



Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9
Iyun
June 2005
Июнь

səhifə
№206 page 784-787
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

ФОТОПРИЕМНИКИ И ИСТОЧНИКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА НА ОСНОВЕ СИЛЬНОАНИЗОТРОПНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ.

МЕХТИЕВ Н.М.* , МЕХТИЕВА Р.Н.**

* *Азербайджанская Нефтяная Академия,
Баку, пр. Азадлыг, 20.,*

** *ИРП НАНА, пр. Г.Джавида 31 А, Т: 4394113.*

Исследование излучательных и фотоэлектрических свойств анизотропных монокристаллов GaSe, InSe, CdSnP₂, CdIn₂Se₄ и гетеропереходов на их основе установлены степень анизотропии электролюминесценции и фотопроводимости обусловленные анизотропией электронных состояний. Показаны принципы создания оптоэлектронных приборов нового поколения-поляриметрических детекторов и преобразователей источников и приемников линейнополяризованного излучения.

Современная оптоэлектроника требует создания приборов нового поколения - преобразователей световой и электрической энергий - чувствительных к поляризацию излучения [1]. Для достижения этой цели пригодны сильноанизотропные полупроводниковые соединения.

Преобразователи световой энергии в электрическую и электрической энергии в поляризованный свет, на основе сильноанизотропных полупроводниковых соединений III-VI и II-III₂-VI₄, имеют своеобразную специфику. Большое значение внутреннего квантового выхода люминесценции и высокая фоточувствительность в оптическом диапазоне, в сочетании с анизотропией оптических переходов в критических точках зоны Бриллюэна упомянутых материалов позволит на их основе создать оптоэлектронные приборы, с новыми функцио-нальными возможностями, в виде поляриметрических детекторов - источников и приемников линейно -поляризованного излучения [2]. Обнаружения эффектов поляризованной люминесценции и фоточувствительности в анизотропных полупроводниковых монокристаллах, обладающих одновременно свойствами поляризатора, анализатора, фоточувствительного и излучающего элемента, позволило бы совместить оптические и фотоэлектрические узлы в одном кристалле и избавиться от изначально сложной проблемы

оптоэлектроники - согласования параметров отдельных элементов устройства.

Слоистые полупроводники GaSe и InSe, исследованные в данной работе, являются одноосными кристаллами, оптическая ось в которых перпендикулярна к поверхности слоев. В выращенных методом Бриджмана монокристаллических образцах этих соединений была обнаружена поляризационная электролюминесценция при возбуждении непосредственным электрическим током. Свечение соединений GaSe и InSe обусловлено инъекцией неосновных носителей из токовых контактов в объем кристалла и их рекомбинацией через соответствующие каналы рекомбинации [3].

Исследование спектральных и люксовых характеристик электролюминесценции проводилось, в специально для этой цели выращенном, монокристаллическом образце, в котором содержится естественная поверхность перпендикулярная поверхности слоя и содержащая ось « \vec{C} ». Только такая геометрия образцов позволяет при излучении и приеме освещения произвести поляризационные исследования.

Геометрия излучения и приема освещения относительно оптической оси « \vec{C} » образца приведена на Рис.1а.

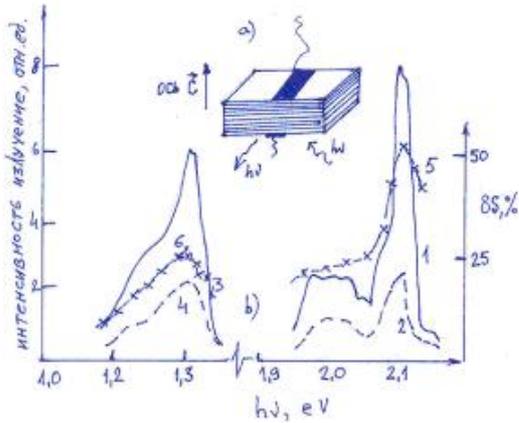


Рис. 1. а) Геометрия освещения и изучения образцов GaSe, InSe. б) Спектры электролюминесценции (1-4) и степени линейной поляризации (5,6). GaSe (1,2,5), InSe(3,4,6) при $E \parallel C$ (1,3) и $E \perp C$ (2,4).

Представленная геометрия монокристаллов слоистых полупроводников GaSe и InSe позволяет изменить угол между электрическим вектором излучения (\vec{E}) и оптической осью « \vec{C} » в интервале $0 \div 180^\circ$ и определить формы индикатрисы света эмитированного из кристалла или распространяющегося в кристалле. Обнаружено, что во всех случаях формула индикатрисы имеет вид

$$\Phi_\varphi = \Phi_{\parallel} \cos^2(\varphi + f\pi/2) + \Phi_{\perp} \sin^2(\varphi + f\pi/2) \quad (1)$$

и согласуется обобщенным законом Малюса. Здесь Φ_{\parallel} и Φ_{\perp} оптический сигнал при ортогональных поляризациях $\vec{E} \parallel \vec{C}$ и $\vec{E} \perp \vec{C}$, φ - угол между \vec{E} и \vec{C} , f - фазовый множитель ($f=0; 1$)

На Рис.1 представлены спектральное распределение электролюминесценции нелегированных кристаллов GaSe и InSe, регистрируемое от естественной поверхности, содержащей ось « \vec{C} ». Спектры ЭЛ регистрировались с помощью спектрометров ИСП-51 и МДР-2 при возбуждении образцов постоянным электрическим полем, при температуре жидкого азота (77 К). Как видно, в спектре излучения в обеих поляризациях проявляются линии, обусловленные распадом экситона (2,1eV GaSe, 1,31eV InSe) и переходами с участием примесных уровней (2,0eV GaSe, 1,25eV InSe). Из рисунка видно, что как в экситонной, так и в примесной областях электролюминесценция проявляет сильную анизотропию. Азимутальная зависимость свечения GaSe и InSe соответствует выражению (1), когда $f=0$. Таким образом, интенсивность свечения при $\vec{E} \parallel \vec{C}$ больше, чем при $\vec{E} \perp \vec{C}$ по всей области спектральной чувствительности. На основе спектров излучения была вычислена степень линейной

поляризации излучения (δS) при различных частотах фотонов выражением

$$\delta S(\nu) = \frac{I_{\parallel}(\nu) - I_{\perp}(\nu)}{I_{\parallel}(\nu) + I_{\perp}(\nu)} \quad (2),$$

где I_{\parallel} и I_{\perp} интенсивность излучения при $\vec{E} \parallel \vec{C}$ и $\vec{E} \perp \vec{C}$ соответственно. Спектр δS представлен на Рис.1. Как видно, δS достаточно чувствительна к частоте фотонов. Максимальная степень линейной поляризации электролюминесценции обнаруживается при излучательном распаде свободных экситонов при энергиях 2,09eV и 1,32eV для GaSe и InSe соответственно. Численное значение δS при этом оказывается 55% GaSe и 35% InSe.

В длинноволновой области когда электролюминесценция обусловлена участием неконтролируемых примесных уровней, численное значение δS уменьшается, но знак сохраняется. Спад δS , при энергиях превышающих энергии фотонов излучения экситонов, объясняется перепоглощением рекомбинационного излучения поляризацией $\vec{E} \parallel \vec{C}$, поскольку в кристаллах GaSe и InSe коэффициент поглощения для этой поляризации фотонов больше, чем при $\vec{E} \perp \vec{C}$.

Монокристаллы GaSe и InSe пригодны также и для приема линейно-поляризованного света. Фоточувствительность чистых и легированных, как изовалентными, так и неизовалентными атомами, кристаллов GaSe и InSe, обнаруживают фотоплеохроизм, которое непосредственно связано с оптической анизотропией материала. Фотоплеохроизмом называется зависимость фоточувствительности материала от положения электрического вектора возбуждающего света. Количественной мерой анизотропии фоточувствительности является коэффициент фотоплеохроизма P_f . Для одноосных кристаллов, к которым относятся исследованные нами кристаллы, коэффициент фотоплеохроизма P_f определяется из значения фотосигнала при двух ортогональных поляризациях подающего излучения относительно оптической оси кристалла $\vec{E} \parallel \vec{C}$ и $\vec{E} \perp \vec{C}$ согласно формуле (2), при замене интенсивности излучения на фотосигнал (i_{\parallel} и i_{\perp}). При неизменной интенсивности подающего излучения значение фотосигнала зависит от угла между \vec{E} и \vec{C} . Форма индикатрисы фототока при этом определяется уравнением (1), когда $f=0$. Таким образом, индикатрисы фототока и электролюминесценции кристаллов GaSe и InSe коррелируют, что является свидетельством связи анизотропии излучательных переходов и фоточувствительности с анизотропией кристаллической структуры материала.

Исследования показывают, что P_f по всей области спектральной чувствительности для GaSe и InSe имеет положительный знак, так как межзонные переходы вблизи фундаментального края поглощения

преимущественно разрешены для направления электрического вектора $\vec{E} \parallel \vec{C}$.

В области фундаментальных переходов при 300 К значение P_i для GaSe оказывается в интервале 10÷40% (Рис.2). Понижение температуры сопровождается увеличением P_i и при 77К оно становится 20÷60%, что сравнимо со значением степени линейной поляризации электролюминесценции. Существенный разброс в значении P_i для различных образцов GaSe и InSe объясняется влиянием неконтролируемых дефектов кристаллической решетки на фотоэлектрические свойства материала. Локальные состояния, соответствующие этим дефектам, достаточно активно участвуют в процессе фоточувствительности, однако их фотосигнал не обнаруживает анизотропию. Это обстоятельство приводит к проявлению фотосигнала в обеих поляризациях возбуждающего света и к уменьшению численного значения P_i . Для стабилизации и роста коэффициента фотоэффекта P_i требуется, каким то образом, исключить влияние таких дефектов на фотопроводимость, т.е. «залечивать» эти структурные дефекты.

Проводимые исследования показывают, что этого можно достичь легированием монокристаллов GaSe и InSe неэквивалентными атомами, например Sn и Ge или облучением нелегированных кристаллов электронным пучком [6]. Для образцов GaSe <0,2 Sn> спектральное распределение P_i при комнатной температуре, представлено на Рис.2. Как видно, в области фундаментального поглощения значение P_i достаточно высоко и достигая 85% становится сравнимой с коэффициентом дихроизма GaSe [4].

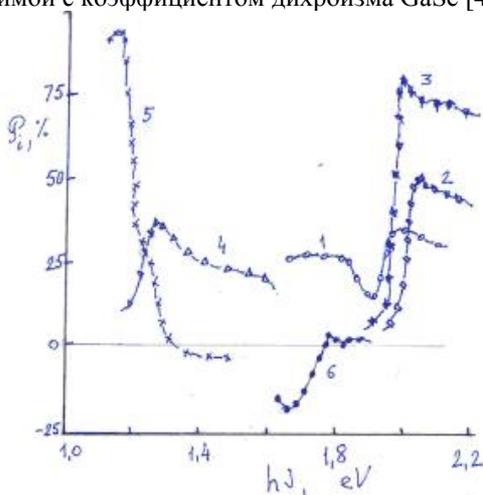


Рис. 2. Спектры фотоэффекта монокристаллов GaSe (1-300к, 2-77к), GaSe <Sn> (3), InSe (4) и гетеропереходов GaSe- CdSnP₂ (5), GaSe-CdIn₂Se₄(6).

Стабилизация и рост коэффициента естественного фотоэффекта демонстрирует преодоление структурных искажений в упаковке слоев. Эти искажения возникают в процессе роста монокристаллов слоистых полупроводников вследствие слабой связи

типа Ван-дер Ваальса между слоями вдоль оси « \vec{C} ». Неэквивалентный примесный атом, принимая позиция внутри слоя, замещает катиона или катионных вакансий и имеет не скомпенсированную валентность. При малых количествах таких атомов их распределение носит случайный характер и взаимодействие между ними через валентных электронов отсутствует. При определенном количестве вводимых примесей расстояние между ними уменьшается и возникает между валентными электронами примесей ковалентная связь. Когда примесные атомы вдоль оси « \vec{C} » образуют бесконечный кластер, это взаимодействие усиливает связь между слоями, так как ковалентная связь намного сильнее молекулярной. Последнее приводит к исключению возникновения неуправляемых дефектов и к увеличению коэффициента фотоэффекта. Дальнейшее увеличение количества примесей приводит к уменьшению P_i . Таким образом концентрационная зависимость коэффициента фотоэффекта при легировании носит пороговый характер, что является мерой пригодности слоистых кристаллов в качестве фотоанализаторов линейно-поляризованного излучения [4].

Поляризационная зависимость фотопроводимости тройных соединений CdSnP₂, CdIn₂Se₄, ZnIn₂Se₄ с тетрагональной координацией атомов обнаруживается в монокристаллах полученных из газовой фазы. Выращенные по этой технологии монокристаллы имеют форму трехгранной призмы с наиболее развитой естественной поверхностью (112). При облучении поляризованным светом поверхности (112) в области края фундаментального поглощения фоточувствительность в CdSnP₂ доминирует при поляризации света $\vec{E} \parallel \vec{C}$, а в CdIn₂Se₄ и ZnIn₂Se₄ при $\vec{E} \perp \vec{C}$.

Согласно выражению (2), коэффициент фотоэффекта в CdSnP₂ положителен, а для

CdIn₂Se₄ и ZnIn₂Se₄ имеет отрицательный знак. В тройных кристаллах исследование спектральной зависимости P_i показывает, что в тетрагональных кристаллах, вблизи края фундаментального поглощения происходит сильное изменение, а иногда инверсия знака P_i .

Анизотропия фотоактивного поглощения этих кристаллов объясняется возникновением внутрикристаллического поля при усложнение химического состава изотропного бинарного аналога. Отсутствующее в бинарных аналогах тетрагональное сжатие кристаллической решетки вдоль оси « \vec{C} » на величину $\eta = 2 - \frac{c}{a}$, где c и a постоянные решетки

(структурный фактор) и наличие в катионной подрешетке двух сортов неэквивалентных атомов (химический фактор) приводит к формированию внутрикристаллического поля и расщеплению вырожденных состояний. Теоретические расчеты и экспе-

рименты показывают [5], что структурный фактор приводит к «положительному», а химический фактор к «отрицательному» кристаллическому расщеплению. В кристаллах CdSnP_2 ведущая роль принадлежит структурному фактору и поэтому в крае фундаментального поглощения P_i положителен. В соединениях $\text{A}^{\text{II}}\text{B}_2^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}_4$ преимущественная роль принадлежит химическому фактору, что приводит к отрицательному P_i . Это обусловлено тем, что кроме двух сортов неэквивалентных атомов в катионной подрешетке последних присутствует упорядоченная вакансия отсутствующая в CdSnP_2 .

Эффективными фотопреобразователями линейно-поляризованного излучения являются гетеропереходы созданные на основе вышеупомянутых соединений в виде GaSe-CdSnP_2 , $\text{GaSe-CdIn}_2\text{Se}_4$. Гетеропереходы изготовлены нами методом посадки на оптический контакт без всяких химических обработок.

Слоистая структура GaSe и естественно выращенная поверхность $(11\bar{2})$ тройных соединений позволяет изготовить гетерограницу малыми значениями пограничных состояний. Гетеропереходы вырабатывают фотоэдс при облучении естественными и линейно поляризованными излучениями. Гетерограницы освещались со стороны широкозонного компо-

нента GaSe. При этом GaSe играет роль оптического «фильтра», а анизотропия фотоотклика обусловлено фотоактивным поглощением света в тройном полупроводнике. При облучении естественным и линейно-поляризованным светом спектр фотоотклика проявляет эффект «окно» с четкими границами в соответствии шириной запрещенных зон контактируемых материалов. Значение и спектр P_i для исследования гетеропереходов представлены на рис. 2. В рассмотренной геометрии для гетероперехода GaSe-CdSnP_2 направление распространения света совпадает с оптической осью кристалла GaSe и для фотоактивных поглощений реализуется только случай $\vec{E} \perp \vec{C}$, а фотоотклик от GaSe соответствующий интервалу энергий $1,35 \div 2,0$ eV, изотропно. При $h\nu < 1,35$ eV значение P_i положителен и при $h\nu \sim 1,17$ eV достигает 90%, что является рекордной для барьеров на основе тройных полупроводников. Энергия максимального значения P_i резонансно совпадает с частотой фотонов Nd-лазера и указывает на перспективность применения рассмотренного гетероперехода в качестве фотодетекторов линейно-поляризованного излучения.

-
- [1]. Медведкин Г.А., Рудь Ю.В., Таиров М.А. – Полупроводниковые кристаллы фотоприемников линейнополяризованного излучения, 1992, Ташкент, с. 295
- [2]. Мехтиев Н.М., Рудь Ю.В., Салаев Э.Ю. – Фотоэлектрические анализаторы поляризации излучения в слоистых полупроводниках III-VI, Физика и техника полупроводников, 1978, Т.12, № 8, с. 1566-1570
- [3]. Г.А.Ахундов, А.Ш.Абдинов, Н.М.Мехдиев, А.Г.Кязимзаде – Электрорлюминесценция монокристаллов InSe, Оптика и спектроскопия, 1975, Т.38, № 5, с. 952-954.
- [4]. Мехтиев Н.М. – Поляризационные фотодетекторы на основе слоистых полупроводников, Физика, 1999, Т. V, №1, с.27-29.
- [5]. Мехтиев Н.М. – Фотоплеохроизм легированных кристаллов GaSe, Физика и техника полупроводников, 1990, Т.12, №9, с.1505-1508.
- [6]. Mechtiev N.M., Mechtieva R.N., - Photopleochroism of irradiated GaSe crystals, Izmir, I Eurasia conference on Nuclear science and its application Turkey, 2000, p.104-108.