

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Бондаренко Антон Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ДИСЛОКАЦИОННЫХ СЕТОК В КРЕМНИИ

специальность
01.04.10. – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении Санкт-Петербургский государственный университет

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры электроники
твёрдого тела
физического факультета СПбГУ
Вывенко Олег Федорович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
ведущий научный сотрудник
кафедры физики твёрдого тела
физического факультета СПбГУ
Вербин Сергей Юрьевич

кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией «Диффузии и
дефектообразования в полупроводниках»
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
Заморянская Мария Владимировна

Ведущая организация: Институт физики твёрдого тела РАН

Защита состоится « » _____ 2013 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.232.33 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул. 1, конференц-зал НИИ Физики им. В. А. Фока.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. М. Горького СПбГУ

Автореферат разослан « » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор

Лезов А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Переход от проводной передачи информации к оптической между отдельными функциональными блоками процессоров рассматривается в настоящее время как одно из основных перспективных направлений развития современной микроэлектроники. Наиболее подходящим для передачи сигнала является излучение на длине волны около 1,5 мкм (0,8 эВ), которое может быть использовано в уже существующих системах связи, поскольку совпадает с окном максимальной прозрачности оптических волноводов и не поглощается в кремнии, который может служить световодом внутри микросхемы. Другим важным требованием для такого излучателя является совместимость его производства с уже имеющейся массовой технологией, основанной на использовании монокристаллического кремния.

В качестве перспективного источника излучения, удовлетворяющего таким требованиям, рассматривается одна из линий дислокационной люминесценции (ДЛ), открытой в кремнии в 1976 г. [1], исторически называемая как линия D1 (~0,8 эВ), поскольку эта линия не только подходит по своему спектральному положению, но и обладает большой интенсивностью при комнатной температуре. Недавно уже сообщалось о создании экспериментальных образцов светодиодных устройств, работающих на D1 линии ДЛ [2, 3].

Для определения перспектив внедрения в производство подобных устройств необходимо иметь теоретическую оценку предельной эффективности ДЛ, которая возможна при наличии понимания природы и механизмов, ответственных за ее появление. Однако, несмотря на многочисленные исследования люминесцентных свойств и электронных уровней, связанных с дислокациями, требуемый уровень знаний в этой области не достигнут.

Одной из ключевых проблем является установление однозначного соответствия между энергетическими уровнями в запрещенной зоне, определяемыми в электрофизических измерениях, и оптическим излучением, наблюдаемым при исследовании люминесцентных свойств. Спектральное положение линий люминесценции несет информацию только о разнице в энергии между локальными уровнями, но не дает количественных сведений о концентрации участвующих центров рекомбинации, которые необходимы для оценки предельной эффективности излучателя. С другой стороны, концентрация локальных уровней в запрещенной зоне полупроводника и их энергетическое положение относительно краев разрешенных зон могут быть определены с помощью методов нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней: Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) для исследования уровней захвата основных носителей и Minority Carrier Transient Spectroscopy (MCTS) – для неосновных. Таким образом, установить прямое соответствие между данными независимых оптических и электрофизических измерений, особенно при достаточно сложном спектре энергетических уровней, что является типичным для дислокационных образцов, оказывается практически невозможным. Поэтому актуальной задачей является разработка нового метода исследования уровней в запрещенной зоне, позволяющего судить не только о глубине залегания уровня, но и о его участии в оптических переходах. Среди способов введения дислокаций в кремний особое место занимает технология сращивания кремниевых пластин, применяющаяся для производства подложек кремния на изоляторе. Эта технология позволяет изготавливать регулярные дислокационные сетки (ДС) с контролируемой плотностью дислокаций на площади целой пластины диаметром до 300 мм, а совместно с технологией Smart Cut® позволяет получать ДС на заданной глубине от поверхности. Данные структуры ввиду их точно определенной геометрии идеально подходят как для промышленного применения, так и для исследования свойств самих дислокаций и ДС.

Цели диссертационной работы

1. Разработка нового метода исследования полупроводниковых излучающих структур, позволяющего определять участие электронных уровней в запрещенной зоне в излучательной рекомбинации.
2. Определение при помощи нового метода уровней в запрещенной зоне ответственных за D1 линию дислокационной люминесценции в образцах сращенных пластин кремния.

Для достижения поставленных целей работы были сформулированы следующие **задачи**:

1. Методами нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS, MCTS) исследовать уровни захвата электронов и дырок, образованные дислокационной сеткой в образцах n- и p-типа сращенных кремниевых пластин с углами вращательной разориентации в диапазоне $0,9^\circ - 6,0^\circ$.
2. Исследовать спектры катодолюминесценции образцов n- и p-типа сращенных кремниевых пластин с различной разориентацией вблизи энергетического положения линии D1 ДЛ.
3. Разработать методику для установления участия в люминесценции каждого конкретного уровня, обнаруживаемого в DLTS измерениях.
4. С помощью разработанной методики провести исследования образцов сращенных пластин n- и p- типа и установить уровни, ответственные за люминесцентную полосу D1.

Научная новизна

1. Впервые с помощью применения комбинации методов DLTS и MCTS исследованы спектры локальных электронных состояний дислокационных сеток в образцах сращенных кремниевых пластин во всей запрещенной зоне кремния, в том числе впервые получены указанные данные для образцов n-типа.
2. Разработан и реализован новый метод исследования происхождения спектральных полос излучательной рекомбинации в полупроводниках, основанный на впервые установленном явлении люминесценции, стимулированной электрическим заполнением носителями заряда локальных уровней в запрещенной зоне полупроводника.
3. С использованием нового метода экспериментально установлены электронные уровни в запрещенной зоне кремния, ответственные за D1 линию дислокационной люминесценции. Показано, что D1 люминесценция проходит при участии только мелких уровней в верхней и нижней половине запрещенной зоны с глубинами залегания порядка соответственно $E_c - 0,1$ эВ и $E_v + 0,08$ эВ.
4. Предложена новая модель оптических переходов, описывающая механизм излучения линии D1 дислокационной люминесценции через мелкие уровни, которая учитывает кулоновское взаимодействие носителей, захваченных на центры рекомбинации, уменьшающее энергию излучения.

Научная и практическая значимость работы

1. Обнаружено и исследовано явление люминесценции, стимулированной электрическим заполнением носителями заряда локальных уровней в запрещенной зоне полупроводника, которое расширяет общие представления об оптических процессах в полупроводниках.
2. Разработанный новый метод исследования процессов излучательной рекомбинации в полупроводниках с участием локальных центров люминесценции может быть использован для исследования широкого класса оптоэлектронных полупроводниковых структур.
3. Установление уровней, ответственных за D1 линию дислокационной люминесценции, открывает возможность оценки предельной эффективности излучателей на ее основе и перспектив ее применения в индустрии микроэлектроники.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально определенные параметры энергетических уровней дислокационных сеток в запрещенной зоне кремния.
2. Совпадение энергетических положений электронных состояний дислокационной сетки в запрещенной зоне кремния n- и p-типа.
3. Новый метод установления однозначного соответствия между данными емкостной спектроскопии глубоких уровней и спектрами люминесценции.
4. Только мелкие уровни в запрещенной зоне с энергетическим положением порядка $E_c - 0,1$ эВ и $E_v + 0,1$ эВ участвуют в оптических переходах, ответственных за D1 линию в кремнии.
5. Модель оптических переходов D1 люминесценции, учитывающая электростатическое взаимодействие носителей заряда, захваченных на нейтральные мелкие дислокационные уровни.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью при исследовании большого числа образцов, применением современных экспериментальных методов исследования глубоких уровней и спектров катодолюминесценции, современных теоретических представлений для интерпретации экспериментальных данных, согласием данных эксперимента с расчетными, полученными на основании имеющихся моделей.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных школах, конференциях и симпозиумах: 25-ая Международная конференция по дефектам в полупроводниках (ICDS-25) (Санкт-Петербург, Россия 2009); 10-ая Международная Конференция по пучковым методам исследования микроструктур в полупроводниках (BIAMS-2010) (Халле, Германия 2010); Международная конференция по протяженным дефектам в полупроводниках (EDS-2010) (Брайтон, Великобритания 2010); XIV Международная Конференция: "Геттерирование и инженерия дефектов в полупроводниковой технологии" (GADEST-2011) (Лойперсдорф, Австрия 2011); Международная конференция по протяженным дефектам в полупроводниках (EDS-2012) (Солоники, Греция 2012); IX Международная конференция и VIII школа молодых ученых Кремний-2012 (Санкт-Петербург, Россия 2012); XV Европейский Конгресс по Микроскопии (EMC-2012) (Манчестер, Великобритания 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов, результатов и обсуждения, заключения, выводов, списка литературы и выводов. Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, включает 57 рисунков и 2 таблицы. Библиография содержит 88 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель и поставлены задачи исследования, показана научная новизна и научно-практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях.

Первая глава диссертации представляет литературный обзор по теме исследования. Глава состоит из трех разделов. В первом дается описание дислокаций в кремнии, даются основные определения, описываются структура ядра и электронные уровни, связанные с дислокациями в кремнии, а также технологические

способы их введения. Во втором разделе рассматриваются спектры дислокационной люминесценции в кремнии, описывается влияние плотности дислокаций на интенсивность и вид спектра дислокационной люминесценции, влияние примесей и точечных дефектов на интенсивность и спектральную форму линий D1/D2 дислокационной люминесценции и на плотность электронных состояний в запрещенной зоне. В третьем разделе рассматриваются основные существующие модели механизмов оптических переходов, ответственных за D1 линию дислокационной люминесценции.

Вторая глава посвящена методам исследования электронных состояний и люминесценции дислокационных сеток на интерфейсе сращенных кремниевых пластин. Глава состоит из пяти разделов. В первом и втором разделах дается описание исследованных образцов, методик определения типа дислокаций в дислокационной сетке и плотности дислокационной сетки при помощи просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). В третьем разделе следует описание методов исследования энергетических уровней в запрещенной зоне (емкостная спектроскопия глубоких уровней (DLTS и MCTS)) в применении к диоду Шоттки с дислокационной сеткой, расположенной на фиксированной глубине от контакта. Четвертый раздел посвящен расчету электрического поля и хода электрического потенциала в диоде Шоттки с интерфейсом в области пространственного заряда (ОПЗ). Показана возможность инверсии направления электрического поля в диоде между дислокационной сеткой и электродом при прямых напряжениях смещения (Рис. 1).

Инверсия направления поля может оказать критическое влияние на регистрируемые спектры фото- и катодолуминесценции за счет модуляции токов сгенерированных неравновесных носителей. Кроме того инверсия направления поля означает, что энергетические уровни дислокационной сетки изначально нейтральны. Их заполнение основными носителями вызывает накопление заряда на интерфейсе, приводящего к эффекту инверсии.

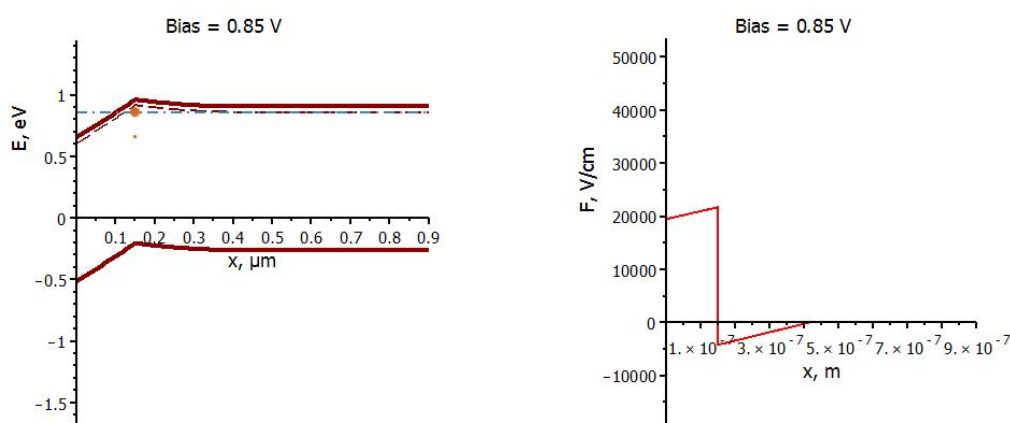


Рис. 1. Зонная диаграмма Шоттки-диода со встроенной в ОПЗ дислокационной сеткой и соответствующий ей профиль электрического поля. Наблюдается инверсия поля при прямых смещениях, связанная с зарядом уровней дислокационной сетки в запрещенной зоне.

Проведено численное моделирование вольт-фарадных характеристик (ВФХ) диода с дислокационной сеткой в ОПЗ, зависимости тока, наведенного электронным лучом (Electron Beam Induced Current, ЕВІС), от приложенного напряжения, показавшее, что при инверсии должен наблюдаться скачок на зависимости наведенного электронным лучом тока от напряжения смещения на диоде (Рис. 2). На ВФХ ожидается наблюдение особенностей в виде плоских горизонтальных участков, соответствующих пиннингу уровня Ферми на энергетических уровнях ДС.

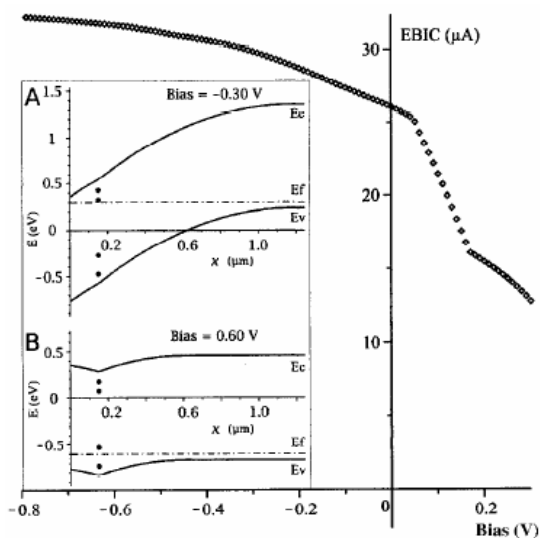


Рис. 2. Симуляция тока наведенного электронным лучом в зависимости от напряжения смещения на Шоттки-диоде с дислокационной сеткой в ОПЗ. Скачок в токе при напряжениях около 0,1 В соответствует началу инверсии направления электрического поля в передней части диода, связанной с зарядкой дислокационной сетки.

Наблюдение скачка тока является однозначным критерием инверсии направления поля в передней части диода.

В пятом разделе описаны основы метода регистрации катодолуминесценции в диоде Шоттки с дислокационной сеткой в ОПЗ на интерфейсе сращенных кремниевых пластин. Показано влияние электрического поля на интенсивность люминесценции. Дано описание примененной экспериментальной установки для исследования спектров катодолуминесценции.

В третьей главе представлены результаты структурных исследований образцов сращенных кремниевых пластин методом ПЭМ. Для всех образцов определены плотность и тип дислокаций, рассчитаны точные углы разориентации пластин.

Приведены результаты исследования образцов сращенных кремниевых пластин методом вольт-фарадных характеристик. Определены параметры приготовленных Шоттки диодов, параметры легирования исходных пластин. Объяснены особенности вольт-фарадных характеристик, согласующиеся с модельными представлениями, описанными в главе 2, подтверждающие наличие пиннинга уровня Ферми на глубоких уровнях ДС.

Представлены результаты исследования образцов сращенных кремниевых пластин методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS, MCTS). Определены параметры уровней дислокационной сетки в запрещенной зоне кремния n- и p-типа: энергетическое положение и сечения захвата. Обнаруженные уровни дислокационной сетки могут быть объединены в две основные группы: мелкие с энергией активации около 0,1 эВ и глубокие с энергией активации более 0,2 эВ, далее обозначаемые просто мелкие и глубокие.

Установлено совпадение энергетического положения уровней в запрещенной зоне в образцах n- и p-типа.

Обнаружено немонотонное поведение определяемой концентрации мелких уровней дислокационной сетки с ростом угла разориентации сращенных пластин, как у образцов n-, так и p-типа. При малых углах разориентации (до 3°) амплитуда пика DLTS растет с увеличением угла разориентации, с дальнейшим увеличением угла амплитуда пика уменьшается вплоть до полного подавления у образцов с углом разориентации более 4°.

Приведены результаты исследования образцов сращенных кремниевых пластин n- и p-типа методом катодолуминесценции типа с углами вращательной разориентации пластин в диапазоне 0,9° - 6° в диапазоне энергий фотона 0,75-0,89 эВ.

Спектры люминесценции малоугловых (0,9°-3°) образцов n- и p-типа демонстрируют совпадающие по форме и энергетическому положению двойные структуры

с максимумом основного пика при энергии 0,80 эВ, соответствующего положению D1 линии дислокационной люминесценции, и дополнительным полностью не разрешающимся пиком при энергии около 0,79 эВ. Спектры люминесценции имеют несимметричную форму и сильно затянуты в сторону больших энергий.

С ростом угла разориентации более 3° интенсивность линии D1 угасает, спектр сначала превращается в широкий максимум при энергии около 0,85 эВ, затем при угле разориентации более 5° наблюдается лишь широкий фоновый сигнал без выраженного максимума.

Установлена корреляция между интенсивностью линии D1 дислокационной люминесценции и величиной пика DLTS в диапазоне температур 50-70 К, соответствующего мелкому уровню (энергия активации $\sim 0,1$ эВ) дислокационной сетки. У малоугловых ($0,9^\circ$ - 3°) образцов наблюдается одновременно интенсивная D1 люминесценция (как в n- так и в p-типе) и пик большой амплитуды от мелкого уровня, с ростом угла разориентации линия D1 угасает с одновременным уменьшением сигнала DLTS от мелкого уровня.

В четвертой главе предложен новый метод для установления участия каждого уровня в запрещенной зоне, локализованного на интерфейсе, помещенном в ОПЗ диода Шоттки, определяемого в DLTS измерениях, в излучательной рекомбинации (Pulsed Traps Refilling Enhanced Luminescence, Pulsed-TREL). Метод основан на регистрации люминесценции, стимулированной последовательными процессами контролируемого заполнения основными носителями энергетических уровней приложением электрических импульсов и инжекции неосновных носителей. Посредством сканирования по амплитуде заполняющего импульса производится последовательное установление участия уровней запрещенной зоны в люминесценции по зависимости интенсивности люминесценции от амплитуды импульса.

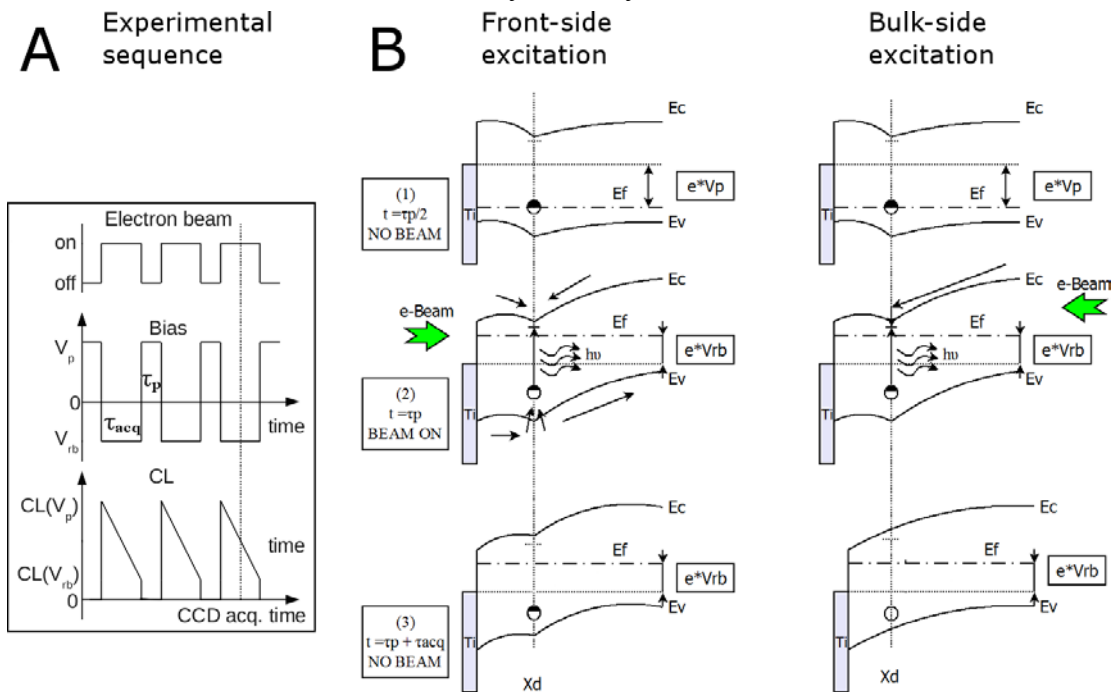


Рис. 3. Экспериментальная последовательность методики Pulsed-TREL (A) и зонные диаграммы (B), изображающие три основных состояния образца (для определенности p-типа) во время измерений при возбуждении со стороны контакта (слева) и со стороны базы диода (справа).

Экспериментальная последовательность Pulsed-TREL приведена на Рис. 3. Сначала в состоянии (1) когда электронный луч убрал с образца, подается заполняющий импульс длительностью τ_p . В соответствии с амплитудой импульса V_p происходит

заполнение состояний дислокационной сетки. Затем в состоянии (2) восстанавливается напряжение обратного смещения V_{rb} и с небольшой задержкой τ_{bb} , определяемой скоростью срабатывания бланкера (устройство, управляющее электронным лучом), включается электронный луч. На зонных диаграммах изображены потоки носителей в случае фронтального возбуждения электронным лучом и возбуждения с тыльной стороны диода. В последнем случае исключен захват основных неравновесных носителей, способных давать дополнительную катодолуминесценцию, не связанную с заполнением уровней во время импульса. Время τ_{acq} , в течение которого происходит облучение образца электронным лучом, должно быть достаточно большим, чтобы все заполненные во время импульса центры успевали полностью опустошаться. На стадии (3) показано состояние образца в момент сразу перед подачей следующего заполняющего импульса. В случае фронтального возбуждения образца возможно неконтролируемое остаточное заполнение уровней. Для гарантированного увода луча с образца перед подачей импульса, импульс подается также с задержкой на срабатывание бланкера.

Благодаря принципу «окна скоростей», реализуемому в DLTS, при определенной температуре регистрируется сигнал от уровня с соответствующей энергией активации, поскольку существует однозначная связь скорости эмиссии с глубиной залегания уровня. Таким образом, глубокие уровни дают пики на спектре при более высоких температурах, чем мелкие. Если при данной температуре нет сигнала DLTS, значит, в запрещенной зоне нет заполненных уровней при соответствующей энергии. Как было описано выше, в случае с дислокационной сеткой на фиксированном расстоянии от контакта заполнение любого энергетического уровня определяется амплитудой импульса. Это означает, что в DLTS измерениях при температуре пика, соответствующего определенному энергетическому уровню, величина сигнала DLTS будет меняться в зависимости от амплитуды заполняющего импульса от нуля, когда уровень не заполняется, до максимального значения, соответствующего предельному заполнению уровня. В случае равновесного заполнения каждому уровню соответствует пара характеристических значений амплитуды импульса, при которых начинается и насыщается заполнение. Интервалы напряжений импульса заполнения в равновесном случае не перекрываются. Получить эти характеристические значения для каждого уровня можно, построив зависимости величины соответствующего пика DLTS от амплитуды импульса (Рис. 4). Именно эти значения предлагается использовать для идентификации уровней, вызывающих усиление интенсивности люминесценции в Pulsed-TREL при конкретных значениях амплитуды импульса.

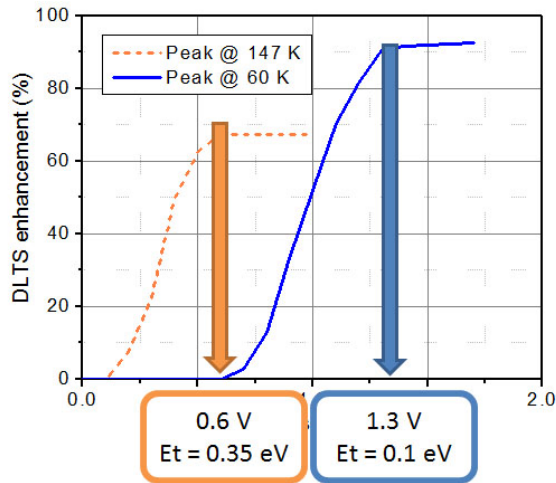


Рис. 4. Пример зависимостей величины пиков DLTS, соответствующих мелкому и глубокому уровню дислокационной сетки, от амплитуды заполняющего импульса. Величина заполняющего импульса, при которой сигнал DLTS насыщается, является характеристической величиной для каждого уровня.

Так как в измерениях DLTS и особенно в Pulsed-TREL заполняющий импульс имеет конечную ширину τ_p , для правильной интерпретации результатов предлагаемой экспериментальной методики было произведено численное моделирование кинетических процессов заполнения уровней дислокационной сетки в запрещенной зоне.

Поскольку исследуемый интерфейс помещен в область пространственного заряда диода Шоттки, в кинетическом уравнении можно пренебречь процессами захвата и эмиссии неосновных носителей. Для центров захвата с энергетической плотностью распределения состояний в запрещенной зоне ρ_E , такой что $\int_E \rho_E dE = 1$,

кинетическое уравнение может быть записано в виде

$$\frac{dF_{[i]}}{dt} = \sigma_{n[i]} \langle v_n \rangle n(1 - F_{[i]}) - \sigma_{n[i]} \langle v_n \rangle N_C \int_E \exp\left(\frac{E - E_C}{kT}\right) \rho_{E[i]} f(E, E_F) dE, \quad (1)$$

$$F_{[i]}(t = 0) = F_{0[i]}$$

где $F_{[i]} = \frac{N_{ss[i]}}{N_{total[i]}}$ – степень заполнения ловушки, $N_{ss[i]}$ – концентрация заполненных

центров захвата, $N_{total[i]}$ – полная концентрация центров захвата, σ_n – сечение захвата ловушки, $\langle v_n \rangle$ – средняя тепловая скорость носителей в разрешенной зоне, n – концентрация основных носителей в месте нахождения дефекта, N_C – эффективная плотность состояний в разрешенной зоне, $f(E, E_F)$ – функция Ферми. Начальные условия заполнения уровней в эксперименте Pulsed-TREL $F_{[i]}(t = 0) = 0$.

На Рис. 5 для моноэнергетических уровней и на Рис. 6 для зоноподобных энергетических уровней сплошными линиями приведены зависимости заполнения уровней от величины импульса. Длительность импульса τ_p составляет 1 мкс. Синяя кривая соответствует глубокому уровню, красная – мелкому. Пунктирными линиями изображены кривые равновесного заполнения $\tau_p = \infty$. Начало роста кривых, соответствующих импульсному заполнению глубокого уровня, смещено от кривых равновесного заполнения в сторону больших амплитуд заполняющего импульса. Это связано с тем, что рост кривой равновесного заполнения начинается с момента совпадения положения уровня Ферми с глубоким уровнем, однако концентрация носителей в зоне проводимости, а значит и скорость захвата носителей, при этом

очень мала. За время импульса 1 мкс ловушки не успевают заполниться. С ростом амплитуды заполняющего импульса концентрация носителей в зоне растет и скорость заполнения растет. В итоге при коротких длительностях заполняющего импульса кривая заполнения становится уже и смещена от равновесной кривой.

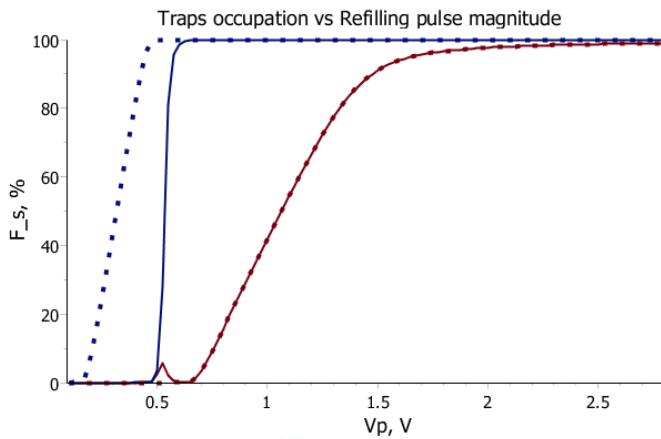


Рис. 5. Заполнение моноэнергетических уровней с глубиной залегания 0,09эВ (синие кривые) и 0,3эВ (красные кривые) в зависимости о величины заполняющего импульса. Сплошные линии соответствуют заполнению импульсом длительностью 1 мкс, пунктирные – равновесному заполнению.

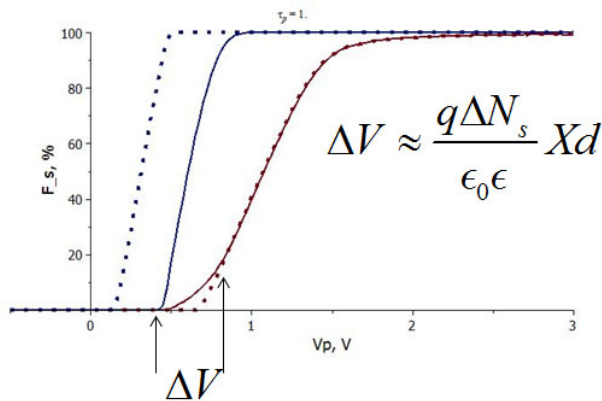


Рис. 6. Заполнение энергетических уровней с прямоугольной функцией распределения и глубиной залегания 0,09эВ (синие кривые) и 0,3эВ (красные кривые) в зависимости о величины заполняющего импульса. Сплошные линии соответствуют заполнению импульсом длительностью 1 мкс, пунктирные – равновесному заполнению.

Вследствие того, что в начальный момент перед подачей заполняющего импульса все ловушки пустые, захват носителей идет на все центры и глубокие и мелкие одновременно. Этот процесс приводит к росту барьера интерфейса (Рис. 1), который динамически поднимает уровни дислокационной сетки относительно уровня Ферми. В кинетическом уравнении (1) для мелкого уровня начинает доминировать эмиссионный член. В итоге его заполнение выходит к равновесному для данного импульса значению.

На зависимости заполнения мелкого уровня от амплитуды импульса (Рис. 5) описанный процесс заполнения приводит к появлению препика в интервале значений напряжения импульса, соответствующих заполнению глубокого уровня. Таким образом, в случае оптических переходов с участием мелкого уровня, на зависимостях интенсивности люминесценции от величины заполняющего импульса можно ожидать появление препиков. При малой концентрации глубоких уровней и их достаточно узком энергетическом распределении в запрещенной зоне.

В случае зоноподобных уровней (Рис. 6) препик, наблюдавшийся при моделировании моноэнергетических уровней, сливается с кривой заполнения мелкого уровня, приводя к ее уширению в сторону меньших амплитуд заполняющего импульса.

По уширению, равно как и по отстоянию препика от равновесной кривой, ΔV можно грубо оценить концентрацию глубоких уровней, вызывающих это уширение.

$$\Delta V \approx \frac{q\Delta N_s}{\epsilon_0 \epsilon} X_d \quad (2)$$

Из проведенного анализа следует, что указанные выше артефакты в виде препиков и уширений могут быть использованы при интерпретации результатов. Стоит отметить, что из симуляций можно ожидать также и промежуточные по виду (между препиком и уширением) кривые заполнения. Так, при более мелком моноэнергетическом уровне, или узком зоноподобном уровне, возможно, что препик частично перекрывается с кривой заполнения, вызвав на последней образование плато или ступеньки.

Пятая глава посвящена исследованию влияния заполнения различных электронных состояний дислокационной сетки на интенсивность линии D1 дислокационной люминесценции новым методом Pulsed-TREL. Представлены результаты измерения спектров катодолуминесценции, стимулированной заполнением энергетических уровней ДС электрическими импульсами (Рис. 7).

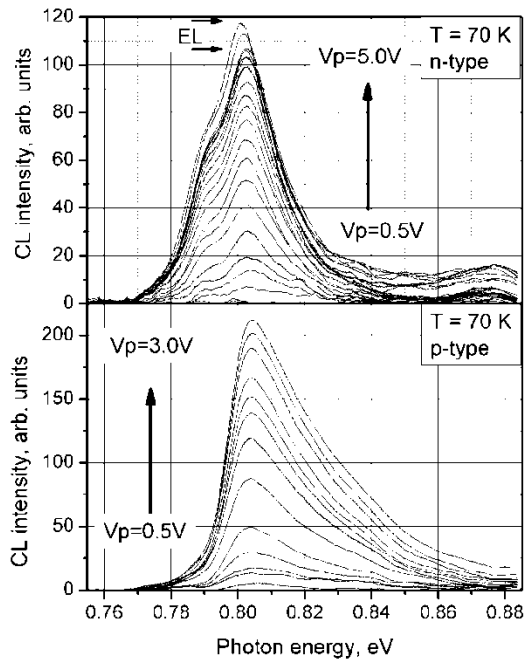


Рис. 7. Спектры Pulsed-TREL для образцов n- (вверху) и p-типа (внизу), записанные в диапазоне напряжений заполняющего импульса от 0 В до 5 В.

боких энергетических состояний сливается с профилем заполнения, уширяя его.

Построены зависимости интенсивности линии D1 ДЛ и величины сигнала DLTS при температурах пиков, соответствующих мелким и глубоким уровням от амплитуды заполняющего импульса (Рис. 8). Насыщение сигнала люминесценции, как в случае n-, так и p-типа, наступает одновременно с насыщением заполнения мелкого уровня при величине импульса равной 1,3 В.

Зависимость сигнала люминесценции от импульса демонстрирует у образца n-типа характерный, воспроизводимый, препик в диапазоне амплитуд импульса 0 – 0,5 В. Данный препик следует отнести к предсказанному симуляцией кинетики заполнения совместному заполнению мелкого и глубоких энергетических состояний в запрещенной зоне. У образца p-типа плотность глубоких состояний оказалась заметно большей, чем в образце n-типа, и препик, связанный с совместным заполнением мелкого и глубоких энергетических состояний сливается с профилем заполнения, уширяя его.

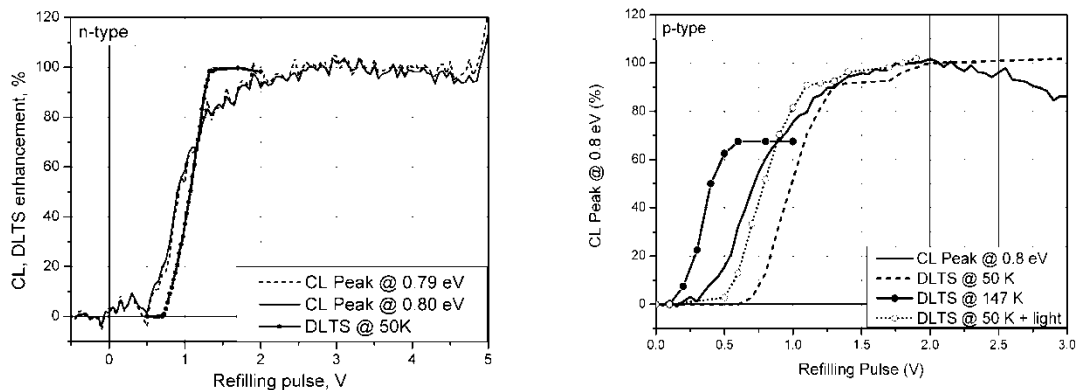


Рис. 8. Зависимости величины сигнала DLTS при $T=50\text{K}$ и $T=147\text{K}$ (мелкий и глубокий уровни дислокационной сетки соответственно) и интенсивности пиков люминесценции 0,79 эВ и 0,8 эВ от амплитуды заполняющего импульса для образцов n-типа (слева) и p-типа (справа).

Представленные выше результаты измерений показали, что как в случае образца n типа, так и в случае p-типа рекомбинация, ответственная за D1 линию ДЛ проходит через мелкие уровни с глубиной залегания $E_c - 0,1$ эВ и $E_v + 0,07$ эВ соответственно.

Межуровневое энергетическое расстояние для этих уровней при температуре 70 К составляет 0,97 эВ, что превышает наблюдаемую энергию оптического перехода равную 0,8 эВ на 0,17 эВ. Для объяснения обнаруженного расхождения в энергиях предлагается модель взаимодействующих нейтральных в незаполненном состоянии уровней. Обозначим уровень в верхней половине запрещенной зоны с энергией $E_a = E_c - 0,1$ эВ буквой А, захват электрона приводит к изменению его зарядового состояния с нейтрального A^0 на отрицательное A^- . Уровень в нижней половине запрещенной зоны $E_d = E_v + 0,07$ эВ обозначим D. Захват дырки переводит уровень D из состояния D^0 в состояние D^+ . Реакцию излучательной рекомбинации тогда можно записать



Наглядно схема оптических переходов предложенной модели представлена на Рис. 9. В начальном состоянии энергия заряженных центров захвата меньше за счет электростатического взаимодействия, чем энергия в конечном состоянии, и эта дополнительная энергия уменьшает энергию испущенного фотона

$$h\nu = E_g - E_d - E_a - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (4)$$

на величину $q^2 / (4\pi\epsilon_0\epsilon r)$. Предложенная модель аналогична в части понижения энергии за счет электростатического взаимодействия представлению о свободном экситоне. Отличие от экситона состоит в том, что в данном случае взаимодействуют носители, захваченные ловушками.

Обнаруженная нами разность межуровневой энергии и энергии испущенных фотонов 0,17 эВ дает расстояние между взаимодействующими центрами 0,76 нм, порядка 1,5 постоянных решетки кремния. Из формулы (4) следует, что самые близко расположенные центры дают наименьшую энергию фотона. Исходя из этой модели, уширение пика D1 ДЛ в высокоэнергетическую сторону может быть объяснено переходами между более удаленными центрами. Еще одним следствием предложенной модели является возможность объяснить разнообразие наблюдаемых дополнительных пиков люминесценции, сопутствующих основному с энергией фотона 0,8 эВ, не только разнообразием энергетического положения самих этих центров люминесценции, но и разнообразием расстояний между взаимодействующими центрами.

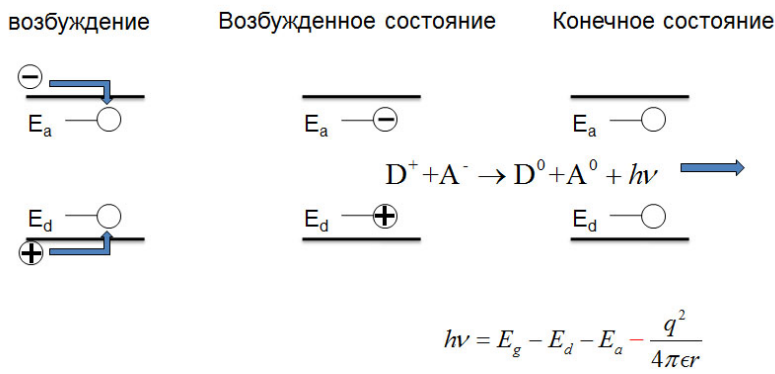


Рис. 9. Схема оптических переходов через пары нейтральных центров захвата носителей, с учетом электростатического взаимодействия между захваченными носителями и соответствующая реакция рекомбинации.

В экспериментах Pulsed-TREL темп генерации электронно-дырочных пар в объеме полупроводника, вычисленный для ускоряющего напряжения 30 кВ и тока пучка 40 нА составлял $2,5 \cdot 10^{14}$ пар/с. Что соответствует наведенному току около 25 мкА. Площадь облучения составляла пятно диаметром около 100 мкм с учетом диффузионного растекания носителей на толщине образца. Плотность тока может быть вычислена, полагая площадь равной 100 x 100 мкм, что дает величину $J = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Постоянная времени захвата дается

$$\frac{1}{\tau} = \sigma_{app} J \quad (5)$$

Где σ_{app} наблюдаемое сечение захвата процесса рекомбинации. Отсюда, из экспериментально определенной постоянной времени затухания люминесценции после заполнения уровней основными носителями $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ с, получаем сечение захвата

$$\sigma_{app} = \frac{1}{J\tau} \approx 10^{-13} \text{ см}^{-2} \quad (6)$$

Это сечение, по крайней мере, на 2 порядка величины больше, чем ожидаемое для нейтральных центров, что может быть объяснено в предположении модели Кведера и др. [4] о наличии эффективных каналов поставки носителей заряда к рекомбинирующим центрам как результат высокой проводимости по дислокациям.

Оцененная из данных DLTS концентрация центров составила величину около 10^{11} см^{-2} . Таким образом, эффективность рекомбинации определим как долю рекомбинационного тока от полного тока диода

$$\eta_{LED} = \frac{I_R}{I_d} = \sigma_{app} N_t \approx 1\% \quad (7)$$

Наша оценка примерно на порядок больше, чем было найдено экспериментально в образцах светодиодов на основе пластически деформированных образцов [2], но хорошо согласуется с этими данными, если учесть что суммарная длина 60 градусных дислокаций в активной зоне пластически деформированных образцов была как раз примерно на порядок меньше. Тем самым подтвержден результат о практической возможности использования ДЛ для создания эффективного светодиода на основе дислокационного кремния.

Более точная оценка предельной эффективности требует проведения измерения с временным разрешением постоянной времени гашения сигнала люминесценции.

Основные результаты работы:

1. Определены концентрации и энергетическое положение уровней дислокационных сеток в запрещенной зоне кремния методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS, MCTS) на образцах сращенных кремниевых пластин n- и p-типа с углами вращательной разориентации пластин в диапазоне $0,9^\circ - 6^\circ$.
2. Проведено теоретическое моделирование профиля потенциала электрического поля в диоде Шоттки с встроенной в ОПЗ дислокационной сеткой с энергетическими уровнями с учетом последовательного сопротивления базы диода в режиме постоянного тока в диапазоне приложенных напряжений смещения $-5 \text{ В} - +5 \text{ В}$. Получены зависимости заполнения глубоких и мелких уровней дислокационной сетки от приложенного напряжения смещения. Установлена возможность инверсии направления поля в передней части диода между электродом и дислокационной сеткой при заполнении уровней сетки.
3. Измерена зависимость тока наведенного электронным лучом в диоде Шоттки с дислокационной сеткой в ОПЗ от приложенного напряжения смещения. Изменение знака наведенного тока в диапазоне напряжений, соответствующих заполнению глубокого уровня подтверждает предсказанное проведенными теоретическими расчетами изменение направления поля в передней части диода.
4. Исследованы спектры катодолюминесценции образцов сращенных кремниевых пластин n- и p-типа с углами вращательной разориентации пластин в диапазоне $0,9^\circ - 6^\circ$ в диапазоне энергий фотона $0,75-0,89 \text{ эВ}$. Спектры люминесценции малоугловых ($0,9^\circ-3^\circ$) образцов n- и p-типа демонстрируют совпадающие по форме и энергетическому положению двойные структуры с максимумом основного пика при энергии $0,80 \text{ эВ}$, соответствующей положению D1 линии дислокационной люминесценции, и дополнительным полностью не разрешающимся пиком при энергии около $0,79 \text{ эВ}$. Спектры люминесценции имеют несимметричную форму и сильно затянуты в сторону больших энергий.
5. Установлена корреляция между интенсивностью линии D1 дислокационной люминесценции и величиной пика DLTS в диапазоне температур $50-70 \text{ К}$, соответствующего мелкому уровню (энергия активации $\sim 0,1 \text{ эВ}$) дислокационной сетки. У малоугловых ($0,9^\circ-3^\circ$) образцов наблюдается одновременно интенсивная D1 люминесценция (как в n- так и в p-типе) и пик большой амплитуды от мелкого уровня, с ростом угла разориентации линия D1 угасает с одновременным уменьшением сигнала DLTS от мелкого уровня.
6. Предложена и разработана новая методика установления участия уровней захвата основных носителей, обнаруживаемых в DLTS измерениях, в излучательной рекомбинации. Методика основана на регистрации люминесценции, стимулированной последовательными процессами контролируемого заполнения основными носителями энергетических уровней, локализованных на интерфейсе, помещенном в ОПЗ диода Шоттки, посредством последовательного приложения электрических импульсов и импульсов инжекции неосновных носителей. Выделение уровня, ответственного за люминесценцию регистрируемой спектральной полосы, производится путем сравнения зависимостей сигналов интенсивности стимулированной люминесценции и величины пика DLTS от амплитуды заполняющего импульса.
7. В результате применения новой методики к образцам сращенных кремниевых пластин установлено, что только мелкие уровни дислокационной сетки в запрещенной зоне кремния ($E_c-0,1 \text{ эВ}$ и $E_v+0,07 \text{ эВ}$) участвуют в D1 люминесценции.
8. Предложена новая модель, объясняющая разницу между межуровневой энергией и энергией регистрируемой люминесцентной полосы, которая учитывает кулоновское взаимодействие носителей, захваченных на нейтральные уровни парных дефектов.
9. Из оценки постоянной времени затухания интенсивности дислокационной люминесценции D1 после окончания заполнения соответствующих уровней, и величины

регистрируемого тока неосновных носителей проведена оценка эффективности излучательной рекомбинации на основе интерфейса сращенных кремниевых пластин. Эффективность излучательной рекомбинации оказалась равной около 1%, что подтверждает возможность практического использования ДЛ для создания эффективного светодиода на основе дислокаций в сращенных пластинах кремния.

Работы автора по теме диссертации

1. A. Bondarenko, O. Vyvenko, N. Bazlov, and O. Kononchuk, Dislocation luminescence and electrical properties of dislocation network produced by silicon direct wafer bonding // *Physica B: Condensed Matter* 2009, v. 404 No. 23-24, p. 4608-4611
2. A. Bondarenko, O. Vyvenko, I. Isakov, and O. Kononchuk, Correlation between cathodoluminescent and electrical properties of dislocation network in the space charge region of Schottky-diode // *Physica Statatus Solidi (c)* 2011, v. 8, p. 1273-1277
3. I. Isakov, A. Bondarenko, O. Vyvenko, V. Vdovin, E. Ubyivovk, and O. Kononchuk, Electrical levels of dislocation networks in p- and n-type Si // *Journal of Physics: Conference Series* 2011, v. 281 No. 1, art. no. 012010
4. A.S. Bondarenko, O.F. Vyvenko, and I.A. Isakov, Identification of dislocation-related luminescence participating levels in silicon by DLTS and Pulsed-CL profiling // *Journal of Physics: Conference Series* 2011, v. 281 No. 1, art. no. 012008
5. A. Bondarenko, O. Vyvenko, I. Kolevatov, I. Isakov, and O. Kononchuk, Dislocation structure, electrical and luminescent properties of hydrophilically bonded silicon wafer interface // *Solid State Phenomena* 2011, v. 178-179, p. 233-242
6. А.С. Бондаренко, О.Ф. Вывенко, И.А. Исаков, Электронные уровни и люминесценция дислокационных сеток, полученных гидрофильным сращиванием пластин кремния // *ФТП* 2013, т. 47 вып. 2, с. 223-227

Цитируемая литература

- [1] N. A. Drozdov, A. A. Patrin and V. D. Tkachev, *JETP Letters* **23**, 597 (1976)
- [2] V. Kveder, M. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Seibt and W. Schroter, *Applied Physics Letters* **84**, 2106 (2004)
- [3] X. Yu, W. Seifert, O. F. Vyvenko, M. Kittler, T. Wilhelm and M. Reiche, *Applied Physics Letters* **93**, 041108 (2008)
- [4] V. V. Kveder, E. A. Steinman, S. A. Shevchenko and H. G. Grimmeiss, *Phys. Rev. B* **51**, 10520 (1995)

Благодарности

За предоставленные образцы сращенных кремниевых пластин автор выражает признательность Олегу Конончуку и компании SOITEC. За помощь в проведении исследований автор благодарит Владимира Ильича Вдовина, Евгения Убийвовка, Ивана Исакова.

Отдельную благодарность автор выражает научному руководителю д. ф.-м. н., профессору Вывенко Олегу Федоровичу, активно участвовавшему в обсуждении результатов экспериментов и постановке задач данной работы.

За возможность проведения измерений на оборудовании Междисциплинарного Ресурсного Центра по направлению «Нанотехнологии» СПбГУ автор благодарит руководство университета и всех коллег – сотрудников МРЦ-НТ.

За помощь в подготовке автореферата автор благодарен к.б.н. Наталье Ланник.

За моральную поддержку и помощь в редактировании текста диссертации автор благодарен своей маме Бондаренко Вере Васильевне, своему отцу Бондаренко Сергею Леонидовичу и своему брату к.ф.-м.н. Бондаренко Юрию Сергеевичу.