

# Особенности роста пленок 3C-SiC/Si, изготовленные методом HTCVD

Лебедев Д.М.  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
dima.lebedev1115@gmail.com

Шишкина Д.А.  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
shishkina.da@ssau.ru

И.А. Шишкин  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
shishkinivan9@gmail.com

С.А. Нефедов  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
nefedov.sa@ssau.ru

В.И. Чепурнов  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
chepurnov.vi@ssau.ru

В.В. Танеев  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
Vadim@taneev.ru

**Аннотация** — Данная работа посвящена исследованиям морфологии и структуры пленок 3C-SiC/Si, изготовленные методом HTCVD. Представлены снимки поверхности структур, демонстрирующие особенности роста пленок карбида кремния на разных уровнях подложкодержателя. Анализ рентгенограмм вращения показал наличие пленок карбида кремния 3-C политаипа.

**Ключевые слова** — карбид кремния, рентгенограммы вращения, HTCVD, морфология, рост пленок

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Карбид кремния (SiC) является перспективным материалом для реализации технологий квантовой и нелинейной фотоники [1, 2]. Кубический карбид кремния (3C-SiC) может быть потенциальным фотогальваническим материалом для тонкопленочных солнечных элементов из-за его широкой запрещенной зоны и нетоксичности. В природе существует несколько кристаллических структур SiC, таких как гексагональные, кубические и ромбоэдрические, также известные как политаипы. Расположение атомов и симметрия, подразумеваемые этими политаипами, в которых тетраэдрически связанные бислои Si-C различаются последовательностью их укладки [3]. Среди них термодинамически стабильный политаипный кубический карбид кремния (3C-SiC) проявил себя как структура чистой цинковой обманки (единственно возможная кубическая структура), в которой получается двухслойная упаковка ABCABC. Политаип 3C-SiC имеет ширину запрещенной зоны 2,36 эВ и демонстрирует хорошую подвижность электронов и скорость насыщения. Почти идеальная ширина запрещенной зоны для солнечного элемента промежуточного диапазона делает 3C-SiC на шаг впереди по сравнению с другими кандидатами, которые можно рассматривать как буферный/оконный слой. Кроме того, он имеет легкодоступные соответствующие глубокие уровни, что является требованием эффективного фотоэлектрического материала [4,5,6].

## 2. МЕТОД HTCVD-РОСТ ПЛЕНКИ 3C-SiC С НИЗКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ДЕФЕКТОВ

HTCVD-процесс выращивания пленки SiC обеспечивается за счет функциональных взаимосвязей системы узлов технологической установки (деталировка на рис. 1): разогретый ВЧ-полем индуктора металлическая (молибденовая) пластина между основанием контейнера-шахты и пьедесталом

предварительно разогревает поток водорода в направлении от нижнего кольца к верхнему, химически активируя его. Основание контейнера-шахты является бесконечным источником углерода, в сквозных каналах которого происходит образование углеводородов посредством реакции углерода с водородом при температуре до 1200°C, т.е. осуществляется химический газовый транспорт исходного реагента из первой зоны во вторую зону с подложками Si. Первая низкотемпературная зона по ходу газа-носителя выполнена без тепловых экранов и функционально предназначена для предварительного подогрева водорода и протекания прямой транспортной реакции переноса углерода в форме углеводородов во вторую высокотемпературную зону, представленную сборкой подложкодержателей, сообщающихся отверстиями. Отверстия в подложкодержателях выполнены для переноса углеводородов потоком водорода параллельно плоскости подложек Si последовательно по высоте сборки подложкодержателей. Снаружи сборка подложкодержателей заключена в тепловые экраны, обеспечивающие температурный градиент между ними и зонами. Разрезы тепловых экранов обращены в одну сторону и образуют линию разрыва, прерывающую циркуляцию наведенных токов индуктора. Кроме того, тепловые экраны обеспечивают градиент температур между зонами. При температуре 1360-1380°C во второй зоне протекает обратная реакция на поверхности подложек кремния: разложение углеводородов с образованием соединения карбида кремния на поверхности подложек кремния по всей высоте сборки подложкодержателей. Потоки газа и воды охлаждения по высоте HTCVD-реактора предпочтительно имеют противоположное направление. Разрезы в тепловых экранах выполняют несколько функций: обеспечивают оптический контроль температуры подложкодержателей, прерывают циркуляцию наведенных токов от ВЧ-поля индуктора (что предупреждает их нагрев), предупреждают потери энергии на излучение и тем самым формируют температурное поле второй зоны. Функциональное назначение второй зоны: Отверстия в подложкодержателях для прохода газового потока по высоте контейнера-шахты над подложками кремния расположены вдоль одного края подложки Si: сопряжение сборки подложкодержателей и сборки тепловых экранов контейнера выполнены на свободной посадке.

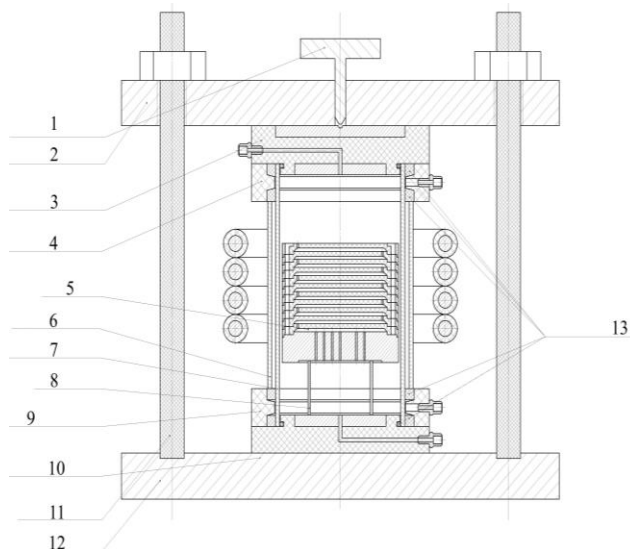


Рис. 1. Элементы HTCVD-реактора: 1 - Винт прижимной, 2 - Плита верхняя, 3 - Крышка реактора верхняя в сборе, 4 - Фланец промежуточный, 5 - Графитовый контейнер в сборе, 6 - Труба внешняя, 7 - Труба внутренняя, 8 - Пьедестал, 9 - Фланец промежуточный, 10 - Крышка реактора нижняя в сборе, 11 - Направляющая (дизэлектрик), 12 - Основание, 13 - Кольца уплотнительные

Дополнительно для устранения поверхностных и объемных дефектов в кристаллах кремния при проведении HTCVD-процесса возможно подключение линии газа моносилана в температурном диапазоне 1360-1380°C. В данном эксперименте номер уровня отсчитывается сверху вниз.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование морфологии поверхности проводилось с помощью оптического микроскопа Neophot 21. Структура поверхности исследовалась методами рентгеноструктурного анализа с помощью съемки рентгенограмм вращения на цилиндрическую пленку. Анализ рефлексов позволяет вычислить межплоскостное расстояние для карбида кремния и определить его политип.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 2 и 3 показаны изображения поверхности структур SiC/Si, которые росли на разных уровнях подложкодержателя. Видно, что рост пленки SiC идет неравномерно от уровня к уровню. На пятом уровне заметны «островки» карбида кремния, сливающиеся в поликристаллическую пленку. Уровень шесть расположен ниже и картина роста меняется. Там уже заметно слияние островков в пленку, однако местами можно наблюдать островковый рост пленки (темно-зеленые области на рис. 3). Анализ покрытия методом рентгенограмм вращения показывает, что в структуре содержатся рефлексы карбида кремния 3С- поли типа

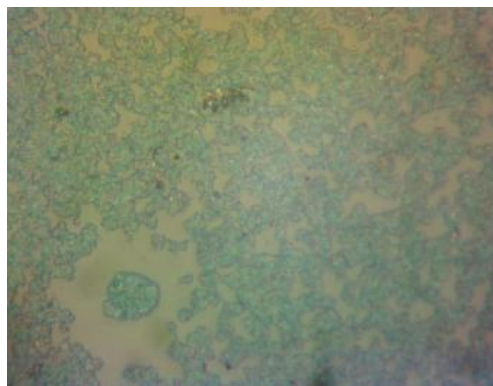


Рис. 2. Морфология поверхности SiC/Si уровень 5.

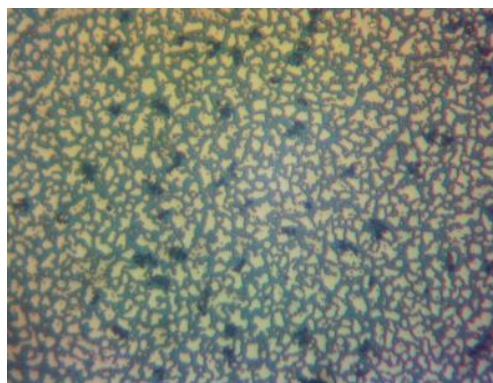


Рис. 3. Морфология поверхности SiC/Si уровень 6

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Guidry, M.A. Optical parametric oscillation in silicon carbide nanophotonics/ M. A. Guidry, K. Y. Yang, D. M. Lukin, A. Markosyan, J. Yang, M. M. Fejer, J. Vučković // *Optica*. – 2020. – Vol. 7.– P. 1139-1142.
- [2] Castelletto, S. Silicon carbide color centers for quantum applications/ S. Castelletto, A. Boretti // *J. Phys. Photonics*. – 2020. –Vol. 2. – P 022001. DOI 10.1088/2515-7647/ab77a2
- [3] Верма, А. Р. Полиморфизм и политипизм в кристаллах. / А. Р. Верма., П.М. Кришна. – Мир, серия "Науки о Земле, 1969. – 274 с.
- [4] Танеев, В. В. Электрофизические и оптические свойства пористых слоев карбида кремния на кремнии для солнечных элементов / В. В. Танеев, А. В. Щербак // LXX молодёжная научная конференция. – 2020. – С. 300–301.
- [5] Нусупов, К.Х. ИК-исследование ионно-синтезированных пленок карбида кремния на кремнии / К.Х. Нусупов, Н.Б. Бейсенханов, И.К. Бейсембетов, Б.К. Кенжалиев, Б.Ж. Сейтов, Д.И. Бакранова // *Fundamental Research*. –2015. – Т. 9.– С. 50–53.
- [6] Голубева, Д.Ю. Пористые структуры на основе карбида кремния для фотоэлектрических преобразователей / Д.Ю. Голубева, Л.В. Курганская, В.В. Танеев, А.В. Щербак / *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2019. – Т. 22, №3. – С. 6–74.