

Постростовая обработка поверхности поликристаллических алмазных подложек и композитных материалов на основе алмаза

А.В. Дерябкин¹, Е.Н. Куликов¹, Ю.Ю. Фёдоров¹, С.К. Гордеев², С.Б. Корчагина²

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина»

²АО «ЦНИИМ», г. Санкт-Петербург

Аннотация: в работе рассмотрена постростовая обработка поверхности поликристаллических алмазных подложек и композитных материалов на основе алмаза. Разработанная технология термохимической обработки поверхности алмаза обеспечивает оптимальный режим по времени обработки и качеству получаемой поверхности. Показано что, уменьшается вероятность растрыва поверхности алмаза, что особенно важно при создании заданного локального рельефа поверхности. Технология применима для обработки поверхности алмазных пластин большого диаметра при подготовке к формированию полупроводниковых структур. Также разработанная технология позволяет обрабатывать композиты алмаз - карбид кремния (АКК «Скелетон») с высокой производительностью, обеспечивая при этом высокую скорость обработки и достаточную величину шероховатости поверхности для использования в качестве высокоэффективного теплоотвода в изделиях СВЧ- электроники.

Ключевые слова: шероховатость, поверхность, ТХО, композиционный материал, шлифовка, сталь, алмаз, кремний, карбид кремния, АКК «Скелетон».

1. Введение

При увеличении мощности изделий СВЧ - электроники необходимо уделять особое внимание отводу тепла. Основную роль в процессе отвода тепла играет теплопроводность материалов теплоотводящих элементов. Один из путей эффективного отвода тепла в изделиях мощной СВЧ электроники — применение теплоотводов из материалов с высокой теплопроводностью (Рисунок 1). Часто применяемые теплоотводы из меди или алюминия в несколько раз превосходят по размерам охлаждаемый элемент.

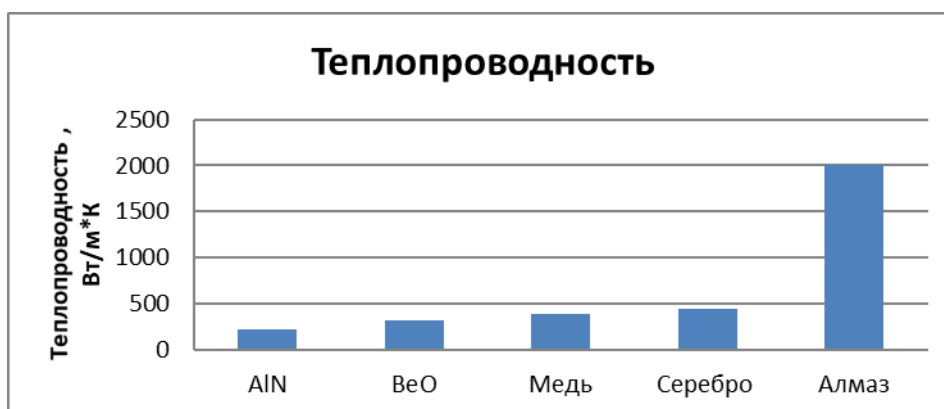


Рисунок 1. Теплопроводность материалов, используемых в качестве теплоотвода

Вышеперечисленные материалы, используемые в качестве теплоотводов, не всегда удовлетворяют потребностям отвода тепла от активной области прибора.

Алмаз, как и композитные материалы на его основе, благодаря своей высокой теплопроводности, стал перспективным материалом для создания высокоэффективных теплоотводов. Одним из композитных материалов на основе алмаза, применяемым в качестве теплоотвода, является АКК «Скелетон».

В АКК "Скелетон" реализуется фонон-фононный механизм теплопроводности, который характеризуется частотой колебаний элементов кристаллической решетки, составляющих его структуру [6]. Этот механизм обеспечивает довольно высокую величину до 600 Вт/мК теплопроводности композита при согласовании кристаллических решеток компонентов. Но очень высокая твердость алмаза и подобных композитов сильно затрудняет последующую обработку традиционными методами изготовленных из них деталей, поэтому весьма актуальным является поиск и применение новых методов обработки.

После роста шероховатость поверхности пластины поликристаллического алмаза толщиной 200-400 мкм составляет 15-30 мкм, у композитного материала АКК «Скелетон» после изготовления шероховатость находится в диапазоне 10-15 мкм, но минимально возможная толщина составит около 1000 мкм из-за особенностей материала. Поверхности с такими характеристиками шероховатости не позволяют обеспечить достаточный тепловой контакт для передачи тепла от полупроводникового кристалла к теплоотводящей подложке (рисунок 2). Таким образом, поверхности ростовой стороны поликристаллического алмаза и поверхности алмазных композитов после процесса формирования требуют шлифования, полирования и планаризации.

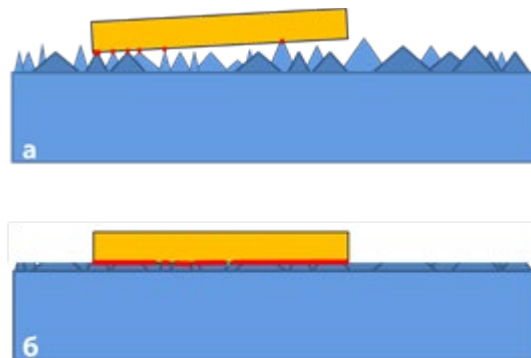


Рисунок 2. Схематичное изображение теплового контакта (красный цвет) на границе раздела полупроводниковый кристалл (оранжевый цвет) – теплоотвод из поликристаллического алмаза (синий цвет). а) до обработки поверхности теплоотвода из поликристаллического алмаза; б) после обработки поверхности теплоотвода из поликристаллического алмаза.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Как показано в [2], для приборов с геометрическими размерами поверхности кристаллов 3–5 мм шероховатость теплоотвода не должна превышать 1 мкм.

Для получения требуемых значений шероховатости был разработан двухстадийный процесс планаризации поверхности пластины поликристаллического алмаза методом диффузионной термохимической обработки (ТХО). Метод основан на явлении взаимодействия и интенсивного растворения углерода из алмаза при температурах в диапазоне (для железа) $900 \div 1180^{\circ}\text{C}$ в местах соприкосновения с металлом [3]. На рисунке 4 приведена диаграмма состояния железо-углерод [4]. Алмаз является нестабильной аллотропической формой углерода и при повышенных температурах переходит в графит, который в дальнейшем диффундирует в железо в местах контакта (рисунок 3).

Термохимическая обработка поликристаллического алмаза проводилась в водородной печи CAMco B16 в атмосфере водорода.

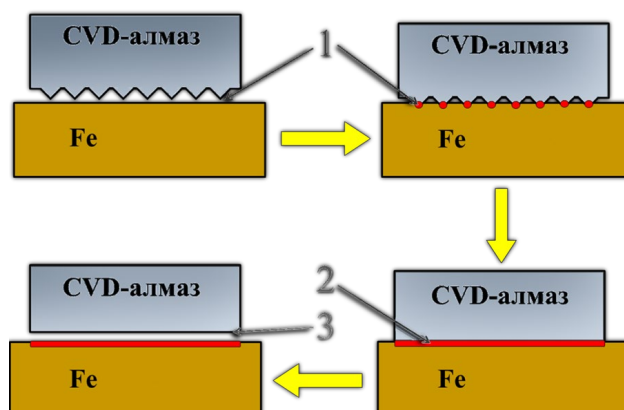


Рисунок. 3. Схема процесса термохимической обработки поверхности алмаза: 1-область контакта выступающих частей алмазной поверхности с металлом; 2-переходная область; 3-гладкая обработанная алмазная поверхность.

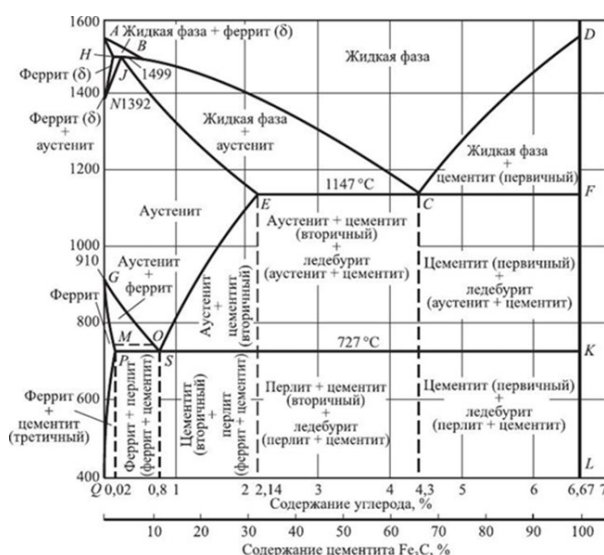


Рисунок 4. Диаграмма состояний железо – углерод.

На первой стадии для предварительной шлифовки поверхности использовалась термохимическая обработка выше точки эвтектики равной 1147 °С. Величина шероховатости поверхности поликристаллического алмаза при обработке в данном температурном диапазоне достигает 4,0÷5,0 мкм, скорость процесса достигает 700÷1500 мкм/ч, что в сотни раз выше, чем традиционные способы механической обработки. Метод позволяет шлифовать алмазные пластины больших площадей: диаметром 50 мм и более - до толщин 70÷200 мкм, что невозможно сделать иными способами. Следует отметить, что большая интенсивность удаления алмаза не подразумевает обработку высокого качества.

На второй стадии используется термохимическая обработка ниже точки эвтектики в диапазоне температур (900÷1130) °С. Скорость обработки уменьшается и составляет от 30 до 50 мкм/ч, но шероховатость поверхности поликристаллического алмаза при этом достигает величины (1÷2) мкм. Минимальная достижимая величина шероховатости при применении двухстадийной термошлифовки определяется тем,

что железо при температуре 917 °С из α -Fe с объемноцентрированной кубической решеткой переходит в γ -Fe с гранецентрированной кубической решеткой. При нагреве полированной пластины железа с классом чистоты обработки 13 (равна 160 нм) выше температуры 917°С класс её обработки снижается до 9 (равна 1,2 мкм) и хуже. Для ответственных применений травление целесообразно проводить на никеле [5], так как в отличие от железа, никель во всем диапазоне температур, от комнатной до точки плавления, имеет одинаковую кристаллическую решетку (гранецентрированную кубическую решетку). Точка эвтектики никеля с углеродом значительно выше, чем точка эвтектики железа с углеродом (1319 °С и 1147 °С, соответственно), процесс травления на никеле в диффузионном режиме можно вести при более высокой температуре, что обеспечит более интенсивный переход алмаза в графит и более быстрый процесс диффузии углерода в никель.

Так же исследовалась возможность применения двухстадийной термохимической обработки для АКК «Скелетон». Температура обработки изменялась в диапазоне от 900 до 1320 °С.

Исследованные выше режимы термохимической обработки поверхности алмаза не применимы для АКК «Скелетон», т.к. в его структуру входит не только алмаз, но кремний и карбид кремния. Причем для всех этих материалов существуют свои оптимальные режимы термообработки. На диаграмме состояний железо-кремний [4] имеются две области зарождения жидкой фазы (рисунок 5).

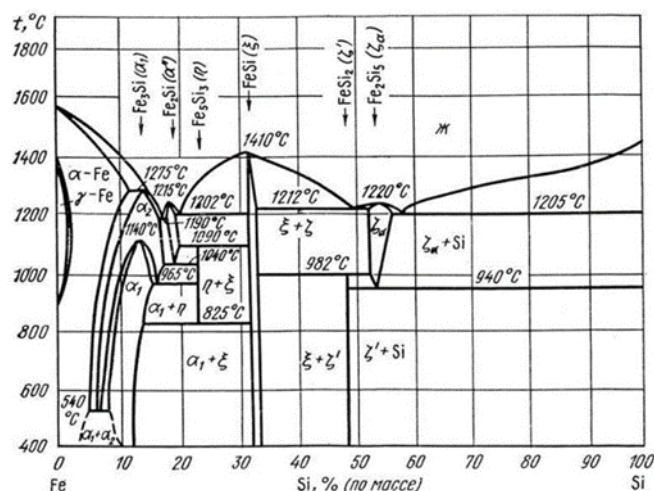


Рисунок 5. Диаграмма состояний железо – кремний.

В ходе выполненных экспериментов было установлено, что при термообработке АКК «Скелетон», находящегося в контакте с железом при температуре выше 1110 °С происходит растворение алмазной составляющей поверхностного слоя в железе. Процесс травления карбид-кремниевой матрицы активизируется при температурах выше 1210°С. Скорость её травления превышает скорость травления алмазных зерен.

Было установлено, что скорость термодиффузионного растворения компонентов композита в железе значительно снижается во времени: наиболее интенсивно процесс протекает в течение первых 1-2 минут, за которые происходит удаление 30-100 мкм материала. Поэтому для более глубокой обработки композита стадию термодиффузионной обработки повторяют несколько раз, используя в каждом случае новые пластины железа. Поверхность композита после первой стадии обработки имеет относительно высокую шероховатость.

Для уменьшения шероховатости необходимо провести вторую стадию термообработки при температуре (1110 ÷ 1130) °С. За счет проведения двух

термохимических обработок пластина из композиционного материала может быть утонена до требуемой величины, а шероховатость поверхности может быть около 2 мкм.

3. Заключение

Разработанная технология двухстадийной термохимической обработки поверхности алмаза обеспечивает режим оптимальный по времени и качеству получаемой поверхности, при этом уменьшается вероятность растрыва поверхности алмаза, что особенно важно при создании заданного локального рельефа поверхности. Технология применима для обработки поверхности алмазных пластин большого диаметра при подготовке к формированию полупроводниковых структур. Двухстадийная термообработка позволяет обрабатывать композиты алмаз - карбид кремния (АКК «Скелетон») с высокой производительностью, обеспечивая при этом высокую скорость обработки и достаточную величину шероховатости поверхности для использования в качестве высокоэффективного теплоотвода в изделиях СВЧ-электроники.

Список литературы

1. Tang, C.J., Neves, A.J. and Fernandes, A.J.S. "Influence of nucleation density on film quality, growth rate and morphology of thick CVD diamond films" *Diamond and Related Materials* 12 (2003) 1488-1494.
2. Obeloer Th., Twitchen D. CVD Diamond Manages Device Heat Effectively, *Microwaves & RF* – 2017, №4.
3. Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю., Кудряшов О.Ю., Леонтьев И.А. Термическая обработка поликристаллического CVD-алмаза с целью формирования гладкой поверхности // *Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника*, 2008. Вып. 2(495). – С.41-46.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в трех томах:Т.1/Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996.
5. Дерябкин А.В. Диффузионная термохимическая обработка поверхности алмаза // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – №4. – 2018. – С.35 -37.
6. 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.