонным взаимодействием и экранированием экситонов плазмой неравновесных носителей, генерированных лазерным светом. Длина экранирования, определенная по формуле Дебай-Хюгеля, оказалась равной $\sim 10\text{\AA}$, что меньше радиуса экситона в InSe $\sim 37\text{\AA}$.

Представляет особый интерес обнаружение нелинейного поглощения в кристаллах InSe за краем фундаментального поглощения. Проведение такого рода исследований требует очень тонких образцов (\sim микронной толщины) с относительно малым значением коэффициента оптического поглощения выше края, отсутствием поверхностных дефектов, а также мощных источников света. На наш взгляд, слоистые кристаллы InSe являются удобным объектом для проведения таких исследований. В этих кристаллах между слоями имеется слабая Ван-дер-Ваальсова связь, что позволяет осуществить скол вдоль плоскости спайности и получить образцы с толщинами вплоть до доли микрона. Отсутствие оборванных связей практически исключает возможности образования поверхностных уровней (концентрация поверхностных состояний на два порядка меньше, чем в обычных полупроводниках) и эти кристаллы обладают высококачественными естественными зеркальными поверхностями. Коэффициент поглощения выше края мал ($\alpha \sim 10^3 \text{ см}^{-1}$ по сравнению с $(10^4 \div 10^5) \text{ см}^{-1}$ в других полупроводниках). Благодаря этим свойствам удалось исследовать спектры поглощения кристаллов InSe за фундаментальным краем поглощения [2,3]. Анализ приведенных в этих работах данных показывает, что в исследуемой области спектр поглощения кристаллов InSe имеет две особенности: высокоэнергетическая особенность, связанная с междузонными переходами в седловой точке типа M_1 , которая располагается в центре боковой грани зоны Бриллюэна и низкоэнергетическая особенность, обусловленная образованием экситонов седловой точки (гиперболические экситоны). В работе [4] наблюдалось резонансное излучение в InSe, обусловленное переходами из состояний, находящихся в глубине зоны проводимости и валентной зоны и расположенных на расстояниях, соизмеримых с шириной запрещенной зоны. Следует отметить, что гиперболические экситоны в настоящее время интенсивно исследуются как в слоистых кристаллах, так и в других полупроводниках [5-8].

В данной работе экспериментально исследуется неравновесная фотопроводимость в кристаллах InSe за краем фундаментального поглощения. Спектры фотопроводимости слоистых полупроводников A^3B^6 в области энергий $h\nu > E_g$ были исследованы в работах [9, 10]. Однако эти измерения были проведены обычными (не лазерными) источниками света и при низких интенсивностях возбуждения.

Эксперименты были выполнены на монокристаллах InSe, выращенных методом Бриджмена. Толщина исследуемых образцов составляла $2 \div 10$ микрона. Подвижность и концентрация электронов, определенные из Холловских измерений, оказались равными $1,2 \times 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Омические контакты наносились напылением индия на освещенную поверхность образцов (перпендикулярно оптической оси-«С»).

Кристаллы облучались импульсами жидкостного лазера (активная среда - родамин 6G), накачка которого осуществлялись азотным лазером. Область перестройки длины волны излучения $473 \div 547 \text{ нм}$, ширина линии генерации во всем диапазоне $\sim 0,4 \text{ \AA}$. Мощность импульса составляла 120 кВт при длительности 3 нс , а частота повторения импульса была равна 20 Гц . Интенсивность излучения изменялась при помощи калиброванных нейтральных фильтров. Выход сигналов фотопроводимости подавался в нестационарную цифровую систему (transient digitizer system), которая включала запоминающий осциллограф и компьютерную систему. Измерения проводились в интервале температур $300 \div 90 \text{ К}$.

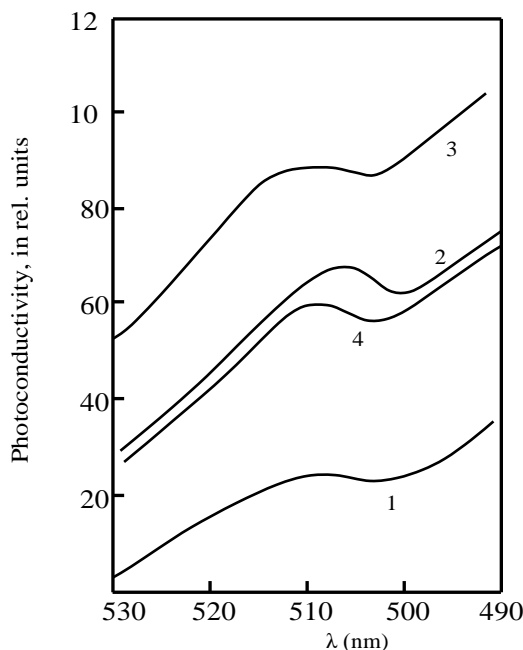


Рис.1

Спектры фотопроводимости кристаллов InSe при различных интенсивностях возбуждения, $\text{МВт}/\text{см}^2$; 1-1,34; 2-3,74; 3-6,4; 4-

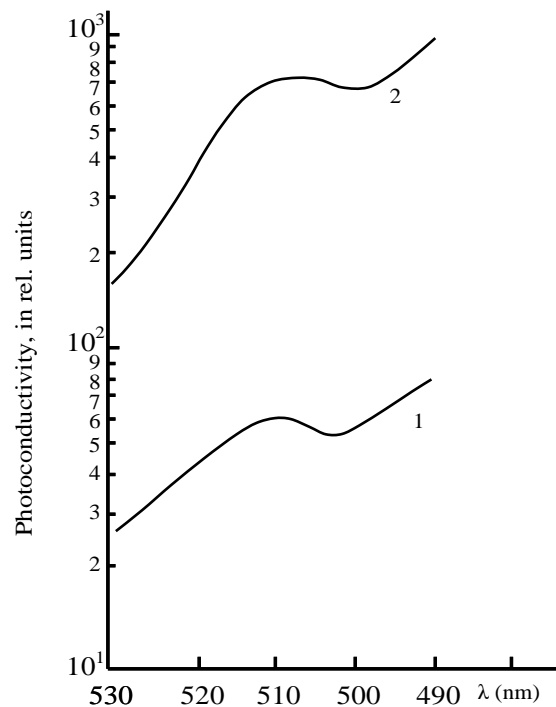


Рис. 2

Спектры фотопроводимости InSe при 300 (кривая 1) и 90 К (кривая 2). $W=12 \text{ МВт}/\text{см}^2$.

На Рис.1 представлены спектры фотопроводимости кристаллов InSe при различных интенсивностях возбуждения. Как видно из рисунка, при низких интенсивностях возбуждения (кривая 1) в спектре фотопроводимости наблюдается слабая полоса с максимумом 508 нм . С увеличением интенсивности лазерного излучения максимумы фотопроводимости отчетливо проявляются (кривые 2 и 3), но при дальнейшем увеличении интенсивности происходит их уменьшение (кривая

4). На Рис.2 приведены спектры фотопроводимости InSe при 300 (кривая 1) и 90К (кривая 2). Видно, что уменьшение температуры до 90К приводит к увеличению фотопроводимости более чем в 10 раз. Зависимость фотопроводимости InSe от интенсивности возбуждения представлена на Рис.3. Как видно из рисунка, в зависимости от мощности накачки фотопроводимость вначале изменяется линейно, затем эта зависимость переходит в сублинейную, а при дальнейшем увеличении интенсивности возбуждения наблюдается ее уменьшение. На Рис.4 приведена кривая релаксации фотопроводимости при 300К. Время релаксации составляет порядка 0,5мкс. При 90К это время повышается почти до 50мкс.

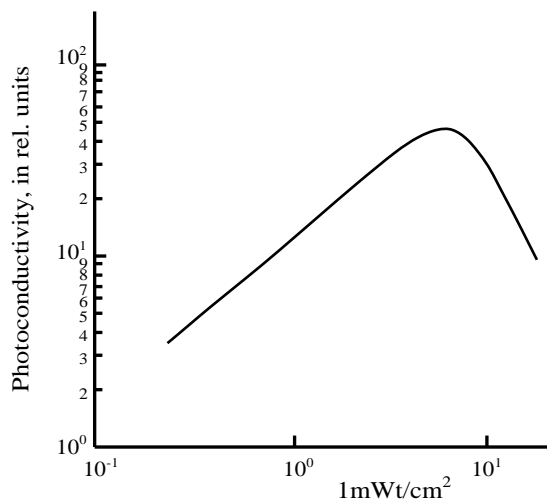


Рис.3.

Зависимость фотопроводимости InSe от интенсивности возбуждения

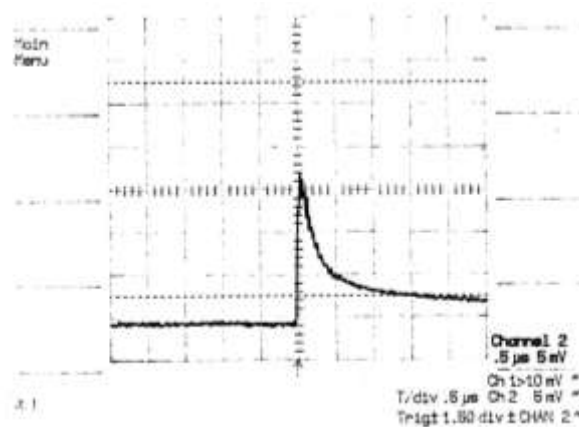


Рис.4.

Кривая релаксации фотопроводимости при 300 К.

Проведенные исследования показали, что кристаллы InSe обладают значительной фоточувствительностью за краем полосы поглощения. Максимумы в спектрах фотопроводимости полностью коррелируют с максимумами спектров поглощения и фотолюминесценции InSe, обусловленные гиперболическими экситонами [3,4]. Резонансный характер максимума фотопроводимости несомненно свидетельствует об экситонной природе наблюдаемого максимума. Об этом также свидетельствует значительная полуширина спектров фотопроводимости, их стабильность и асимметрия с более коротковолновым краем.

Значительное увеличение фотопроводимости с уменьшением температуры, по-видимому, обусловлено изменением времени релаксации носителей тока с температурой.

Анализ кинетических уравнений фотопроводимости при высоких уровнях оптического возбуждения рассмотрен в работе [11]. Согласно этой работе, фотопроводимость, обусловленная экситонами при низких уровнях возбуждения, линейно изменяется с интенсивностью возбуждения, но при высоком уровне возбуждения, когда нелинейное поглощение становится доминирующим, линейная зависимость превращается в сублинейную. Наши экспериментальные данные, относящиеся к исследованию люкс-амперной характеристики фотопроводимости InSe находятся в хорошем согласии с результатами работ [11] до уровня возбуждения 6 МВт/см^2 , но для более высоких уровней возбуждения фотопроводимость начинает уменьшаться (Рис.3). Уменьшение фотопроводимости на более высоких уровнях возбуждения ($>6 \text{ МВт/см}^2$) может быть объяснено не только уменьшением экситонного поглощения, обусловленного процессом экранирования экситонов свободными носителями, но также термическим

гашением фотопроводимости и образованием поверхностных состояний при очень высоких уровнях оптического возбуждения.

Таким образом, приведенные выше результаты показывают, что кристаллы InSe являются удобным объектом для исследования фотопроводимости за краем фундаментального поглощения при высоких уровнях возбуждения. Наличие значительной чувствительности в этой области свидетельствует о высоком качестве естественных поверхностных слоев и позволяет утверждать, что кристаллы InSe могут быть использованы в качестве фотоприемников не только в инфракрасной области спектра, а также в видимой области.

1. А.Г.Кязим-заде, А.А.Агаева, В.М.Салманов, А.Г.Мохтари, *Неорганические материалы*, **43** (2007) 1419.
2. А.И.Савчук, Н.Л.Говалешко, Г.Д.Далевский, З.Д.Ковалюк, *УФЖ*, **17** (1972) 1548.
3. Г.И.Абуталыбов, М.Л.Белле, *ФТП*, **8** (1974) 2392.
4. Д.П.Дворников, В.М.Салманов, И.Д.Ярошецкий, *Письма в ЖЭТФ*, **20** (1974) 17.
5. С.В.Вирко, М.П.Лисица, Ф.В.Мощный, *ФТТ*, **42** (2000)1579
6. В.И.Белявский, Р.А.Кончаков, *ФТТ*, **43** (2001) 1558.
7. А.П.Крохмаль, *ФТП*, **37** (2003) 257.
8. В.Б.Канустянык, Р.М.Пастернак, А.З.Калуш, М.Р.Панасюк, В.С.Цибульский, В.П.Рудык, Р.Я.Серкиз, *Журнал Прикладной Спектроскопии*, **74** (2007) 252.
9. A.Segura, J.P.Guesdon, J.M.Besson, *J. Appl. Phys.*, **54** (1983) 876.
10. O.Z.Alekperov, M.O.Godjaev, M.Z.Zarbaliev, R.Suleimanov, *Sol. Stat. Comm.*, **77** (1991) 65.
11. V.D.Egorov, G.O.Müller, R.Zimmermann, *Sol. Stat. Comm.*, **38** (1991) 271.

**InSe KRİSTALLARININ YÜKSƏK OPTİK HƏYƏCANLAŞMADA FUNDAMENTAL UDMA
KƏNARINDAN BÖYÜK ENERJİLƏRDƏ FOTOKEÇİRİCİLİYİ**

**A.H.KAZIMZADƏ, V.M.SALMANOV, A.A.SALMANOVA,
A.M.ƏLİYEVƏ**

Təcrübi olaraq layvari InSe kristallarında fundamental udma kənarından böyük enerjilərdə fotokeçiricilik müşahidə olunmuşdur. Böyük enerji oblastında fotokeçiriciliyin xüsusiyyətləri bu kristallarda lazer şüalarının təsiri ilə yaranan hiperbolik eksitonlarla izah edilir.

**PHOTOCONDUCTIVITY OF InSe BEHIND OF THE FUNDAMENTAL ABSORPTION AT THE
HIGH LEVELS OF THE OPTICAL EXCITATION**

A.G.KYAZIM-ZADE, V.M.SALMANOV, A.A.SALMANOVA, A.M.ALIYEVA

Photoconductivity in layered crystals InSe behind edge of the fundamental absorbtion at excitation by dye laser have been investigated experimentally. The features of the conductivity in the region of high energy have been explained by the influence of hyperbolic excitations generated by laser light.

Редактор: Т.Керимова