

Сверхвысоковакуумная лабораторная технологическая установка для создания наноструктур с латеральными размерами 1-10 нм на поверхности металлов и полупроводников

Суть проекта:

Предлагается изготовить макет технологической установки лабораторного уровня, предназначенной для конструирования поверхностных наноструктур с заданными свойствами, включая функциональные элементы электроники, и разработать базовые технологические процессы.

Актуальность данной разработки:

Происходит становление такой отрасли как нанотехнология, которая должна пониматься, в первую очередь, как создание технологий на уровне контролируемого управления одиночными объектами с нанометровыми размерами. Реально пока необходимых технологических инструментов для данной цели еще не существует. Используются имеющиеся инструменты, тем или иным образом адаптированные к задачам нанотехнологии. То, что предлагается в данном проекте, направлено на создание прототипа нового класса инструментов. Поскольку конечным продуктом должны быть элементы размерами 1-10 нм, то до завершения полного технологического цикла эти элементы должны быть защищены от воздействия воздушной или жидкой среды (естественный окисел таких полупроводников как Si или GaAs составляет 3-4 нм) и весь технологический цикл должен быть проведен в условиях вакуума, который определяется временем технологических операций. Как правило, должны быть реализованы условия сверхвысокого вакуума, т.е. 10^{-10} ÷ 10^{-12} Торр. Помимо этого, на стадии изготовления наноструктур должен осуществляться контроль параметров создаваемых элементов, по крайней мере, их топологии и размеров.

Концепция предлагаемой лабораторной установки базируется на указанных требованиях. Это сверхвысокий вакуум, контроль топологии (местоположения структур) и размеров элементов посредством совмещения сканирующего зондового (СЗМ) и растрового электронного микроскопов (РЭМ) и прецизионные технологические операции (вплоть до атомной точности) на основе локальных (в зоне СЗМ-зонда) химических реакций.

То, что подобные технологические установки, в которых РЭМ позволяет "видеть" одновременно всю поверхность образца и зонд СЗМ с достаточно высоким разрешением, чтобы позиционировать зонд над выделенным участком поверхности, а СЗМ "проводит" локальное технологическое воздействие, в принципе нужны для развития такой области как нанотехнология, сомнению не подвергается. Вопрос, какие задачи должны решаться подобными инструментами. В первую очередь, задачи конструирования наноразмерных систем управления сигналами (нанoeлектроника, нанофотоника, наномеханика и пр.) по принципу bottom-top, в идеале из отдельных атомов или молекул.

Существует еще одна проблема, которая требует пояснения. Поскольку в наноструктуре размерами 1-10 нм поверхностные атомы составляют существенную долю вещества, то все сложности теории, имеющиеся в физике поверхности, прямым образом переносятся в разработку теоретических основ функциональных элементов с нанометровыми размерами. А это, в свою очередь, означает, что, как и в современной физике поверхности, теория пока не будет иметь предсказательной силы и основой продвижения вперед будет эксперимент, требующий соответствующих инструментов.

Состояние проблемы в мире

В настоящее время аналогов подобных установок не существует. Сверхвысоковакуумное аналитическое или технологическое оборудование такого уровня принципиально могут разрабатывать и производить всего четыре компании в мире. Ведущей компанией является Omicron Nanotechnology. В настоящее время только данная

компания предлагает комбинированные установки (Multiscan Lab или UHV Nanoprobe), в которых сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) совмещен с растровым электронным микроскопом (РЭМ), однако в идеологию данных установок не входит одновременное проведение технологических операций с использованием локальных поверхностных химических реакций.

В настоящее время (2012 г.) в мире уже имеется пример подобного подхода к разработке приборных электронных систем масштаба 5 нм и менее. Речь идет о Федеральном исследовательском центре "Центр квантовых вычислений и коммуникационных технологий" (<http://www.cqc2t.org>), созданном в Австралии на базе ведущих университетов страны. В данном Центре в технологической цепочке используется прибор фирмы Omicron Nanotechnology, разработанный специально для данного Центра и представляющий собой СТМ, совмещенный с РЭМом в одной сверхвысоковакуумной камере. В недавно опубликованной работе (*Nature Nanotechnology* 19 (2012) 21) описывается созданный кремниевый одноэлектронный транзистор с активным элементом – квантовой точкой размерами в один атом примеси (Р- фосфор).

Паспорт проекта

Назначение установки:

Конструирование поверхностных наноструктур с заданными свойствами, включая функциональные элементы электроники

Основные функции и параметры:

1. Технологические операции: локальное травление и/или осаждение материала в зоне воздействия зонда сканирующего туннельного микроскопа на молекулы активных газов (молекулярные галогены, металлоорганические и металлгидридные соединения)
2. Контроль процессов. Совмещенные сканирующий зондовый (атомно-силовой и туннельный) и растровый электронный микроскопы позволяют осуществлять наблюдение топологии поверхности, позиционирование зонда СТМ, контроль размеров создаваемых структур и проводить измерения с использованием туннельной и силовой спектроскопии. Все управление процессами, включая напуск газов, и измерениями автоматизировано.
3. Остаточное давление – не хуже $1 \cdot 10^{-10}$ торр
4. Диапазон температур – $100 \div 500$ К
5. Подложки – Si, GaAs, Cu, Ag, Au, Fe, Ni
6. СЗМ. Пространственное разрешение – атомное (0.2 нм), область сканирования 5×5 мкм, область позиционирования зонда 5×5 мм
7. РЭМ. Пространственное разрешение – 10 нм, область сканирования 20×20 мм

Состав:

Трехкамерная сверхвысоковакуумная установка, укомплектованная сканирующим зондовым и растровым электронным микроскопами, набором газовых и твердотельных источников материала с прецизионными системами управления, системой охлаждения и нагрева образцов, ионными источниками, масс-спектрометром, цифровыми блоками управления процессами и измерениями, лабораторными технологическими картами.

Технологические операции:

— Формирование атомно-гладкой поверхности кремния и A_3B_5 заданной атомной реконструкции, локальное травление зондом СТМ (нанолитография) с использованием сверхтонких слоев (1-10 монослоев) резиста или гетерогенных химических процессов. Разработка методов литографии с поперечными размерами структур 1-10 нм.

- Создание планарных металлических элементов на полупроводнике (линейный проводник, проводник заданной топологии) путем разложения металлорганических соединений (железа, меди и пр.), сверхвысокого (10^{21} ат/см³) дельта-легирования в зоне воздействия зонда СТМ, осаждения линейных атомных цепочек на вицинальных гранях полупроводников и пр.
- Локальное легирование поверхностных структур на поверхности полупроводников путем осаждения из молекулярных пучков, включая металлгидридные соединения.
- Атомные манипуляции зондом СТМ при пониженных температурах.
- Другие технологии атомного масштаба

Потребители:

Исследовательские центры и компании, работающие в области нанотехнологий

Задел

В настоящее время Институт общей физики им. А.М Прохорова РАН (ИОФ РАН) является **единственным** местом в России, где **разрабатываются сверхвысоковакуумные зондовые микроскопы и ведутся исследования взаимодействия активных газов с поверхностью полупроводников и металлов на атомном уровне, а ЗАО НПФ «Сигма Скан» - единственный в России производитель сверхвысоковакуумных сканирующих зондовых микроскопов.** В 1994 г. в ИОФРАН был разработан первый российский сверхвысоковакуумный СТМ, положивший начало серии GPI 300, а в 1995 г. опубликована первая сделанная в России работа по исследованию поверхности на атомном уровне (*Письма ЖЭТФ* **62** (1995) 444). Результаты работ Института по теме "Взаимодействие молекулярных галогенов с поверхностью твердого тела" опубликованы в более чем 50 рецензируемых научных статьях, двух монографиях. К выпуску в 2012 г. в издательстве "Stanford Chong" готовится монография "Halogen Induced Nanotechnology".

С 2002 г. разработанные в ИОФРАН сверхвысоковакуумные сканирующие туннельные микроскопы серии GPI 300 изготавливаются в компании ЗАО НПФ "Сигма Скан" и **являются основой приборной базы** для российской науки о поверхности: из 30 имеющихся в России сверхвысоковакуумных установок, оснащенных зондовыми микроскопами, 13 имеют в своем составе микроскоп GPI 300. Данные приборы находятся в ИОФРАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФТТ РАН, ИАПУ ДВО РАН, ИМЕТ УрО РАН, БГУ, ИК СО РАН, ИРЭ РАН, ФТИ УрО РАН, Курчатовский центр.

В 2006 г. в рамках прикладной НИР (контракт 02.435.11.2008 с Роснаукой, программа ФЦНТП 2005-2006 гг.) в ЦЕНИ ИОФРАН разработан и изготовлен макет сверхвысоковакуумного низкотемпературного сканирующего туннельного микроскопа GPI CRYO. В настоящее время проводятся низкотемпературные эксперименты в системе Cl/Si и Cl/Ag. Изготовлен еще один экземпляр прибора GPI CRYO для Института Ж.Ламура в Нанси (Франция) в рамках совместной лаборатории РАН-НЦНИ "Инструментарий, измерения и технологии атомного масштаба".

В 2009 г. реализован проект, в результате которого создана система SPM-in-SEM, представляющая собой комбинированный сканирующий туннельный/атомно-силовой микроскоп (СТМ/АСМ), который размещается внутри растрового электронного микроскопа SUPRA40 фирмы Karl Zeiss и позволяет улучшить пространственное разрешение РЭМ вплоть до атомного.