

Проект РФФИ № 18-29-11023 "Плазмохимический синтез микро- и нанокристаллических композитов алмаз-карбид кремния с высокой теплопроводностью для применений в электронике" (2018-2021 гг)

Проект нацелен на исследование нового метода получения высокотеплопроводных пленочных композиционных материалов «алмаз-карбид кремния» путем со-осаждения алмаза и SiC в СВЧ плазме (частота 2,45 ГГц) в газовых смесях «метан-водород-силан» ($\text{H}_2\text{-CH}_4\text{-SiH}_4$). Обе составляющие компоненты, алмаз и карбид кремния, являются широкозонными полупроводниками с очень высокой теплопроводностью. Предполагается, что такая композиционная керамика с коэффициентом теплового расширения выше, чем у чистого алмаза, перспективен для применений в качестве теплоотводящих материалов в корпусах мощных электронных приборов. Работы по проекту выполняются на базе Лаборатории алмазных материалов Центра Естественных исследований ИОФ РАН. Руководитель проекта зав. Лабораторией В.Г. Ральченко.

На этапе 2 проекта внимание было сконцентрировано на следующих направлениях: (а) переход в осаждении композитов от небольших подложек кремния (около 1 см²) до пластин диаметром 2 дюйма, что необходимо для реальных применений в электронике; (б) расширение области параметров СВЧ разряда при выращивании композитов, в том числе за счет добавок аргона в газовую смесь; (в) более детальный анализ структуры, электрофизических и тепловых свойств синтезируемого материала.

Среды наиболее значимых полученных научных результатов можно отметить следующие.

1. В СВЧ-плазмохимическом реакторе выращены пленки композита SiC-алмаз на подложках из кремния с ориентацией (111) диаметром 50 мм. Условия синтеза выбирались близкими к оптимальным параметрам, найденным на предыдущем этапе работы, обеспечивая примерно равные скорости роста (около 280 нм/ч) каждой из фаз, предупреждая блокирование поверхности одной из них. Получены композиты с объемной долей карбида кремния в диапазоне 20-35%. Показано, что добавка аргона в рабочую смесь в количестве до 20%, в отличие от аналогичных процессов синтеза алмаза в смесях $\text{CH}_4\text{-H}_2$, оказывает слабое влияние на размеры и газовой температуры плазмы. При определенных условиях впервые при использовании силана в качестве прекурсора удалось реализовать осаждение в СВЧ плазме монокристаллических гетероэпитаксиальных пленок карбида кремния политипа 3C-SiC (без примесей алмаза) на кремнии, что подтверждено спектроскопией комбинационного рассеяния света и рентгеноструктурным анализом (Рис. 1).

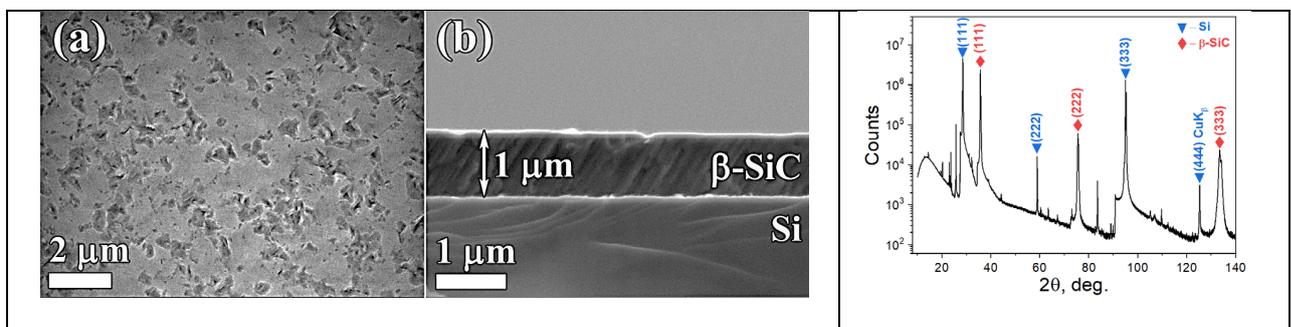


Рис. 1. Изображения эпитаксиальной пленки карбида кремния $\beta\text{-SiC}$ толщиной 1 мкм на кремнии в растровом электронном микроскопе: вид ростовой поверхности (а) и скола (б). Пленка выращена в СВЧ плазме в смеси $0.8\%\text{SiH}_4+4\%\text{CH}_4+\text{H}_2$. Рентгеновская дифрактограмма пленки SiC на подложке (111) Si демонстрирует эпитаксиальное соотношение ориентаций пленки и подложки.

2. Получены экспериментальные данные о структуре образцов с использованием различных аналитических методов: РЭМ, конфокальной спектроскопии КР, рентгенодифракционного анализа, атомно-силовой микроскопии, оптической профилометрии. Продемонстрирована эффективность использования картирования спектров КР по поверхности композитов для одновременного определения их зеренной и кристаллической структур.

3. Зондирование СВЧ плазмы в смесях $\text{H}_2\text{-CH}_4\text{-SiH}_4$ с помощью оптической эмиссионной спектроскопии с пространственным разрешением в процессе синтеза керамики позволило определить пространственные профили распределения радикалов $\text{H}\alpha$ и C2 на различных расстояниях от подложки в радиальном и аксиальном (ось Z) направлениях, а также оценить газовую температуру плазмы.

4. Впервые измерена теплопроводность композитных пленок SiC-алмаз, которая составила около 120 Вт/мК при комнатной температуре. Результат получен при использовании метода «3-Омега», который не требует отделения пленки от подложки, и пригоден для тонких пленок, в том числе субмикронной толщины. Найденное значение теплопроводности оказалось близким к известному для кремния, ниже теплопроводности микрокристаллического алмаза, и существенно выше, чем для аморфного SiC ($k=1,7$ Вт/мК).

5. Экспериментально исследованы процессы полировки пластин поликристаллического алмаза, SiC и керамических композиционных пленок на оригинальном ограночном станке, разработанном для обработки алмаза в автоматическом режиме. Контроль рельефа проводили с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и оптической профилометрии. При использовании разработанного процесса полировки исходная шероховатость R_a композитной пленки (около 1 мкм) снижена до значения ~ 22 нм. Еще более низкие финишные значения R_a достигнуты в сравнительном эксперименте при полировке монокристалла SiC (2,9 нм) и алмазной пленки (6,6 нм). Разработанный способ полировки обеспечивает получение весьма гладких финишных поверхностей совместимых с микроэлектронными технологиями.

Полученные результаты исследований будут использованы на заключительном этапе работы для оптимизации процессов синтеза композитных пленок и повышения их качества, таких как теплопроводность.