

УДК 536.2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО ИСТОЧНИКА В АЛМАЗНОМ ТЕПЛОТВОДЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Хорунжий И.А.¹, Мартинович В.А.¹, Русецкий М.С.², Казючич Н.М.²¹Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь²Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Одним из перспективных применений алмазов является создание на их основе теплоотводов для мощных полупроводниковых приборов [1, 2]. Рабочие характеристики этих приборов, например, лазерных диодов, чувствительны к изменению температурного режима, что требует стабилизации и непрерывного контроля рабочей температуры прибора. Для этого в непосредственной близости от охлаждаемого прибора устанавливаются датчики температуры. Точность измерения температуры внешними датчиками ограничена эффективностью теплового контакта и теплопроводностью материала теплоотвода. Кроме того, внешние датчики, в силу значительных габаритов и наличия теплового сопротивления контакта, характеризуются низким быстродействием. Оптимальным размещением датчика температуры является интегрирование его в приборную структуру, а где это невозможно или трудно выполнимо – интегрирование в материал теплоотвода (алмаз). Будучи изготовленным в алмазе, датчик имеет практически идеальный тепловой контакт с ним, и, учитывая исключительно высокую теплопроводность и малую теплоемкость, должен быть быстродействующим.

Цель работы – найти распределение температуры по поверхности алмазного теплоотвода и оценить быстродействие встроенного в него терморезистора.

Для проведения экспериментов использовалась полированная пластина синтетического алмаза производства РУП «Адамас БГУ» толщиной 360 мкм. На поверхности пластины путем имплантации ионов бора и последующим активационным отжигом изготавливалась матрица терморезисторов как показано на рисунке 1а.

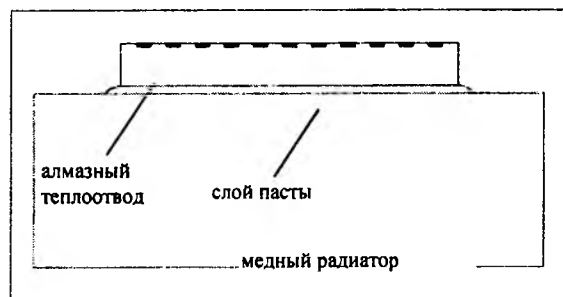
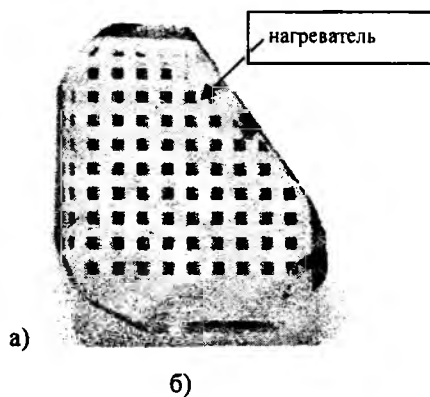


Рисунок 1 – Пластина синтетического алмаза с матрицей терморезисторов – (а), схематическое изображение исследуемой структуры – (б)

Размеры резистора и контактных площадок к нему – 200×200 мкм. Один из резисторов использовался в качестве нагревателя, а остальные резисторы – в качестве датчиков температуры. Использование встроенного в алмаз нагревателя позволило минимизировать как тепловое сопротивление между нагревателем и теплоотводом, так и быстродействие самого нагревателя. Матрица терморезисторов позволила исследовать динамику изменения распределения температуры вдоль поверхности пластины в зависимости от расстояния между нагревателем и датчиком. Для измерения абсолютных значений температуры терморезисторы калибровались в диапазоне температур от 20 до 40 °С.

Поскольку эксплуатация алмазного теплоотвода в реальных условиях предполагает его размещение на радиаторе, в наших экспериментах пластина с терморезисторами находилась в тепловом контакте с медной пластиной размером 62×42×4,9 мм. Для улучшения теплового контакта между теплоотводом и радиатором теплоотвод устанавливался на слой теплопроводящей пасты КППТ-8 (рисунок 1б). Численное моделирование динамики изменения температуры в разных точках алмазного теплоотвода в процессе нагрева системы, изображенной на рисунке 1б, проводилось с использованием прикладного программного пакета ANSYS. Значения теплопроводности, теплоемкости, плотности алмаза, используемые при моделировании, взяты из [3].

На рисунке 2 приведены экспериментально измеренные и рассчитанные кинетики изменения температуры терморезисторов, расположенных на различных расстояниях от нагревателя. Подводимая к нагревателю мощность составляла 1 Вт, длительность фронта нарастания мощности не более 1 мкс. Из рисунка 2 видно,

что отклик терморезистора не описывается простой функцией, причем ход экспериментальных и расчетных кривых аналогичен. Для количественного описания зависимостей, приведенных на рисунке, была выполнена их аппроксимация в виде суммы двух экспоненциальных функций:

$$T = T_0 + A_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) + A_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right),$$

где A_1 и A_2 – весовые коэффициенты компонент, τ_1 и τ_2 – постоянные времени, T_0 – начальная температура.

Необходимо отметить, что такая аппроксимация, несмотря на упрощенный подход, позволяет оценить быстродействие исследуемой системы.

Анализ аппроксимированной зависимости показал, что величина постоянной времени быстрой τ_1 и медленной τ_2 компонент различаются более чем на порядок и составляют, соответственно, 10 и 450 мс. При этом вклад медленной компоненты в суммарный отклик системы не превышает 20%. Постоянная времени τ_2 и весовой коэффициент медленной компоненты зависят от используемого радиатора и, очевидно, связаны с его разогревом. Параметры быстрой компоненты слабо зависят от характеристик радиатора и связаны с разогревом алмазной пластины.

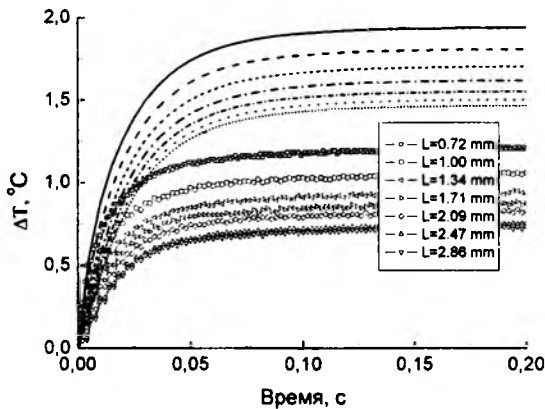


Рисунок 2 – Кинетика изменения температуры терморезисторов, расположенных на различных расстояниях от нагревателя: точки – эксперимент, линии – расчет.

С уменьшением расстояния между нагревателем и терморезистором (термодатчиком) вклад медленной компоненты в общий отклик системы практически не изменяется, в то время как вклад быстрой компоненты увеличивается в несколько раз. Это хорошо согласуется с предположением о том, что медленная компонента связана с разогревом радиатора, а быстрая – с распространением тепла по алмазной пластине.

Как видно из рисунка 2, перепад температуры между термодатчиками, удаленными друг от друга на 2,14 мм, составляет всего 0,48 °C. Точно такое же значение дает расчет, что свидетельствует о том, что моделирование кинетических процессов, в целом, правильно описывает распространение тепла в исследуемой структуре. В то же время абсолютные значения температуры, полученные в результате расчета и измеренные в эксперименте, различаются на 0,73 °C, причем расчетные значения несколько завышены по сравнению с экспериментально измеренными значениями температуры. По-видимому, реальные параметры, влияющие на эффективность отвода тепла от источника тепловыделения, такие, например, как теплопроводность алмаза и, особенно, параметры слоя теплопроводящей пасты, отличаются от заданных при моделировании и требуют уточнения. Различия между расчетом и экспериментом наблюдаются также на начальном участке нагрева термодатчиков. Экспериментально наблюдаемая скорость роста температуры оказывается выше, чем в расчете.

Следует отметить, что приведенные на рисунке 2 зависимости являются типичными для исследованных пластин алмаза, но от кристалла к кристаллу может наблюдаться небольшое, в пределах 20 %, отклонение параметров. Такое отклонение, скорее всего, связано с различным значением теплопроводности пластин и их геометрических размеров.

Таким образом, установлено, что постоянная времени отклика терморезистора, встроенного в алмазный теплоотвод, на изменение тепловыделения составляет величину порядка 10 мс. Разность температур вдоль поверхности пластины составляет менее 0,5 °C на расстояниях порядка 2 мм. Разработанная компьютерная модель корректно описывает систему: алмазный теплоотвод – теплопроводящая паста – медный радиатор, что позволяет прогнозировать величину и кинетику разогрева мощных полупроводниковых приборов и оптимизировать систему охлаждения мощного полупроводникового прибора.

1. Eden, R.C. / R.C. Eden // Applications of diamond substrates for advanced high density packaging. // Diamond and Related Materials, 1993, v.2, p.1051.
2. Mei Sun, Sheng-Jun Zhai, Hong-Li Tian, Ping He, Jing-Qin Wang, Hong-Dong Zhao // Analysis of Temperature in High Power Laser Array Heat Sinks // ICSICT '06. 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, 2006.
3. Новиков, Н.В. Физические свойства алмаза. Справочник / Н.В. Новиков, Ю.А. Кочержинский, Л.А. Шульман и др. – Киев, Наукова думка, 1987, 189 с.