

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛМАЗНОГО ТЕПЛОТВОДА СО ВСТРОЕННЫМ ДАТЧИКОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

В. А. Мартинович¹, И. А. Хорунжий¹, М. С. Русецкий², Н. М. Казючиц²

¹Белорусский национальный технический университет, valeriiam@yahoo.com

²Белорусский государственный университет

Алмазные теплоотводы находят применение при эксплуатации транзисторов большой мощности, диодов Ганна, интегральных схем повышенной мощности, полупроводниковых лазеров, лавинно-пролетных диодов, варикапов, переключающих полупроводниковых приборов и других устройств [1]. Рабочие характеристики мощных полупроводниковых приборов, особенно лазерных диодов, чувствительны к изменению температурного режима, что требует стабилизации и непрерывного контроля рабочей температуры прибора. Оптимальным размещением датчика температуры является интегрирование его в материал теплоотвода. Изготовленный в алмазе, датчик имеет практически идеальный тепловой контакт с ним, и, учитывая исключительно высокую теплопроводность, должен быть быстродействующим. О возможности создания датчиков температуры на основе алмаза известно давно. Например, таким датчиком является терморезистор, сформированный на алмазной пластинке методом имплантации ионов бора [2]. Использование ионной имплантации позволяет изготовить терморезистор практически любой требуемой конфигурации и размеров, а высокая энергия активации проводимости легированных примесью бора слоев (~0,36 эВ) обеспечивает высокую чувствительность датчика температуры. Этот метод хорошо реализуется на природных кристаллах алмаза типа IIa с низким содержанием азота (не более 10^{18} см^{-3}). Синтетические кристаллы алмаза содержат гораздо больше азота (~ 10^{19} см^{-3}). Вследствие компенсации акцепторных центров, создаваемых бором, донорной примесью азота не удается получить высокую проводимость и энергию активации при малых дозах имплантации ионов бора, а при увеличении дозы происходит резкое уменьшение энергии активации проводимости, приводящее к снижению чувствительности. Альтернативой легированию алмаза бором для создания проводимости может быть его "легирование" дефектами, сопровождающими ионную имплантацию [3].

Целью работы являлось исследование характеристик теплоотвода на основе синтетического НТНР алмаза со встроенным датчиком температуры, моделирование процессов теплопереноса в нем.

Для создания теплоотвода использовались синтетические кристаллы алмаза производства РУП "Адамас БГУ". Кристаллы разрезались на плоскопараллельные пластины и подвергались полировке. На поверхности пластин с помощью ионной имплантации формировались контактные и резистивные области. Контакты создавались имплантацией ионов бора с последующим активационным отжигом в вакууме. Расположенные между контактами резистивные области формировались имплантацией ионов фосфора с энергией 180 кэВ с последующим изохронным отжигом для создания проводящего слоя, обусловленного радиационными дефектами (энергия активации приблизительно 0.1 эВ). Размер резистора и контактных площадок к нему составлял 200×200 мкм. Одна из контактных площадок использовалась в качестве нагревателя, а матрица терморезисторов – в качестве датчиков температуры. Это по-

зволило исследовать распределение температуры вдоль поверхности пластины в зависимости от расстояния между нагревателем и датчиком. Для получения абсолютных значений температуры терморезисторы калибровались в диапазоне температур от 20 до 40 °С. Пластина с терморезисторами устанавливалась на медный радиатор. Тепловой контакт между алмазным теплоотводом и медным радиатором обеспечивался тонким слоем теплопроводящей пасты КПТ-8. Для количественной оценки быстродействия системы “охлаждаемый прибор – теплоотвод - датчик” использовалась тепловая постоянная времени τ [4].

Численное моделирование динамики изменения температуры в разных точках алмазного теплоотвода в процессе нагрева системы проводилось с использованием прикладного программного пакета ANSYS. Значения теплопроводности, теплоемкости, плотности алмаза, используемые при моделировании, взяты из [5]. Распределение температуры в исследуемой системе представлено на рисунке 1.

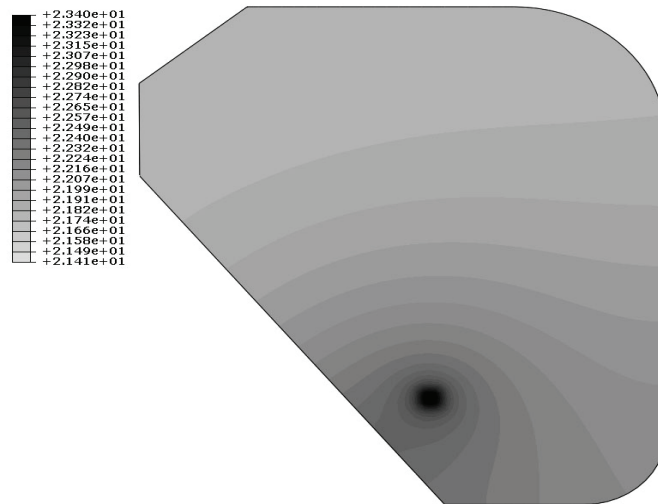


Рис. 1. Стационарное распределение температуры по поверхности алмазной теплоотводящей подложки

Кинетика изменения температуры, измеренная терморезисторами, расположенными на различных расстояниях от нагревателя, при подводимой к нагревателю мощности 1 Вт была получена экспериментально и путем моделирования (рис.2). Из рисунка 2 видно, что вид экспериментальных и расчетных кривых аналогичен. Для количественного описания зависимостей 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.

Значения постоянных времени двух компонент составляют 10 и 450 мс соответственно, т.е. различаются более чем на порядок. С уменьшением расстояния между нагревателем и терморезистором вклад медленной компоненты в общий отклик сис-

темы практически не изменяется, в то время как вклад быстрой компоненты увеличивается в несколько раз. Это может быть обусловлено тем, что медленная компонента связана с разогревом радиатора, а быстрая – с распространением тепла по алмазной пластине. Перепад температур между термодатчиками, удаленными друг от друга на 2,14 мм, составляет всего 0,48 °С. Такое же значение дает расчет, что свидетельствует о том, что моделирование кинетических процессов правильно описывает распространение тепла в исследуемой структуре.

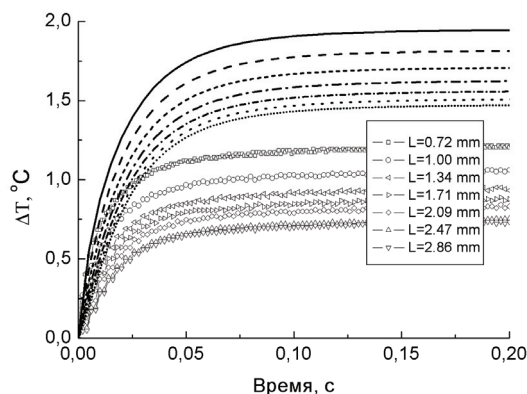


Рис. 2. Кинетика изменения температуры терморезисторов, расположенных на различных расстояниях от нагревателя: точки – эксперимент, линии – расчет

Методом численного моделирования было исследовано влияние размеров алмазной пластины на систему «нагреватель-терморезистор». Анализ полученных результатов показал, что площадь поверхности и толщина пластины существенно влияют как на максимальную температуру датчика температуры, так и на быстродействие системы.

Таким образом, на основе синтетического алмаза был изготовлен теплоотвод со встроенным датчиком температуры. Установлено, что постоянная времени отклика датчика температуры, встроенного в алмазный теплоотвод, составляет величину порядка 10 мс. Размеры алмазной пластины существенным образом влияют на быстродействие системы нагреватель-датчик температуры. Разработанная компьютерная модель позволяет прогнозировать величину и кинетику разогрева мощных полупроводниковых приборов, оптимизировать систему их охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ральченко, В. CVD-алмазы. Применение в электронике / В. Ральченко, В. Конов // Электроника: Наука, Технология. Бизнес. 2007. № 4. С.58.
2. Мельников А.А. Полупроводниковые структуры р-типа на природном алмазе / А.А. Мельников, А.М. Зайцев, В.И. Курганский, А.Я. Шилов, В.С. Вариченко, В.Ф. Стельмах // Алмаз в электронной технике. М.: Энергоатомиздат. 1990. с. 228-238.
3. Rusetsky M.S. The use of ion implantation damage for thermosensitive layer formation in HPHT diamond / M.S. Rusetsky, N.M. Kazuchits, E.V. Naumchik // 4th International Conference "Radiation Interaction With Material and Its Use in Technologies 2012" May 14 – 17, 2012, Kaunas (LITHUANIA), p. 320-323.
4. ГОСТ 28626-90 "Терморезисторы косвенного подогрева с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Общие технические условия".
5. Новиков, Н.В. Физические свойства алмаза. Справочник / Н.В. Новиков, Ю.А. Кочержинский, Л.А. Шульман и др. // Киев. Наукова думка. 1987. 189 с.