

Сведения о выполненных работах
в период с 27.07.2023 г. по 30.06.2024 г.

по проекту **«Физико-технологические основы синтеза бездефектного
силицена и германена методом молекулярно-лучевой эпитаксии»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 21-72-10031

Руководитель: Лозовой Кирилл Александрович, канд. физ.-мат. наук

На третьем этапе работы проводились экспериментальные исследования по синтезу силицена и германена на подложках Si(100), Si(111), Al(111), Ge(111) и HOPG.

В результате выполнения работ по проекту в отчетном периоде на основе полученных экспериментальных результатов завершено построение физико-математической модели эпитаксиального роста двумерных кристаллов силицена и германена на различных подложках.

Получены зависимости параметров формируемых двумерных материалов от условий их синтеза (подложки, температуры, скорости и времени роста) в методе молекулярно-лучевой эпитаксии.

Усовершенствована процедура подготовки пластин для осаждения наноструктур с помощью имеющегося в распоряжении комплекса оборудования для предэпитаксиальной очистки подложек.

Проведены дальнейшие экспериментальные исследования по синтезу двумерных структур кремния и германия на различных подложках с помощью эпитаксиального осаждения германия и кремния в сверхвысоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии, оснащенной двумя электронно-лучевыми испарителями для кремния и германия «Катунь-100».

Определены температурные интервалы для различных режимов роста кремния и германия на различных подложках.

Проведены исследования морфологии поверхности синтезированных структур методами дифракции быстрых электронов, атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Указанными методами получены изображения поверхности синтезированных структур.

Получены рамановские спектры выращенных образцов, определены структурные характеристики полученных двумерных слоев.

Проведен сравнительный анализ результатов, полученных различными методами (в том числе в рамках теоретических и экспериментальных исследований).

На заключительном этапе выполнения проекта исследованы зависимости качества выращиваемых двумерных слоев от технологических параметров в методе молекулярно-лучевой эпитаксии. Осуществлена отработка режимов синтеза двумерных материалов. Описаны технологические режимы синтеза двумерных кремния и германия толщиной от одного до нескольких монослоев.

Была осуществлена поездка в город Санкт-Петербург для выступления на Всероссийской научной конференции с международным участием "Невская фотоника – 2023" (9–13 октября 2023 г., г. Санкт-Петербург) (Лозовой К.А., стендовый доклад на тему "Исследование гомоэпитаксиального роста на поверхности Si (100) методом дифракции быстрых электронов") и обсуждения полученных результатов.

Полученные результаты также представлялись на следующих конференциях:

1. Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (4–8 сентября 2023 г., г. Новосибирск).

2. 10-я Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы радиофизики" (26–29 сентября 2023 г., г. Томск).

3. Школа молодых ученых по оптическим и фотоэлектрическим свойствам полупроводниковых квантовых систем "Оптика и фотоэлектрика квантовых систем" (8-9 ноября 2023 г., г. Новосибирск).

4. 10th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (23-26 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург).

По результатам проделанной работы в отчетном периоде опубликовано 5 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, в том числе 1 статья в высокорейтинговом зарубежном журнале *C Journal of Carbon Research* (импакт-фактор 4.1).

По результатам работы зарегистрировано 2 ноу-хау:

1. «Способ получения двумерных слоев кремния и германия на высокоориентированном пиролитическом графите» (Приказ ТГУ № 1280/ОД от 04.12.2023 г.).

2. «Способ получения двумерных слоев кремния и германия на подложке германия» (Приказ ТГУ № 1281/ОД от 04.12.2023 г.).

Возможность практического использования результатов проекта:

В результате работы разработана технология синтеза двумерных слоев кремния и германия толщиной от одного до нескольких монослоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Рекомендованы ростовые условия в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющие синтезировать пленки силицена и германена заданной толщины и качества, оптимальные для создания устройств нанoeлектроники и фотоники различного назначения. Такие устройства составляют основу новейшей элементной базы электронных приборов контроля и автоматизации производства, оптических и квантовых систем передачи информации и применяются в современной электронике, солнечной энергетике, сенсорике, медицине (в том числе для адресной доставки лекарственных средств), квантовых и телекоммуникационных технологиях.

В результате выполнения проекта сформирован научный и технологический задел по изучению особенностей формирования и разработке отечественных технологий синтеза различных бездефектных графеноподобных двумерных материалов и их производных на различных подложках, а также приборов нового поколения на их основе.