ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Л.Раткин / rathkeen@bk.ru

В третьей декаде марта 2012 года в Президиуме Российской академии наук (РАН) проведена научная сессия Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН "Проблемы материалов в электронных приборах будущих поколений".

На сессии был представлен широкий спектр разработок. Доклад акад. А.Орликовского и д.ф.-м.н. В.Вьюркова (Физико-технологический институт РАН) был посвящен использованию новых материалов в кремниевых интегральных схемах (ИС).

Среди основных проблем применения транзистора с изолированным затвором в суб-100-нм области – увеличение разброса порогового напряжения вследствие изменения концентрации примеси с уменьшением длины канала и катастрофический спад подвижности носителей из-за высокой их концентрации. Предлагалось использовать материалы с высокой подвижностью носителей зарядов (A_3B_5, GeSi, Ge) и формировать одноосные или биаксиально напряженные каналы. Так же рассматривалась проблема омических контактов к полупроводникам A_3B_5, связанная с невозможностью применения сильного легирования и повышения площади контакта, способствующих снижению сопротивления.

Отказ от поликремния в металлическом затворе транзисторов обусловлен его высоким сопротивлением, диффузией в канале и формированием обедненного слоя вблизи диэлектрика, что эквивалентно утолщению его подзатворного слоя. При выборе материала специалисты руководствуются низкой плотностью активных дефектов на границах и в объеме слоя, высоким потенциальным барьером для электронов, термодинамической стабильностью контакта и качественной границей с кремнием, кинетической стабильностью и устойчивостью к нагреву до 1000°С в течение 5 с, высокой диэлектрической проницаемостью.

К проблемам многоуровневых соединений следует отнести необходимость применения адекватных метрологических методов, потребность в новых материалах, надежность соединений и контактов, минимизацию задержек и потерь в соединениях. В настоящее время развиты методы создания соединений с использованием нанотрубок, применением оптических элементов и СВЧ-компонентов.

Акад. М.Чурбановым и д.ф.-м.н. А.Гусевым (Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Девятых РАН, Нижний Новгород) рассмотрено получение моноизотопного высокочистого кремния для твердотельных квантовых компьютеров. Схема предусматривает разделение изотопов кремния, синтез и глубокую очистку исходных летучих соединений и силана, получение поликристаллического кремния, выращивание из него монокристаллов. Наиболее трудноудалимые летучие примеси – фосфин, этилен, диборан, этан. Для очистки SIH_4 от них применяется низкотемпературная ректификация. При ее использовании возникают проблемы отделения SiH_4 от малолетучих примесей, однако их удалению способствует криофильтрация и ректификация при повышенном давлении.

Затравочный стержень (ЗС) из моноизотопного ^{28}Si изготавливается сваркой поликристаллов в ленту с последующим осаждением из моносилана и формированием его синтезированного бестигельной зонной плавкой. Выращенный монокристалл обладает удельным электрическим сопротивлением свыше 0,4 кОм·см при концентрации кислорода не более $2{\cdot}10^{12}$ атомов/см^3 (примесь углерода не превышает $3{\cdot}10^{14}$ атомов/см^3). Для проекта АВОГАДРО получен поликристалл изотопа ^{28}Si чистотой более 99,99382, содержащий $6{,}1{\cdot}10^{15}$ атомов/см^3 кислорода и $3{,}7{\cdot}10^{15}$ атомов/см^3 углерода. Диаметр заготовки – 61,5 мм при длине 5,9 кг, что практически соответствует требованиям к такому кремнию. Монокристаллы стабильных изотопов кремния ^{28}Si, ^{29}Si и ^{30}Si, благодаря разработанной и запатентованной в России технологии [1], содержат примеси углерода и кислорода

не выше $1{\cdot}10^{16}$ атомов/см^3 при сопротивлении более 200 ом·см. Изотопный эффект параметра кристаллической решетки кремния позволяет применять его в квантовом компьютере [2].

Тема выступления к.х.н. А.Коткова (НПП "САЛЮТ") – получение высокочистых летучих хлоридов, гидридов и металлоорганических соединений для изготовления наноразмерных слоев. Были представлены данные о содержании примесей в гидридах и арсине фирмы MATHESON TRI GAS (США). Проанализированы данные о допустимом их содержании в триметилалюминии, триметилиндии и триметилгаллии чистоты 99,999. Рассматривались различные стадии получения таких веществ и PH_3, SiH_4, $SiCl_4$, NH_3, AsH_3, $AsCl_3$. Описана ректификационная установка для получения высокочистого AsH_3, из которого в ЗАО "ЭПИЭЛ" изготовлены образцы с удельным сопротивлением 2–4 кОм·см. Установка для очистки трехлористого мышьяка позволила изготовить в ЗАО "ЭЛМА-МАЛАХИТ" образцы с подвижностью носителей заряда при 300К не ниже 7000 см^2/(В·с) при их концентрации $5{\cdot}10^{14}$ см$^{-3}$.

А.Котков

В Институте общей физики РАН сконструированы приборы для определения примесей в гидридах. По результатам газовой хроматографии, ИК-Фурье и диодно-лазерной спектрометрии получены данные об изменении концентрации метана в их легкой фракции. Разработана установка для анализа высокочистого аммиака на содержание воды. Исследования позволили определить параметры эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных с применением разных образцов арсина, выявить характер изменений электрофизических параметров таких слоев по годам выпуска этого соединения.

А.Двуреченский

Эпитаксии германия на кремнии и получению упорядоченных ансамблей квантовых точек Ge/Si было посвящено выступление чл.-кор. А.Двуреченского (Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Новосибирск). При гетероэпитаксии в системах, рассогласованных по постоянной кристаллической решетки, рассматривалось спонтанное образование 3D упруго напряженных островков (УНО). Оно характеризуется дисперсией по размерам, составляющей для квантовых точек Ge в Si 17–20%, а также случайным зарождением нанокристаллов с неупорядоченным расположением в плоскости роста [3]. В рамках исследования степени однородности массива нанокристаллов Ge на Si при импульсном воздействии собственными низкоэнергетическими ионами рассматривалась эпитаксия Ge на Si с частично ионизированным молекулярным пучком при 250–400°С, энергией Ge^+ от 50 до 250 эВ, молекулярным потоком $F_{Ge}=7{\cdot}10^{13}$ см$^{-2}$с$^{-1}$, длительностью импульса 0,5, степенью ионизации Ge молекулярного пучка 0,1–0,5%. Проанализированы СТМ-изображения с распределением 3D-островков по размерам после осаждения при 350°С 5МС Ge на Si(100) [4].

При наносекундном лазерном воздействии в нестационарных условиях нагрева изучалась модель кристаллизации и плавления нанокластеров Ge в матрице Si [5]. Температура плавления нанокристаллов Ge в кремнии возрастает при уменьшении их размеров. Данные о кинетике фазовых превращений при импульсном лазерном отжиге подтверждают возможность уменьшения дисперсии по размерам в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками.

При формировании упорядоченных в плоскости роста массивов квантовых точек после N циклов травления/окисления исследовалась морфология облученной ионами поверхности Si. При облучении через тестовые маски обнаружено, что варьирование параметров ионной имплантации с последующим удалением нарушенного слоя обеспечивает создание в нм-масштабе поверхности с затравочными областями различной формы и глубины. При ионном облучении выявлены преимущественное окисление аморфного кремния и рост Ge на структурированной поверхности Si [6].

Методом молекулярной динамики и с применением потенциала Терсдорфа для гетеросистем Ge/Si (111)-(5·5) и Ge/Si (100)-(2·1) с числом атомов не более $5{\cdot}10^5$ изучалась микроскопическая атомная диффузия на структурированной поверхности. Рассматривались ямки в форме перевернутых пирамид [7]. При исследовании упорядоченного зарождения и роста квантовых точек Ge на кольцевых

SiGe нанопроводниках разработан метод формирования из них кольцевых цепочек, использующий для зарождения 3D-островков деформацию поверхности над нанокольцами. С использованием метода Монте-Карло предложен способ учета деформационных эффектов в 3D-модели эпитаксиального роста наноструктур.

В докладе рассматривались фотодетекторные структуры, методы исследования квантовых точек Ge на поверхности слоя SiGe в матрице Si, детекторы на основе квантовых точек Ge в матрице SiGe на виртуальной подложке, температурная зависимость обнаружительной способности и чувствительности. Фотодетекторы на базе квантовых точек Ge/Si (001) для атмосферного окна (3–5) мкм позволяют исследовать влияние уровня и профиля легирования на параметры этих изделий и управлять спектральной полосой чувствительности с помощью контроля элементного состава нанокластеров Ge.

В выступлении чл.-кор. П.Копьева (Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург) обсуждалось состояние и перспективы развития молекулярно-лучевой эпитаксии. Отмечались фундаментальные свойства полупроводниковых гетероструктур и их особенности: необходимость использования подобных структур с хорошим согласованием параметров решетки и эпитаксиальных технологий выращивания, применение многокомпонентных твердых растворов.

П.Копьев

В целом в представленных на сессии докладах подчеркнуто следующее:

- при создании кремниевых квантовых компьютеров могут использоваться передовые технологии кремниевой микро- и наноэлектроники;
- кремний, благодаря большим значениям времени декогеренизации, наиболее предпочтителен для создания твердотельных квантовых компьютеров;
- для конструирования квантовых компьютеров необходима монокристаллическая структура моноизотопного ^{28}Si с содержанием изотопа ^{29}Si не выше 10^{-3} атомных %;
- применение моноизотопного ^{28}Si для квантовых компьютеров предполагает наличие электроактивных примесей не выше 10^{14} атомов/см^3 при содержании кислорода и углерода менее 10^{15} атомов/см^3;
- основным материалом для производства ИС по-прежнему остается кремний: в 2026 году на пластинах 450–675 мм может быть достигнут минимальный размер элементов 5,9 нм;
- применение ультратонких структур КНИ (кремний на изоляторе) начнется с 2013 года, а к 2020 году на пластинах диаметром не менее 450 мм толщина слоя Si достигнет 3 нм при длине канала 10 нм;
- в стадии исследований – технологии производства германиевых и A_3B_5-каналов для классических транзисторов на объемной подложке;
- исследованы механизмы роста островков Ge и разработаны методы создания структурированной поверхности Si с плотностью точек зарождения 10^{10} см$^{-2}$;
- выше 400°C упорядоченный гетероэпитаксиальный рост нанокристаллов Ge происходит на структурированной поверхности Si с шагом 100 нм;
- снижение дисперсии квантовых точек по размерам возможно при импульсном лазерном отжиге наноструктур со встроенными слоями квантовых точек и на основе молекулярно-лучевой эпитаксии с созданием нанокристаллов Ge на поверхности Si импульсным ионным воздействием.

Литература

1. **Гусев А.В., Гавва В.А.** Способ выращивания монокристаллов моноизотопного кремния. Патент РФ № 2370576, 20 октября 2009 г.
2. **Kane B.E.** – Nature, 1998, v.393, p.33–137.
3. Yakimov A.I., Dvurechenskii A.V., Nikiforov A.I. – Nano- and Optoelectronics, 2006, v.1, №2, p.119–175.
4. **Smagina J.V., Novikov P.L., Armbrister V.A., Zinoviev V.A., Nenashev A.V., Dvurechenskii A.V.** – Physica B: Condensed Matter, 2009, v.404, p.4712–4715.
5. **Gatskevich E.I., Malevich V.I., Zinoviev V.A., Dvurechenskii A.V.** International conference "Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies", St. Petersburg-Pushkin, Russia, July 5–6, 2010, p.121.
6. **Novikov P.L., Smagina J.V., Vlasov D.Yu, Deryabin A.S., Kozhukhov A.S., Dvurechenskii A.V.** – Crystal Growth, 2011, v.323, №1, p.198–200.
7. **Новиков П.Л., Смагина Ж.В., Двуреченский А.В.** Десятая российская конференция по физике полупроводников, 19–23 сентября 2011, Нижний Новгород.

Фото: Л. Раткин