

Проект РНФ № 23-42-00120

«Разработка детекторов ионизирующего излучения на низко-дислокационных монокристаллах алмаза, выращиваемых из газовой фазы, с высокой эффективностью сбора зарядов», результаты 2023 года

В 20203 году начался проект РНФ № 23-42-00120, нацеленный на исследование и разработку детекторов ионизирующего излучения на алмазных пленках и кристаллах с пониженной плотностью дислокаций и дефектов, выращиваемых методом осаждения из газовой фазы в СВЧ-плазмохимических реакторах (CVD алмазах). В силу высокой радиационной стойкости алмаза, детекторы на его основе востребованы в качестве альтернативы традиционным полупроводниковым детекторам, например, кремниевых, так как первые могут обеспечить большее время жизни прибора в условиях сильных радиационных полей. В соответствии с планом работ на первом году исследования работы были сконцентрированы на следующих направлениях.

1. Осаждение толстых (несколько миллиметров) алмазных слоев (кристаллов) требует поддержания стабильных параметров процесса на протяжении сотен часов. Проведено экспериментальное исследование долговременных (несколько сотен часов) стабильных режимов роста крупных монокристаллов алмаза (SCD) в СВЧ-плазмохимических CVD реакторах «АРДИС-100» и «АРДИС-300», в газовых смесях CH_4/H_2 и $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}_2$. На подложках из синтетических монокристалльных алмазных пластины с ориентацией (100) в газовых смесях CH_4/H_2 выращены эпитаксиальные алмазные слои толщиной до 1,5 мм, а в смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ толщиной до 4,8 мм. Продемонстрирована стабильность и непрерывность работы реактора АРДИС-300 в течение 360 часов подряд.

2. Определены оптимальные ростовые условия (давление, состав плазмы, температура подложки, СВЧ мощность), в которых высокое качество синтезируемого алмаза сочетается с приемлемой скоростью роста для получения толстых эпитаксиальных слоев (кристаллов) за разумное время. В задаче оптимизации удобной техникой оказалось измерение *in situ* скорости роста кристалла с помощью низко-когерентной интерферометрии.

3. Охарактеризована структура и дефектно-примесный состав синтезированных монокристаллов с помощью Рамановской спектроскопии, фотолюминесцентной спектроскопии (PL), сканирующей электронной микроскопии (SEM), рентгеновской дифрактометрии (XRD), подтверждено весьма высокое качество кристаллов. Ширина алмазного пика в спектре КР составляет около $\Delta\nu = 2,4 \text{ см}^{-1}$, заметных напряжений в кристаллах не выявлено. В спектрах PL при этом обнаружены примесные дефекты – центры окраски азот-вакансия (NV) и кремний-вакансия (SiV) от фоновых примесей в реакторе.

4. В русле идеи минимизации числа дислокаций в подложках, для последующего синтеза алмазных слоев для детекторов, были изготовлены пластины, в которых дислокации расположены преимущественно вдоль (тип 1) или поперек плоскости (тип 2) плоскости (100) пластин. Это достигнуто лазерной резкой вдоль различных направлений выращенных «кубиков» CVD-алмаза. Данные об ориентации дислокаций (пучков дислокаций) получены рентгеновской топографией. выращенных «кубиков» CVD-алмаза. Существенно, что оба типа подложек для эпитаксии имели ориентацию (100). Оценена плотность дислокаций в подложках по количеству ямок травления, образующихся при обработке образцов СВЧ-плазмой $\text{H}_2\text{-O}_2$. С помощью SEM и атомно-силой микроскопии получены карты пространственного распределения ямок, их форма, размеры, ориентация. Найдено, что в подложке типа 1 (*дислокации идут вдоль поверхности*) плотность дислокаций ($9 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$) на порядок ниже, чем в подложке типа 2 ($\sim 9 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$).

5. Проведен гомоэпитаксиальный рост алмазных пленок толщиной около 600 мкм на подложках типа 1 и типа 2, различающихся ориентацией дислокаций. Для отделенных и отполированных пластин обнаружено более низкое содержание примесного азота (определено из спектров оптического поглощения в УФ области), более низкое содержание NV центров (как следует из спектров ФЛ), и несколько меньший уровень напряжений (из кривых качания в рентгеновской дифракции), чем для стандартных подложек типа 2.

6. Приготовлены и исследованы два дизайна геометрии металлических электродов: (а) два электрода, нанесенных на противоположные грани алмазной пластины (сэндвич-структура); и (б) встречно-штыревые электроды (ВШЭ) на одной стороне кристалла. Система электродов типа «сэндвич» стандартна для детекторов на алмазных пластинах толщиной несколько сотен микрометров. В задаче регистрации ионизирующих частиц с малыми длинами пробега, целесообразно уменьшать расстояние между электродами, например, применяя ВШЭ, чтобы увеличить быстродействие детекторов и эффективность сбора заряда. Изготовлены ВШЭ, у которых ширина электродов L , полученных вакуумным напылением меди через маску, составляла 50 или 100 мкм, расстояние между электродами варьировали от 75 до 400 мкм. Толщина электродов не превышала 300 нм. Проведено моделирование электрического поля с использованием пакета программ ANSYS. Особенностью ВШЭ структуры является сильная неоднородность электрического поля в объеме подложки. Построена модель движения носителей заряда по криволинейным траекториям.

Предварительные измерения чувствительности образцов детектора при облучении альфа-частицами (источник Am-241, энергия альфа-частиц 5,486 МэВ) показали, что спектр эффективности сбора заряда детекторных структур ВШЭ имеет, в отличие от стандартных электродов типа «сэндвич», сложную форму с двумя пиками. Поведены расчеты для ситуации, когда электроны и дырки, двигаясь в приповерхностном нарушенном слое с высокой концентрацией дефектов, имеют время жизни значительно ниже, чем в объеме, что и приводит к неполному сбору заряда. Получена оценка значения времени жизни $\tau=3,0$ нс в приповерхностном слое, и 80 нс в объеме. Сделан вывод о необходимости оптимизации схемы детектирования с применением ВШЭ.

7. В рамках кооперации, проведен структурный анализ алмазных пленок китайского партнера по проекту, который развивает другой подход к подавлению образования дислокаций в кристалле, а именно, метод ELO – epitaxial over growth. В этой технологии используют регулярные массивы расположенных на поверхности подложки объектов, таких как металлические островки или полоски, которые при заращивании обеспечивают помимо вертикального также и боковой рост алмаза, тем самым снижая количество дислокаций в эпитаксиальном слое. С помощью спектроскопии КР и ФЛ, и кривых качания в рентгеновской дифракции проанализированы образцы, выращенные стандартным способом, так и методом ELO. Образец ELO продемонстрировал очень высокую чистоту (отсутствие линии ФЛ от NV-центров), что интересно для создания детектора, но при этом имелись локальные напряженные области, в которых ширина пика КР могла увеличиваться до $3,1 \text{ см}^{-1}$. Понимание источников напряжения и усовершенствование ELO будут одной из задач на следующих этапах работы.