

Е.Я. Швец, первый проректор, к.т.н., профессор
О.П. Головки, доцент, к.ф.-м.н.

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОКРЕМНИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Запорожская государственная инженерная академия

Проанализовано напрямки досліджень технології та властивостей нанокремнію для застосування в оптоелектроніці.

Проанализированы направления исследований технологии и свойств нанокремния для применения в оптоэлектронике.

Введение. Разработка и исследование нанотехнологий взрывообразно внедряются во все новые области технологии, включая электронику. Применение наноструктур обеспечивает миниатюризацию приборов, снижение их энерго- и материалоемкости. Вследствие действия чисто геометрических и физических факторов вместе с уменьшением размеров снижается и характерное время протекания разнообразных процессов в приборе, что приводит к росту его быстродействия.

Наноструктурные объекты состоят из счетного числа атомов, поэтому в них уже в значительной степени проявляются дискретная атомно-молекулярная структура вещества, а также квантовые закономерности его поведения. Это приводит к появлению новых или усилению уже известных физических свойств материала, в том числе и основного материала современной твердотельной электроники – кремния.

Состояние вопроса. Стремительное сокращение размеров приборных элементов в кремниевых интегральных микросхемах требует учета квантово-размерных ограничений на протекающие в них процессы. Кремниевые наноструктуры интенсивно исследуются в последние 5...7 лет. Особенный интерес вызывает обнаруженные в нанокристаллах кремния оптические эффекты [1]. Излучение света объемными монокристаллами кремния крайне затруднено вследствие не прямой зонной структуры кремния. Однако в низкоразмерных кремниевых структурах, в частности, в кремниевых нанопроволоках, обнаружена люминесценция с длиной волны света около 1550 нм [2]. В связи с прозрачностью кремния в ближней инфракрасной области спектра этот эффект дает возможность сочетания кремниевых нанопроволок с оптоволоконными системами связи, которые используют диапазон длин волн 1300...1550 нм.

Исследованиями [1] установлено, что в нелегированных нанокристаллах кремния происходит подавление люминесценции вследствие Оже-рекомбинации. Повышение интенсивности излучения возможно при увеличении концентрации носителей заряда в нанокристаллах кремния путем их легирования. Исследование люминесценции нанокристаллов кремния, которые после выращивания были легированы бором методом ионной имплантации, позволило выявить сложную зависимость интенсивности фотолюминесценции от концентрации введенных ионов бора. Авторам удалось установить оптимальные дозы легирования в сочетании с отжигом после внедрения примеси, которые приводят к значительному росту интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов кремния.

В работе [3] показано, что повышению интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов кремния способствует также наличие примесей углерода, кислорода и золота.

Нанокристаллы кремния, созданные внутри диэлектрической матрицы, могут служить ячейками хранения электрического заряда [4], что может быть использовано для создания высокоэффективных наноразмерных элементов памяти, а также ряда оптоэлектронных устройств.

Высокая значимость кремниевых наноструктур обуславливает актуальность исследования методов их создания и оптических свойств. В последние пять лет большой интерес исследователей вызывают наноразмерные гетероструктуры Si/Ge .

Постановка задачи. Цель данной работы – проанализировать перспективы применения в оптоэлектронике нового вида наноразмерных структур – гетеронаноструктур Si/Ge .

Основная часть исследования. В Si/Ge -гетероструктурах с самоорганизующимися островками и квантовыми точками даже при комнатной температуре наблюдаются электро- и фотолюминесценция в инфракрасном диапазоне света с длиной волны 1300...1550 нм, в котором, как уже отмечалось выше, работают оптоволоконные линии связи. Это дает возможность создания на их основе светоизлучающих устройств для оптоволоконных систем связи, легко интегрируемых с кремниевой технологией изготовления интегральных микросхем. Кроме того, было обнаружено, что периодические $Si/Si_{1-x}Ge_x$ -сверхрешетки могут быть использованы для разработки наноэлектронных приборов, работающих на эффекте резонансного туннелирования электронов. Отсюда понятно желание довести технологию и свойства таких наноструктур до уровня, необходимого для создания высокоэффективных оптоэлектронных систем.

Авторы работы [5] показали, что напряженный (растянутый) Si -слой, выращенный на релаксированном буферном слое твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ поверх кремниевой монокристаллической подложки с кристаллографической ориентацией (001), является эффективной квантовой ямой для электронов.

Известно [6], что кремний и германий образуют непрерывный ряд твердых растворов, параметр кристаллической решетки и ширина запрещенной зоны которых зависят от процентного содержания компонентов. При эпитаксии германия на кремниевую подложку твердого раствора германия с кремнием вследствие одинаковой структуры (типа алмаза) и близости параметров решетки осаждаемого слоя и подложки между ними не образуются дислокации несоответствия. Отсутствие дислокаций на границах самоформирующихся островков, выращенных на гладком релаксированном слое твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x/Si(100)$ с долей $Ge_x = 0,2...0,3$, способствует тому, что интенсивность фотолюминесценции на порядок выше, чем в случае подобных островков, выращенных на ненапряженных кремниевых подложках.

В работе [7] исследованы самоиндуцированные nanoостровки, формирующиеся в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии германия на монокристаллической кремниевой подложке. Установлено, что одновременно формируются nanoостровки двух форм (рис. 1) – куполообразной и в виде пирамид с квадратным основанием, симметрия которых согласуется с симметрией четвертого порядка поверхности подложки с кристаллографической ориентацией (001).

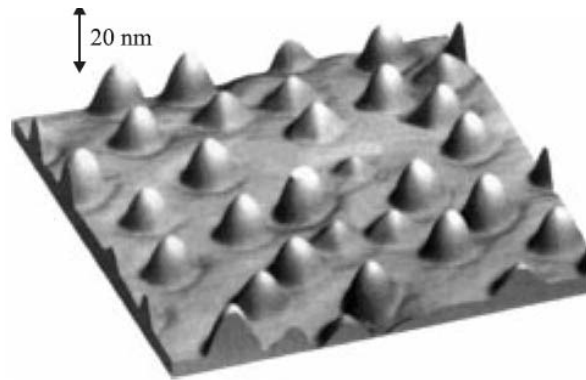
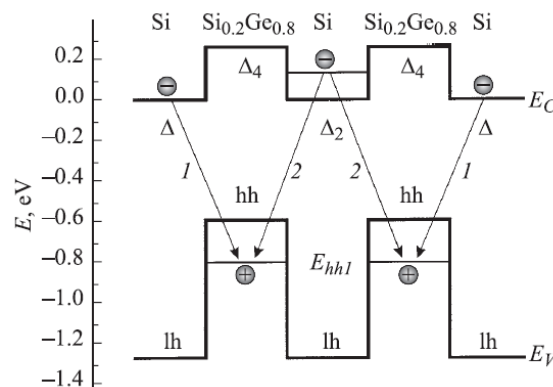


Рисунок 1 – Наноостровки твердого раствора $Ge-Si$, выращенные на кремниевой подложке (001) (атомная силовая микроскопия) [7]

Авторы наблюдали трансформацию наноостровков из одной формы в другую в зависимости от их размеров и температуры эпитаксии.

Последующие исследования [8] показали, что при молекулярно-лучевой эпитаксии твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ слоев толщиной до $3a \dots 4a$ (a – постоянная решетки) образуются напряженные слои. При превышении толщины слоя критического размера ($4a$) происходит его самоорганизация в кристаллическую наноструктуру. При толщине осажденного слоя $4a$ образуются островки пирамидальной формы, а при толщинах свыше $6a \dots 7a$ начинают образовываться трехмерные островки куполообразной формы. Высота их варьируется в пределах $2 \dots 6$ нм в зависимости от толщины осажденного слоя $Si_{1-x}Ge_x$. Пространство между двумя островками заполнено разделительным слоем кремния толщиной не более 2 нм. Типичные размеры образованных пирамидальных островков составляют $5 \dots 6$ нм в высоту и $30 \dots 50$ нм в ширину, в то время как островки куполообразной формы имеют диаметр свыше 50 нм.

По экспериментально наблюдаемым спектрам фотолюминесценции $Si/Si_{1-x}Ge_x$ -наноструктур авторы работы [8] предложили следующее теоретическое описание излучательной рекомбинации носителей заряда в таких структурах. Области кремния выполняют роль квантовых ям в зоне проводимости и квантовых барьеров в валентной зоне (рис. 2).



1 - переход зона - зона типа 1; 2 - переход зона - зона типа 2

Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма периодической наноразмерной $Si/Si_{1-x}Ge_x$ -структуры и каналы рекомбинации в ней [8]

Акты рекомбинации совершаются за счет квазипрямозонных переходов электронов, локализованных в квантовых ямах кремния, в квантовую яму в валентной

зоне, образованной $Si_{1-x}Ge_x$. Упругие напряжения в такой гетероструктуре приводят к расщеплению зоны проводимости на две долины вдоль оси (001) и на четыре долины – вдоль осей (100) и (010). При этом области эффективной рекомбинации электронов и дырок локализуются на гранях и в основании островков. Как видно из рис. 2, переход 1 характеризуется меньшей энергией относительно перехода 2, при котором рост энергии электрона в потенциальной яме кремния осуществляется за счет эффекта квантового ограничения.

Теоретический анализ показал также, что для островков куполообразной формы характерна безфононная рекомбинация зона – зона (переход типа 1, рис. 2), поэтому эффективность люминесценции такой наноструктуры крайне низкая.

Для низкоразмерных островков пирамидальной формы характерна рекомбинация носителей заряда с испусканием поперечного оптического фонона, соответствующая фотолюминесценции в диапазоне энергий 0,9...1,05 эВ, которую определяют квазипрямозонные переходы локализованных носителей заряда между зоной проводимости в кремнии и валентной зоной в твердом растворе $Si_{1-x}Ge_x$ (переход типа 2, рис. 2). Установлено, что интенсивность излучения растет с увеличением интенсивности накачки, переходя в режим насыщения, что связано с ростом скорости генерации носителей заряда в островках $Si_{1-x}Ge_x$. Однако, как показали результаты моделирования, при увеличении толщины нанослоев в $Si/Si_{1-x}Ge_x$ -наноструктурах от 6 нм до 18 нм при очень высокой интенсивности накачки интенсивность излучения может уменьшиться практически в 10^4 раз.

Выводы. Результаты ряда исследований [5,7,8] показали, что осаждение германия методом молекулярно-лучевой эпитаксии на монокристаллической кремниевой подложке с кристаллографической ориентацией (001) в зависимости от технологических режимов приводит либо к образованию упругонапряженных нанослоев $Si_{1-x}Ge_x$, либо к самоорганизации $Si_{1-x}Ge_x$ -островков различной формы.

Отсутствие дислокаций на границах раздела материалов, проявление квантово-размерного эффекта и возможность реализации квазипрямозонных переходов локализованных носителей заряда обеспечивают высокую интенсивность электро- и фотолюминесценции в инфракрасном диапазоне света. Это дает возможность создания на их основе светоизлучающих устройств для оптоволоконных систем связи, легко интегрируемых с кремниевой технологией изготовления интегральных микросхем, что делает эти структуры наиболее перспективными для оптоэлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние имплантации ионов бора и последующих отжига на свойства нанокристаллов Si / Г. А. Качурин, С. Г. Черкова, В. А. Володин В.А. [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – Вып. 1. – С. 75-81.
2. Cathodoluminescence investigation of silicon nanowires fabricated by thermal evaporation of SiO / G. Jia, T. Arguirov, V. Kittler [et all.] // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – Вып. 4. – С. 407-410.
3. Фотолюминесценция пленок нанокристаллического кремния, полученных импульсным лазерным осаждением с введением углерода / А. Б. Каганович, И. П. Лисовский, Э. Г. Манойлов, С. А. Злобин // Физика и техника полупроводников, 2006. – Т. 40. – Вып. 4. – С. 449-453.
4. Ефремов В. Д. Вариация края поглощения света в пленках SiN_x с кластерами кремния / В. Д. Ефремов, В. А. Володин, Д. В. Марин // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42. – Вып. 2. – С. 202-207.

5. Влияние напряженного Si-слоя на фотолюминесценцию самоформирующихся островков, выращенных на релаксированных SiGe/Si(100)-буферных слоях / М. В. Шалеев, А. В. Новиков, А. Н. Яблонский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – Вып. 2. – С. 172-176.
6. Горелик С. С. Материаловедение полупроводников / С. С. Горелик, М. Я. Дашевский. – М.: МИСИС, 2003. – 480 с.
7. Яремко А. М. Взаимосвязь минимумов поверхностной энергии самоиндуцированных nanoостровков SiGe и их формы / А. М. Яремко, М. Я. Валах, В. Н. Джаган // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – Вып. 4. – С. 391-396.
8. Барашевич Ю. А. Каналы излучательной рекомбинации в Si /Si_{1-x}Ge_x-наноструктурах / Ю. А. Барашевич, А. С. Панфиленок, В. Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42. – Вып. 1. – С. 68-74.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2010 р.

Рецензент, проф. І.Ф. Червоний