

На правах рукописи

Радчук Наталия Борисовна

Исследование неравновесных электронных процессов в германии с примесями
халькогенов.

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Ильин Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Титов Андрей Иванович

доктор физико-математических наук, профессор Федорцов Александр Борисович

Ведущая организация – физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Российской академии наук

Защита состоится « 2 » марта 2006 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «24» января 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.01

доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В данной работе исследуются неравновесные процессы, происходящие в германии с участием халькогенов, элементов VI группы Периодической таблицы. Сера, селен, теллур образуют состояния, лежащие вблизи середины запрещенной зоны германия, т.е. являются «глубокими». Глубокие примеси в зависимости от зарядового состояния могут являться центрами рекомбинации или прилипания. Следовательно, их введение может резко уменьшать времена жизни неравновесных носителей тока, что необходимо для увеличения быстродействия полупроводниковых приборов. Центры с отталкивающими потенциальными барьерами увеличивают времена жизни неравновесных носителей, что актуально в связи с развитием техники многоэлементных матричных фотоприемников с накоплением.

Примеси S, Se, Te в германии имеют энергии ионизации, соответствующие «окнам» прозрачности атмосферы при 3,5 и 10 мкм, что делает эти материалы перспективными для создания фотоприемников ИК-излучения. Используя твердые растворы Ge–Si, легированные глубокими примесями, можно получить материал с регулируемой длинноволновой границей спектральной чувствительности.

Одновременно, исследование глубоких примесей позволяет получить фундаментальную информацию о природе глубокого примесного центра, адекватная теория которого до сих пор еще не создана. Представляет интерес исследование переходов электронов из основного состояния глубокой примеси в возбужденное. К возбужденным состояниям применим расчет по методу эффективной массы, что позволяет их рассматривать как модельные объекты.

Перспективы получения новых экспериментальных данных для развития представлений о природе глубоких примесных центров полупроводниках и возможность получения новых фоточувствительных материалов стимулируют продолжение исследований в данном направлении.

Основная цель диссертационной работы – экспериментальное исследование неравновесных электронных процессов в германии, легированном серой, селеном, теллуrom и кремнием. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Создание экспериментальных установок для оптических измерений, для исследования эффекта Холла, измерения времени жизни неравновесных носителей, регистрации вольтамперных характеристик.
2. Освоение технологических процессов получения монокристаллов германия, легированных халькогенами и кремнием, структур с p-i-n-переходами различными методами: горизонтальной перекристаллизацией, газотранспортной эпитаксией, диффузией.
3. Исследование спектров примесной фотопроводимости полученных кристаллов и структур с различными уровнями легирования.
4. Изучение электрических и релаксационных свойств примесей халькогенов в кристаллах и p-i-n-структурах.
5. Теоретический анализ полученных результатов, выяснение причин различий в поведении примесей S, Se, Te в германии.

Научная новизна работы. В спектрах фотопроводимости (ФП) германия впервые наблюдались линии оптических переходов электронов с основного состояния примеси халькогена в возбужденное: в Ge:Te - одиночный положительный пик, в Ge:S, Ge:Se-три отрицательных. Такие же переходы обнаружены в твердых растворах $Ge_{1-x}Si_x$. Определено влияние содержания кремния в твердых растворах Ge-Si на энергию ионизации и энергию связи теллура и селена в германии.

Получены спектры ФП высокого разрешения на образцах в виде p-i-n-диодов. Выявлены пять новых линий переходов электронов в возбужденные состояния (BC) в Ge:Se и две в Ge:S. Показано, что различный вклад Te и S, Se в ФП связан с локализацией их BC в Γ - и L- точках зоны Бриллюэна соответственно, а отрицательный вклад в фототок S и Se объяснен изменением симметрии примесного центра после перехода в возбужденное состояние.

Время релаксации постоянно в примесной области фотоэффекта и резко снижается в области фундаментальных переходов. Из температурной зависимости времени релаксации τ найдена энергия активации селена.

Исследована вольтамперная характеристика (ВАХ) p-i-n-диода Ge:Se при частотах напряжения килогерцового диапазона. Вид ВАХ объяснен процессами накопления заряда инжектированных носителей и электрической перезарядкой примесных состояний.

Построена установка с уникальными параметрами для бесконтактного измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках.

Практическая значимость работы. На основе исследованных материалов могут быть созданы фотоприемные устройства для инфракрасной области спектра. Особенно интересна высокая селективная чувствительность системы Ge:Te в районе 375 мэВ (энергия возбужденного состояния иона Te^+ в Ge), соответствующая окну прозрачности атмосферы. Использование материала $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\text{:Te}$ позволяет смещать область селективной спектральной чувствительности путем выбора процентного содержания Si. Сравнительно медленная релаксация фототока в материале Ge:Se позволяет применять его в матричных преобразователях изображения с накоплением.

Созданная установка для бесконтактного определения времени жизни неравновесных носителей может быть использована для экспресс-контроля полупроводниковых материалов в промышленности.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. В спектрах фотопроводимости (ФП) германия, легированного халькогенами, присутствуют в Ge:Te–синглет с положительным вкладом в фототок, в Ge:S, Ge:Se – триплеты, с отрицательным вкладом в ФП, связанные с переходами электронов из однократно ионизованного состояния в возбужденные.
2. Введение кремния в германий, легированный халькогенами, приводит к увеличению энергий ионизации и возбужденных состояний (BC) при сохранении вида спектра.

3. Спектры фотопроводимости высокого разрешения содержат не наблюдавшиеся ранее спектральные линии переходов электронов в возбужденные состояния: в p-i-n – структуре Ge:Se пять, в Ge:S–две.
4. Различие спектральных зависимостей ФП в области переходов ионов халькогенов в ВС определяется их положением в зоне Бриллюэна германия: состояние теллура связано с Г-точкой, а состояния S, Se с L-точкой. Ион теллура вызывает релаксацию решетки германия, а серы, селена – дисторсию. ВС идентифицированы путем сравнения с теоретическим расчетом.
5. Спектральная линия ВС селена однородно уширена и аппроксимируется лоренцианом, а теллура–гауссианом, что объясняется резонансным характером возбужденного состояния иона теллура.
6. Экспериментальный спектр сечения фотоионизации нейтрального селена в германии находится в хорошем соответствии с результатами теоретического расчета для модельного потенциала примесного центра.
7. Время релаксации фототока p-i-n-структуры Ge:Se неизменно в примесной области спектра и резко снижается в области фундаментальных переходов. Энергия активации, найденная из температурной зависимости времени релаксации, соответствует данным оптических измерений.
8. Вольтамперная характеристика p-i-n-диода Ge:Se, снятая в динамическом режиме, отображает процесс накопления заряда инжектированных носителей и электрическую перезарядку примесных состояний.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на II-й Республ. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупр. (Одесса, 1982г), Рос.конф. «Инновационные наукоемкие технологии для России» (С.Петербург, 1995), 18 International Conference on Defects in Semiconductors (Sendai, Japan, 1995), 2-ой Рос.конф. по физике полупроводников (Зеленогорск, 1996), Всерос. научн. конф., ФПП-2002 (С.Петербург, 2002), 17-ой Межд. научно-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2002), VII-ой Всерос. конф. по пробл. науки и высш. шк. «Фунд. иссл. в техн. универс.» (С.Петербург, 2003), Межд. конф. «Оптика, оптоэлектроника и технологии»

(Ульяновск, 2003), IX-ой Всероссийской конференции «Фунд. иссл. в техн. универс.» (С.Петербург, 2005), Межд. конф. «Опто-наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 2005), научных семинарах кафедры физики полупроводников и наноэлектроники СПбГПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, список которых представлен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы из 134 наименований. Работа изложена на 143 страницах, включая 44 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, определяется цель исследования, дается оценка научной и практической значимости результатов работы, формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы по экспериментальным и теоретическим исследованиям поведения глубоких примесей в полупроводниках. Раздел **1.1** посвящен описанию зонной структуры Ge и Si, которые относятся к веществам с тетраэдрическими связями и имеют структуру алмаза, принадлежащую пространственной группе O_h^7 . В разделе **1.2** рассмотрены теоретические методы расчета локализованных состояний. Атом примеси нарушает периодическую структуру полупроводника и вносит локальное возмущение в энергетический спектр, а в запрещенной зоне появляются разрешенные состояния, связанные с областью возмущения. В расчете по методу эффективной массы (МЭМ) считается, что избыточный электрон связан с примесным атомом кулоновскими силами, уменьшенными за счет диэлектрической постоянной кристалла, а влияние решетки на движение электрона учитывается путем замены массы свободного электрона на эффективную m^* . Метод не применим для расчета параметров «глубоких» примесей, т.к. электрон слабо взаимодействует с атомами решетки, его орбита

имеет малый радиус, а волновые функции сосредоточены, в основном, в пределах одного межатомного расстояния и экспоненциально убывают при удалении от примесного атома. В разделе **1.3** приводятся сведения из работ, посвященных исследованию S, Se, Te в Ge, которые образуют в запрещенной зоне германия два глубоких донорных уровня. В разделе **1.4** рассмотрены работы, в которых исследуются переходы электронов в возбужденные состояния. Введение атома примеси приводит к появлению в запрещенной зоне целой серии водородоподобных уровней энергии, сходящихся к соответствующей зоне. Раздел **1.5** посвящен работам по исследованию твердых растворов Ge-Si. Показано влияние кремния на зонную структуру германия и примесей на спектры фотопроводимости $Ge_{1-x}Si_x$. В разделе **1.6** рассматривается влияние глубоких примесей на процессы в p-n – переходах.

В разделе **2.1 второй главы** обосновывается выбор фотопроводимости, как наиболее информативного метода исследования неравновесных процессов в полупроводниках. В разделе **2.2** приведено описание экспериментальной установки для оптических измерений в температурном диапазоне 54-400К, построенной на базе монохроматора ИКМ-1 с призмой из LiF. Повышение чувствительности установки достигается путем применения модуляции оптического сигнала с последующим синхронным детектированием. Уровень легирования выращенных образцов определяется на холловской установке (описана в разделе **2.3**), построенной в соответствии с двухчастотным методом. Она позволяет регистрировать температурные зависимости коэффициента Холла и одновременно удельного сопротивления. Релаксационные характеристики исследуются на установке (описана в разделе **2.4**) для бесконтактного измерения времени жизни в полупроводниках. Концентрация неравновесных носителей детектируется по изменению поглощения излучения с.в.ч. - мощности. В разделе **2.5** представлена установка для регистрации вольтамперных характеристик неоднородных структур. Раздел **2.6** посвящен технологии получения материалов с заданными свойствами. Для исследования зарядовых состояний глубокой примеси, необходимо легировать материал

мелкой компенсирующей примесью. Степень компенсации $\kappa = N_{\text{мел}}/N_{\text{хал}}$, где $N_{\text{мел}}$ - концентрация мелкой акцепторной примеси, $N_{\text{хал}}$ - концентрация халькогена. Нами изготовлены несколько групп образцов германия, легированных халькогенами: однородные образцы, полученные методом горизонтальной перекристаллизации, диффузией и газотранспортной эпитаксией и неоднородные – p-i-n-структуры, полученные путем диффузии. Завершается глава (раздел 2.7) анализом возможных экспериментальных ошибок.

Третья глава посвящена полученным экспериментальным результатам и их обсуждению. В разделе 3.1 представлены результаты холловских измерений. Температурные зависимости концентраций для образцов Ge:Te и Ge:Se имеют двухступенчатый вид, характерный для двухзарядных примесей, из которых определяются концентрации халькогена и компенсирующей примеси галлия. Раздел 3.2 посвящен исследованию фотоэлектрических свойств однородных образцов Ge:Te, Ge:Se, Ge:S полученных диффузией и горизонтальной перекристаллизацией. В спектрах фотопроводимости (ФП) кристаллов Ge:Te при $T=77\text{K}$ обнаружен узкий пик при энергии 375 мэВ (рис.1). Малая ширина пика, примерно 5 мэВ на уровне 0,5 от амплитудного значения, свидетельствует о переходах электронов в возбужденное состояние (BC). Пик появлялся при компенсации $\kappa \approx 0,05$, когда в материале уже имеются ионы Te^+ , и достигал максимума при $\kappa \approx 1$, когда верхний уровень Te полностью ионизован. При этом красная граница ФП соответствует энергии ионизации иона Te^+ $E_1=280$ мэВ. Понижение температуры до 54К, приводит к исчезновению пика, а граница ФП смещается в сторону меньших энергий и соответствует $E_2=95$ мэВ, т.е. энергии ионизации нейтрального атома теллура Te^0 . Это значит, что при $T=54\text{K}$ все атомы теллура находятся в нейтральном состоянии и электроны переходят прямо в зону проводимости. Экспериментально полученным значениям энергий соответствует уровень, лежащий выше L-точки и ниже Γ -точки на ≈ 45 мэВ. Таким образом, наблюдаемая нами линия соответствует переходам электронов с однократно

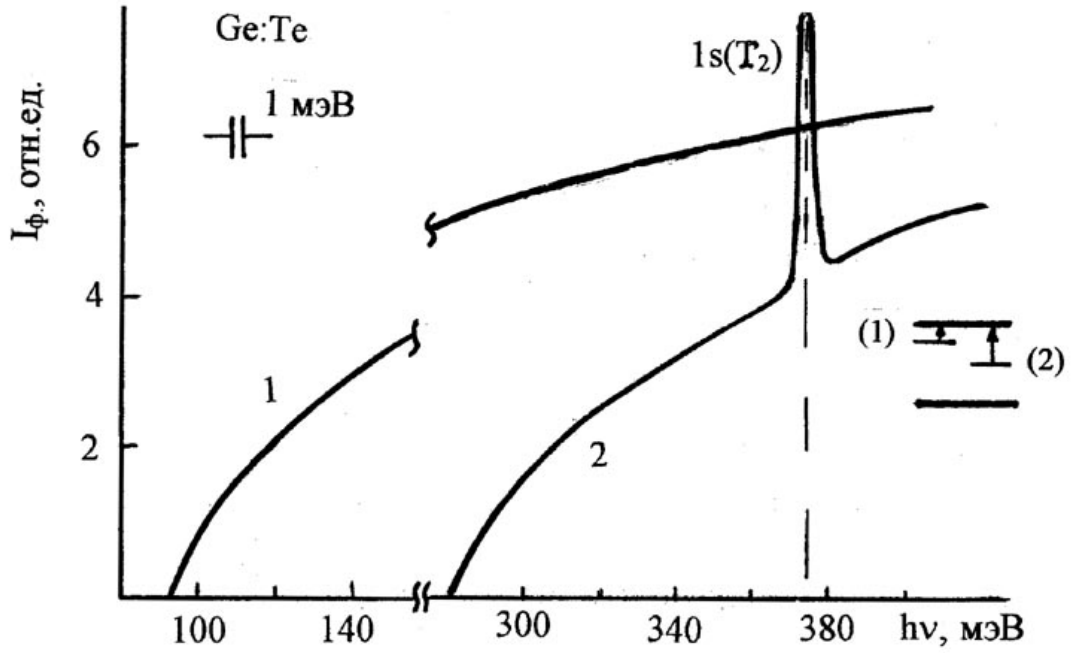


Рис.1. Спектр фотопроводимости Ge:Te. Степень компенсации $k \approx 0,05$.
1 – при температуре $T=54\text{K}$, 2 – $T=77\text{K}$.

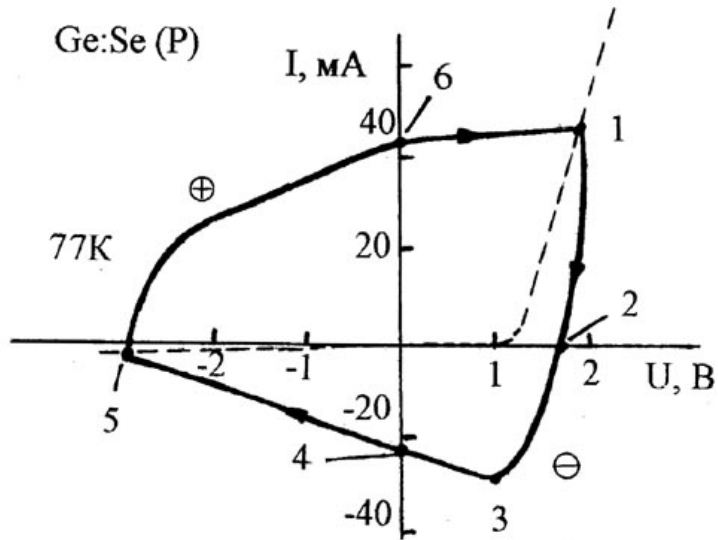


Рис.2. Динамическая вольт-амперная характеристика структуры Ge:Se(P) при $T=77\text{K}$. Частота напряжения смещения $f=40\text{ кГц}$. Пунктиром показана ВАХ при частоте напряжения $f=50\text{ Гц}$.

ионизованного теллура Te^+ на уровень возбужденного состояния, лежащий под Γ -минимумом, а оттуда путем туннелирования или термического возбуждения в Γ -состояние электроны переходят в L -состояние с рассеянием энергии на фононах. Вероятность такого процесса велика, и на фоне примесной фотопроводимости появляется узкая спектральная линия. Сравнение с теоретическим расчетом Фолкнера [1] показало, что переходам при энергии 375 мэВ соответствует состояние $1s(T_2)$.

В спектрах ФП $Ge:Se$ ($T=77K$) при компенсации $k=0,5-1$, когда в Ge присутствуют одновременно нейтральные атомы Se^0 и ионы Se^+ , на фоне примесной проводимости с нейтральных атомов Se^0 ($E_1=248$ мэВ) в области энергий 350-370 мэВ наблюдается резкое снижение фототока. Можно различить три частично перекрывающиеся спектральные линии шириной порядка кТ. Малая ширина линий свидетельствует о принадлежности их к возбужденным состояниям. Таким образом, электроны переходят с иона селена Se^+ , энергия ионизации которого $E_2=372$ мэВ, на уровни, лежащие под L -минимумом зоны проводимости германия, на фоне переходов с нейтрального селена Se^0 и дают отрицательный вклад в фототок. В соответствии с работой Фолкнера это $353-2p_0$, $362-3p_0$ и 368 мэВ- $3p_{\pm}$ состояния.

Спектр фотопроводимости $Ge:S$ аналогичен спектру $Ge:Se$, а измеренные нами энергии ионизации составляют $E_1=240$ мэВ, $E_2=372$ мэВ. Наблюдаемым переходам в ВС с ионов серы S^+ соответствуют энергии 353, 358, 368 мэВ, которые идентифицируются с состоянием $2p_0$, $2s(T_2)$, $3p_{\pm}$.

Отрицательный вклад в ФП ионов S^+ , Se^+ , объясняется тем, что после перехода в ВС изменяется симметрия примесного центра и, в соответствии с принципом Франка-Кондона, передав энергию фононам, электрон переходит в более низкое энергетическое состояние, а не в зону проводимости.

Для выяснения возможной связи наблюдаемых явлений с комплексами, были изготовлены образцы германия со смешанным легированием $Se+Te$ с $k\approx 0,8$. Анализ спектров ФП показал, что вклад примесей аддитивен, т.е. переходы в ВС связаны с одиночными халькогенами, а не с комплексами

Se+Te, которые дали бы новые детали в спектры фотопроводимости. Измеренные нами энергии ионизации халькогенов в германии составляют:
S: $E_1=240$ мэВ, $E_2=372$ мэВ; Se: $E_1=248$ мэВ, $E_2=372$ мэВ;
Te: $E_1=95$ мэВ, $E_2=280$ мэВ.

В разделе **3.3** приведены результаты исследования твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$. Известно влияние кремния на энергетический спектр германия; поэтому были изготовлены образцы Ge:Te и Ge:Se с содержанием Si от (1,5-4,5)%. В спектрах примесной ФП при $T=77K$ обнаружены линии, соответствующие возбужденным состояниям: примесь теллура дает синглет, а селена – триплет. В образцах Ge-Si:Te энергия ионизации иона Te^+ изменяется со скоростью 7,5 мэВ/1%(Si), а скорость изменения энергии связи 3,5 мэВ/1%(Si). В образцах Ge-Si:Se энергия ионизации нейтрального атома Se^0 изменяется со скоростью 20 мэВ/1%(Si), а энергия связи на 5 мэВ/1%(Si). К сожалению, не произошло качественной перестройки спектра при замене атомов германия кремнием, которую можно ожидать при 15% содержании Si при сближении L- и Δ - минимумов зоны проводимости. Тем не менее, подтверждено, что Te и Se в твердых растворах Ge-Si являются двухзарядными донорами, определены скорости изменения энергий ионизации и связи в зависимости от процентного содержания кремния.

В разделе **3.4** приводятся результаты электрических исследований изготовленных нами структур на основе Ge+халькоген+P. Особенность таких структур состоит в их высокой фоточувствительности при приложении напряжения в обратном направлении. Вольтамперные характеристики (ВАХ), снятые, при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц, имеют традиционный вид - большие токи в прямом направлении, хорошо аппроксимирующиеся экспонентой, в обратном - малые. Измеренное распределение потенциала по толщине образца и вид ВАХ подтверждают, что нами изготовлен p-i-n-диод. Для исследования инерционных процессов к образцу прикладывалось внешнее напряжение – меандр с частотой 40 кГц, при котором наблюдается расщепление ВАХ и фазовый сдвиг тока относительно приложенного

напряжения (рис.2). Вид ВАХ определяется процессами накопления инжектированных носителей и электрической перезарядкой примеси. Изменение заселенности примесных уровней в зависимости от направления приложенного поля представлено в работе графически. Найдена концентрация носителей заряда, участвующих в перезарядке, которая оказалась соизмеримой с концентрацией вводимого халькогена.

В разделе 3.5 исследуются релаксационные свойства p-i-n – диодов Ge:Se. Измерена температурная зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда τ . При 77К оно составляет 600 мкс, что в несколько раз больше, чем в нелегированном материале, т.е. селен ведет себя как центр прилипания. Определенная энергия ионизации селена, находится в соответствии с оптической.

Спектральная зависимость времени жизни получена при освещении образца ксеноновой импульсной лампой с кварцевым баллоном. Измеренное τ в пределах точности эксперимента постоянно в примесной области и резко уменьшается в фундаментальной из-за сильного роста коэффициента поглощения, и соответственно, поверхностной рекомбинации.

В разделе 3.6 представлены результаты фотоэлектрических исследований p-i-n – диодов с примесями халькогенов при $T=77K$. Спектр ФП Ge:Te идентичен снятому ранее на однородных образцах. В спектре ФП Ge:Se при энергиях 350-370 мэВ наблюдаются переходы электронов на уровни возбужденных состояний, но вместо трех ранее наблюдавшихся, можно различить не менее восьми возбужденных состояний (рис.3) 349,4; 353; 354,8; 356; 357,7; 361,8; 365,2; 368 мэВ. Их идентификация по Фолкнеру дает следующий результат – 353 - $2p_0$; 357,7 - $2s(T_2)$; 361,8 - $3p_0$; 365,2 - $2p_{\pm}$, 368 мэВ - $3p_{\pm}$. Не все состояния удалось идентифицировать, это говорит о том, что полный энергетический спектр селена, не может быть описан водородоподобной моделью.

Возможно, что большое число возбужденных состояний Se в Ge связано с

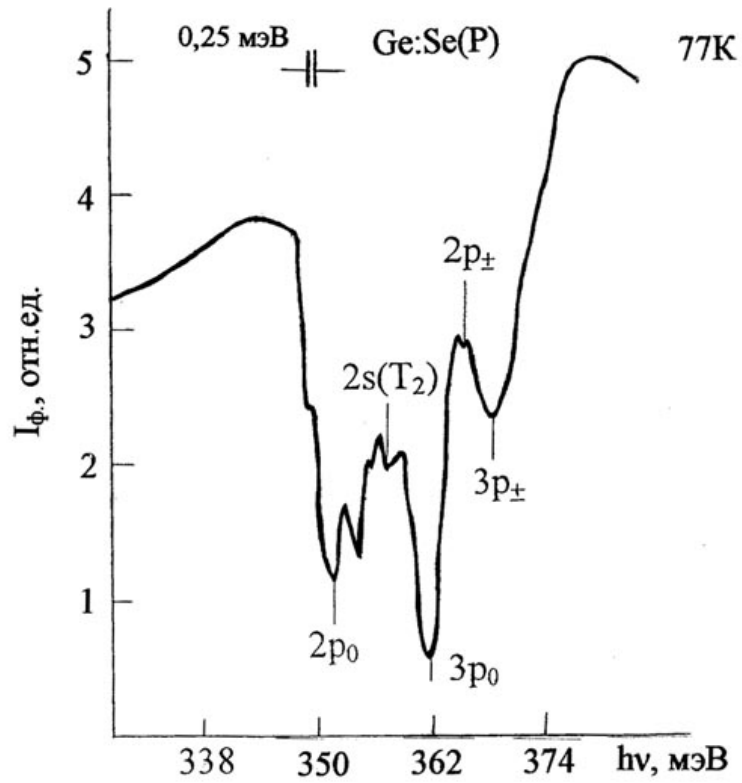


Рис.3. Спектр фотопроводимости Ge:Se(P) при температуре $T=77\text{K}$.
Степень компенсации $\kappa=0,5$.

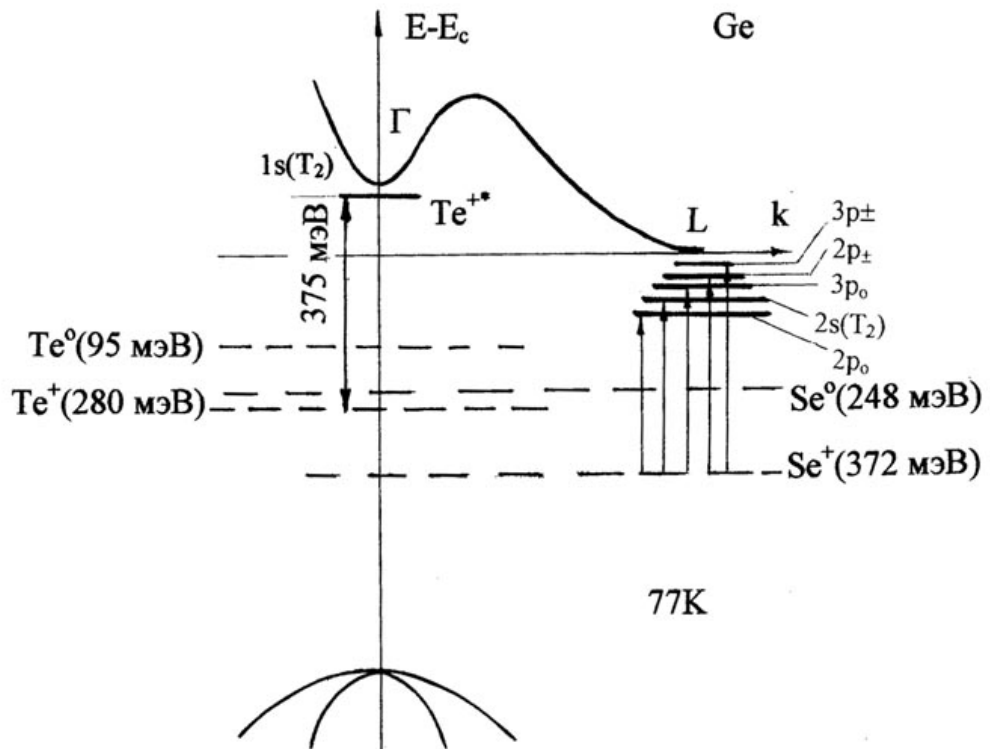


Рис.4. Энергетическая диаграмма состояний Te и Se в Ge при $T=77\text{K}$.

глубиной залегания уровня иона селена, лежащего ниже половины ширины запрещенной зоны. В этом случае к волновым функциям зоны проводимости примешиваются волновые функции валентной зоны, что и проявляется в усложнении энергетического спектра. В спектре ФП p-i-n – диодов Ge:S обнаружены две новые линии переходов электронов в возбужденные состояния. Тогда, согласно [1], энергии переходов соответствуют $353,3-2p_0; 358-2s(T_2); 362-3p_0; 365-2p_{\pm}$ и $368 \text{ мэВ}-3p_{\pm}$ состояниям. На рис.4 представлена энергетическая диаграмма состояний халькогенов в германии при $T=77\text{K}$.

В разделе 3.7 обсуждаются экспериментальные результаты. Проведен расчет спектральной зависимости сечения поглощения в соответствии с работой Гринберга [2] и сравнение с экспериментальной кривой. Далее рассмотрены механизмы уширения спектральных линий. Состояние иона Te^+ в Ge оказывается вырожденным с состояниями зоны проводимости, т.е. является резонансным, а спектральная линия аппроксимируется гауссианом. Селен в германии образует локализованное состояние, связанное с L-экстремумом, а спектральная линия хорошо аппроксимируется леренцианом. Различное поведение теллура, с одной стороны, и серы, селена с другой объясняется различием их электрофизических параметров, что приводит к релаксации решетки Ge – в случае теллура и дисторсии – в случае серы, селена.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Впервые в спектрах фотопроводимости (ФП) Ge обнаружены линии переходов электронов с ионов халькогенов в возбужденные состояния (BC), причем, BC теллура, характеризуется одиночным положительным пиком, а сера и селен вносят несколько пиков отрицательной полярности. Амплитуда фотосигнала в области особенностей сильно зависит от степени компенсации примесей халькогенов. Определены энергии ионизации халькогенов и оптимальные для наблюдения BC степени компенсации.
- 2 В спектрах ФП Ge:(Te+Se) обнаружены линии переходов в BC ионов теллура и селена. Следовательно, наблюдаемые линии обусловлены одиночными атомами в узлах кристаллической решетки, а не комплексами.

3. . В спектрах ФП твердых растворов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ $x=(1,5-4,5)\%$, легированных Te и Se увеличивается энергия ионизации и энергия связи халькогенов с ростом процентного содержания кремния при сохранении вида спектра.
4. В спектрах ФП высокого разрешения p-i-n-диодов Ge+халькогены выявлены новые линии переходов ионов в ВС: в Ge:S – две, в Ge:Se – пять.
5. ВС идентифицированы в соответствии с теоретическим расчетом Фолкнера.
6. ВС иона теллура Te^+ связано Γ -точкой зоны Бриллюэна германия и является резонансным. После оптического возбуждения электрон из ВС переходит путем туннелирования в абсолютный минимум зоны проводимости и увеличивает сигнал фотопроводимости.
7. ВС ионов серы S^+ и селена Se^+ локализованы в L-точке зоны Бриллюэна. Отрицательный вклад в фотопроводимость объяснен изменением симметрии примесного центра после возбуждения, и последующего возврата электрона в основное состояние.
8. Выполнен расчет спектральной зависимости сечения фотоионизации примеси Se в Ge и проведено сопоставление с экспериментальным спектром. Обнаружено и объяснено соответствие спектральной линии перехода в ВС теллура- гауссианом, селена – лоренцианом. Различие спектров ВС объяснено путем анализа комплекса электрофизических параметров халькогенов: возбуждение иона Te^+ вызывает релаксацию решетки германия, S^+ , Se^+ – дисторсию.
9. В p-i-n-диоде Ge:Se энергия активации, найденная из температурной зависимости времени релаксации, соответствует данным оптических измерений. Спектральная зависимость времени жизни постоянна в примесной области спектра и резко снижается в области фундаментальных переходов.
10. Вольтамперные характеристики (ВАХ) p-i-n-диодов Ge:Te, S, Se, снятые в динамическом режиме, отображают процесс накопления заряда инжектированных носителей и перезарядку примесных состояний.

11. Создан комплекс аппаратуры для изготовления легированных образцов, исследования электрических, фотоэлектрических, релаксационных характеристик полупроводников с глубокими уровнями.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

[1]. Faulkner R.A. // Phys.Rev. - 1969. - Vol. 184, N 3. - P. 713-721.

[2] Гринберг А.А. // ФТП. - 1976. - Т. 10, Вып. 10. - С. 1872-1878.

Список публикаций по теме диссертации.

1. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Особенности ФП германия с примесью теллура // II Респ. конф. по фотоэл. явл. в полупр.: Тез. докл., - Одесса, 1982. - С.199.
2. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Особенность в спектре фотопроводимости германия, легированного теллуrom // ФТП. - 1982. - Т. 16, Вып. 10. - С. 1855.
3. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Устройство для измерения концентрации носителей заряда в проводящих материалах // Авт. свид. № 1112316 - 1984г.
4. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Возбужденные состояния примеси Se в Ge // ФТП. - 1985. - Т. 19, Вып. 4. - С. 749-750.
5. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Возбужденные состояния примесей халькогенов в германии // Микроэлектронные устройства. Проектирование и технология: Межвузовский сборник, г. Красноярск: Кр.ПИ, 1988. - С. 107-110.
6. Ушаков А.Ю., Радчук Н.Б., Штеренгас Р.М. Фотопроводимость, связанная с примесью теллура в германии // ФТП. - 1995. - Т. 29, Вып. 3. - С. 483-486.
7. Ушаков А.Ю., Радчук Н.Б., Штеренгас Р.М. Возбужденные состояния серы и селена в германии // ФТП. – 1995. - Т. 29, Вып. 4. - С. 754-756.
8. Штеренгас Р.М., Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Энергетические спектры примесей халькогенов в германии // Рос. Конф. «Инновационные наукоемкие технологии для России»: Тез. докл., - С.Петербург, 1995, ч.9 - С. 129.
9. Штеренгас Р.М., Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Примесная фотолюминесценция халькогенов в германии // там же, - С. 130.
10. Ushakov A.Yu., Radchuk N.B., Shterengas R.M. Excited states of chalcogen impurities in Ge // 18 th International Conference on Defects in Semiconductors. – Japan, Sendai.- 1995. - P. 128.

11. Ушаков А.Ю., Штеренгас Р.М., Радчук Н.Б. Энергетические спектры возбужденных состояний примесей халькогенов в германии // 2-я Рос. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., - Зеленогорск, 1996. - С. 154.
12. Ушаков А.Ю., Штеренгас Р.М., Штеренгас Л.М., Радчук Н.Б., Возбужденные состояния ионов халькогенов в германии // ФТП. - 1998. - Т. 32, Вып. 2. - С. 155-158.
13. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Бесконтактный метод экспресс-измерения времени жизни неосновных носителей в полупроводниках // Всерос. научн. конф. ФПП-2002: Тез. докл., - С.Петербург, 2002. - С. 228.
14. Ушаков А.Ю., Радчук Н.Б. Бесконтактное измерение времени жизни // 17-я Межд. н-т. конф. по фотоэл. и приб. очн. видения:Т.д.,- Москва, 2002.- С.60.
15. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Энергетические спектры халькогенов в сплавах Ge_xSi_{1-x} // VII-я Всерос. конф. по пробл. науки и высш. шк. «Фунд. иссл. в техн. универс.»: Тез. докл., - С.Петербург, 2003. - С. 252-253.
16. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Оптические переходы возбужденных состояний халькогенов в германии // Межд. конф. «Оптика, оптоэлектроника и технологии»: Тез. докл., - Ульяновск, 2003. - С. 71.
17. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Бесконтактный метод измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках // ПТЭ. - 2003. - N 3. - С. 112-115.
18. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Примесная фотопроводимость халькогенов в твердых растворах $Ge_{1-x}Si_x$ // ФТП. - 2005. - Т. 39, Вып. 5. - С. 550-551.
19. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Оптические переходы в германиевых p-i-n-структурах // IX Всерос. конф. по пробл. науки и высш. шк. «Фунд. иссл. в техн. универс.»: Тез. докл., - С.Петербург, 2005. - С. 138-139.
20. Радчук Н.Б., Ушаков А.Ю. Рекомбинационные процессы в германии с примесью селена // Межд. конференция «Опто-наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: Тез. докл., - Ульяновск, 2005. - С. 84.