

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 537.311.322, 535.37
Коды ГРНТИ 29.19.31, 29.31.23
№ госрегистрации

УТВЕРЖДАЮ
Ректор
д.х.н., профессор Собынин В.А.

(подпись)

“ ____ ” сентября 2011 г.

М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЁТ

по проблеме:

**Получение и комплексное исследование излучателей света в области
1.5 мкм на основе наноструктурированного кремния**

номер контракта: **П506**

по проекту **НК- 94П(2)** поисковых научно-исследовательских работ, выполняемому в рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» направления 1 «Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы в соответствии с приказом Рособразования №417 от «17» апреля 2009 г., по направлению «Создание электронной компонентной базы»

Руководитель проекта

профессор А. В. Аржанников

Новосибирск 2011

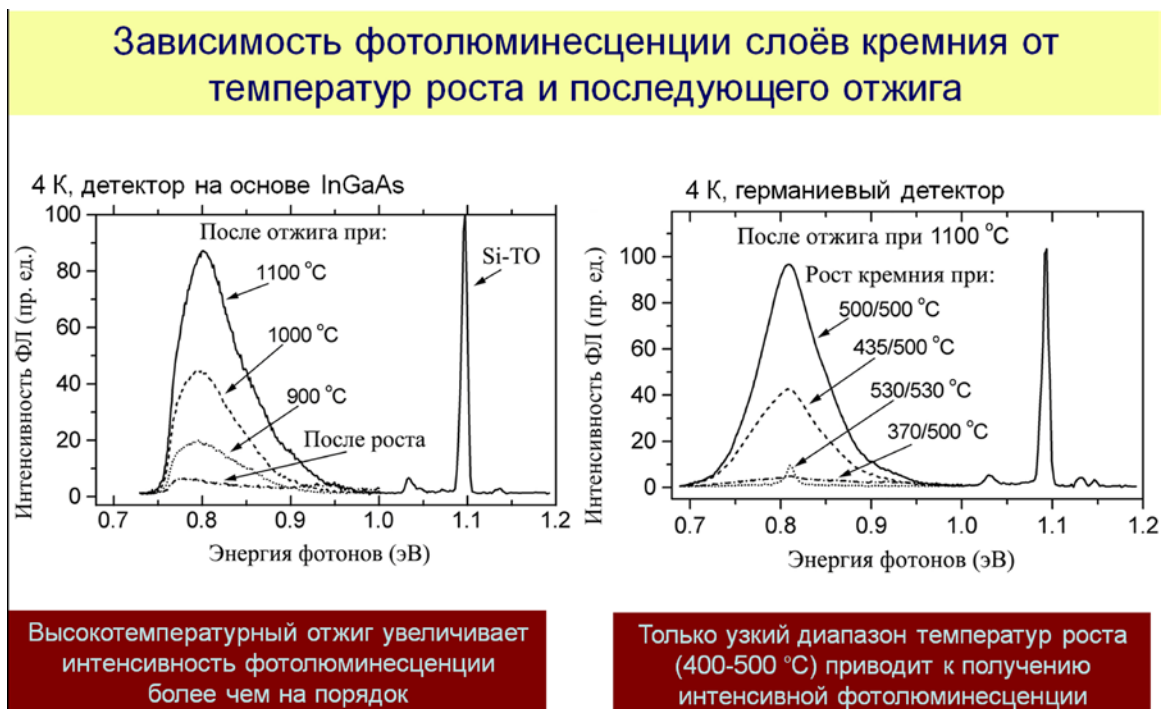
Краткое содержание

Кремний является основным материалом производства элементной базы кремниевой микроэлектроники. Однако его применение для изготовления оптоэлектронных устройств ограничено особенностями его зонной структуры, оптические межзонные переходы в которой происходят с низкой вероятностью, так как требуют возбуждения фононов для выполнения закона сохранения импульса. Ключевой подход к увеличению квантового выхода люминесценции состоит в модификации зонной структуры кремния посредством создания дополнительных энергетических уровней, оптические переходы через которые происходят без обязательного участия фононов. Успешная реализация такой модификации может существенно расширить область применения кремния.

Возможность изготовления источников света из материала на основе кремния открывает перспективу конструирования *монолитных* интегральных оптоэлектронных устройств. Наиболее востребованной областью применения таких устройств является оптическая связь посредством кварцевого оптоволокна, в котором наименьшее поглощение света происходит в диапазоне длин волн 1.5-1.6 мкм. Такие длины волн больше, чем длина волны излучения кремния при межзонных переходах, которая составляет величину около 1.1 мкм. Для излучения света с длиной волны около 1.5 мкм требуется, чтобы в электронной структуре кремния появились уровни, энергетический зазор между которыми был бы более узким, чем ширина запрещённой зоны.

Целью данного проекта является развитие оригинального метода формирования высокой концентрации глубоких уровней в кремнии посредством формирования в нём дислокаций, и изготовление светодиодов для диапазона длин волн 1.5-1.6 мкм на основе слоёв такого кремния. Особенность нашего метода состоит в том, что дефекты не вносятся в уже существующий кристалл кремния, а образуются в процессе его роста в специфических экспериментальных условиях. С помощью сканирующей туннельной микроскопии нами установлено, что рост как германия, так и кремния на оксидированной поверхности кремния начинается с зарождения полусферических островков, которые образуют массив с очень высокой плотностью 10^{12} - 10^{13} см⁻². При такой плотности массива, островки по мере роста могут достигать диаметра в основании до 3-10 нанометров, после чего происходит их коалесценция. С помощью просвечивающей электронной микроскопии нами установлено, что кристаллические островки германия могут либо быть эпитаксиальными по отношению к кристаллической подложке кремния, либо иметь случайную ориентацию в зависимости от температуры роста. Последующее осаждение кремния приводит к созданию структуры квантовых точек германия в матрице кремния, которая по данным исследования фотолюминесценции даёт широкую полосу излучения света в диапазоне 1.4-1.6 мкм.

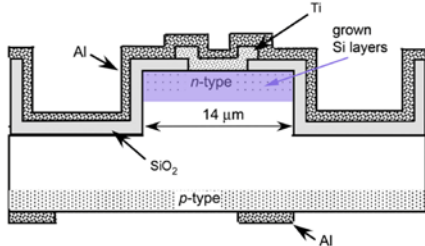
На первом этапе данного проекта было установлено, что высокотемпературный отжиг выращенных структур не приводит к исчезновению фотолюминесценции, связанной с квантовыми точками германия, а напротив, он вызывает появление пика люминесценции в диапазоне 1.5-1.6 мкм с более высокой интенсивностью. Исчезновение люминесценции после высокотемпературного отжига ожидалось из-за растворения островков германия посредством диффузии германия в кремнии. Увеличение интенсивности фотолюминесценции после отжига наблюдалось только у тех структур, которые были выращены в диапазоне сравнительно низких температур приблизительно от 400 до 500 °С. На втором этапе данного проекта с помощью просвечивающей электронной микроскопии нами установлено, что при таких условиях в слоях кремния формируются дислокации, причём их концентрация достигает величин $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Высокотемпературный отжиг уменьшает концентрацию дислокаций незначительно и приводит к существенному уменьшению центров безызлучательной рекомбинации. Это и обеспечивает появление интенсивного пика фотолюминесценции в диапазоне 1.5-1.6 мкм.



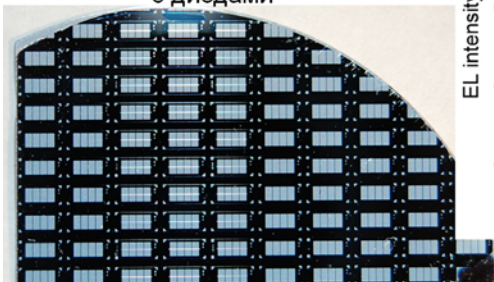
На втором этапе данного проекта нами были изготовлены светодиоды двух конфигураций, а именно: для регистрации излучения в направлении от поверхности выращенных слоёв кремния и в направлении от края слоя от диодной структуры в форме волновода.

Краевая электролюминесценция диодов волноводного типа

Схема сечения изготовленного $p-i-n$ диода волноводной конфигурации

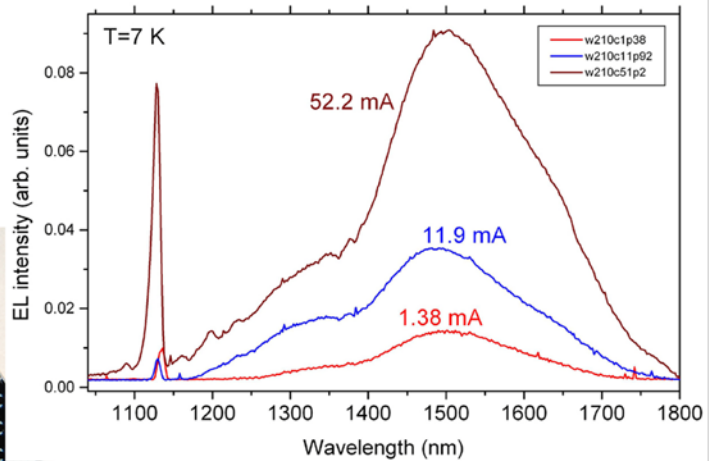


Фотография пластины кремния с диодами



Спектры электролюминесценции

w210, One Si layer about 200 nm thick

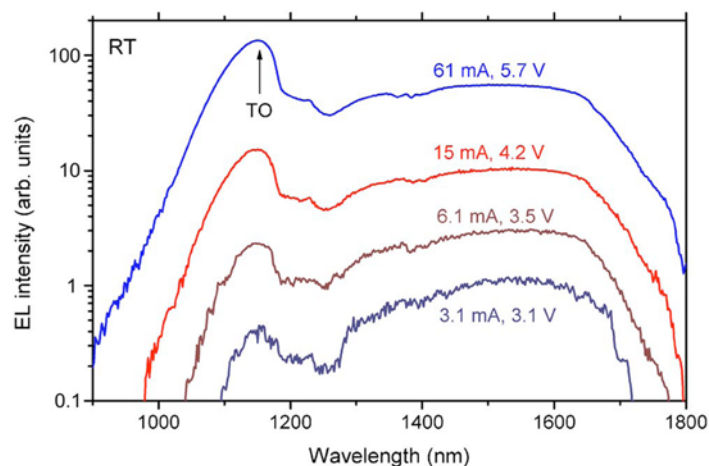


Несмотря на меньшую на 4 порядка площадь излучения, диоды волноводного типа дают сравнимую по величине интенсивность электролюминесценции при низких температурах.

15

Проведено детальное исследование электролюминесценции изготовленных диодов, то есть, измерены зависимости интенсивности излучения от плотности тока при разных температурах в диапазоне от 7 до 325 К. Эти исследования показали, что диоды обеих конфигураций излучают в диапазоне длин волн 1.4-1.6 мкм при комнатной температуре. Причём интенсивность электролюминесценции с ростом температуры в этом диапазоне уменьшается только в 3 раза в случае излучения в направлении от поверхности выращенных слоёв.

Зависимость интенсивности электролюминесценции от величины тока при комнатной температуре



Интенсивность люминесценции в диапазоне 1.5-1.6 мкм имеет более сильную зависимость от тока, чем линейную.

На третьем этапе данного проекта исследования были сосредоточены на трёх направлениях. Первое из них было связано с дальнейшим развитием технологии создания слоев кремния с высокой концентрацией глубоких уровней. Эта работа проводилась с использованием установки сверхвысоковакуумной установки сканирующей туннельной микроскопии, оснащённой источниками для молекулярно-лучевой эпитаксии кремния, германия и висмута. При этом висмут использовался как сурфактант для модификации процесса роста слоёв германия и кремния. Кроме этого, ростовая камера установки была оборудована системой напуска кислорода для оксидирования поверхности кремния. Поскольку наш метод роста слоёв кремния основан на использовании наноструктурированных поверхностей кремния состоящих из массивов островков германия, то для приготовления такой поверхности нами впервые был использован сурфактант висмута, обеспечивший образование массива кластеров германия с размером каждого кластера всего несколько атомов. Кроме этого, было проведено детальное исследование процесса образования массива трёхмерных островков кремния на оксидированной поверхности кремния (111). При росте на такой поверхности появление дислокаций проявляется сильнее, чем при росте на оксидированной поверхности кремния (100).

Второе направление исследований было направлено на обработку и анализ экспериментальных данных по электролюминесценции. При этом были использованы экспериментальные результаты и модельные представления, развитые нами для фотолюминесценции и представленные в отчёте за второй этап данного проекта. Не смотря на то, что температурные зависимости и зависимости от плотности мощности возбуждения для фото- и электролюминесценции сильно различаются, тем не менее, они относятся к материалу с одинаковой электронной структурой и поэтому допускают использование одной схемы для описания излучательных и безызлучательных переходов. Для их описания была использована статистика Шокли-Рид-Холла. Как можно было бы предположить из общих рассуждений, наблюдаемые различия между зависимостями для фото- и электролюминесценции происходит от влияния процесса переноса носителей под действием внешнего электрического поля на их концентрацию в разных областях диодной структуры. Работа с данными по электролюминесценции привела к уточнению наших представлений, которые были развиты нами для фотолюминесценции. Это относится к интерпретации зависимости положения пика люминесценции от плотности мощности накачки, которая связана с заполнением носителями глубоких уровней.

Целью третьего направления исследований является поиск путей увеличения внешнего квантового выхода люминесценции. Основной подход здесь состоит в создании условий для получения направленной люминесценции, а также в сужении её пика. Принципиальным

решением этой задачи является создания структур, в которых работал бы эффект Пурселя. Этот эффект лежит в основе функционирования фотонных кристаллов различной конфигурации и даёт увеличение интенсивности излучения на резонансных длинах волн, отбор которых осуществляется посредством выбора определённой геометрии для отражения и прохождения электромагнитных волн. Эффект Пурселя для слоёв дислокационного кремния ранее не наблюдался. Поэтому первостепенной задачей являлось обнаружение резонансной люминесценции выращенных слоёв кремния в простейшей конфигурации с двумя параллельно расположенными отражающими границами. Изготовление таких структур нами осуществлялось посредством роста слоёв дислокационного кремния в конфигурации кремний-на-изоляторе. На данном этапе нами проводилось исследование структуры и морфологии поверхности таких слоёв методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии, соответственно.

Таким образом, за время работы над проектом нами была разработана технология выращивания слоёв наноструктурированного кремния, содержащего высокую концентрацию глубоких уровней, обусловленных дислокациями. Выращенные слои показывают высокую интенсивность фотолюминесценции в области длин волн 1.5 мкм. На основе выращенных слоёв были изготовлены несколько конфигураций *p-i-n* диодов, которые дают электролюминесценцию в этой области длин волн при комнатной температуре. Установлена электронная структура излучающих слоёв кремния и механизм излучательных электронных переходов. Они происходят при участии глубоких уровней в запрещённой зоне кремния. Это обстоятельство показывает перспективность использования таких слоёв для изготовления источников ближнего ИК излучения. Разработанная технология получения слоёв наноструктурированного кремния позволяет создавать структуры кремний-на-изоляторе, которые требуются для увеличения внешнего квантового выхода люминесценции посредством изготовления фотонных кристаллов с использованием эффекта Пурселя. Задачи проекта решены в полном объёме.

Отчёт по третьему этапу проекта состоит из 108 страниц, 3 частей, 38 рисунков и 71 источника.