

## Двухслойные теплоотводящие подложки на основе композитного материала алмаз – карбид кремния – кремний

А.В. Дерябкин<sup>1</sup>, Е.Н. Куликов<sup>1</sup>, Ю.Ю. Фёдоров<sup>1</sup>, М.Ю. Никитина<sup>1</sup>, С.К. Гордеев<sup>2</sup>,  
С.Б. Корчагина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина»

<sup>2</sup>АО «ЦНИИМ»

**Аннотация:** в работе рассмотрены технологические процессы создания двухслойной теплоотводящей электроизоляционной подложки. Пленки поликристаллического алмаза толщиной более 50 мкм были выращены на подложках композиционного материала алмаз-карбид кремния-кремний (АКК «Скелетон») осаждением в СВЧ-реакторе в газовой смеси метан-водород. Установлено, что теплопроводность наружного слоя композита и его электрическое сопротивление могут быть значительно улучшены нанесением на него пленки поликристаллического алмаза необходимой толщины. Реализация предлагаемой двухслойной подложки позволит создать высокоэффективный теплоотвод для мощных приборов.

**Ключевые слова:** шероховатость, поверхность, композиционный материал, термохимическая обработка, алмаз, кремний, карбид кремния, синтез пленок поликристаллического алмаза, CVD.

### 1. Введение

Одной из тенденций развития современных изделий микроэлектроники СВЧ является микроминиатюризация, увеличение плотности выделяемой мощности и повышение рабочей температуры приборов. В связи с этим возникает проблема эффективного отвода тепла от активной области приборов. Теплопроводность материалов теплоотводящих элементов играет основную роль в процессе отвода тепла, что обуславливает применение теплоотводов из материалов с высокой теплопроводностью.

В качестве высокоэффективного теплоотвода представляется перспективным использование композиционного материала с высокой (до 600 Вт/мК) теплопроводностью: алмаз-карбидокремниевый композит (АКК) «Скелетон» [1], структура которого включает алмазные частицы, связанные в единый композит карбидокремниевой матрицей. Изменение пропорции компонентов композита позволяет корректировать свойства материала в широких пределах.

В композите реализуется фонон-фононный механизм теплопроводности, который характеризуется частотой колебаний элементов кристаллической решетки, составляющих его структуру. Материал с некоторым частичным химическим изменением поверхности зерен алмаза в карбидокремниевую матрицу обеспечивает хорошее согласование кристаллических решеток алмаза и карбидокремниевой матрицы и слабое рассеяние фононов на границах их раздела. Это обеспечивает довольно высокую теплопроводность композитного материала в целом [1,2].

АКК «Скелетон» не является диэлектриком, что ограничивает область его применения. Его можно использовать в приборах, где не требуется электрическая изоляция активных кристаллов от металлического фланца, например, в мощных диодах, DMOS транзисторах и иной РЭА, где актуален вопрос эффективного отвода тепла. Кроме того, низкие электроизоляционные свойства теплоотвода могут привести к образованию паразитной емкости между кристаллом и теплоотводом.

Для увеличения электрического сопротивления между кристаллом полупроводникового прибора и металлическим фланцем без ухудшения его теплофизических свойств предлагается нанести на поверхность композита тонкую пленку поликристаллического алмаза.

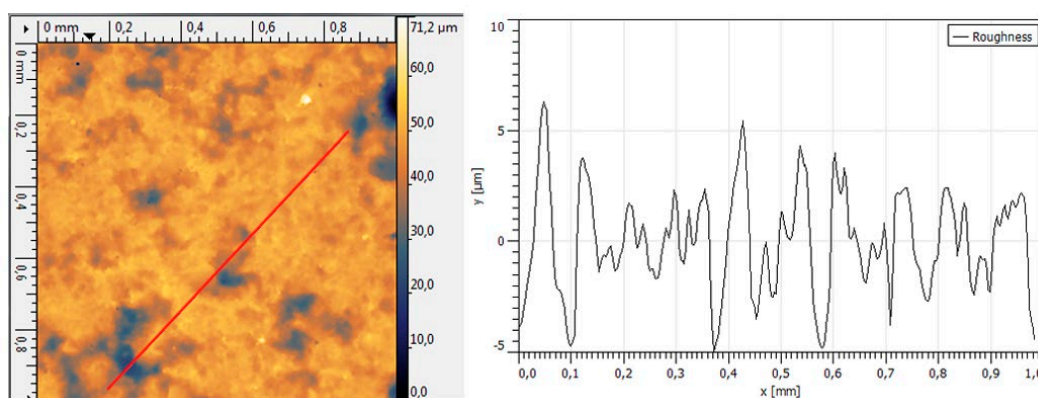
Отметим, что создание теплоотвода полностью из поликристаллического алмаза довольно затратное мероприятие, т.к. согласно результатам моделирования оптимальная толщина теплоотвода, в зависимости от размеров полупроводникового кристалла, составляет (400 – 800) мкм [3,4].

## 2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Для исследования процесса получения двухслойной теплоотводящей подложки поликристаллический алмаз – композитный материал «Скелетон» были подготовлены образцы композиционного материала с составом: алмаз 59%об., карбид кремния 34%об., кремний 7% об. размером 10 x 10 мм и толщиной 3 мм. и пластины из нелегированной стали размером 20×20×3мм, отшлифованные до 13 класса чистоты.

Поверхность композита подвергалась двухстадийной термохимической обработке в водородной печи САМсо В16 в атмосфере водорода по технологии представленной в [2]. Температура обработки изменялась в диапазоне от 900 до 1320 °С. Шероховатость поверхности исследовалась с помощью оптического профилометра Zygo ZeGage Pro HR и электронного микроскопа Zeiss.

За счет проведения двух термохимических обработок пластины из композиционного материала были утонены до величины 1,0 мм, а шероховатость их поверхности составила около 2 мкм (Рисунок 1).



**Рисунок 1.** Скан поверхности композиционного материала после термохимической обработки, сделанный с помощью оптического профилометра Zygo ZeGage Pro HR.

Подготовленные таким образом подложки композита помещались в реактор установки плазмохимического осаждения АТВ-127, на которой выращивались пленки поликристаллического алмаза. Пленки выращивались методом химического осаждения из газовой смеси метана и водорода при воздействии СВЧ-разряда.

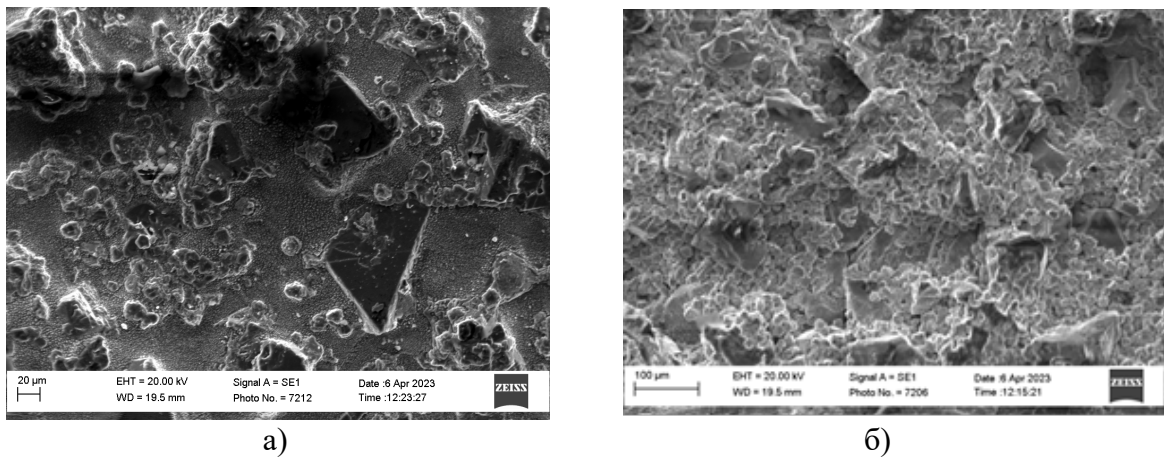
Условия синтеза пленок поликристаллического алмаза были следующими: СВЧ мощность 7,5 кВт на частоте 2.45 ГГц, концентрация метана (2 – 3) %, концентрация водорода (97 – 98) %, давление в камере 90 Торр, температура подложки 850 °С, скорость роста плёнок (2,0 – 5,0) мкм/час.

Толщина пленки задавалась скоростью роста и продолжительностью времени осаждения.

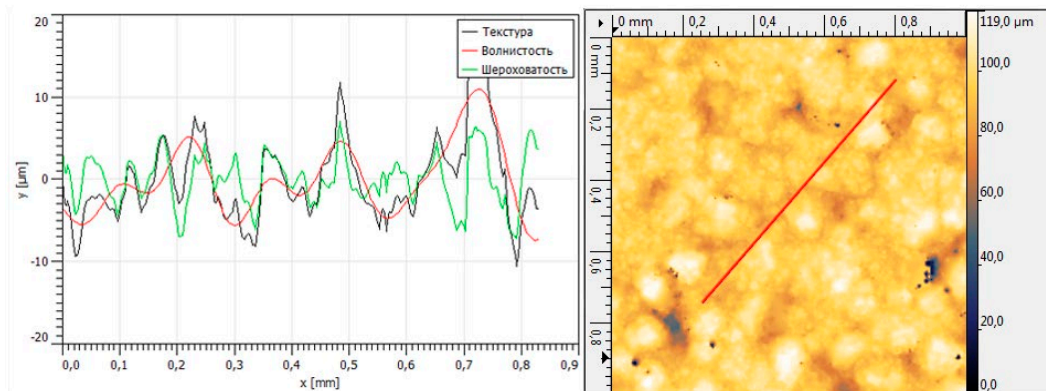
В общем случае, началу роста пленок поликристаллического алмаза предшествует инкубационный период, в течение которого на поверхности подложки должны сформироваться зародыши алмазной фазы. Для облегчения и ускорения процесса

формирования центров нуклеации алмазной пленки на начальной стадии ее роста в качестве затравки используют микро- и нанокристаллы алмаза, которыми «засевают» поверхность подложки [5]. В нашем случае, «засев» для роста пленок был не нужен, так как центрами нуклеации служили алмазные зерна на поверхности композита.

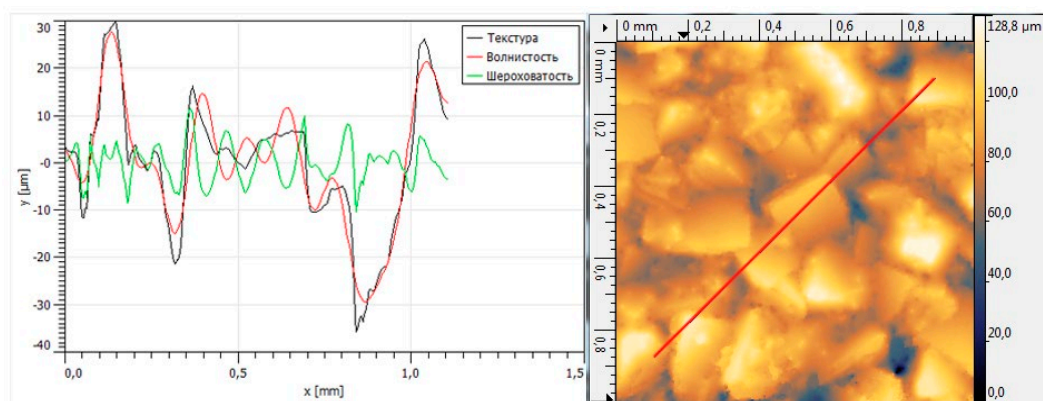
Микрофотографии поверхности пленок поликристаллического алмаза, выращенных на композите после осаждения в течение 25 и 50 часов, приведены на рисунке 2. Кристаллиты алмаза в процессе роста увеличиваются в размерах от 17 мкм, после 25 ч, до 170 мкм, при этом толщина пленок равна 50 и 200 мкм, соответственно. Поверхности двухслойной теплоотводящей подложки при толщине слоя алмаза 50 мкм и 200 мкм показаны на рисунках 3-4.



**Рисунок 2.** Микрофотографии поверхности пленок поликристаллического алмаза, выращенных на композите в течение 25 часов (а) и 50 часов (б), сделанные с помощью электронного микроскопа Zeiss.



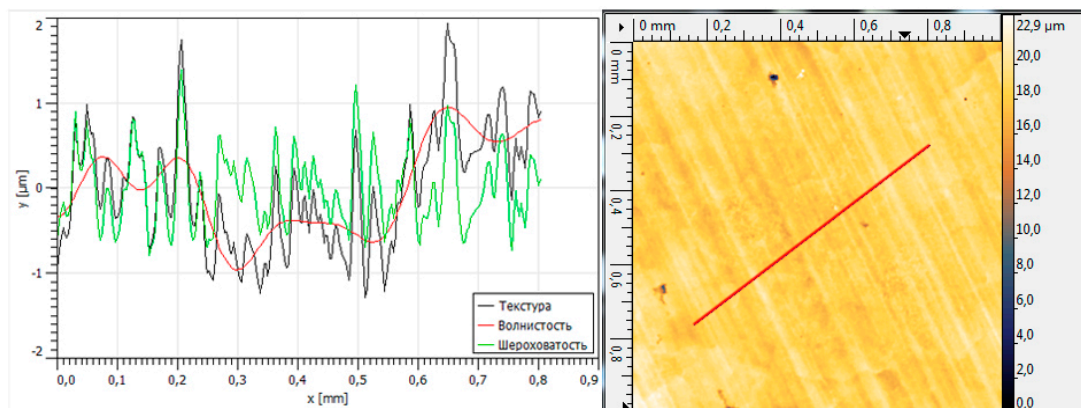
**Рисунок 3.** Скан поверхности двухслойной теплоотводящей подложки с толщиной слоя пленки поликристаллического алмаза 50 мкм.



**Рисунок 4.** Скан поверхности двухслойной теплоотводящей подложки с толщиной слоя пленки поликристаллического алмаза 200 мкм.

После роста пленки поликристаллического алмаза проводилась термошлифовка ее поверхности по технологии, описанной в [6].

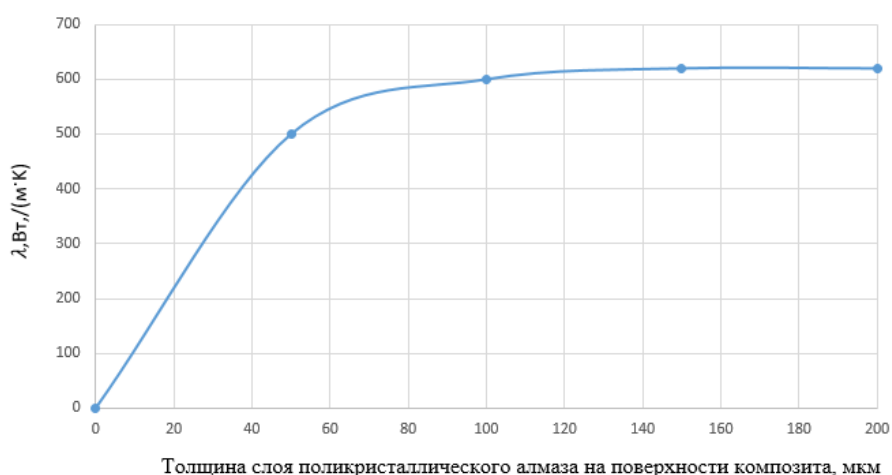
На рисунке 5 приведен скан шероховатости поверхности алмаза полученной двухслойной теплоотводящей подложки.



**Рисунок 5.** Скан шероховатости поверхности алмаза полученной двухслойной теплоотводящей подложки после термохимической обработки.

На двухслойных подложках алмаз – АКК «Скелетон» с разной толщиной выращенной пленки поликристаллического алмаза измерялись теплопроводность и электрическое сопротивление. Толщина пленок алмаза определялась методом взвешивания образцов, теплопроводность определялась методом, основанным на моделировании продольного нестационарного температурного поля в образце с помощью измерителя теплопроводности КИТ-02Ц. Зависимость величины теплопроводности от толщины слоя показан на рисунке 6. Электрическое сопротивление подложки определялось с помощью измерителя приборных характеристик Прогресс-3000. Первоначальные измерения показали, что электрическое сопротивление АКК «Скелетон» было  $6 \cdot 10^6$  Ом, а после выращенной

на поверхности пленки поликристаллического алмаза увеличилось на три порядка.



**Рисунок 6.** Зависимость величины теплопроводности  $\lambda$  от толщины слоя поликристаллического алмаза на поверхности композита.

Анализ результатов показывает, что предложенная двухслойная теплоотводящая подложка алмаз – композитный материал «Скелетон» обладает хорошими теплофизическими и электроизоляционными свойствами. При этом оптимальная толщина пленки поликристаллического алмаза составляет 150 мкм.

### 3. Заключение

Методом осаждения из газовой фазы пленки поликристаллического алмаза на поверхность композиционного материала «Скелетон» получена двухслойная теплоотводящая подложка.

Оценка величин теплопроводности и электрического сопротивления подтвердила вывод о том, что нанесение пленки алмаза способствует улучшению теплофизических и электроизоляционных свойств АКК «Скелетон».

Таким образом, реализация предлагаемой двухслойной подложки позволит создать высокоэффективный теплоотвод для мощных приборов СВЧ-диапазона.

#### Список литературы

1. Гордеев С.К., Жуков С.Г., Данчукова Л.В., Экстрем Т.С. Особенности получения композиционных материалов на основе алмаза, карбида кремния и кремния при низких давлениях // Неорганические материалы. – 2001. – т.37. – №6. – с. 691 – 696.
2. Дерябкин А.В., Куликов Е.Н., Фёдоров Ю.Ю., Гордеев С.К., Корчагина С.Б. Исследование процесса термохимической обработки поверхности композиционного материала алмаз – карбид кремния – кремний // Сборник докладов XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2023. – с. 398 – 401.
3. Воробьев А.А., Воробьева Е.В., Галдецкий А.В., Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Моделирование теплового режима полупроводниковых приборов с различными типами теплоотводов // Электронная техника. – Сер.1. – 2010. – вып. 2. – с. 12 – 20.
4. Глинский И.А., Зенченко Н.В. Расчет теплораспределяющего элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов // Микроэлектроника. – 2015. – т. 44. – № 4. – с. 269 – 274.
5. Вуль А.Я., Голубев В.Г., Грудинкин С.А. и др., Начальные стадии роста алмазной пленки при использовании наноалмазов в качестве центров зародышеобразования // Письма в ЖТФ. – 2022. – т. 28. – вып. 18. – с. 77 – 83.
6. Дерябкин А.В., Духновский М.П., Куликов Е.Н., Федоров Ю.Ю. Исследование процессов планаризации поверхности поликристаллического алмаза методом термического растворения в системе алмаз-металл // Материалы XXIII Международного симпозиума «Нанотехнологии и нанотехнология». – 2019. – т.2. – с.663 – 664.