

## **Исследование процесса переноса тепла в системе металл-алмаз-металл**

*Обнаружен экспериментально диодный эффект переноса тепла через границу раздела алмаз-металл. На границе двух тел с различными дебаевскими температурами всегда возникает тепловой барьер. Дебаевские температуры материалов, традиционно используемых для теплоотводов, незначительно отличаются друг от друга, и только с применением алмаза, дебаевская температура которого существенно выше чем у контактирующих с ним материалов, описанный эффект стал экспериментально заметен.*

**Ключевые слова:** алмаз, металлизация алмаза, теплоотвод, теплопроводность, температура Дебая.

Металлизированные теплоотводящие элементы конструкции из поликристаллического CVD-алмаза применяются в производстве полупроводниковых приборов всё шире [1,2].

Однако, увеличение эффективности отвода тепла этими элементами может быть затруднено из-за так называемого граничного теплового сопротивления. Известно, что любая граница раздела двух сред обладает тепловым сопротивлением. При прохождении тепла сквозь эту границу, на ней образуется скачок температуры. Впервые данное явление было продемонстрировано на границе раздела сверхтекучего гелия и стенки теплообменника в 1941 году П.Л. Капицей.

В простейшем случае это явление связано с различием упругих параметров двух сред, что вызывает рассеяние фононов на границе [3].

Рассмотрим границу раздела алмаз-металл. Прохождение фононов дополнительно затруднено еще и наличием дополнительной графитной фазы углерода на термоинтерфейсе, неизбежно возникающей при вжигании металлизации в алмаз [4]. Фактическое тепловое сопротивление металлизированной алмазной пластины при этом превышает расчетные значения в 2-4 раза.

Для исключения графитизации поверхности алмаза, наносится тонкий слой кремния между алмазом и металлом, который подвергнется воздействию потока высокоэнергетичных ионов. За счет атомов отдачи поток ионов размывает границу алмаз-кремний и создавал промежуточный слой карбида кремния. Это позволяет перейти от системы алмаз-металл к системе алмаз-карбид кремния-кремний-металл и исключает графитизацию.

Однако фактическое тепловое сопротивление металлизированной пластины алмаза и в этом случае превышает в расчетные значения 1,5-2 раза.

Проанализировав распределение тепловых полей при работе мощных транзисторов, собранных на алмазном металлизированном теплоотводе, образуется тепловой барьер на границе раздела алмаз-металл: тепловой поток хорошо проходит границу металл-алмаз, но с трудом преодолевает границу алмаз-металл.

Передача тепла в металлах происходит при электрон-электронном взаимодействии, а в диэлектриках за счет фонов-фононных взаимодействий. Наблюдаемое явление обуславливается различием в передаче колебаний (энергии) от электрона к фону и от фона к электрону. Фонов-фононные колебания решетки алмаза с большими потерями распространяются в решетке металла, что затрудняет передачу тепла от алмаза к металлу. А электрон-электронные колебания решетки металла свободно распространяются в решетке алмаза, поэтому при передаче тепла от металла к алмазу тепловой барьер не возникает.

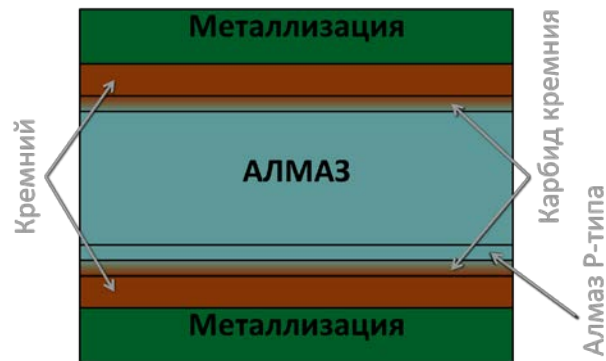


Рис. 1. Схематическое изображение структуры металлизации алмазного теплоотвода.

Для облегчения прохождения тепла через границу раздела алмаз-металл необходимо создать особые условия. Это реализуется с помощью легирования тонкого приповерхностного слоя алмаза, создания электропроводящей области. Экспериментально установлено, что ее наличие улучшает согласование фонов-фононного и электрон-электронного типов теплопроводности в алмазе и слое металлизации, тем самым, приводит к значительному снижению теплового сопротивления.

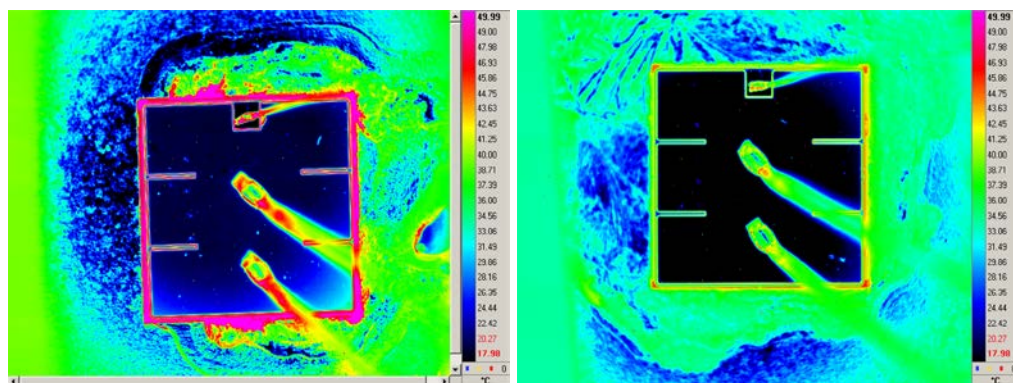


Рис. 2. Изображения распределения тепловых полей транзисторов смонтированных на алмазных теплоотводах с тепловым барьером (слева) и без теплового барьера (справа), полученные на тепловизоре FLIR SC5000.

Таким образом, тепловой барьер возникает всегда на границе двух тел с различными дебаевскими температурами. Дебаевские температуры материалов, традиционно используемых для теплоотводов, незначительно отличаются друг от друга, и только с применением алмаза, дебаевская температура которого существенно выше чем у контактирующих с ним материалов, описанный эффект стал экспериментально заметен.

Предложенный механизм возникновения теплового барьера позволяет реализовать новые подходы к регулированию тепловых процессов, существенно повысить эффективность теплоотводящих систем.

#### Библиографический список

1. В.Б. Вяхирев, М.П. Духновский, А.К. Ратникова, Ю.Ю. Федоров. «Изолирующие теплоотводы на основе CVD-алмаза для силовой электроники» // Электронная техника. Серия 1. СВЧ электроника. 2009. Вып. 3(502). С. 36-40.
2. P.P. Maltsev, S.V. Redkin, I.A. Glinskiy et.al. «Heatsink Diamond Nanostructures for Microwave Semiconductor Electronics» // Nanotechnologies in Russia, 2016. Vol. 11, No. 7–8, pp. 480–490.
3. Маделунг, О. Теория твёрдого тела. / О. Маделунг – М.:Наука, 1980. – 416 с.
4. М.Р. Dukhnovsky, E.N. Kulikov, A.K. Ratnikova, Yu.Yu. Fedorov, S.A. Bogdanov, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, A.V. Muchnikov «Diamond materials and principles of technology 3D-processing them for electronic products» // Electronic Engineering, series I. Microwave Engineering. 2013. No. 3(518), P. 40-46.