

УДК 538.958

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В ОБЛАСТИ СПЛОШНОГО СПЕКТРА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ СЕЛЕНИДА ГАЛЛИЯ

Ф.Ш.АХМЕДОВА

*Азербайджанский Архитектурный и Строительный Университет
AZ 1073, Баку, ул. Айны Султановой, 5
fidan.ehemedova.1988@mail.ru*

Получена: 14.01.2021
Принята к печати: 25.02.2021

РЕФЕРАТ

Исследована фотопроводимость селенида галлия в области сплошного спектра при высоких уровнях оптического возбуждения. В качестве источника излучения использован наносекундный жидкостной лазер, генерирующий излучения в области длин волн (320–450)нм. Экспериментально исследованы спектры, люкс-амперные характеристики и кривые релаксации неравновесной фотопроводимости. Показано, что обнаруженный в спектре фотопроводимости максимум с длиной волны $\lambda = 376,7$ нм при 300К обусловлен экситонными состояниями, связанными с минимумами зон более глубокими, чем зоны, образующие край фундаментального поглощения. Наблюдаемые особенности фотопроводимости в GaSe при лазерном возбуждении, значительное увеличение времени жизни и величины неравновесной фотопроводимости при 90К могут быть объяснены наличием уровней прилипания вблизи зоны проводимости.

Ключевые слова: лазеры, GaSe, фотопроводимость, экситоны.

ВВЕДЕНИЕ

Фотопроводимость в полупроводниках обычно наблюдается из состояний вблизи края основного поглощения, связанных с собственным поглощением, межзонными или экситонными переходами. Кроме того, наличие в запрещенной зоне полупроводников примесных уровней вызывает переходы между примесными уровнями и разрешенными зонами [1–4]. Между тем вызывает особый интерес обнаружение и исследование фотопроводимости полупроводников в высокоэнергетической области спектра. Проведение такого рода исследований позволит наряду с оптическим поглощением и люминесценцией изучать энергетические состояния в области сплошного спектра, а также расширить возможности применения

полупроводников для нужд фотоэлектроники. Однако, для проведения таких исследований необходимо иметь тонкие кристаллы с относительно малым значением коэффициента поглощения выше края основного поглощения и высокий уровень оптического возбуждения.

На наш взгляд, слоистые кристаллы GaSe являются удобным объектом для проведения таких экспериментов. Слабая Ван-дер-Ваальсовая связь между слоями позволяет осуществить скол вдоль плоскости спайности без механической и химической обработки и получить образцы с толщинами вплоть до доли микрона. При этом сразу получались естественные зеркальные оптические поверхности, не требующие специальной полировки. Отсутствие оборванных связей практически исключает возможности образования поверхностных

уровней, концентрация которых на два порядка меньше, чем в обычных полупроводниках. Коэффициент поглощения в GaSe выше края полосы поглощения мал ($\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$) по сравнению с таким классическим полупроводниками как Ge и Si ($\sim 10^4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$). Наличие экситонных переходов у края основного поглощения с энергией связи $\sim 20 \text{ мэВ}$ позволяет провести экспериментальные исследования при комнатной температуре. Ширина запрещенной зоны GaSe соответствует энергии кванта большинства современных лазеров, что позволяет создать большую концентрацию электронно-дырочных пар, вплоть до $10^{18} \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [5].

Данная работа посвящена обнаружению и экспериментальному исследованию фотопроводимости GaSe в области высокоэнергетического спектра поглощения.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованные кристаллы GaSe были выращены методом Бриджмена и обладали типом проводимости. Образцы толщиной 2-10 микронов и площадью $\sim 1 \text{ см}^2$ были изготовлены путем скалывания из крупных слитков в направлении параллельном оптической оси "с". Омические контакты из индия наносили на свежесколотую поверхность образца методом термического испарения в вакууме. Удельное сопротивление образцов варьировалось в интервале $10^3 \cdot 10^5 \text{ Ом см}$. Подвижность и концентрация носителей, определенные холловскими измерениями, оказались равными $20 \text{ см}^2/\text{В с}$ и $1 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Кристаллы GaSe облучались импульсами жидкостного лазера, накачка которого осуществлялась азотным лазером. Область перестройки длины волны излучения лазера (320-450 нм) полностью перекрывала высокоэнергетическую область GaSe [6]. Мощность импульса составляла 120 кВт при длительности 10 нс , а частота повторения импульса равнялась 20 Гц . Интенсивность лазерного излучения варьировали при помощи калиброванных нейтральных фильтров. Луч лазера направляли перпендикулярно поверхности образца (параллельно оси "с" кристалла) и фокусировали на площадь диа-

метром $\sim 1 \text{ мм}$. Были предприняты специальные меры, чтобы контакты не освещались лазерным светом. К образцу прикладывали внешнее электрическое поле в интервале $10 \cdot 100 \text{ В/см}$. В этом интервале фототок изменялся практически линейно с полем. Система регистрации фототока представляла нестационарную цифровую систему, которая включала запоминающую осциллограф и компьютерную систему [7]. Измерения были выполнены в интервале температур $90 \cdot 300 \text{ К}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис.1 приведены спектры фотопроводимости кристаллов GaSe при двух температурах, 300 и 90 К. Как видно из рисунка в высокоэнергетической области спектра наблюдаются отчетливые максимумы с длинами волн $376,7 \text{ нм}$ (кривая 1) и $375,8 \text{ нм}$ (кривая 2) при температурах 300 К и 90 К, соответственно. Исследования спектров фотопроводимости показали, что уменьшение температуры в интервале $300 \cdot 90 \text{ К}$ приводит к незначительному сдвигу спектров в сторону высоких энергий ($\sim 10 \text{ \AA}$).

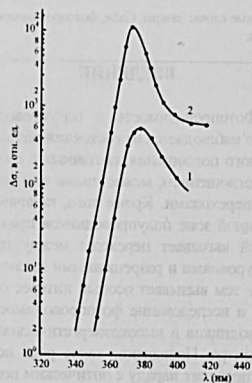


Рис. 1

Спектры фотопроводимости кристаллов GaSe при температурах 300 К (кривая 1) и 90 К (кривая 2).

По-нашему мнению, наблюдаемая нами в кристаллах GaSe при высоких уровнях оптического возбуждения неравновесная фотопроводимость в области сплошного спектра обусловлена экситонными состояниями, связанными с минимумами зон более глубоких, чем зоны, образующие край фундаментального поглощения [8]. Ранее в работах [9-13] наблюдалось оптическое поглощение и резонансное излучение в области сплошного спектра кристаллов GaSe и InSe. Анализ приведенных в этих работах данных показывает, что высокоэнергетические особенности в GaSe и InSe связаны межзонными переходами в седловой точке типа M_1 , которая располагается в центре боковой грани зоны Бриллюэна [14]. Энергия связи гиперболических экситонов, определенная как энергетическое расстояние между особенностями, оказалась $\sim 315 \text{ мэВ}$. Сравнение спектров фотопроводимости со спектрами поглощения и люминесценции GaSe в указанных работах позволили прийти к выводу, что они обусловлены образованием экситонов седловой точки.

Увеличение времени релаксации фотопроводимости (~ 10 раз) с понижением температуры, по-видимому, свидетельствует о влиянии уровней прилипания на неравновесную фотопроводимость, однако с той спецификой, что их уровни располагаются в области сплошного спектра, намного превышающей край собственного поглощения. Действительно, в случае высокого уровня возбуждения при наличии уровней прилипания вблизи зоны проводимости GaSe время релаксации может весьма значительно превышать время жизни неосновных носителей и тем значительней, чем больше их концентрация и ниже температура [1]. В свою очередь, время жизни непосредственно влияет на фотопроводимость, и увеличение времени жизни должно привести к увеличению неравновесной фотопроводимости при низкой температуре, так как:

$$\Delta\sigma = e\mu\beta I\tau, \quad (1)$$

где e - заряд электрона, μ - подвижность носителей тока, β - квантовый выход, т.е. число пар,

образуемых одним квантом, I - интенсивность падающего света, τ - время жизни неравновесных носителей.

Как видно из формулы (1), при неизменном значении других параметров, увеличение времени жизни неравновесных носителей приводит к увеличению фотопроводимости (Рис.2).

Представляют особый интерес люкс-амперные характеристики неравновесной фотопроводимости в GaSe. Известно, что зависимость фотопроводимости $\Delta\sigma$ (или неравновесной концентрации) от интенсивности света I вида $\Delta\sigma \sim I^{1/2}$ справедлива для вещества, не содержащего ловушек, переходит в линейную зависимость при равномерном распределении ловушек. Зависимость вида $\Delta\sigma \sim I^{1/2}$ может существовать и при наличии прилипания, если концентрация фотоэлектронов, захваченных на уровни, расположенные выше квазиуровня Ферми, больше концентрации фотоэлектронов, захваченных на уровни, расположенные ниже квазиуровня Ферми [2].

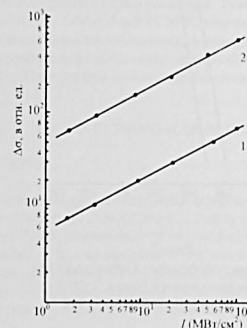


Рис. 2

Зависимость фотопроводимости кристаллов GaSe от интенсивности лазерного излучения при 300 К (кривая 1) и 90 К (кривая 2).

Наблюдаемую на опыте зависимость $\Delta\sigma$ от некоторой степени I , показатель которой заключен между $1/2$ и 1, можно описать, приняв, что распределение ловушек по энергиям является экспоненциальной, т.е. такой, ко-

гда концентрация ловушек, имеющих энергию E , экспоненциально уменьшается при увеличении расстояния E от дна зоны проводимости. Так, для области интенсивности света, при которой фотопроводимость свободных носителей меньше концентрации захваченных носителей, эта простая модель приводит к степенной зависимости $\Delta\sigma$ от I с показателем степени при I , лежащим между $1/2$ и 1 . При больших интенсивностях света, когда фотопроводимость свободных носителей больше концентрации захваченных носителей, будет преобладать бимолекулярная рекомбинация и $\Delta\sigma \sim I^{1/2}$ (Рис.3).

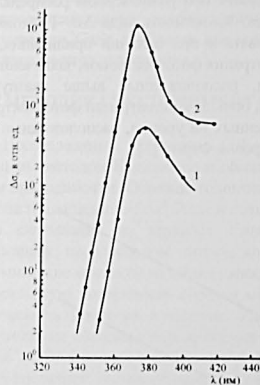


Рис. 3

Кривые релаксации фототока в кристаллах GaSe.
а - полуширина линии 0,5мксек, $T=300K$;
б - полуширина линии 5мксек, $T=90K$.

Таким образом, наблюдаемая нами люкс-амперная характеристика вида $\Delta\sigma \sim I^{1/2}$ свидетельствует о бимолекулярном механизме рекомбинации в кристаллах GaSe при лазерном возбуждении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что обнаруженная при лазерном возбуждении неравновесная фотопроводимость в области сплошного спектра GaSe из состояний, находящихся в глубине зоны проводимости, связана с гиперболическими экситонами. Увеличение времени жизни неравновесных носителей с понижением температуры и связанный с этим рост фотопроводимости, по-видимому, обусловлен влиянием уровней прилипания на неравновесную фотопроводимость. Люкс-амперная зависимость вида $\Delta\sigma \sim I^{1/2}$ свидетельствует о бимолекулярном механизме рекомбинации.

- С.М.Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках*, Москва, (1963) 494.
- Р.Бьюб. *Фотопроводимость твердых тел*, Москва, (1962) 558.
- А.Роуз. *Основы теории фотопроводимости*, Москва, (1966) 192.
- К.В.Шалимова. *Физика полупроводников*, Москва, (1985) 390.

- А.Г.Кязым-заде, А.А.Агаева, В.М.Салманов, А.Г.Мохтари. *Фотопроводимость монокристаллов GaSe при высоких уровнях оптического возбуждения*, *Неорганические Материалы*, **44** №4 (2008) 1-5.
- В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, И.М.Алиев, А.А.Салманова, Р.М.Мамедов, Ф.Ш.Ахмедова. *Свойства фотопроводимости кристаллов GaSe при сильном оптическом возбуждении*,

Transactions of National Academy of Science of Azerbaijan, series of physics-mathematical and technical sciences, Physics and Astronomy, XXXVII №5 (2017) 86-91.

- А.Г.Кязым-заде, А.А.Агаева, В.М.Салманов, А.Г.Мохтари. *Экситонное поглощение в кристаллах GaSe и InSe при микосекундном возбуждении*, *Неорганические Материалы*, **43** №12 (2007) 15-20.
- J.S.Velicky. *Excitonic effects in the interband absorption of semiconductors*, *Phys. Stat. Sol.*, **16** (1966) 147-153.
- V.K.Subashiev, Le-kh-Bin, L.C.Cherikova. *Hyperbolic excitons in GaSe*, *Solid Stat. Comm.*(b), **9** (1971) 369-377.
- V.I.Sokolov, D.B.Kushev, V.K.Subashiev. *Electro absorption in the hyperbolic exciton region in GaSe*, *Phys. Stat. Sol.* (b), **50** (1972) 125128.

- V.I.Sokolov, V.K.Subashiev, D.B.Kushev. *Line-shape of the Hyperbolic excitation in GaSe*, *Phys. Stat. Sol.* (b), **65** (1974) 47-49.
- Г.И.Абугалибов, М.Л.Белле. *Модуляционный спектр и форма линии поглощения гиперболического экситона в селениде телура*, *ФТП*, **8** (1974) 368-371.
- Г.И.Абугалибов, М.Л.Белле. *Край поглощения и структура спектра поглощения гиперболического экситона в кристалле*, *ФТП*, **9** (1975) 1330-1336.
- H.Kamimura, K.Nakao. *Band structures and optical properties of semiconducting layer compounds GaS and GaSe*, *J. Phys. Soc. Jpn.* (b), **24** (1968) 1313-1325.

OPTİK SPEKTRİN KƏSİLMƏZ OBLASTINDA GaSe NAZİK TƏBƏQƏLƏRİNİN FOTOKEÇİRCİLİYİ

F.ŞAHMƏDƏVA

Yüksək optik həyəcanlaşmada GaSe nazik təbəqələrinin fotokeçiriciliyi təcrübə olaraq tədqiq edilmişdir. İşıq mənbəyi olaraq (320-450 nm) dalğauzunluğu intervalında işləyən nanosəniyəli maye lazerdən istifadə olunmuşdur. Təcrübə olaraq fotokeçiriciliyin spektral, lüks-ampere və relaksasiya xarakteristikaları ölçülmüşdür. Göstərilmişdir ki, 300K temperaturunda müşahidə olunan, maksimumu $\lambda=376,7\text{nm}$ -ə bərabər olan fotokeçiricilik fundamental udma kənarından böyük enerjilərdə məskunlaşan sərbəst eksonlarla əlaqədardır. GaSe nazik təbəqələrinin $T=90K$ temperaturunda müşahidə olunan xüsusiyyətləri yaşama müddətinin və fotokeçiriciliyin kəskin artması keçirici zonanın yaxınlığında yerləşən yapışma mərkəzləri ilə əlaqəli ola bilər.

PHOTOCONDUCTIVITY IN THE CONTINUOUS SPECTRUM REGION IN THIN GALLIUM SELENIDE FILMS

F.ŞAHMƏDƏVA

The photoconductivity of gallium selenide was investigated in the continuous spectrum region at high levels of optical excitation. A nanosecond liquid laser generating radiation in the wavelength range (320-450 nm) was used as a radiation source. Spectra, lux-ampere characteristics, and relaxation curves of nonequilibrium photoconductivity were studied experimentally. It was shown that the maximum observed in the photoconductivity spectrum with a wavelength of $\lambda=376.7\text{nm}$ at 300K was due to excitation states associated with the minimum of bands deeper than the bands forming the fundamental absorption edge. The observed features of photoconductivity in GaSe under laser excitation, a significant increase in the lifetime and the value of nonequilibrium photoconductivity at 90K could be explained by the presence of sticking levels near the conduction band.