

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф.ИОФФЕ

На правах рукописи

ВЕКСЛЕР Михаил Исаакович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ МОП СТРУКТУР
С ТУННЕЛЬНО-ТОНКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

специальность
01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2006

Работа выполнена в Физико-техническом институте
им. А. Ф. Иоффе РАН

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор

Воробьев Л.Е.

Доктор технических наук,
профессор

Лучинин В.В.

Доктор физико-математических наук,
профессор

Новиков Б.В.

Ведущая организация:

Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН, г. Москва

Защита состоится "____" _____ 200__ г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН (194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан "____" _____ 200__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Л. М. Сорокин

Общая характеристика работы

Настоящая работа, выполненная в период с 1992 по 2006 гг., посвящена комплексному исследованию электрических и оптических (люминесцентных) свойств туннельных МОП структур.

Под "туннельной МОП структурой" понимается система Металл-Оксид-Полупроводник (Si), протекание заметного сквозного тока в которой может быть обеспечено за счет прямого квантовомеханического туннелирования носителей через барьер трапециoidalной формы, создаваемый запрещенной зоной SiO₂. Толщина слоя окисла для этого должна составлять менее 4 нм.

Актуальность темы

Важнейшее предназначение МОП структур связано с их использованием в затворной секции полевого транзистора - основного элемента современной твердотельной электроники [1,2].

Повышение уровня интеграции микросхем предполагает уменьшение планарных размеров отдельных транзисторов, что, как известно [2], требует применения все более тонких подзатворных диэлектриков. Ранее считалось, что ограничением на миниатюризацию неизбежно выступит появление туннелирования носителей заряда из канала в затвор. Но в середине 1990-х гг. были изготовлены [3] образцы приборов с субмикронной длиной канала и туннельно-тонким SiO₂, демонстрировавшие вполне удовлетворительные характеристики, несмотря на наличие утечки. Ввиду таких перспектив использования слоев окисла толщиной 1-3 нм резко возросли требования к объему, точности и достоверности данных о поведении туннельных МОП структур.

Сказанного достаточно, чтобы считать актуальность принятого исследования неоспоримой.

Однако, большой интерес представляют и некоторые другие приборы на основе тонкой МОП структуры, в частности, биполярный транзистор с туннельным МОП эмиттером [4-6], в котором роль базы играет инверсный слой, а роль коллектора - толща Si. Именно этот прибор находился в центре нашего внимания на

начальном этапе диссертационной работы, и именно в его терминах проводится ниже большинство наших рассуждений. Весьма любопытными представляются также свойства МОП структур, связанные с инъекцией горячих электронов в кремний [5].

Изучение этих свойств, равно как и исследования туннельного переноса заряда в упомянутом биполярном транзисторе, сейчас приобретают особое значение, поскольку получаемые результаты оказываются важными для анализа токов затвора.

В настоящее время ведутся активные поиски "альтернативных" подзатворных диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, применение которых, вместо SiO_2 , позволило бы снизить туннельные токи. Разрабатываемые модели для описания туннелирования в структурах металл/ SiO_2 / Si будут применимы и для систем с новыми материалами.

Цель работы

Целью диссертационной работы являлось:

- 1) проведение подробного экспериментального исследования электрических характеристик диодов, транзисторов и тиристоров на основе туннельной МОП структуры - с уделением особого внимания инъекции горячих носителей в Si и эффектам их энергетической релаксации;
- 2) разработка аналитической модели для расчета электрических характеристик туннельных МОП структур, пригодной для любых параметров (легирование, толщина SiO_2 , материал верхнего электрода: металл/polySi) и любых режимов смещения;
- 3) комплексное изучение электролюминесценции кремниевых туннельных МОП структур: измерение и анализ спектров в различных режимах, сопоставление с данными для других излучающих кремниевых приборов и определение интенсивности свечения в абсолютных единицах;
- 4) феноменологическое исследование следствий деградации и пробоя диэлектрика в приборах на основе туннельных МОП структур, а также выявление взаимосвязи между повреждением окисла

и изменениями люминесцентных свойств образцов;

5) анализ возможностей использования транзистора с туннельным МОП эмиттером как инструмента для измерения параметров туннелирования (эффективных масс в окисле) и параметров энергетической релаксации горячих электронов в кремнии.

Объекты и методы исследования

Основными объектами исследования являлись структуры Al/1-4 нм SiO₂/n(p)Si, изготовленные в ФТИ РАН в двух-, трех- и четырех- электродном исполнении (дополнительные выводы позволяли управлять потенциалом инверсного слоя).

Экспериментально изучались статические вольтамперные характеристики всех имевшихся приборов, а также спектры люминесценции туннельных МОП диодов на подложках различных типов. Проводилось моделирование электрических характеристик структур Al/SiO₂/Si и polySi/SiO₂/Si; для последних результаты расчетов сопоставлялись с литературными данными.

В качестве дополнения рассмотрены свойства некоторых других систем металл-диэлектрик-полупроводник.

Научная новизна работы

В настоящей работе впервые

- подробно изучено поведение различных туннельных МОП структур и транзистора с туннельным МОП эмиттером в сильноточных режимах (инжекционная способность, эффекты ионизации, деградация);
- исследованы особенности, связанные с туннельной прозрачностью приповерхностной области полупроводника (двойное/тройное туннелирование в МОП системе, перенос зона-зона, резонансный транспорт);
- предложена целостная квантовая модель для расчетов электрических характеристик туннельных МОП структур, не имеющая ограничений на выбор параметров и режимов;

- измерены спектры люминесценции МОП структур с толщиной окисла менее 3 нм, эти спектры отражают особенности туннельной инжекции и излучательных процессов различных типов (рекомбинация, внутризонные переходы);
- определено несколько важных характеристических параметров SiO₂ и Si (квантовый выход оже-ионизации вблизи порога и темп испускания фотонов в кремнии, эффективная масса дырки в тонком окисле).

Основные положения, выносимые на защиту

1. При положительном смещении на подложке туннельная МОП структура представляет собой инжектор квазимоноэнергетичных горячих электронов в кремний. Энергия инжекции E_{inj} определяется разностью между уровнем Ферми металла и краем зоны проводимости Si за пределами инверсного или обогащенного слоя; она регулируется напряжениями на клеммах структуры и может на практике достигать нескольких эВ.

2. Электрические и оптические (люминесцентные) свойства приборов на основе туннельной МОП структуры: туннельных диодов, транзисторов и тиристоров с туннельным МОП эмиттером, - в значительной степени определяются свойствами инжектора и условиями энергетической релаксации горячих носителей в кремнии.

3. В обратносмещенной туннельной МОП структуре Al/SiO₂/nSi, благодаря совместному действию оже-ионизации атомов кремния инжектируемыми электронами и ударной ионизации, возникает положительная обратная связь по току, что приводит к бистабильности (а иногда и мультистабильности) структуры в некотором диапазоне напряжений.

4. Коэффициент инжекции системы Al/SiO₂/nSi снижается при уменьшении толщины SiO₂ и при снижении легирования N_D (в сопоставимых режимах). Это сказывается на усилении транзистора с туннельным МОП эмиттером и на величине напряжения

его переключения V_{sw} . Рост V_{sw} с уменьшением N_D связан также с ослаблением поля в области объемного заряда, снижающим эффективность ударной ионизации.

5. Туннелирование в подложке является важным механизмом переноса заряда в туннельной МОП структуре, в особенности при сильном легировании. Его модельный учет приводит к возрастанию предсказываемых сквозных токов. Туннелирование зона-зона в Si - при изгибе зон более E_g - способствует поддержанию инверсии. Еще одним эффектом туннелирования в полупроводнике является резонансный перенос электронов через дискретные квантовые уровни в области интерфейса Si/SiO₂.

6. Разработанная модель позволяет проводить расчеты электрических характеристик туннельных МОП структур в самых различных ситуациях: любой уровень легирования, прямое или обратное смещение, металлический или поликремниевый электрод, любые режимы управления потенциалом инверсного слоя в подложке, - с претензией на количественную точность. При этом должны использоваться следующие значения параметров туннелирования: высоты барьеров как в толстой МОП структуре, эффективные массы в окисле для электронов $m_e = 0.42m_0$ и дырок $m_h = 0.33m_0$.

7. Излучательные переходы в кремнии являются одним из важных каналов релаксации инжектируемых в МОП структуре электронов. Туннельные МОП структуры люминесцируют; форма соответствующего спектра зависит от E_{inj} , а также (в случае инверсии) от величины электрического поля в обедненной области. Выделяются вклады разных механизмов люминесценции, в частности прямых внутрizonных и рекомбинационных переходов, в полную интенсивность.

8. Так как люминесцентные характеристики весьма чувствительны к повреждению SiO₂, их можно использовать для мониторинга деградации и пробоя туннельно-тонкого окисла.

9. Стойкость туннельной МОП структуры к протеканию тока в режиме прямого туннелирования значительно выше, чем ее

же стойкость (и чем стойкость структур с более толстым диэлектриком) в режиме инжекции Фаулера-Нордгейма. Величина заряда Q_{sbd} , перенос которого приводит к пробое SiO_2 , для случая прямого туннелирования может достигать 10^7 Кл/см², что достаточно для приборных применений.

10. Транзистор с туннельным МОП эмиттером может служить удобным метрологическим инструментом для исследования параметров туннелирования и параметров энергетической релаксации электронов в кремнии. Определенное с его помощью значение эффективной массы дырок в тонком слое SiO_2 равно $m_h = 0.33m_0$; величина квантового выхода $P(E_{inj})$ оже-ионизации при $E_{inj} \sim 1.5$ эВ составляет единицы процентов.

Практическое значение работы

Научно-практическая значимость работы состоит в том, что в ней подробно теоретически и экспериментально исследован комплекс эффектов, связанных со сквозным переносом заряда в МОП структуре с толщиной пленки диоксида кремния 1-3 нм.

Полученные результаты могут использоваться при решении задачи оптимизации приборов, в которых туннельная МОП структура играет роль инжектора горячих электронов. Кроме того, многие аспекты проведенного исследования (данные измерений токов, ряд деталей моделирования, параметризация барьеров, диагностика стойкости окисла) заслуживают, на наш взгляд, внимания разработчиков полевых транзисторов с подзатворным диэлектриком нанометровой толщины. Практическое применение может найти также предложенная "оптическая" методика мониторинга повреждения туннельно-тонких слоев SiO_2 .

Развитые в диссертации модели допускают имплементацию в программы-симуляторы полупроводниковых приборов.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 1-й, 2-й и 3-й Российских Конференциях по физике полупроводников

(Нижний Новгород, 1993; Зеленогорск, 1996; Москва, 1997), на "Humboldt-Kolleg Conference" (St.-Petersburg, 2005), а также на международных конференциях: International Conferences on Solid State Devices and Materials [SSDM] (Makuhari, 1993; Yokohama, 1994), Japan; International Conference on the low-dimensional systems, Chernogolovka, Russia (1993); European Material Research Society [E-MRS] Spring Meetings, Strasbourg, France (1996; 1999); International Semiconductor Conference [CAS], Sinaia, Romania (1996); International Conference on Microelectronics [MIEL], Nis, Yugoslavia (1997); International Conference on SIMulation of Semiconductor Processes And Devices [SISPAD], Leuven, Belgium (1998); Conferences on INSulating Films On Semiconductors [INFOS], (Kloster Banz, Germany, 1999; Udine, Italy, 2001; Barcelona, Spain, 2003); International Symposia "Nanostructures: Physics and Technology", St.-Petersburg, Russia (2000; 2002); Workshop on Dielectrics in Microelectronics [WoDiM], Munich, Germany (2000); European Workshop on ULtimate Integration of Silicon [ULIS], Munich, Germany (2002); European Solid-State Device Research Conference [ESSDERC], (Firenze, Italy, 2002; Estoril, Portugal, 2003).

С использованием материалов диссертации автором сделано три приглашенных доклада: в Mikroelektronik Centret, Lyngby, Denmark (1999), в Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, München, Germany (2000) и в Technische Fakultät der Universität Kiel, Germany (2003).

Кроме того, результаты работы обсуждались на семинарах отдела Сильноточной Электроники ФТИ РАН.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 73 научных работы (5 - лично автором диссертации, остальные - в соавторстве), в том числе 50 статей в реферируемых научных журналах: *Физика и Техника Полупроводников*, *Solid-State Electronics*, *IEEE Transactions on Electron Devices*, *Microelectronics Engineering* и других.

Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографии (210 наименований). Ее полный объем составляет 230 страниц, количество рисунков 94.

Содержание работы

Во **введении** кратко описан предмет диссертационного исследования - туннельная МОП структура, очерчен круг изучаемых вопросов, объяснена актуальность и указаны цели работы. Кроме того, приведены положения, выносимые на защиту, и формальные сведения о диссертации (число публикаций и т. п.).

Первая глава посвящена литературному обзору, а также истории исследования кремниевых приборов с туннельно-тонким диэлектриком. Предварительно сообщается необходимая начальная информация о туннельных структурах как объектах. Обсуждается критерий отнесения МОП структуры к разряду туннельных и затрагивается вопрос об ее зонных диаграммах, решение которого лежит в основе объяснения многих физических свойств.

Представляя историю туннельных МОП структур, мы выделяем два этапа: от конца 1960-х до середины 1990-х гг. и последующий период. На первом этапе были изготовлены различные структуры с тонкими пленками SiO_2 и разработана их теория, описывающая режимы с невысокими напряжениями на окисле [7]. Стало понятным, что поведение туннельных систем отличается от поведения МОП структур без переноса заряда не только фактом протекания тока, но и распределением прикладываемого смещения. Возможность управления им, а значит, и величиной сквозного тока легла в основу работы биполярного (фото)транзистора с МОП эмиттером [4,7]. Туннельные МОП структуры применялись также как фотодетекторы и солнечные элементы.

Второй этап ознаменовался использованием туннельных диэлектриков в качестве подзатворных в полевых транзисторах [3]. Это обстоятельство значительно повысило актуальность наших

исследований и их практическую ценность. Однако, если в "ранних" вариантах применения туннельной МОП структуры сквозному току через SiO_2 принадлежала основная роль, то в полевом транзисторе туннелирование - паразитный эффект. Исследования переноса заряда через слой диэлектрика, как, например, в биполярном транзисторе с туннельным МОП эмиттером, могут рассматриваться как вклад в анализ токов затвора в полевых транзисторах, то есть в область электроники, получившую название "gate engineering", задачами которой являются подбор материалов для затворной секции и изучение их характеристик.

Во **второй** главе обсуждаются результаты экспериментально-го исследования электрических характеристик приборов на основе туннельной МОП структуры.

Эти результаты представлены в статьях А1-А5, А9-А12, А14-А19, А21, А24, А26, А29, А31, А36, А40, А45, А46, А48, А49 (см. стр. 28-33).

При изучении поведения диодов $\text{Al/SiO}_2/\text{Si}$ наиболее интересные особенности выявлены в режимах обратного смещения структур на сильнолегированных подложках pSi ("+" на металл) и умеренно легированных подложках nSi ("+" на кремний).

На Рис. 1 представлены вольтамперные характеристики структур $\text{Al/SiO}_2/\text{nSi}$. Сильноточное включенное состояние поддерживается благодаря внутреннему механизму пополнения неосновных носителей - ионизации атомов кремния инжектируемыми горячими электронами [8]. В нашей работе установлено, что напряжение переключения V_{sw} снижается с толщиной окисла d и с концентрацией доноров N_D . При $N_D > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ бистабильности нет, а характеристика суперлинейна.

Вольтамперные кривые структур $\text{Al/SiO}_2/\text{p}^+\text{Si}$ демонстрируют особенности иного рода (Рис. 2). Начиная с некоторого напряжения, наблюдается существенный рост обратного тока; иногда он бывает ступенчатым. Увеличение тока обусловлено туннелированием зона-зона в Si, а ступени могут появляться за счет резонансного транспорта электронов из валентной зоны через уровни квантовой ямы в зоне проводимости [9] в металл [10].

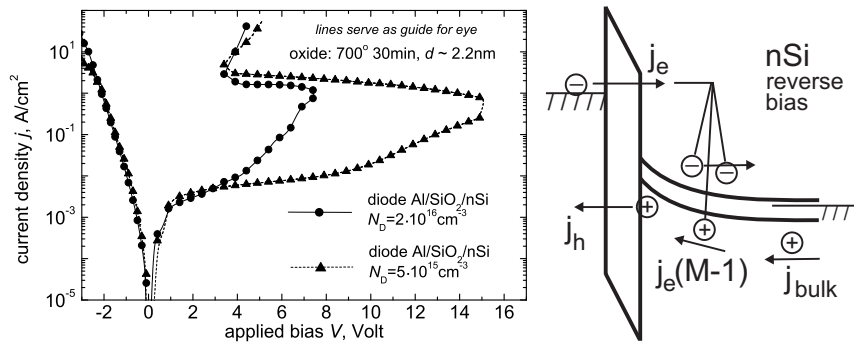


Рис. 1: Измеренные ВАХ туннельных МОП структур (подложки nSi).

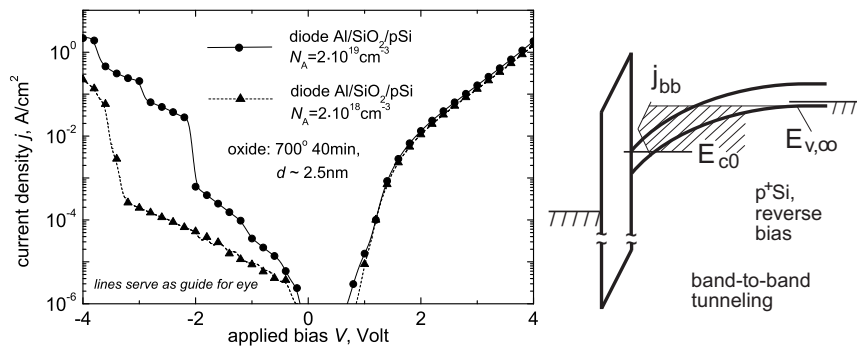


Рис. 2: Измеренные ВАХ туннельных МОП структур (подложки p⁺Si).

Известно, что туннельные МОП структуры на умеренно легированных подложках nSi могут работать как (фото)транзисторы [4-7]. Коллектором при этом является толщина кремния, а базой - инверсный дырочный слой. Управление осуществляется светом или же подачей тока через p⁺-область, примыкающую к МОП эмиттеру (Рис. 3). Описанный биполярный прибор топологически идентичен полевому транзистору. Различие состоит в направлении протекания основного тока (они помечены стрелками).

Свойства транзисторов с туннельным МОП эмиттером подробно исследованы в нашей работе. На Рис. 4 приведены выход-

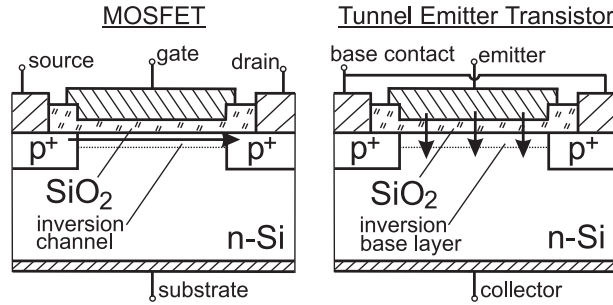


Рис. 3: Полевой/биполярный транзистор с туннельно-тонким SiO₂.

ные характеристики $J_C(U_{CE})|_{J_B}$, а также входные характеристики $J_B(U_{BE})$ для того же и еще для одного прибора ($N_D = 10^{16}$ см⁻³). S-образность кривых $J_C(U_{CE})$ отражает бистабильность

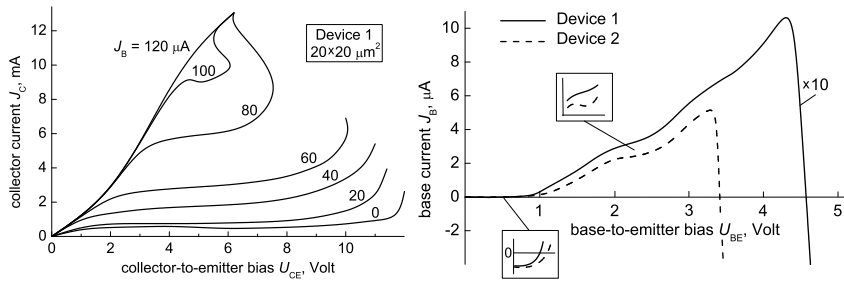


Рис. 4: Выходные и входные кривые транзисторов с МОП эмиттером.

транзистора. Иногда наблюдалось два S-сегмента (мультистабильность). Входная характеристика содержит участки спада J_B : при высоких U_{BE} ($> 3-4$ В) и - для мультистабильных образцов - около $U_{BE} \sim 2.2$ В. При $U_{BE} > 2.2$ В рост $J_B(U_{BE})$ замедляется.

Об аналогичном поведении J_B сообщалось авторами [6]. Для его объяснения используем выражение

$$J_B = j_B \cdot S = (j_h - j_{bulk} - j_e \cdot (M - 1)) \cdot S \quad (1)$$

Здесь j_e, j_h - туннельные токи между зоной проводимости/вален-

тной зоной и металлом, j_{bulk} - ток дырок из толщи Si, S - площадь, M - фактор умножения электронов. Если напряжение U_{CE} невелико, $M - 1 \approx P(E_{inj})$, где P - квантовый выход оже-ионизации [11], E_{inj} - энергия инжекции ($E_{inj} \approx qU_{BE} - E_g$). Спады и замедления роста J_B связаны с влиянием тока $j_e \cdot (M - 1)$ при $E_{inj} > E_g$. Отметим еще, что в области совсем низких U_{BE} за счет термогенерации оказывается $j_{bulk} > j_h$ и поэтому там $J_B < 0$.

Поведение других изученных в работе туннельных структур: Au/CaF₂/nSi, Au/SiO₂/nSiC и W(игла CТМ)/вакуум/nSi - во многих деталях повторяло поведение приборов Al/SiO₂/Si.

Третья глава содержит описание предложенных нами аналитических моделей туннельных МОП структур. Развитая теория состоит из нескольких взаимосвязанных блоков, посвященных туннелированию через SiO₂ и в кремнии, эффекту квантования в обогащенном или инверсионном слое, энергетической релаксации электронов, а также балансу неосновных носителей.

Модели опубликованы в А6, А13, А22, А24, А26, А28, А29, А31, А32, А36, А38, А40, А42-А46, А48, А50.

Коэффициент прохождения частицы через диэлектрик T_{ox} всегда находится с учетом и верхнего, и нижнего барьеров. Полная энергия E и поперечный волновой вектор \vec{k}_\perp считаются сохраняющимися [12]. Туннелирование в Si подразделяется на перенос в запрещенной зоне (и далее через окисел), перенос зона-зона и резонансный транспорт. Последние два процесса возможны лишь при обратном смещении, когда изгиб зон в кремнии $q\varphi_s$ достаточно велик, и сильном легировании. При этом полный ток - например, для случая структуры Al/SiO₂/pSi - записывается как

$$j = j_e + j_h = j_e^{lev} + j_e^{cont} + j_h^{cont} + j_h^{resonant} \quad (2)$$

где для появления $j_h^{resonant}$ необходимо, чтобы по крайней мере один из уровней квантовой ямы лежал ниже, чем край валентной зоны толщи кремния $E_{v,\infty}$. Значок cont помечает ток континуума, а lev - ток с дискретных уровней.

При расчете зонной диаграммы МОП структуры учитывается квантование в инверсионном или обогащенном слое в одноуровневом приближении. При этом используется выражение $\psi_0 = (b^3/2)^{1/2} z \exp(-b z/2)$ для волновой функции основного состояния в квантовой яме [9] (инверсия) или вводится эмпирическая формула $\varphi(z) = \varphi_s(1 - \exp(-\lambda z))$ для профиля зон в кремнии (обогащение). Здесь z - расстояние от интерфейса Si/SiO₂, а λ , b - параметры. Вышележащие дискретные уровни при необходимости находятся квазиклассическим способом.

Энергия электронов E_{inj} , инжектируемых в Si при положительном смещении на подложке, определяется за инверсионным или обогащенным слоем. В случае nSi (режим инверсии) рассматривается ударная генерация электронно-дырочных пар. Мы выделяем оже-ионизацию (при $E_{inj} > E_g$) и ударную ионизацию в поле обедненной области. Фактор умножения составляет

$$M = (1 + P) \cdot (1 + \gamma_{depl}); \quad P(E_{inj}) = \frac{1}{\hbar\omega_0} \int_{E_g}^{E_{inj}} \frac{\tau_{ii}^{-1}(\tilde{E})}{\tau_{ph}^{-1}(\tilde{E})} d\tilde{E} \quad (3)$$

где γ_{depl} - квантовый выход ударной ионизации. Через τ_{ph}^{-1} , τ_{ii}^{-1} обозначены темпы потерь энергии на испускание оптических фотонов с энергией $\hbar\omega_0 = 0.063$ эВ и на ионизацию.

Для нахождения напряжения на окисле U при заданном обратном смещении V применяется уравнение баланса неосновных носителей. В случае nSi оно имеет вид (1). Вклад в j_{bulk} могут давать термогенерация (j_{th}), фототок, ток туннелирования зона-зона в Si (j_{bb}) и ток "pn-перехода" инверсный слой - толщина.

Результаты расчета вольтамперных характеристик туннельных МОП диодов Al/SiO₂/nSi(pSi) приведены на Рис. 5, 6 (случай умеренного легирования). В режиме аккумуляции ток резко растет с уменьшением d для структур как на nSi, так и на pSi. В режиме же обратного смещения (инверсия/обеднение) увеличение тока при утоньшении SiO₂ наблюдается только для структур n-типа. Рис. 5 демонстрирует бистабильность прибора на nSi; она связана с эффектами ионизации и отмечалась в эксперименте.

Моделирование характеристик транзисторов с туннельным МОП эмиттером также дало неплохие результаты.

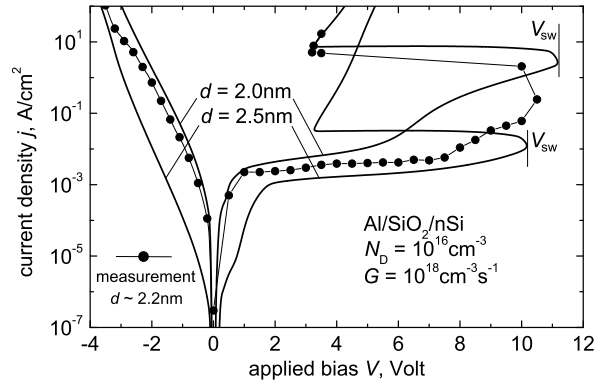


Рис. 5: Рассчитанные характеристики структур Al/SiO₂/nSi.

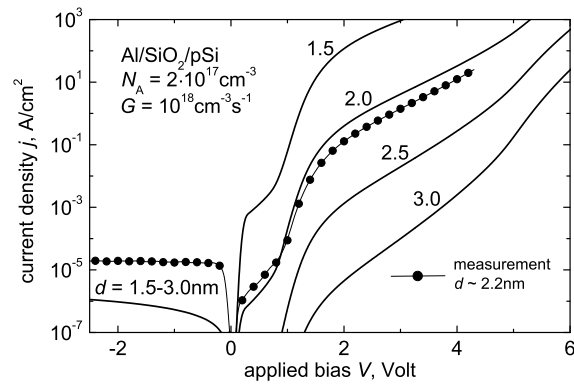


Рис. 6: Рассчитанные характеристики структур Al/SiO₂/pSi.

Вольтамперные кривые сильнолегированных структур приведены на Рис. 7. Как и в соответствующих экспериментах (Рис. 2), заметны подъемы тока, особенно резкие при концентрациях $N_A > 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Первый подъем отвечает появлению тока j_{bb} , а второй и последующие - моментам вовлечения дискретных уровней в резонансный транспорт. Отметим также, что наличие тока j_{bb}

способствует поддержанию инверсии и иногда обнаруживается на вольтфарадных характеристиках (появляется "горб").

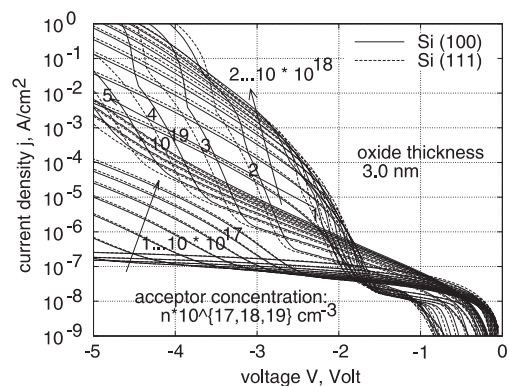


Рис. 7: Рассчитанные характеристики структур на подложках p^+Si .

При расчетах использованы следующие значения параметров. Разрывы зоны проводимости и валентной зоны на границе Si/SiO₂ $\chi_e = 3.15$ эВ, $\chi_h = 4.63$ эВ, барьер Al/SiO₂ $\chi_m^+ = 3.17$ эВ, эффективные массы электронов и дырок в SiO₂ - $m_e = 0.42m_0$ [13] и $m_h = 0.33m_0$ (примерно соответствует данным [14] и нашим собственным оценкам). Масса для туннелирования в запрещенной зоне кремния $m_g = 0.17m_0$. Зависимость P от энергии взята из [11]. Темп термогенерации в Si $G = 10^{18}$ см⁻³с⁻¹.

Глава **четвертая** целиком посвящена электролюминесценции туннельных МОП структур, наблюдающейся при подаче положительного смещения $V > 2-3$ В на кремниевую подложку.

Наши статьи на эту тему: А8, А20, А23, А25, А27, А30, А37, А43.

Для целей анализа данного эффекта мы выделяем несколько составляющих интенсивности (Рис. 8). Наиболее принципиально наличие НИ-компоненты (Hot Injection), связанной с инъекцией в Si *изначально* горячих моноэнергетичных электронов. Именно НИ-излучение отличает люминесценцию туннельных МОП структур от свечения других кремниевых приборов [15]. Далее, может появ-

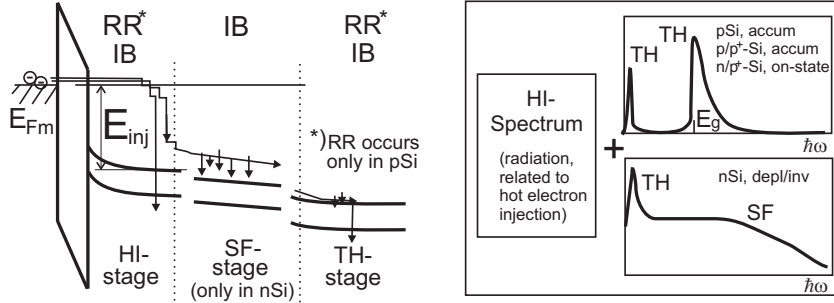


Рис. 8: Схема формирования спектра туннельной МОП структуры.

ляться SF-компонента (Strong Field) в области объемного заряда. Наконец, имеется ТН-составляющая (ТНermalized), создаваемая "остывшими" электронами: пики при $\hbar\omega \sim kT$ и $\hbar\omega \sim E_g$.

Если структура и/или режим выбраны так, что вовне индуцированного дырочного слоя сильного поля нет (например, Al/SiO₂/pSi, обогащение), то форма спектра определяется величиной E_{inj} :

$$\frac{dW}{d[\hbar\omega]} \approx \nu \cdot \frac{J \hbar\omega}{q \hbar\omega_0} \int_0^{E_{inj}} \frac{1}{\tau_{ph}^{-1}(\tilde{E})} \frac{d}{d[\hbar\omega]} \tau_{le}^{-1}(\tilde{E}, \hbar\omega) d\tilde{E} \quad (4)$$

Здесь $\nu = \nu([\hbar\omega])$ - доля интенсивности света, выходящая из образца без перепоглощения, а $d\tau_{le}^{-1}/d[\hbar\omega]$ (с⁻¹эВ⁻¹) - темп потерь энергии на эмиссию фотонов в заданном интервале от $\hbar\omega$ до $\hbar\omega + \delta\hbar\omega$, отнесенный к ширине этого интервала.

Спектральные диапазоны для внутризонного (IB, IntraBand) и рекомбинационного (RR, Radiative Recombination) излучения суть $\hbar\omega = 0 \dots E_{inj}$ и $E_g \dots E_{inj} + E_g$. Для оценки наибольшей энергии световых квантов, генерируемых при внутризонных прямых (IB-d, d=direct) переходах, нами получена формула

$$E_{dir} = E_e - \frac{1}{2\alpha} \left(\sqrt{1 + 4\alpha \left(\frac{2\sqrt{2}\pi \Delta \hbar}{a_L \sqrt{m_l}} - \sqrt{E_e(1 + \alpha E_e)} \right)^2} - 1 \right) \quad (5)$$

где $E_e = E_{inj}$, $m_l = 0.916m_0$ - продольная масса электрона в Si, $a_L = 0.543$ нм - постоянная решетки, $\Delta = 0.15$ (отступ минимума от края зоны Бриллюэна в единицах $k_b = 2\pi/a_L$), $\alpha = -0.09$ эВ⁻¹. Прямые рекомбинационные переходы (RR-d), возможные при $E_{inj} > 2.3$ эВ, приводят к эмиссии фотонов с $\hbar\omega \sim 3.4$ эВ.

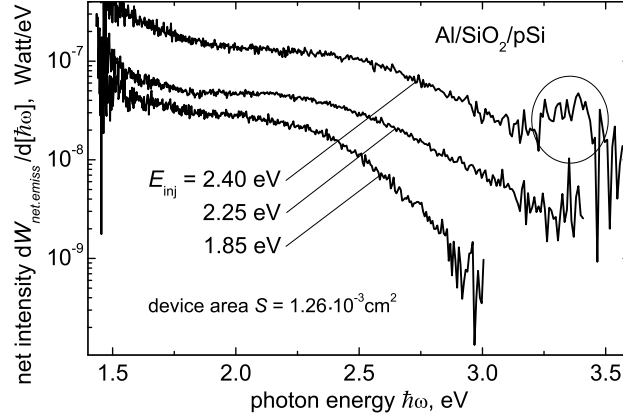


Рис. 9: Спектры эмиссии фотонов туннельной МОП структурой.

Для проведения оптических измерений использовалась установка на базе монохроматора с фотоумножителем [16]. Данные об интенсивности можно было получать не только в относительных ($dI/d[\hbar\omega]$, а.у.), но и в абсолютных ($dW/d[\hbar\omega]$, Ватт/эВ) единицах, а учет перепоглощения позволял реконструировать спектр собственно эмиссии фотонов $dW_{net.emiss}/d[\hbar\omega]$.

На Рис. 9 приведены спектры $dW_{net.emiss}/d[\hbar\omega]$ туннельной МОП структуры Al/SiO₂/pSi ($N_A = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³). Все они имеют четкую коротковолновую границу $\hbar\omega = E_{inj} + E_g$. При относительно низких энергиях фотонов (< 1.7 эВ) намечается хвост от ТН-пика около $\hbar\omega \sim E_g$. Для $E_{inj} = 2.4$ эВ в области $\hbar\omega \sim 3.4$ эВ имеется особенность, связанная с RR-d переходами; до реконструкции (на кривых $dW/d[\hbar\omega]$) эта особенность была менее выражена. Представленные на Рис. 9 спектры излучения согласуются с результатами их моделирования методом Монте Карло.

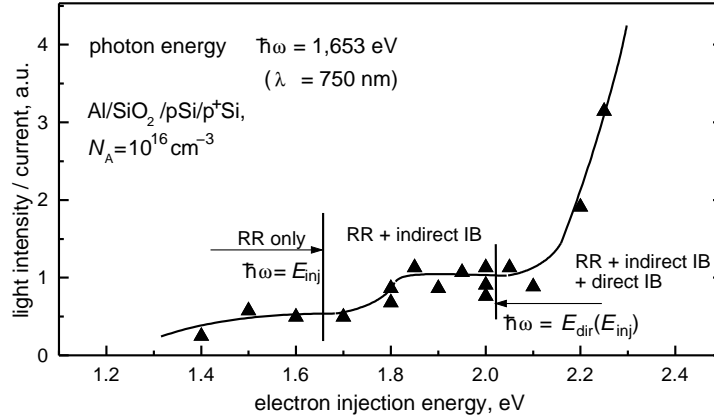


Рис. 10: Интенсивность излучения на выбранной длине волны.

Помимо спектров, мы измеряли зависимости интенсивности эмиссии фотонов фиксированной энергии $I^{\hbar\omega}$ от E_{inj} . Если $\hbar\omega < E_g$, кривая $I^{\hbar\omega}(E_{inj})$ имеет два (близких) порога: IB-i (i=indirect) при $E_{inj} = \hbar\omega$ и IB-d при $E_{inj} = f^{-1}(\hbar\omega)$, где f^{-1} - обратная функция по отношению к $E_{dir} = f(E_e)$, задаваемой формулой (5). Если выбрано $\hbar\omega > E_g$, то порогов три: RR-i (или RR-d, если $\hbar\omega \sim E_g$) при $E_{inj} = \hbar\omega - E_g$ и далее два вышеназванных порога IB-i, IB-d. На Рис. 10 приведена иллюстрация как раз для такого случая (RR-порог оказался вовне представленного диапазона энергий E_{inj}). Измерения $I^{\hbar\omega}(E_{inj})$ проводились также в работе [17], но ее авторы отмечали лишь вклад IB-d процессов.

Предметом **пятой** главы является изучение деградации и пробоя тонких слоев SiO_2 . Наряду с изменениями электрических характеристик, впервые анализируется влияние повреждения окисла на люминесцентные свойства туннельной МОП структуры.

Соответствующие данные были включены в работы A16, A17, A23, A33-A35, A37, A39, A41, A46, A48, A49.

Исследование процесса *деградации* диодов и транзисторов с МОП эмиттерами показало, что он по своим проявлениям эквива-

лентен утоньшению пленки SiO_2 в сочетании с появлением потерь энергии при переносе в ней электронов. Эффект *пробоя* в режиме аккумуляции можно грубо считать равносильным постановке резистора вместо поврежденной части структуры, а при обратном смещении характер влияния пробоя зависит от многих факторов, в том числе от проводимости инверсного слоя.

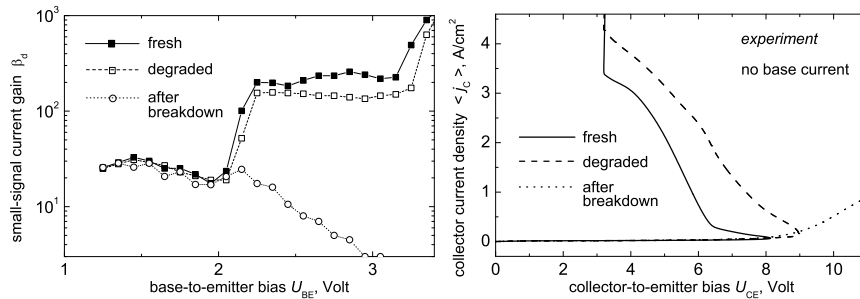


Рис. 11: Изменения характеристик транзистора при повреждении SiO_2 .

На Рис. 11, приведены зависимости коэффициента усиления транзистора $\text{Al/SiO}_2/\text{nSi}$ ($d \sim 2.2$ нм, $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$) от U_{BE} , а также его коллекторные характеристики при нулевом базовом токе. Эффективное уменьшение толщины окисла и энергии инжекции вследствие деградации вызывают некоторое снижение усиления. Акт пробоя радикально изменяет поведение прибора в сильноточных режимах (резко падает β_d) и срывает бистабильность, а при небольших U_{BE} , когда проводимость инверсного слоя невысока, прибор продолжает работать.

В случае аккумуляции деградация и пробой проявлялись более тривиально и чаще всего сводились просто к увеличению тока. Однако при высоких напряжениях иногда оказывалось, что сопротивление шунта превосходит туннельное сопротивление до повреждения, - и тогда ток после пробоя снижался.

Для количественной характеристики стойкости диэлектрика к протеканию тока используется величина заряда Q_{sbd} , перенос которого (в среднем) приводит к формированию проводящей об-

ласти пробоя. В тонких МОП структурах указанная область обычно не расширяется, то есть пробой является "мягким" [18,19]. Было установлено, что заряд Q_{sbd} в режиме прямого туннелирования (DT) может достигать 10^7 Кл/см², а в режиме инжекции Фаулера-Нордгейма через треугольный барьер - всего 10^3 - 10^4 Кл/см². Ранее, резкое повышение Q_{sbd} при переходе к DT отмечалось авторами [18], исследовавшими более толстые образцы (~ 4 нм). Измерения Q_{sbd} проводились нами на тиристорах Al/SiO₂/nSi/p⁺Si во включенном состоянии, в которых поставка неосновных носителей обеспечивалась нижним p⁺-эмиттером.

Влияние деградации слоя SiO₂ на спектры люминесценции $dI/d[\hbar\omega]$ туннельных МОП структур при заданном напряжении V связано с изменением условий протекания тока в диэлектрике.

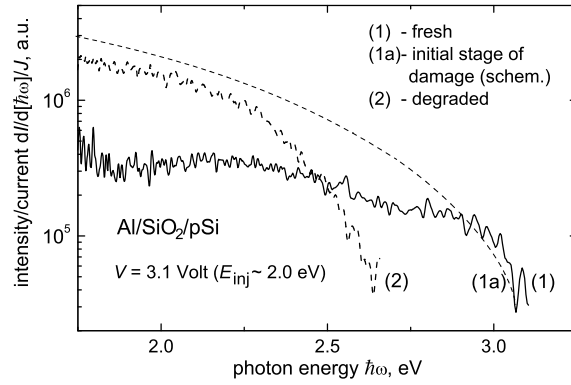


Рис. 12: Трансформация спектра при деградации SiO₂.

Спектры излучения структуры Al/SiO₂/pSi ($N_A = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³), измеренные в процессе деградации, приведены на Рис. 12. Вначале интенсивность $dI/d[\hbar\omega]$ увеличивалась во всем спектральном диапазоне, в особенности в длинноволновой части. Затем коротковолновый край смещался (1a \rightarrow 2) в сторону меньших $\hbar\omega$, из-за чего спектр 1a не всегда удавалось записать надежно.

Такая трансформация может быть объяснена совместным влиянием эффектов утоньшения окисла и неупругости туннелирова-

ния. Благодаря "утощению", имеет место рост тока и интенсивности свечения, а накопление дефектов-рассеивателей вызывает искажения спектра: снижается средняя энергия испускаемых фотонов. Положение края спектра остается неизменным до тех пор, пока имеется некоторая зона, в которой электроны при переносе не теряют энергию. Но как только туннелирование становится неупругим и в этой зоне, появляется сдвиг.

Как было установлено в наших экспериментах, при деградации диэлектрика размываются пороги на зависимостях интенсивности НИ-излучения на фиксированной длине волны $I^{\hbar\omega}$ (см. Рис. 10). Размытие объясняется потерей электронами моноэнергетичности при их переносе через поврежденный окисел.

В области пробоя НИ-люминесценция, как правило, срывалась, так как электроны инжектировались "холодными". Если свечение области закоротки все же частично сохранялось, отношение $I^{\hbar\omega}/J$ для любого $\hbar\omega$ после пробоя уменьшалось.

Изменения оптических характеристик туннельных МОП структур при повреждении SiO_2 зачастую оказывались более ярко выраженными, чем изменения тока. Следовательно, появляется возможность использовать измерения спектров и/или интенсивности для контроля состояния структуры. Например, эпюры интенсивности могут служить альтернативой или дополнением к традиционным эпюрам тока при мониторинге деградации и пробоя.

В **шестой** главе приборы на основе тонкой МОП структуры - в первую очередь, транзистор с МОП эмиттером - используются как инструменты для измерения квантового выхода оже-ионизации и темпов генерации фотонов в Si, а также параметров туннельных барьеров. При этом разработанные модели применяются не для расчетов, а для обработки экспериментальных данных с целью определения необходимых величин.

Материал опубликован в А7, А9, А16, А17, А25, А29, А36, А37, А44, А47.

В части параметров туннелирования через SiO_2 уточнению подлежат эффективная масса для нижнего барьера m_h , а также - в конкретных случаях - толщина диэлектрика d .

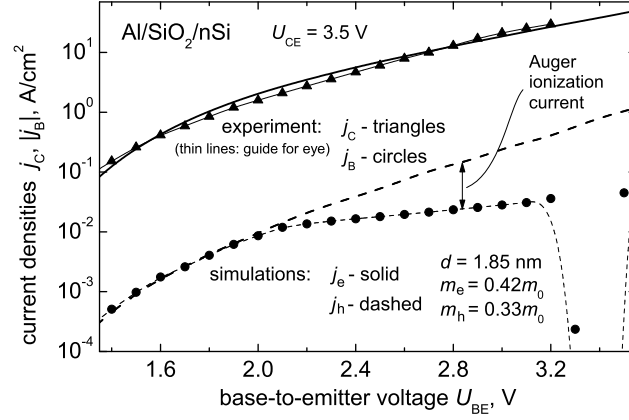


Рис. 13: Экспериментальные данные для определения d , m_h , $P(E_e)$.

В транзисторе Al/SiO₂/nSi толщина окисла находится из измерений коллекторного тока j_C . При $U_{CE} > U_{BE}$ он приблизительно равен электронной компоненте тока через окисел j_e , которая вычисляется с использованием известного значения $m_e = 0.42m_0$ [13]. В примере на Рис. 13 получается $d = 1.85$ Å. Для определения d в МОП диодах - как на nSi, так и на pSi - измеряется сквозной ток j в режиме аккумуляции ($j \approx j_e$). В сильнолегированных структурах на подложках p-кремния толщину SiO₂ можно оценить исходя из данных по напряжениям активации межзонного переноса электронов и резонансного транспорта.

Процедура определения m_h предполагает обработку характеристик транзистора на подложке nSi. Сначала находится толщина d . Далее измеряется ток базы j_B ; при напряжениях U_{BE} менее 2.2 В и невысоких U_{CE} (но больших, чем U_{BE}) он равен туннельному току дырок j_h . После этого по туннельным формулам вычисляется масса m_h . Нами получено значение $m_h = 0.33m_0$ (Рис. 13), что соответствует некоторым другим публикациям [14] и намного меньше, чем масса дырки в толстых слоях SiO₂ [1].

Кривые $j_B(U_{BE})$ используются также для определения квантового выхода оже-ионизации P в диапазоне энергий электрона

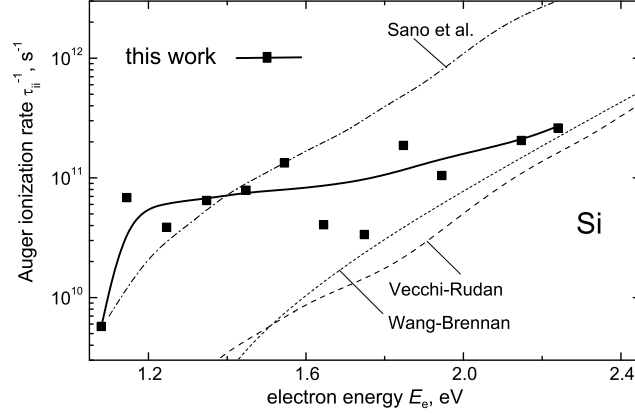


Рис. 14: Темп оже-ионизации в Si как функция энергии электрона.

1-2.5 В. В области $U_{BE} > 2.2$ В имеем $j_B = j_h - j_e \cdot P(E_{inj})$, где j_e и j_h могут быть рассчитаны. Оказалось, что при энергиях $E_e \sim 1.5$ эВ квантовый выход составляет около одного процента. Измеренную зависимость $P(E_e)$ целесообразно преобразовать к виду темпа потерь энергии на ионизацию $\tau_{ii}^{-1}(E_e)$:

$$\tau_{ii}^{-1}(E_e) = \tau_{ph}^{-1}(E_e) \cdot \hbar\omega_0 \cdot \frac{dP(E_e)}{dE_e} \quad (6)$$

(температура фононного рассеяния $\tau_{ph}^{-1}(E_e)$ заимствуется в [20]). Результат представлен на Рис. 14 и сопоставлен с данными работ [20-22].

Мы провели также измерение темпа потери энергии электронами на испускание фотонов $d\tau_{le}^{-1}(E_e, \hbar\omega)/d[\hbar\omega]$. При этом использовались спектры диодов Al/SiO₂/pSi, записанные в абсолютных единицах и реконструированные с учетом перепоглощения.

Для математической обработки применялось выражение

$$\frac{d\tau_{le}^{-1}(E_{inj}, \hbar\omega)}{d[\hbar\omega]} = \tau_{ph}^{-1}(E_{inj}) \left(\frac{q\hbar\omega_0}{\hbar\omega} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial E_{inj}} \left(J^{-1}(E_{inj}) \frac{dW_{net.emiss}(E_{inj}, \hbar\omega)}{d[\hbar\omega]} \right) \quad (7)$$

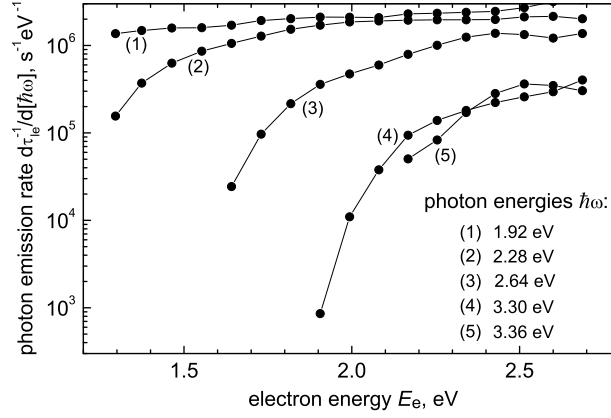


Рис. 15: Темп потерь энергии электроном на испускание фотонов в Si.

получающееся после переноса предынтегральных множителей (4) в левую часть и взятия производных по энергии инжекции E_{inj} . Для подачи окончательного результата следует заменить E_{inj} на формальную переменную E_e , как при записи τ_{ii}^{-1} .

На Рис. 15, показаны полученные зависимости $d\tau_{le}^{-1}/d[\hbar\omega]$ от E_e для нескольких $\hbar\omega$ (исходные спектры см. на Рис. 9). Диапазон энергий электронов и фотонов ограничивался возможностями эксперимента. Интегральный темп эмиссии фотонов $\tau_{le}^{-1}(E_e)$ при этом можно оценить как $\sim 10^6 \text{ c}^{-1}$ ($\tau_{le}^{-1} \approx [d\tau_{le}^{-1}/d[\hbar\omega]] \Delta[\hbar\omega]$, где $\Delta[\hbar\omega] \approx 2 \text{ эВ}$ - ширина области измерения).

В **заключении** подводятся итоги диссертационной работы.

Основные результаты

В представленной работе были всесторонне исследованы особенности поведения туннельных МОП структур Al/SiO₂(1-4 нм)/Si. Наибольшее внимание уделялось электрическим и оптическим свойствам таких структур, связанным с переносом заряда через диэлектрик, в том числе эффектам, обусловленным инжекцией горячих электронов из металла в кремний при положительном на-

пряжении на подложке. При этом

1) изучены особенности поведения системы Al/SiO₂/Si при обратном смещении, отражающие факт сосуществования электронной и дырочной компонент туннельного тока. Благодаря наличию обеих компонент, структуры Al/SiO₂/nSi способны функционировать как биполярные транзисторы с туннельным МОП эмиттером. Установлено, что коэффициент инжекции такого эмиттера, а значит, и усиление транзистора, растут при увеличении толщины SiO₂ и/или уровня легирования N_D ;

2) показано, что в режиме прямого туннелирования (в отличие от инжекции Фаулера-Нордгейма) ресурс работы МОП структуры весьма велик. Величина заряда Q_{sbd} , перенос которого посредством прямого туннелирования приводит к пробое слоя SiO₂, может достигать 10^7 Кл/см²; этого достаточно для многих приборных применений;

3) разработаны аналитические модели, позволяющие надежно рассчитывать электрические характеристики туннельных МОП структур с различными параметрами в любых режимах;

4) наряду с туннелированием через слой SiO₂, проанализирован эффект туннелирования в полупроводнике (включая резонансный транспорт через дискретные уровни вблизи интерфейса Si/SiO₂), который во всех случаях увеличивает сквозные токи. Туннелирование зона-зона в кремнии пополняет заряд инверсного слоя в структурах на сильнолегированных подложках;

5) подробно изучены особенности, связанные с релаксацией инжектируемых горячих носителей в кремнии. Энергетическая релаксация электронов, помимо рассеяния на фононах, сопровождается генерацией новых электронно-дырочных пар, квантовый выход которой зависит от энергии инжекции и от величины электрического поля в Si. Ток ударной генерации играет большую роль в балансе токов в некоторых МОП приборах: в частности, его наличие обуславливает би- и мульти-стабильность транзистора с туннельным МОП эмиттером Al/SiO₂/nSi;

6) впервые тщательно исследованы процессы эмиссии фото-

нов в туннельной МОП структуре. Анализ измеряемых спектров люминесценции позволяет выделить вклады прямых внутрizonных и рекомбинационных излучательных переходов в Si. Форма спектра определяется условиями инжекции электронов и сильно зависит от режима смещения туннельной МОП структуры. Так как эти условия изменяются при повреждении слоя SiO₂, появляется возможность использовать оптические исследования для мониторинга деградации;

7) на основе измерений характеристик туннельных МОП структур было независимо определено несколько важных параметров материалов Si и SiO₂: значение эффективной массы дырок в тонком окисле ($m_h = 0.33m_0$), квантовый выход оже-ионизации в кремнии (единицы процентов при энергии электрона 1.5 эВ), темп испускания фотонов в Si.

Список публикаций по теме диссертации

(тезисы докладов в список не включены)

[A1] Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. Ударная ионизация в транзисторах с туннельно-тонким МОП-эмиттером. *Письма в ЖТФ*, т. 18, вып. 21, стр. 1-5 (1992).

[A2] Грехов И.В., Шулекин А.Ф., Векслер М.И. Статические характеристики кремниевого оже-транзистора с туннельным МОП-эмиттером и индуцированной базой. *ФТП*, т. 27, вып. 1, стр. 88-94 (1993).

[A3] Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. Мультистабильность МДП-структур с туннельно-тонким диэлектрическим слоем. *Письма в ЖТФ*, т. 19, вып. 3, стр. 50-55 (1993).

[A4] Grekhov I.V., Shulekin A.F., Vexler M.I. Multicascade impact ionization in Si Metal-Insulator-Semiconductor Tunnel Emitter Auger Transistor (Si MIS TEAT). *Solid-State Commun.*, v. 87, No. 4, pp. 341-343 (1993).

[A5] Грехов И.В., Шулекин А.Ф., Векслер М.И. Механизм формирования стационарных обратных вольт-амперных характеристик МДП-структур с переносом заряда. *ФТП*, т. 29, вып. 2, стр.

229-234 (1995).

[A6] Vexler M.I. A simple analytical model of the tunnel MIS emitter Auger transistor. *IEEE Trans. Electron Devices*, v. ED-42, No. 4, pp. 656-661 (1995).

[A7] Grekhov I.V., Shulekin A.F., Vexler M.I. Measurement of the near-threshold Auger ionization probability in silicon. *J. Phys. - Condensed Matter*, v. 7, pp. 7037-7043 (1995).

[A8] Векслер М.И., Грехов И.В., Соловьев С.А., Ткаченко А.Г., Шулекин А.Ф. Электролюминесценция кремниевых туннельных МДП-структур. *Письма в ЖТФ*, т. 21, вып. 13, стр. 81-86 (1995).

[A9] Grekhov I.V., Shulekin A.F., Vexler M.I. Silicon Auger transistor - new insight into the performance of a tunnel MOS emitter transistor. *Solid-State Electronics*, v. 38, No. 8, pp. 1533-1541 (1995).

[A10] Белов С.В., Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. Неустойчивости распределения тока по площади в кремниевом оже-транзисторе с туннельным МОП-эмиттером. *Письма в ЖТФ*, т. 22, вып. 3, стр. 42-47 (1996).

[A11] Болотов Л.И., Макаренко И.В., Титков А.Н., Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. СТМ-контакт с пассивированной водородом поверхностью кремния как точечный оже-транзистор с туннельным МОП-эмиттером. *ФТП*, т. 38, вып. 3, стр. 889-900 (1996).

[A12] Альварес Х.К., Векслер М.И., Грехов И.В., Соколов Н.С., Шулекин А.Ф. Электрофизические характеристики структур Au/CaF₂/n-Si<111> с супертонкими (менее 20 нм) слоями CaF₂, выращенными методом молекулярно-лучевой эпитаксии. *ФТП*, т. 30, вып. 7, стр. 1328-1334 (1996).

[A13] Векслер М.И. Туннельная МДП-структура при высокой плотности тока (режим обратного смещения). *ФТП*, т. 30, вып. 9, стр. 1718-1727 (1996).

[A14] Белов С.В., Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. Подавление эффекта отеснения эмиттерного тока в оже-транзисторах. *ФТП*, т. 30, вып. 10, стр. 1838-1847 (1996).

[A15] Belov S.V., Vexler M.I., Grekhov I.V., Shulekin A.F. Non-

one-dimensional effects in tunnel MOS devices. *Thin Solid Films*, v. 294, pp. 281-283 (1997).

[A16] Grekhov I.V., Shulekin A.F., Vexler M.I. Degradation of tunnel-thin silicon dioxide films. *IEEE Trans. Electron Devices*, v. ED-44, No. 12, pp. 2307-2308 (1997).

[A17] Грехов И.В., Шулекин А.Ф., Векслер М.И. Деградация туннельных МОП-структур при высокой плотности тока. *ФТП*, т. 32, вып. 6, стр. 743-747 (1998).

[A18] Грехов И.В., Векслер М.И., Иванов П.А., Самсонова Т.П., Шулекин А.Ф. Эффект усиления фототока в МОП-структурах Au/SiO₂/n-6H-SiC с туннельно-тонким диэлектриком. *ФТП*, т. 32, вып. 9, стр. 1145-1148 (1998).

[A19] Grekhov I.V., Schmalz K., Shulekin A.F., Tittelbach-Helmrich K., Vexler M.I. Operation of a bipolar transistor with a tunnel MOS emitter and an induced base from 4.2 to 300K. *Cryogenics*, v. 38, No. 6, pp. 613-618 (1998).

[A20] Grekhov I.V., Shulekin A.F., Vexler M.I., Zimmermann H. Concepts of light emission from a silicon MOS tunnel emitter Auger transistor. *Solid-State Electronics*, v. 43, No. 2, pp. 417-426 (1999).

[A21] Grekhov I.V., Ivanov P.A., Samsonova T.P., Shulekin A.F., Vexler M.I. SiC-based phototransistor with a tunnel MOS emitter. *IEEE Trans. Electron Devices*, v. ED-46, No. 3, pp. 577-579 (1999).

[A22] Shulekin A.F., Vexler M.I., Zimmermann H. Quantization effects in hole inversion layers of tunnel MOS emitter transistors on Si(100) and (111) substrates at T=300K. *Semicond. Sci. Technol.*, v. 14, No. 5, pp. 470-477 (1999).

[A23] Asli N., Gastev S.V., Grekhov I.V., Seegebrecht P., Shulekin A.F., Tyaginov S.E., Vexler M.I., Zimmermann H. Al/SiO₂(2.0-2.5 nm)/p-Si tunnel junction as a light emitter. *Microelect. Eng.*, v. 48, No. 1-4, pp. 79-82 (1999).

[A24] Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. Роль эффекта ударной ионизации в формировании обратных вольт-амперных характеристик туннельных структур Al/SiO₂/n-Si. *ФТП*, т. 34, вып. 7, стр. 803-808 (2000).

[A25] Asli N., Gastev S.V., Grekhov I.V., Seegebrecht P., Shulekin A.F., Tyaginov S.E., Vexler M.I., Zimmermann H. Luminescence measurements on MOS tunnel diodes as a method of finding the photon emission rates in Silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 3, pp. 539-543 (2000).

[A26] Vexler M.I., Shulekin A.F., Dieker Ch., Zaporozhtschenko V., Zimmermann H., Jäger W., Grekhov I.V., Seegebrecht P. Current model considering oxide thickness non-uniformity in a MOS tunnel structure. *Solid-State Electronics*, v. 45, No. 1, pp. 19-25 (2001).

[A27] Asli N., Vexler M.I., Shulekin A.F., Yoder P.D., Grekhov I.V., Seegebrecht P. Threshold energies in the light emission characteristics of silicon MOS tunnel diodes. *Microel. Reliability*, v. 41, No. 7, pp. 1071-1076 (2001).

[A28] Vexler M.I., Asli N., Shulekin A.F., Meinerzhagen B., Seegebrecht P. Compact quantum model for a silicon MOS tunnel diode. *Microelect. Eng.*, v. 59, pp. 161-166 (2001).

[A29] Карева Г.Г., Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. Туннелирование электронов через двойной барьер в структуре металл-окисел-кремний при обратном смещении. *ФТП*, т. 36, вып. 8, стр. 953-958 (2002).

[A30] Asli N., Vexler M.I., Shulekin A.F., Seegebrecht P. Hot-electron-induced luminescence of metal-oxide-semiconductor tunnel devices. *Semicond. Sci. Technol.*, v. 18, pp. 147-153 (2003).

[A31] El Hdiy A., Khlil R., Ziane Dj., Grekhov I.V., Shulekin A.F., Vexler M.I. Impact of the band-band tunneling in silicon on electrical characteristics of Al/SiO₂/p⁺-Si structures with the sub-3 nm oxide under positive bias. *Solid-State Electronics*, v. 47, No. 4, pp. 617-620 (2003).

[A32] Vexler M.I. A simple quantum model for the MOS structure in accumulation mode. *Solid-State Electronics*, v. 47, No. 8, pp. 1283-1287 (2003).

[A33] Khlil R., El Hdiy A., Shulekin A.F., Tyaginov S.E., Vexler M.I. Soft breakdown of MOS tunnel diodes with a spatially non-uniform oxide thickness. *Microelectronics Reliability*, v. 44, No. 3,

pp. 543-546 (2004).

[A34] Asli N., Shulekin A.F., Yoder P.D., Vexler M.I., Grekhov I.V., Seegebrecht P. Impact of oxide damage on the light emission properties of MOS tunnel structures. *Solid-State Electronics*, v. 48, No. 5, pp. 731-737 (2004).

[A35] Шулекин А.Ф., Тягинов С.Э., Khilil R., El Hdiy A., Векслер М.И. Мягкий пробой как причина спада тока в туннельной МОП структуре. *ФТП*, т. 38, вып. 6, стр. 753-756 (2004).

[A36] Vexler M.I., Shulekin A.F., Grgec D., Grekhov I.V., Meinerzhagen B. Band-to-band tunneling related effects in a thin MOS structure. *Microelect. Eng.*, v. 72, pp. 180-184 (2004).

[A37] Asli N., Векслер М.И., Грехов И.В., Seegebrecht P., Тягинов С.Э., Шулекин А.Ф. Излучательная рекомбинация в кремниевой туннельной МОП-структуре. *ФТП*, т. 38, вып. 9, стр. 1068-1073 (2004).

[A38] Тягинов С.Э., Векслер М.И., Шулекин А.Ф., Грехов И.В. Влияние пространственной неоднородности толщины диэлектрика на вольтамперные характеристики туннельных МОП структур. *Письма в ЖТФ*, т. 30, вып. 24, стр. 7-11 (2004).

[A39] Тягинов С.Э., Asli N., Векслер М.И., Шулекин А.Ф., Seegebrecht P., Грехов И.В. Мониторинг интенсивности люминесценции туннельной МОП структуры с пространственно неоднородной толщиной диэлектрика. *Письма в ЖТФ*, т. 31, вып. 8, стр. 47-51 (2005).

[A40] Tyaginov S.E., Vexler M.I., Shulekin A.F., Grekhov I.V. Statistical analysis of tunnel currents in scaled MOS structures with a non-uniform oxide thickness distribution. *Solid-State Electronics*, v. 49, No. 7, pp. 1192-1197 (2005).

[A41] El Hdiy A., Khilil R., Jin Y., Tyaginov S.E., Shulekin A.F., Vexler M.I. An aluminum-gate metal-oxide-silicon capacitor with a tunnel-thin oxide under the bidirectional electric stress. *J. Appl. Phys.*, v. 98, Paper No. 024501 [5 pages] (2005).

[A42] Векслер М.И., Грехов И.В., Шулекин А.Ф. О влиянии поперечного квантования на электрические характеристики тун-

нельной МОП-структуры субмикронных размеров. *ФТП*, т. 39, вып. 12, стр. 1430-1435 (2005).

[A43] Yoder P.D., Vexler M.I., Shulekin A.F., Asli N., Gastev S.V., Grekhov I.V., Seegebrecht P., Tyaginov S.E., Zimmermann H. Luminescence spectra of an Al/SiO₂/p-Si tunnel metal-oxide-semiconductor structure. *J. Appl. Phys.*, v. 98, Paper No. 083511 [12 pages] (2005).

[A44] Vexler M.I., Tyaginov S.E., Shulekin A.F. Determination of the hole effective mass in thin silicon dioxide film by means of an analysis of characteristics of a MOS tunnel emitter transistor. *J. Phys.: Condens. Matter*, v. 17, No. 50, pp. 8057-8068 (2005).

[A45] Vexler M.I., El Hdiy A., Grgec D., Tyaginov S.E., Khlil R., Meinerzhagen B., Shulekin A.F., Grekhov I.V. Tunnel charge transport within silicon in reversely-biased MOS tunnel structures. *Microelectronics Journal*, v. 37, No. 2, pp. 114-120 (2006).

[A46] Тягинов С.Э., Векслер М.И., Шулекин А.Ф., Грехов И.В. Влияние неоднородности толщины диэлектрика на переключение туннельной МОП структуры Al/SiO₂/n-Si при обратном смещении. *ФТП*, т. 40, вып. 3, стр. 314-318 (2006).

[A47] Векслер М.И., Тягинов С.Э., Шулекин А.Ф. Транзистор с туннельным МОП эмиттером как инструмент для определения эффективной массы дырки в тонкой пленке диоксида кремния. *ФТП*, т. 40, вып. 4, стр. 498-503 (2006).

[A48] Tyaginov S.E., Vexler M.I., Shulekin A.F., Grekhov I.V. Effect of the spatial distribution of SiO₂ thickness on the switching behavior of bistable MOS tunnel structures. *Microelect. Eng.*, v. 83, No. 2, pp. 376-380 (2006).

[A49] Tyaginov S.E., Vexler M.I., Shulekin A.F., Grekhov I.V. The post-damage behavior of a MOS tunnel emitter transistor. *Microelectronics Reliability* (2006) accepted for publication.

[A50] Vexler M.I. Simulation of current-voltage characteristics of a MOS structure considering the tunnel transport of carriers in semiconductor. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v. 39, No. 1, pp. 61-65 (2006).

Список цитируемой литературы

- [1] А. П. Барабан, В. В. Булавинов, П. П. Коноров, *Электроника слоев SiO₂ на кремнии*, Л., изд-во ЛГУ (1988).
- [2] <http://public.itrs.net>, "International Technology Roadmap for Semiconductors", (2005).
- [3] H. S. Momose, M. Ono, T. Yoshitomi, T. Ohguro, S. Nakamura, M. Saito, H. Iwai, *IEEE Trans.*, **ED-43** 1233 (1996).
- [4] J. G. Simmons, G. W. Taylor, *Solid-State Electron.*, **29** 287 (1986).
- [5] И. В. Грехов, Е. В. Остроумова, А. А. Рогачев, А. Ф. Шулекин, *Письма в ЖТФ*, **17** 44 (1991).
- [6] E. Aderstedt, I. Medugorac, P. Lundgren, *Solid-State Electron.*, **46** 497 (2002).
- [7] M. A. Green, F. D. King, J. Shewchun, *Solid-State Electron.*, v. 17, I-Theory, p. 551; II-Experiment, p. 563 (1974).
- [8] S. K. Lai, P. V. Dressendorfer, T. P. Ma, R. C. Barker, *Appl. Phys. Lett.*, **38** 41 (1981).
- [9] Т. Андо, А. В. Фаулер, Ф. Стерн, *Электронные свойства двумерных систем* [гл. 3], М., Мир (1985).
- [10] Г. Г. Карева, *ФТП*, **33** 969 (1999).
- [11] W. E. Drummond, J. L. Moll, *J. Appl. Phys.*, **42** 5556 (1971).
- [12] A. Ghetti, A. Hamad, P. J. Silverman, H. Vaidya, N. Zhao, *Proc. SISPAD Conf.*, Kyoto, Japan, p. 239 (1999).
- [13] A. Schenk, G. Heiser, *J. Appl. Phys.*, **81** 7900 (1997).
- [14] A. Haque, K. Alam, *Appl. Phys. Lett.*, **81** 667 (2002).
- [15] G. Deboy, J. Kölzer, *Semicond. Sci. Technol.*, **9** 1017 (1994).
- [16] N. Asli, *Experimentelle Untersuchung der Elektrolumineszenz von MOS-Tunnelstrukturen*, PhD Dissertation, Kiel Univ., Germany (2004).
- [17] E. Cartier, J. C. Tsang, M. V. Fischetti, D. A. Buchanan, *Microelectron. Eng.*, **36** 103 (1997).
- [18] M. Depas, B. Vermeire, P. W. Mertens, M. Meuris, M. M. Heyns, *Semicond. Sci. Technol.*, **10** 753 (1995).
- [19] S. Lombardo, J. H. Stathis, B. P. Linder, K. L. Rey, F. Palumbo, C. H. Tung, *J. Appl. Phys.*, **98** Paper 121301 (2005).
- [20] Y. Wang, K. Brennan, *J. Appl. Phys.*, **75** 313 (1994).
- [21] M. C. Vecchi, M. Rudan, *IEEE Trans.*, **ED-45** 230 (1998).
- [22] N. Sano, M. Tomizawa, A. Yoshii, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** 3662 (1991).