

В. А. Мартинович¹, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: valeriam@yahoo.com,

И. А. Хорунжий¹, канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф., e-mail: igor.khorunzhii@newmail.ru,

М. С. Русецкий², ст. науч. сотр., e-mail: rusetsky@bsu.by,

Н. М. Казюц², зав. лаб., e-mail: kazuchits@bsu.by

¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

ТЕПЛОТВОД НА ОСНОВЕ АЛМАЗА СО ВСТРОЕННЫМ ДАТЧИКОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Поступила в редакцию 30.10.2015

На основе синтетического алмаза типа Ib изготовлен теплоотвод со встроенными терморезисторами микрометровых размеров. Теплоотвод представляет собой алмазную пластину, установленную на медный радиатор. Распределение температуры в алмазном теплоотводе от "точечного" источника теплоты мощностью 0,7 Вт измерено с помощью терморезисторов и рассчитано методом численного моделирования. Получено хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными. Установлено, что кинетика нагрева имеет "быструю" и "медленную" составляющие, характеризующие разогрев алмазной пластины и медного радиатора соответственно. Время установления квазистационарного распределения температуры в алмазном теплоотводе составляет ~10 мс.

Ключевые слова: синтетический алмаз типа Ib, теплоотвод, терморезистор, кинетика нагрева, численное моделирование

Введение

Одним из факторов, ограничивающих миниатюризацию полупроводниковых приборов, является высокая плотность выделяемой мощности, что приводит к перегреву прибора. Для решения этой проблемы требуется рассредоточить концентрированный тепловой поток на большую площадь. Высокая теплопроводность алмаза обеспечивает эффективное распределение теплоты [1–3] от "точечных" источников. Кроме того, алмаз вследствие низкой электропроводности позволяет изолировать полупроводниковый кристалл от металлического корпуса. Использование алмазных теплоотводов целесообразно также в системе охлаждения приборов, чувствительных к изменению температурного режима. Для таких приборов требуется стабилизация и непрерывный контроль рабочей температуры. Местом для оптимального расположения датчика температуры в этом случае является сама приборная структура, а где это невозможно, датчик температуры размещается в материале теплоотвода (алмазе). Интегрированный в алмаз датчик температуры имеет практически идеальный тепловой контакт с теплоотводом и, с учетом высокой теплопроводности алмаза, высокое быстродействие [4].

Чувствительный датчик температуры в алмазной пластине может быть изготовлен методом имплантации ионов бора [5–8]. Технология создания легированных бором термочувствительных слоев хорошо разработана для кристаллов алмаза типа Па с низким (менее 10^{18} см^{-3}) содержанием азота. Однако большинство природных и синтезированных

методом высоких давлений и температур (метод НТНР) алмазов содержат гораздо больше азота (более 10^{19} см^{-3}). В таких алмазах не удается получить высокие значения проводимости и энергии активации при малых дозах имплантации ионов бора. Это связано с тем, что акцепторная примесь бора компенсируется донорной примесью азота. С увеличением дозы имплантации в окрестности проекционного пробега ионов параллельно развиваются два процесса:

- растет число структурных нарушений, которые при отжиге стимулируют графитизацию;
- формируется перекрывающаяся с валентной примесью (связанная с примесью бора) зона проводимости [5].

При этом проводимость имплантированного слоя возрастает, а энергия активации проводимости уменьшается, что приводит к снижению термочувствительности [6, 7]. Альтернативой ионной имплантации бора для создания проводимости в алмазе может быть его "легирование" дефектами, сопровождающими ионную имплантацию [9, 10]. Тип имплантированного иона в этом случае не имеет существенного значения [11].

Цель работы — изготовление алмазного теплоотвода со встроенным датчиком температуры, исследование и моделирование процессов теплопереноса в нем.

Изготовление датчиков температуры в алмазном теплоотводе с использованием имплантации ионов фосфора

Теплоотводы были изготовлены из кристаллов алмаза, синтезированных методом НРНТ в РУП

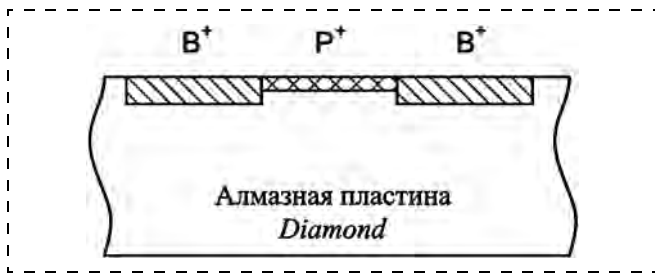


Рис. 1. Схема алмазного терморезистора; B⁺ и P⁺ — слои алмаза, имплантированные ионами бора и фосфора соответственно

Fig. 1. Diamond thermistor; B⁺ and P⁺ — layers of a diamond, implanted with boron and phosphorus ions, respectively

"Адамас БГУ" [12–15]. Средняя концентрация основных технологических примесей в алмазах составляла $4 \cdot 10^{19}$ и $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для азота и никеля соответственно. Кристаллы разрезались алмазными дисками параллельно плоскости (100) на заготовки толщиной 400...500 мкм и механически полировались с двух сторон до получения плоскопараллельных пластин толщиной около 300 мкм. Шероховатость полированной поверхности пластин составила ~10...15 нм. Для изготовления теплоотводов использовали пластины, вырезанные из центральной части кристалла, размером не менее 4×4 мм. На одной из поверхностей пластин методами фотолитографии и ионной имплантации формировалась матрица терморезисторов. Схематическое изображение терморезистора приведено на рис. 1.

Контактные области терморезисторов размером 200×200 мкм создавались имплантацией ионов бора с вариацией энергии в диапазоне 25...100 кэВ и суммарной дозой $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Активация проводимости внедренного бора достигалась отжигом в вакуумной печи с графитовым нагревателем при

1450 °С в течение одного часа. Набор энергий имплантации использовался для создания квазиоднородного легированного бором слоя глубиной около 0,2 мкм, который полностью не удалялся при химической обработке пластин после отжига. Высокая доза имплантации использовалась для формирования при отжиге примесной зоны, которая перекрывалась с валентной зоной и имела близкую к нулю энергию активации проводимости [5, 6, 11].

Расположенные между контактами термочувствительные области размером 200×200 мкм формировались имплантацией ионов фосфора с энергией 180 кэВ дозой $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом при 500 °С. Фактором, определяющим выбор ионов фосфора, была величина их энергии имплантации в стандартном технологическом процессе, позволяющая создавать слой структурных нарушений достаточно глубоко (0,2 мкм) от поверхности. Доза имплантации была выбрана из анализа дозовых зависимостей проводимости и отжига имплантированного слоя [9, 10]. Результаты исследований приведены на рис. 2.

Как видно на рис. 2, а, начиная с дозы 10^{15} см^{-2} , наблюдается быстрый рост проводимости имплантированного слоя (сплошная линия), сопровождающийся уменьшением энергии активации проводимости (штриховая линия). При дозах имплантации менее 10^{15} см^{-2} проводимость и энергия активации слабо зависят от дозы имплантации, а разброс этих параметров в пределах даже одной пластины очень велик. Например, проводимость некоторых резисторов вследствие неоднородного распределения примесей и дефектов в алмазной пластине [13–15] может различаться на порядок. Все это затрудняет управление проводимостью и ее энергией активации путем изменения дозы имплантации.

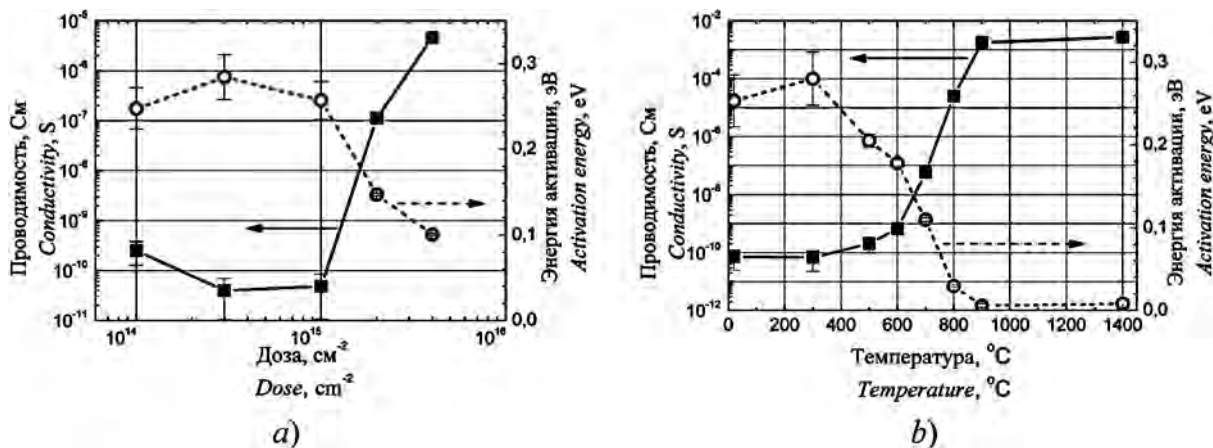


Рис. 2. Зависимость проводимости и энергии активации проводимости имплантированного ионами фосфора слоя от: а — дозы имплантации; б — температуры изохронного (60 мин) отжига для дозы имплантации 10^{15} см^{-2}

Fig. 2. Conductivity and the activation energy of conductivity of the layer implanted with phosphorus ions from: a — implantation dose; b — temperature of isochronal (60 min) annealing for implantation dose of 10^{15} см^{-2}

Более точное управление проводимостью и энергией активации может быть осуществлено варьированием условий отжига имплантированных слоев. Оказалось [9, 10], что характер изменения электрических параметров имплантированных слоев алмаза при отжиге определяется дозой имплантированной примеси. Например, в слоях, имплантированных ионами фосфора дозой 10^{14} см^{-2} , проводимость уменьшается с ростом температуры отжига. Уменьшение проводимости авторы работы [16] связывают с отжигом радиационных дефектов междоузельного типа и восстановлением кристаллической решетки алмаза. Для дозы 10^{15} см^{-2} (рис. 2, *b*), наоборот, наблюдается резкий рост проводимости с одновременным уменьшением энергии активации при температурах отжига выше 500...600 °С. Различный ход кривых отжига обусловлен тем, что доза 10^{14} см^{-2} лежит ниже, а 10^{15} см^{-2} — выше критической дозы аморфизации алмаза [11]. При отжиге без стабилизирующего давления аморфный слой алмаза трансформируется в графитоподобный. Перестройка кристаллической решетки сопровождается повышением проводимости и снижением энергии активации проводимости в имплантированном слое.

Таким образом, имплантацией ионов фосфора дозами выше критической и последующим термическим отжигом в синтетическом НРНТ алмазе были сформированы терморезисторы с параметрами, пригодными для практического применения.

Распределение температуры в алмазном теплоотводе. Эксперимент и моделирование

Исследования характеристик алмазного теплоотвода проводили в условиях, имитирующих условия эксплуатации мощных полупроводниковых приборов. Пластина НРНТ алмаза с терморезисторами (рис. 3, *a*, см. третью сторону обложки) устанавливалась на медный радиатор. Толщина алмазной пластины составляла 360 мкм, площадь — 16 мм^2 , размеры медного радиатора — $62 \times 42 \times 4,9 \text{ мм}$. Тепловой контакт между алмазной пластиной и медным радиатором обеспечивался слоем теплопроводящей пасты марки КПТ-8 толщиной 10 мкм. Тепловыделение от работающего прибора имитировала одна из контактных площадок терморезистора, которая использовалась в качестве нагревателя. С помощью игольчатых зондов к контактной площадке подводилась электрическая мощность 0,7 Вт. Длительность нарастания электрического сигнала составляла не более 1 мкс. Матрица терморезисторов вокруг нагревателя позволяла исследовать распределение температуры в алмазной пластине. Для получения абсолютных значений температуры терморезисторы предварительно калибровались на разработанной нами автоматизи-

рованной установке для измерения температурных зависимостей проводимости [17].

На рис. 3, *b* (см. третью сторону обложки) показано установившееся распределение температуры вокруг "точечного" нагревателя размером $200 \times 200 \text{ мкм}$ при выделении мощности 0,7 Вт, полученное методом численного моделирования с использованием прикладного программного пакета ANSYS для температуры окружающей среды 20 °С. Форма и размеры алмазной пластины и медного радиатора в компьютерной модели соответствуют экспериментальному образцу. Значения теплофизических параметров, используемых при моделировании, приведены в таблице. Как видно на рис. 3, *b*, рассчитанный максимальный перегрев алмазного теплоотвода относительно температуры окружения составляет 2,4 °С, а перепад температуры в пределах алмазной пластины не превышает 1,4 °С.

Рассчитанное и измеренное экспериментально с помощью терморезисторов №№ 1—7 (см. рис. 3, *a*) распределения температуры в алмазной пластине приведены на рис. 4, *a*. Снижение температуры при удалении от источника теплоты наблюдается для обеих зависимостей. Данные расчета превышают экспериментально измеренные. Ход экспериментальной и рассчитанной кривых хорошо описывается степенными функциями с показателем степени $-0,36$ и $-0,20$ соответственно. Экстрапо-

Значения теплофизических параметров
Thermophysical properties used in the simulation

Параметр <i>Parameter</i>	Значение параметра <i>Value</i>	Литературный источник <i>Literary source</i>
Плотность, кг/м^3 <i>Density, kg/m³</i>		
Алмаз <i>Diamond</i>	3515	[18]
Медь <i>Copper</i>	8900	[19]
КПТ-8 <i>KPT-8</i>	1500	[19]
Теплопроводность, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ <i>Thermal conductivity, W/(m \cdot K)</i>		
Алмаз <i>Diamond</i>	2000	[18]
Медь <i>Copper</i>	400	[19]
КПТ-8 <i>KPT-8</i>	2	[19]
Удельная теплоемкость, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ <i>Specific heat, J/(kg \cdot K)</i>		
Алмаз <i>Diamond</i>	515,5	[18]
Медь <i>Copper</i>	395	[19]
КПТ-8 <i>KPT-8</i>	500	[19]

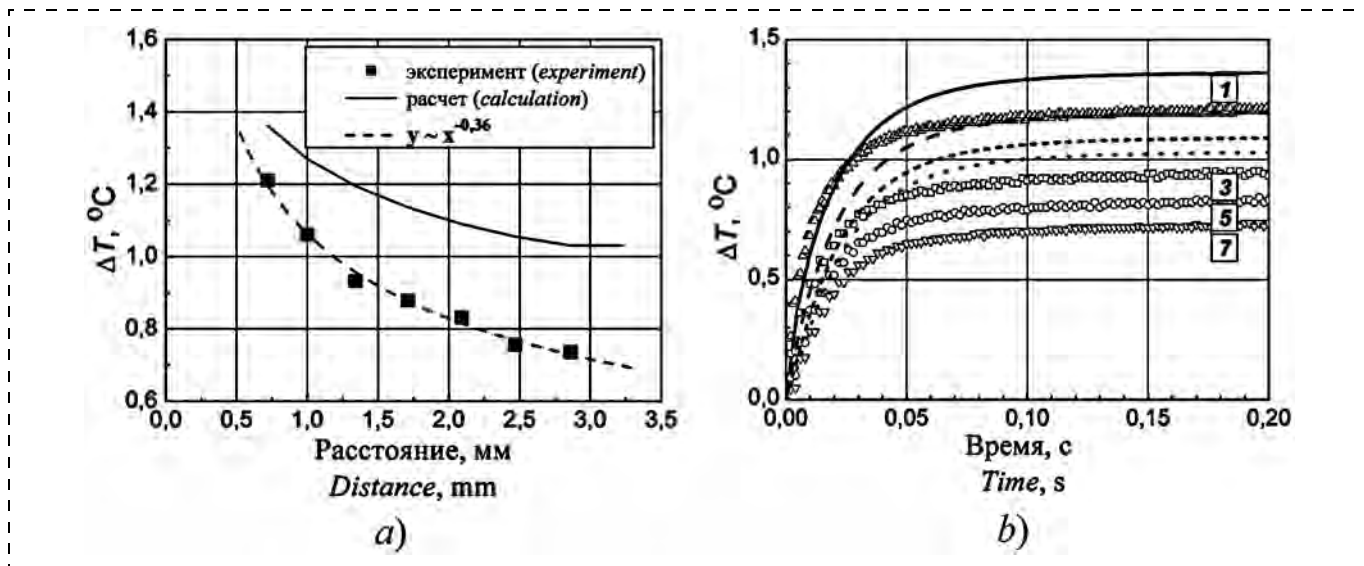


Рис. 4. Перегрев алмазной пластины относительно 20 °С на различных расстояниях от нагревателя (а), кинетики нагрева участков алмазной пластины в местах расположения терморезисторов №№ 1, 3, 5, 7 (b). Точки — эксперимент, линии — расчет

Fig. 4. Overheating of the diamond plate relatively to 20 °С at the different distances from the heater (a), the heating kinetics of the areas of the diamond plate at thermistors' locations №№ 1, 3, 5, 7 (b). Points — the experiment, line — the calculation

лания экспериментальной кривой к началу оси абсцисс (области тепловыделения) позволяет оценить максимальную температуру перегрева алмазного теплоотвода, которая составляет всего 1,8 °С, а перепад температуры по пластине составляет около 1,0 °С. По мере удаления от источника теплоты разность между данными эксперимента и расчета монотонно возрастает (с 0,15 до 0,29 °С для ближнего и дальнего терморезисторов соответственно). Наиболее вероятными причинами этих расхождений могут быть не учтенные в модели процессы конвекционного и излучательного теплообмена с окружающей средой и др.

На рис. 4, b приведены кинетики нагрева различных участков алмазной пластины, измеренные с помощью терморезисторов №№ 1, 3, 5, 7 и полученные методом численного моделирования. Видно, что экспериментально измеренные и рассчитанные кривые нагрева имеют подобный вид и содержат две составляющие. Быстрый рост температуры через 30...40 мс существенно замедляется. Далее наблюдается медленное повышение температуры с выходом на квазистационарные значения, для которых измеренная и рассчитанная температуры различаются на 0,15...0,29 °С. Следовательно, численное моделирование кинетических процессов, в целом, правильно описывает перенос теплоты в исследуемой структуре и может быть использовано для расчета и оптимизации систем охлаждения.

Для количественного описания процессов переноса теплоты в системе "алмазная пластина — теплопроводящая паста — металлический радиатор" была проведена аппроксимация кинетики нагрева

в каждой локальной области алмазной пластины суммой двух экспоненциальных функций:

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

где T_0 — температура окружающей среды; A_1 и A_2 — весовые коэффициенты "быстрой" и "медленной" составляющих; τ_1 и τ_2 — постоянные времени нагрева.

Постоянная времени нагрева τ [20] использовалась для количественной оценки быстродействия алмазных терморезисторов. Рассчитанные из формулы (1) значения постоянной времени "быстрой" и "медленной" составляющих процесса нагрева различаются более чем на порядок и составляют 10 и 450 мс соответственно.

Для экспериментального подтверждения природы "медленной" составляющей кинетики нагрева алмазная пластина устанавливалась на разные радиаторы. На рис. 5 показаны кривые нагрева алмазной пластины при использовании радиаторов из коррозионно-стойкой стали и меди. "Быстрые" составляющие кинетики в обоих случаях практически одинаковые, а "медленные" различаются. Использование радиатора из коррозионно-стойкой стали (2×2 см) приводит к непрерывному повышению температуры системы "алмазная пластина — радиатор", тогда как радиатор из меди (3×3 см) с более высокой теплопроводностью отводит теплоту более эффективно и предотвращает перегрев системы.

Наличие "быстрой" и "медленной" составляющих в кинетике нагрева имеет следующее физическое объяснение. После включения нагревате-

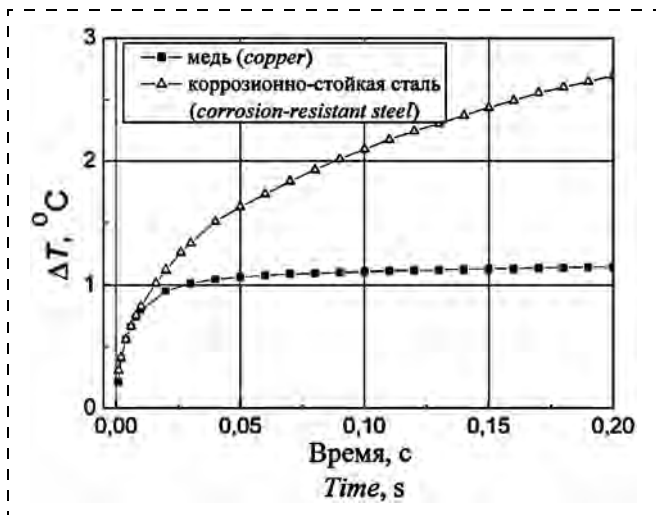


Рис. 5. Экспериментально измеренные кинетики нагрева алмазной пластины при использовании разных радиаторов

Fig. 5. Experimental heating kinetics of the diamond plate using different radiators

ля, вследствие высокой теплопроводности алмаза, происходит быстрое прогревание алмазной пластины. Характерное время выравнивания температуры t_1 в алмазной пластине было оценено по формуле [21]

$$t \sim \frac{r^2 c \rho}{\lambda}, \quad (2)$$

где r , c , ρ , λ — линейный размер, удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности пластины соответственно. Расчетное значение $t_1 = 14$ мс хорошо согласуется со значением τ_1 , полученным при аппроксимации экспериментальных данных. Дальнейший рост температуры алмазной пластины возможен после прогревания радиатора. Этот процесс определяет "медленную" составляющую в кинетике нагрева. Оценка времени выравнивания температуры в медном радиаторе на расстояниях, сравнимых с толщиной радиатора, дает значение $t_2 = 210$ мс, что является величиной одного порядка с τ_2 из эксперимента.

Отвод теплоты от алмазной пластины к медному радиатору осуществляется через слой пасты КПП-8, теплопроводность которой существенно меньше, чем теплопроводность алмаза и меди, вследствие чего на границе алмаз — паста создается барьер для распространения теплоты. Поток теплоты j через слой пасты определяется законом Фурье:

$$j = \lambda \frac{dT}{dx} S, \quad (3)$$

где λ — коэффициент теплопроводности пасты; dT — разность температур между "верхней" и "нижней" поверхностями пасты; dx — толщина слоя пасты; S — площадь контакта алмаз — паста — ра-

диатор. Повышение температуры алмазной пластины прекратится после того, как поток теплоты от источника станет равным тепловому потоку через контактную поверхность алмаз — паста — радиатор. При заданном значении коэффициента теплопроводности пасты, которое обычно не превышает 2...7 Вт/(м · К), формируемая разность температур dT будет определяться площадью контакта S и толщиной слоя пасты dx . Для того чтобы разность температур между алмазом и медным радиатором была минимальной, что является важным фактором для охлаждения прибора, нужно увеличивать площадь контакта, т. е. размер самой алмазной пластины, и/или минимизировать тепловое сопротивление переходной области алмаз — радиатор.

Заключение

На основе синтетического алмаза типа Ib изготовлены экспериментальные образцы теплоотводов со встроенными датчиками температуры. Кинетика нагрева алмазного теплоотвода содержит две составляющие, характеризующие разогрев алмазной пластины и металлического радиатора соответственно. Время установления квазистационарного распределения температуры в алмазном теплоотводе составляет десятки миллисекунд. В условиях, имитирующих работу "точечного" полупроводникового прибора мощностью 0,7 Вт, максимальный перегрев алмазной пластины площадью 16 мм² и толщиной 0,36 мм, установленной на медный радиатор, составляет 1,8 °C, а перепад температуры по поверхности пластины — 1,0 °C.

Численное моделирование процессов распространения теплоты с использованием программного пакета ANSYS корректно описывает систему "алмазная пластина — теплопроводящая паста — медный радиатор", что позволяет прогнозировать величину и кинетику нагрева алмазного теплоотвода, оптимизировать системы охлаждения.

Список литературы

1. Моряков О. С. Алмазные теплоотводы в конструкции полупроводниковых приборов // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. "Полупроводниковые приборы". М.: Электроника, 1982. Вып. 1 (857). С. 1—46.
2. Ланин В., Телеш Е. Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 120—124.
3. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике // Электроника: Наука, Технология. Бизнес. 2007. № 4. С. 58—67.
4. Бормашов В. С., Буга С. Г., Бланк В. Д., Кузнецов М. С. и др. Быстродействующие терморезисторы из синтетических монокристаллов алмаза // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 5. С. 134—139.
5. Мельников А. А., Зайцев А. М., Курганский В. И., Шилов А. Я. и др. Полупроводниковые структуры p -типа на природном алмазе // Алмаз в электронной технике. М.: Энергоатомиздат. 1990. С. 228—238.

6. Job R., Denisenko A. V., Zaitsev A. M., Werner M., et al. Temperature Sensor On Boron Ion Implanted Diamond // MRS Proceedings. 1995. Vol. 416. P. 249–254.
7. Werner M., Job R., Zaitsev A. M., Fahrner W. R., et al. Relationship between Resistivity and Boron Doping Concentration of Single and Polycrystalline Diamond // Phys. stat. sol. (a). 1996. Vol. 154. P. 385–393.
8. Зяблюк К. Н., Митягин А. Ю., Талипов Н. Х., Чучева Г. В. и др. Технология создания легированных бором слоев на алмазе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2012. № 5. С. 39–43.
9. Русецкий М. С., Казюцич Н. М., Казюцич В. Н., Наумчик Е. В. Формирование термочувствительных элементов в синтетическом алмазе с использованием радиационных дефектов ионной имплантации // Матер. 4-й Международной научно-технической конференции "Приборостроение—2011". М.: БНТУ. 2011. С. 393–394.
10. Rusetsky M. S., Kazuchits N. M., Naumchik E. V. The use of ion implantation damage for thermosensitive layer formation in HPNT diamond // Proc. of 4th International Conference "Radiation Interaction With Material and Its Use in Technologies 2012". Kaunas. 2012. P. 320–323.
11. Зезин Р. Б., Храброва Т. В., Моряков О. С., Лобанов Ф. И. Полупроводниковые алмазы // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. "Полупроводниковые приборы". М.: Электроника. 1985. Вып. 2 (1097). С. 1–48.
12. Соловьев В. С., Гусаков Г. А., Кречотень О. В., Семенов Е. А. и др. Состав и пространственное распределение атомов примесей в монокристаллах синтетического алмаза // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 2000. № 2. С. 31–37.
13. Казюцич Н. М., Русецкий М. С., Наумчик Е. В., Мартинович В. А. Методика визуальной оценки распре-

ления примесей и дефектов в синтетических HPNT алмазах // Матер. VIII Междунар. научно-практической конф. "Актуальные проблемы современных наук—2012". Пшемьсль: Наука и образование. 2012. Т. 44. Физика. Химия и химические технологии. С. 32–35.

14. Казюцич Н. М., Коновалова А. В., Азарко И. И., Якочук Ф. Ф. и др. Влияние условий синтеза на примесный состав монокристаллов алмаза марки СТМ "Алмазот" // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 2. С. 1449–1461.
15. Gaubas E., Ceponis T., Jasiunas A., Kalendra V., et al. Lateral scan profiles of the recombination parameters correlated with distribution of grown-in impurities in HPNT diamond // Diamond and Related Materials. 2014. Vol. 47. P. 15–26.
16. Kalish R., Reznik A., Prawer S., Saada D., et al. Ion-Implantation-Induced Defects in Diamond and Their Annealing: Experiment and Simulation // Phys. Stat. Sol. (a). 1999. Vol. 174. P. 83–99.
17. Русецкий М. С., Казюцич Н. М. Автоматизированная установка для измерения температурных зависимостей проводимости на базе ИППП-1 // Матер. 7-й Междунар. научно-техн. конф. "Приборостроение—2014". М.: БНТУ. 2014. С. 131–133.
18. Физические свойства алмаза: Справочник / Под ред. Н. В. Новикова. Киев: Наукова думка. 1987. 189 с.
19. ГОСТ 28626—90 Терморезисторы косвенного подогрева с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Общие технические условия.
20. Теплопроводность и теплофизические свойства веществ и материалов: справочник. URL: <http://thermalinfo.ru/>
21. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967. 392 с.

V. A. Martinovich¹, Ph. D., Associate Professor, valeriam@yahoo.com, I. A. Khorunzhii¹, Ph. D., Head of Chair, igor.khorunzhii@newmail.ru, M. S. Rusetsky², Senior Researcher, rusetsky@bsu.by, N. M. Kazuchits², Head of Laboratory, kazuchits@bsu.by

¹ Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus

² Belarussian State University, Minsk, Belarus

Diamond Heat Sink with an Embedded Temperature Sensor

The micron-sized embedded thermoresistors were manufactured for the heat sink made of Ib type synthetic diamond. The heat sink consists of a diamond plate installed on a copper radiator. The temperature distribution inside the diamond heat sink from a "point" heat source with power of 0,7 W was measured with the use of the thermoresistors. In addition, it was calculated by the method of numerical simulation. Good correlation between the experimental and calculated data was obtained. It was discovered that the heating kinetic of the diamond heat sink had a "fast" and a "slow" components, which characterized heating of the diamond plate and the copper radiator, respectively. Time to reach a quasi-stationary temperature distribution in the diamond heat sink was about 10 ms.

Keywords: synthetic diamond of Ib type, heat sink, thermoresistor, heating kinetic, numerical simulation

Introduction

One of the factors limiting the miniaturization of the semiconductor devices is high density of the allocated power, which leads to overheating of the device. To solve the problem, it is needed to disperse the concentrated heat flux over a larger area. The high thermal conductivity of a diamond provides efficient distribution of heat [1–3] from the "point" sources. Furthermore, a diamond due to the low electrical conductivity allows to isolate the semiconductor chip from the metal housing. The use of a diamond heat sink is also advisable in the cooling system of the devices, which are sensitive to temperature changes. They require stabilization and continuous monitoring of the operating temperature. The instrumental structure is the optimum place for arrangement of the temperature sensor, and where this is not possible, the sensor is

placed in a heat sink material (diamond). The diamond-integrated temperature sensor has a near perfect thermal contact with a heat sink and, taking into account the high thermal conductivity of a diamond, has a high-speed performance [4].

The temperature sensor in the diamond plate may be fabricated by implantation of boron ions [5–8]. The technology for creating of boron-doped heat-sensitive layers is well designed for the diamond crystals of IIa-type with low nitrogen content (less than 10^{18} cm^{-3}). However, the most of natural diamonds and diamonds synthesized at high pressures and temperatures (HTHP method) contain more nitrogen (more than 10^{19} cm^{-3}). They cannot obtain a high conductivity and the activation energy at low doses of ion implantation of boron. This is caused by the fact that the acceptor impurity of boron is compensated by the donor impurity of nitrogen. With