

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

© Н. Л. Евдокимова, В. В. Долгов, А. Ю. Моторин

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, 27

Рассмотрен метод определения теплопроводности пластин по остыванию включенного полупроводникового прибора, установленного на поверхность исследуемой пластины. По сравнению с другими методами данный метод использует полупроводниковый прибор и как нагревательный элемент, и как датчик температуры. Определение теплопроводности пластин производится с использованием аналитической теплоёмкости полупроводникового прибора, что существенно упрощает обработку кривой остывания. Учёт тепла, рассеиваемого полупроводниковым прибором без теплоотвода, позволяет точнее оценить мощность теплового потока, поступающего от диода в пластину. Использование цилиндрической конструкции даёт возможность проводить измерения на образцах произвольной формы.

**Ключевые слова:** измерение теплопроводности, тепловое сопротивление, тепловая структурная функция

**Сведения об авторах:** Евдокимова Наталья Львовна, [evdokimova@pulsarnpp.ru](mailto:evdokimova@pulsarnpp.ru); Долгов Владимир Викторович, [dolgov\\_vv@pulsarnpp.ru](mailto:dolgov_vv@pulsarnpp.ru); Моторин Андрей Юрьевич, [motorin\\_aj@pulsarnpp.ru](mailto:motorin_aj@pulsarnpp.ru)

---

## THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS OF MATERIALS USED IN MANUFACTURING OF SEMICONDUCTOR DEVICES

N. L. Evdokimova, V. V. Dolgov, A. Yu. Motorin

JCS «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

Method of thermal conductivity measurements of wafers utilizing the cooling of turned-on semiconductor device, placed on top of the tested wafer is considered. Compared with other techniques, the proposed method utilizes semiconductor device both as a heating element and as thermal sensor. Thermal conductivity measurements are performed using analytical thermal capacity of semiconductor device, which significantly simplifies cooling curve processing. Calculation of the amount of heat that is dispersed by the semiconductor device without heat-sink allows for more precise estimation of the intensity of the heat flow from diode to the wafer. Cylindrical structure allows measurements on samples of arbitrary shape.

**Keywords:** thermal conductivity measurements, thermal resistance, thermal structural function

**Data of authors:** Evdokimova Natalia Lvovna, [evdokimova@pulsarnpp.ru](mailto:evdokimova@pulsarnpp.ru), Dolgov Vladimir Viktorovich, [dolgov\\_vv@pulsarnpp.ru](mailto:dolgov_vv@pulsarnpp.ru); Motorin Andrey Yurievich, [motorin\\_aj@pulsarnpp.ru](mailto:motorin_aj@pulsarnpp.ru)

### **Введение**

Для обеспечения низких тепловых сопротивлений полупроводниковых приборов необходим контроль теплопроводности

материалов, используемых при изготовлении приборов – контроль теплопроводности полупроводниковых пластин, из которых изготавливают кристаллы, и материалов, используемых при изготовлении корпуса

прибора. Современные методы контроля теплопроводности материалов, применяемых при изготовлении полупроводниковых приборов, изложены в [1]. В статических методах определяют две температуры на пути теплового потока. Затем по разности температур и мощности теплового потока находят тепловое сопротивление и из известной геометрии пластины рассчитывают теплопроводность. Температуру, как правило, определяют с помощью термпар, установленных на пластине. При этом всегда часть теплового потока уходит в термопару. В работе [2] предложен метод определения теплопроводности пластин без использования термопары. Теплопроводность пластин определяется из измерения переходного теплового сопротивления транзистора, установленного на поверхность исследуемой пластины. В работе [2] тепловой анализ проводился с использованием тепловой структурной функции [3], получаемой на измерителе T3Ster (thermal transient tester) [4], из измерения переходного теплового сопротивления транзистора, установленного на поверхность исследуемой пластины. Транзистор при этом являлся и разогревающим элементом (в режиме разогрева), и датчиком температуры (в режиме остывания). В работах [5, 6] была предложена упрощенная методика теплового анализа полупроводниковых приборов. Была введена аналитическая теплоёмкость  $C^*$ , как приращение количества тепла  $\Delta Q$  при увеличении средней температуры  $\Delta T$  на один градус  $C^* = \Delta Q / \Delta T$ . В случае разогревающего импульса постоянной мощности  $P$  выражение для  $C^*$  примет вид  $C^* = P \cdot t / \Delta T$ . Учитывая, что тепловое сопротивление  $R_t = \Delta T_{\text{макс}} / P$ , было получено  $C^* = t / R_t$ . Формула справедлива на тех участках кривой остывания, где приращение максимальной температуры  $\Delta T_{\text{макс}}$  равно приращению средней температуры  $\Delta T$ . По аналогии с работой [3] была введена аналитическая структурная функция  $K^* = dC^* / dR_t$ , позволяющая без использования сложного математического анализа, встроенного в прибор T3Ster, по кривой

остывания анализировать путь теплового потока.

Целью этой работы являлась разработка метода определения теплопроводности пластин по остыванию установленного на пластину полупроводникового прибора с использованием аналитической теплоёмкости полупроводникового прибора  $C^*$  и аналитической тепловой структурной функции  $K^*$ .

### *Теоретическое обоснование методики*

В работе [2] было показано, что в цилиндрической системе координат интегральная теплоёмкость зависит от теплового сопротивления следующим образом:

$$C_{\Sigma} = w c_v r_0 \exp(4\pi W \lambda R_{\Sigma}), \quad (1)$$

где  $C_{\Sigma}$  – интегральная теплоёмкость,  $R_{\Sigma}$  – тепловое сопротивление,  $w$  – толщина пластины,  $r_0$  – радиус контакта нагревающего элемента с пластиной,  $c_v$  – объёмная теплоёмкость пластины,  $\lambda$  – теплопроводность пластины.

Из формулы (1) видно, что логарифм теплопроводности линейно зависит от теплового сопротивления. При этом коэффициент  $k = \Delta(\ln C^*) / \Delta R_{\Sigma}$  постоянен и равен:

$$k = 4\pi w \lambda. \quad (2)$$

Авторы работы [2] по кривой остывания транзистора, полученной с помощью прибора T3Ster, находили  $C_{\Sigma}$ . Затем по наклону зависимости логарифма теплопроводности от теплового сопротивления, зная толщину пластины  $w$ , авторы работы [2] находили теплопроводность пластин  $\lambda$  из формулы (2). В данной статье задачей являлось исследование возможности определения значения теплопроводности пластин (без прибора T3Ster) с помощью введённой в [5, 6] аналитической теплоёмкости  $C^* = t / R_t$ , существенно упрощающей тепловой анализ.

### Методика эксперимента и обработка результатов

В качестве полупроводникового прибора, являющегося и нагревателем, и датчиком температуры, был использован диод. Контактующее с пластиной устройство, состоящее из диода и теплоотвода, показано на рис. 1. Теплоотвод содержит цилиндрическое отверстие, в центре которого расположен диод. Диод от теплоотвода отделён фторопластовой втулкой, позволяющей расположить диод в центре отверстия. Исследуемая пластина помещалась на теплоизолирующую поверхность. Сверху устанавливалось контактирующее устройство. Для улучшения теплового контакта контактирующее устройство прижималось к пластине дополнительными грузами. Места контактов диода и теплоотвода с пластиной смазывались теплопроводящей пастой. При этом исследуемая пластина служила теплоотводом для разогретого диода. Для апробации методики были взяты пластины меди, свинца, алюминия, кремния, алюминитридной керамики и керамики 22ХС.

В режиме разогрева на диод (был использован диод 2Д237) подавался импульс разогревающего тока ( $I_{\text{наг}} = 0,5 \text{ А}$ ) длительность которого была достаточна для выхода диода в статический тепловой режим (было выбрано 4 минуты). В режиме измерения на участке остывания проводи-

лась серия замеров термочувствительного параметра (при  $I_{\text{изм}} = 20 \text{ мА}$ ): 200 замеров через 10 мкс и 6000 замеров через 10 мс.

В качестве термочувствительного параметра использовалось прямое падение напряжения на диоде  $U_{\text{пр}}$ . В результате измерения были получены два массива: массив времени  $t_i$  и массив  $U_{\text{пр } i}$ . По изменению прямого падения напряжения на диоде  $U_{\text{пр } i}$  (по известному его температурному коэффициенту напряжения ТКН) рассчитывались массив приращений температуры  $\Delta T_i = \Delta U_{\text{пр } i} / \text{ТКН}$  и массив тепловых сопротивлений диода на участке остывания:

$$R_{t_{\text{ост } i}} = \Delta T_i / P_{\text{пласт}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{пласт}}$  – это мощность, поступающая в пластину.

Однако мощность, поступающая в пластину ( $P_{\text{пласт}}$ ) не равна всей мощности, рассеиваемой диодом ( $P_{\text{расс}} = I_{\text{наг}} * U_{\text{наг}}$ ). Часть рассеиваемой диодом мощности параллельным потоком уходит в контакты и через крышку диода на воздух ( $P_{\text{возд}}$ ). Для определения доли мощности, поступающей в пластину  $P_{\text{пласт}}$ , от всей мощности, рассеиваемой диодом  $P_{\text{расс}}$ , было проведено сравнение теплового сопротивления диода, расположенного на пластине, и теплового сопротивления диода, расположенного на

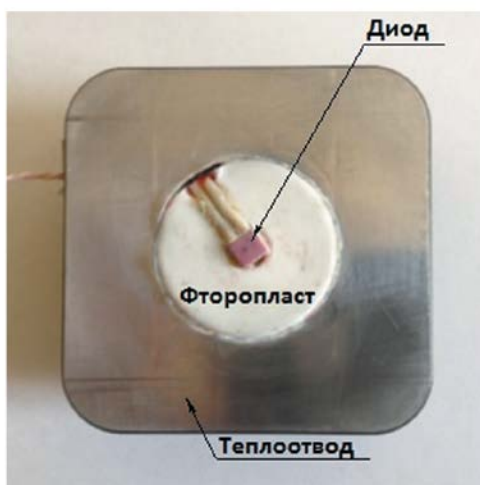


Рис. 1

Устройство, контактирующее с исследуемой пластиной

теплоизолирующем основании, при котором тепловой поток уходит только в воздух и в контакты ( $R_{t \text{возд}}$ ). Тепловое сопротивление диода, установленного на пластине (ему соответствует тепловой поток  $P_{\text{расс}}$  и тепловое сопротивление  $R_{t \text{паралл}}$ ), является параллельным соединением теплового сопротивления для потока, идущего через пластину ( $P_{\text{пласт}}$ ,  $R_{t \text{пласт}}$ ) и теплового сопротивления для потока, идущего через крышку и контакты ( $P_{\text{возд}}$ ,  $R_{t \text{возд}}$ ). Тогда по закону параллельного соединения:

$$R_{t \text{парал}} * P_{\text{расс}} = R_{t \text{возд}} * P_{\text{возд}} \quad (4)$$

При этом часть общего теплового потока, поступающего от диода в пластину ( $\eta$ ) будет равна:

$$\eta = P_{\text{пласт}} / P_{\text{расс}} = 1 - P_{\text{возд}} / P_{\text{расс}} = 1 - R_{t \text{паралл}} / R_{t \text{возд}} \quad (5)$$

Таким образом, измерив тепловое сопротивление диода, установленного на пластине ( $R_{t \text{парал}}$ ), и тепловое сопротивление диода, расположенного на теплоизолирующем основании ( $R_{t \text{возд}}$ ), по формуле (4) можно определить какая часть рассеиваемой диодом мощности  $\eta$  уходит в пластину.

По формуле (3) с использованием (5) был получен массив теплового сопротивления на участке остывания  $R_{t \text{ост } i}$ . Далее проводилось сглаживание экспериментальных данных в программе Origin с помощью процедуры экспоненциального фиттинга, в котором выходная функция представляет собой сумму экспонент  $R_t(t) = \sum r_j \exp(-t/\tau_j)$ . По полученным в результате фиттинга значениям  $r_j$  и  $\tau_j$  строился сглаженный массив тепловых сопротивлений, в котором каждому моменту времени  $t_i$  соответствовало значение  $R_{t \text{ост } i}$ . Затем из массива тепловых сопротивлений на участке остывания  $R_{t \text{ост } i}$  был получен массив тепловых сопротивлений, соответствующий нагреву  $R_{t \text{наг } i}$  по формуле:

$$R_{t \text{наг } i} = R_{t 0} - R_{t \text{ост } i} \quad (6)$$

где  $R_{t 0}$  – тепловое сопротивление в момент отключения греющего импульса.

Тепловое сопротивление  $R_{t 0}$  определялось экстраполяцией начального участка кривой остывания (по  $\sqrt{t}$ ) к моменту  $t=0$  (снятой с интервалом 10 мкс).

Аналитическая интегральная теплоёмкость  $C^*$  для каждого момента времени  $t_i$  определялась из  $R_{t \text{наг } i}$  по формуле [5, 6]:

$$C_i^* = t_i / R_{t \text{наг } i} \quad (7)$$

### Результаты эксперимента

Полученная после фиттинга зависимость теплового сопротивления диода от времени приведена на рис. 2. Красный цвет соответствует диоду, расположенному на свинцовой пластине, синий – диоду на медной пластине. На приведённом графике наблюдаются два участка: участок I, где тепловые сопротивления диода, установленного на разные пластины, совпадают, и участок II, где тепловое сопротивление диода на свинцовой пластине превышает тепловое сопротивление диода, расположенного на медной пластине. Таким образом, при достаточном времени нагрева (в нашем случае более 100 мс) по переходной тепловой характеристике диода можно судить о тепловых свойствах пластин, являющихся для диода теплоотводом. Участок I ( $t < 100$  мс) соответствует накоплению тепла в диоде. Участок II ( $t > 100$  мс) соответствует нагреванию пластин, на которых находится диод. Из рис. 2 видно, что тепловое сопротивление диода на свинцовой пластине существенно выше, чем тепловое сопротивление того же диода на медной пластине, и в конце снятого временного интервала значение теплового сопротивления для диода на свинцовой пластине равно 27 °C/Вт, а на медной пластине – 10,5 °C/Вт.

Построенная по формуле (7) зависимость  $C^*$  от теплового сопротивления  $R_t$  показана на рис. 3.

Как видно из рис. 3 и в случае медной, и в случае свинцовой пластин есть участок, соответствующий радиальному рас-

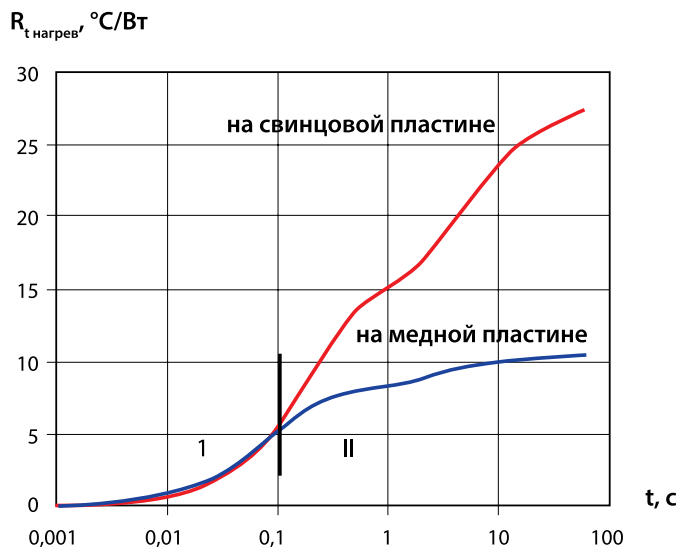


Рис. 2

Зависимость теплового сопротивления  $R_{t\text{ нагр}}$  от времени для диода, находящегося на медной и свинцовой пластине

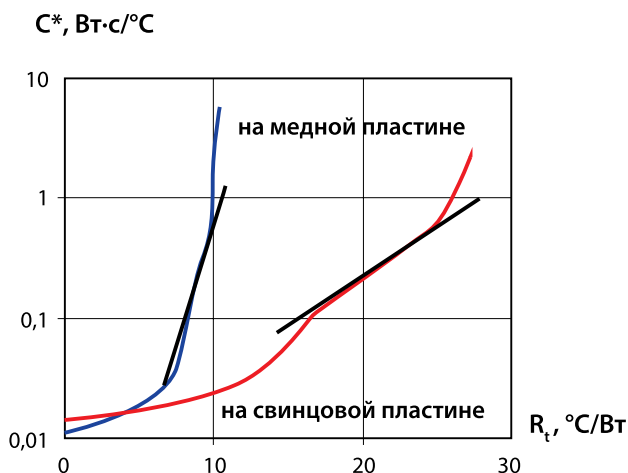


Рис. 3

Зависимость аналитической теплоёмкости  $C^*$  от теплового сопротивления  $R_t$

теканью тепла, где логарифм теплоёмкости  $C^*$  линейно зависит от теплового сопротивления  $R_t$ . На рис. 3 этот участок выделен сплошной чёрной линией. Это подтверждает применимость формулы (1) и для аналитической теплоёмкости  $C^*$ . На этом участке производная  $d(\ln C^*)/dR_t$  (обозначим её  $k^*$ ) не должна меняться. Значение  $k^*$  при нагреве медной пластины больше, чем при нагреве свинцовой пластины, что также соответствует формуле (1).

Для определения  $k^*$  (на рис. 3 это наклон чёрных линий на участке линейности) было проведено дифференцирование  $\ln C^*$  по тепловому сопротивлению  $R_t$  по формуле:

$$\frac{d(\ln C^*)}{dR_t} = \frac{1}{C^*} \frac{dC^*}{dR_t} = \frac{k^*}{C^*} \tag{8}$$

Из формулы (8) следует, что коэффициент  $k^*$  равен отношению аналитической

тепловой структурной функции  $K^*$  к аналитической теплоёмкости  $C^*$  на участке радиального растекания тепла по пластине. Построенная по формуле (8) зависимость  $K^*/C^*$  от  $R_t$  для диода на разных пластинах приведена на рис. 4 и 5.

Из рис. 4 и 5 видно, что зависимость  $K^*/C^* = f(R_t)$  имеет пологий участок, соответствующий радиальному растеканию тепла. Значение ординаты в области пологого участка обозначим  $k^*_l$ , где индекс  $l$  – определяет пластину, на которой находится диод. Измерение  $k^*$  на пластинах с известными значениями  $w$  и  $\lambda$  показало, что  $k^*$  также как и  $k$  в работе [2] практически прямо пропорционально произведению  $w\lambda$ :

$$k^* \sim w\lambda. \tag{9}$$

Однако коэффициент пропорциональности в эксперименте оказался не равным  $4\pi$ , как в формуле (1).

Предложенным методом была определена теплопроводность различных пластин. Результаты сведены в табл. В первом столбце приведены используемые материалы пластин, во втором столбце их толщины. В третьем столбце таблицы даны полученные вышеописанным способом значения  $k^*$  для разных пластин. В четвертом столбце приведены тепловые сопротивления диода ( $R_{t \text{ паралл}}$ ), установленного на разных пласти



Рис. 4

Зависимость  $K^*/C^*$  от теплового сопротивления  $R_t$  для диода на медной и свинцовой пластинах

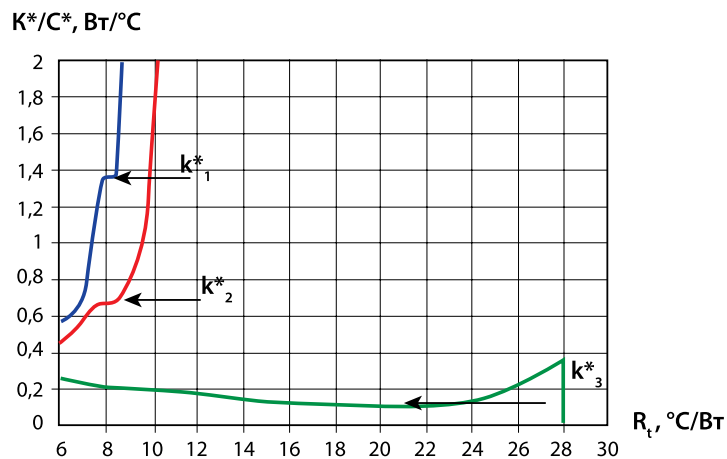


Рис. 5

Зависимость  $K^*/C^*$  от теплового сопротивления  $R_t$  для диода на различных керамических пластинах: 1 – керамика AlN,  $w = 1$  мм; 2 – керамика AlN,  $w = 0,5$  мм; 3 – керамика 22ХС,  $w = 0,5$  мм

Таблица

Параметры, используемые для определения теплопроводности

Материалы	Толщина $w$ , мм	$k^*$ , Вт/°C	$R_{г\text{ паралл}}^*$ , °C/Вт	$\eta$	$k^* \cdot \eta$ , Вт/°C	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/м·К
Pb	0,95	0,32	17,65	0,81	0,26	35
Si litl	0,38	0,51	13,9	0,86	0,44	150
AlN	0,5	0,74	12,05	0,88	0,65	170
22ХС	0,45	0,14	31,4	0,65	0,096	26
Cu	0,45	1,1	10,3	0,90	0,99	286
Al	0,5	0,88	17,65	0,88	0,77	201

нах. В пятом столбце даны рассчитанные по (5) значения коэффициентов  $\eta$ , учитывающие часть теплового потока, поступающую от диода в пластину ( $R_{возд} = 100 \text{ °C/Вт}$ ). В шестом столбце дано произведение  $k^*$  и  $\eta$ . В седьмом столбце дана рассчитанная из формулы (9) теплопроводность пластин  $\lambda$ .

На рис. 6 показана построенная по данным табл. зависимость  $k^*$  от  $w\lambda$ . Синим цветом на рис. 6 изображена прямая, построенная по данным столбца (3), красным цветом – по данным столбца (6), учитывающая долю теплового потока, поступающую от диода в пластину. Уточнение  $k^*$  по части теплового потока, поступающего в пластину приводит к тому, что зависимость из линейной превращается в прямую пропорциональную. Это даёт возможность определять теплопроводность пластин по одному эталону.

Таким образом, определив значение  $k^*$  диода, установленного на исследуемой пластине, можно определять теплопроводность пластин. Тот факт, что коэффициент наклона не равен  $4\pi$  как в формуле (1), может быть связан с тем, что используемый как нагреватель диод в основании не круглый, а прямоугольный, в то время как формула (1) применима для радиального растекания тепла. Другой причиной могут быть неучтённые потери тепловой мощности или погрешность в определении ТКН. Значение коэффициента при  $w\lambda$  в (1) может отличаться для другой экспериментальной реализации установки. Поэтому для каждой установки желательно определять этот коэффициент на пластине с известной толщиной и теплопроводностью, то есть проводить калибровку.

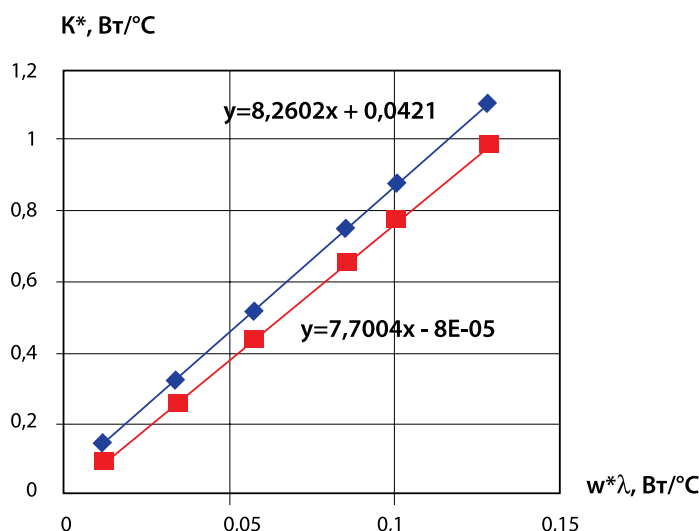


Рис. 6  
Зависимость  $k^*$  от  $w\lambda$

Таким образом, метод может быть применён для определения теплопроводности материалов, используемых в полупроводниковой электронике.

### Выводы

По остыванию диода, установленного на пластине с цилиндрическим теплоотводом, с помощью коэффициента  $K^*$ , равного отношению аналитической теплоёмкости  $C^*$  к аналитической тепловой структурной функции  $K^*$ , можно определять теплоёмкость исследуемых материалов.

Значение  $K^*$  зависит от теплопроводности пластины, на которой находится диод. Величина  $K^*$  прямо пропорциональна произведению толщины пластины на её теплопроводность  $\lambda$ .

Оценка мощности, рассеиваемой диодом в окружающую среду, позволяет повысить точность измерения  $\lambda$ .

Достоинством метода является отсутствие погрешности, связанной с неконтролируемым уходом тепла в термопару.

Данным методом можно измерять теплопроводность пластин неправильной формы.

При уменьшении размеров диода и теплоотвода метод может быть использован для локального измерения теплопроводности.

### Литература

1. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. – М.: Техносфера, 2016. – 328 с.
2. Szekely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements // IEEE Tr. On Component and Packing Technology, v. 24, № 4, 2002, pp. 605-610.
3. Szekely V., Tran van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method // Solid-State Electronics, v. 31, № 9, 1988, pp. 1363-1368.

4. Режим доступа: <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster/>, T3Ster® – Dynamic Thermal Characterization (дата обращения: 05.03.2017).
5. Евдокимова Н. Л., Ежов В. С., Минин В. Ф. Тепловой анализ полупроводниковых структур // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – Вып. 1 (230). – С. 69-75.
6. Евдокимова Н. Л., Ежов В. С., Иванов К. А. Аналитическая тепловая структурная функция. Численное моделирование // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 1 (235). – С. 27-35.

### References

1. Gruzдов V. V., Kolkovskiy Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *Kontrol novykh tekhnologiy v tverdotelnoy SVCH elektronike* [Advanced technology control in solid-state microwave electronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 328 p.
2. Szekely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements // IEEE Tr. On Component and Packing Technology, v. 24, № 4, 2002, pp. 605-610.
3. Székely V., Tran van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method // Solid-State Electronics, v. 31, № 9, 1988, pp. 1363-1368.
4. URL: <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster/>, T3Ster® – Dynamic Thermal Characterization (accessed 5 March 2017).
5. Evdokimova N. L., Ezhov V. S., Minin V. F. Thermal analysis of semiconductor structures. Numerical modeling. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 1 (230), pp. 69-75.
6. Evdokimova N. L., Ezhov V. S., Ivanov K. A. Analytical thermal structural function. Numerical modeling. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2015, № 1 (235), pp. 27-35.