

# Тепловой расчет *pin*-диодов на основе карбида кремния

© П.Б. Гамулецкая\*, А.В. Кириллов\*, А.А. Лебедев, Л.П. Романов\*, В.А. Смирнов\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* ЗАО „Светлана–Электронприбор“,  
Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 сентября 2003 г. Принята к печати 9 сентября 2003 г.)

Приведены результаты тепловых расчетов различных конструктивных моделей *pin*-диодов на основе SiC с емкостью структуры 0.2 пФ при толщинах подложки 360, 50 и 2 мкм. Проведено сравнение с кремниевой *pin*-структурой на интегральном теплоотводе.

## 1. Введение

Известно, что благодаря своим уникальным электрофизическим параметрам карбид кремния является перспективным материалом для силовой электроники [1]. Однако все еще большая плотность структурных дефектов в эпитаксиальных структурах SiC задерживает начало промышленного выпуска высокоточных приборов на основе этого материала. В то же время SiC-приборы СВЧ диапазона, имеющие малые геометрические размеры, демонстрируют характеристики, близкие к теоретическим, что приводит к стремительному развитию СВЧ техники на основе SiC.

В настоящей работе впервые проведено теоретическое исследование теплового сопротивления *pin*-диода на основе SiC для диапазона частот  $\sim 10$  ГГц.

## 2. Методика расчета

При расчете *pin*-диодов принималась емкость структуры при обратном смещении  $C_{pm} = 0.2$  пФ — типичная величина для трехсантиметрового диапазона длин волн. Толщина базы ( $n^-$ -области)  $h_n = 2$  и 6 мкм. Толщина низкоомной подложки карбида кремния  $n^+$ -типа  $H_{n^+}$  при расчете принималась равной одному из трех вариантов:

- 360 мкм — для случая типовой подложки (пластины) карбида кремния;
- 50 мкм — для случая утоньшенной подложки с целью снижения электрических потерь в подложке;
- 2 мкм — для случая полностью удаленной с целью максимального снижения электрических потерь в подложке (идеальный случай), аналог — кремниевая *pin*-диодная структура на интегральном теплоотводе.

В табл. 1 приведены основные параметры карбида кремния, кремния и алмаза (для случая использования алмазного теплоотвода). Теплопроводность SiC-4H взята из работы [2], остальные параметры SiC — из [3].

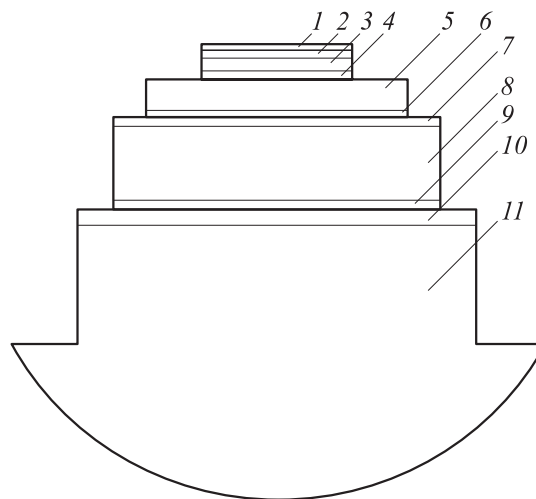
Расчет теплового сопротивления проводился методом упрощенного эквивалента для круглого источника тепла в стационарном режиме для многослойной пластины по методике, изложенной в работе [4].

Схема тепловой модели, по которой проводился расчет, представлена на рис. 1. В случае, если моделируемая

структура не имела алмазного пьедестала, в используемой для расчета схеме отсутствуют слои 7–9 (рис. 1).

Суть расчета сопротивления методом упрощенного эквивалента для круглого источника тепла состоит в учете растекания теплового потока по объему слоя (тела), если его размеры превышают размеры источника тепла. Схема распространения теплового потока по слою от источника тепла к теплоотводу показана на рис. 2.

Как видно из рис. 2, тепловой поток, входящий в слой с однородными электрофизическими и тепловыми



**Рис. 1.** Тепловая модель *pin*-структуры на основе SiC на медном держателе. 1 — омический контакт к  $p^+$ -области, толщины слоев в мкм: Al — 0.05, Ti — 0.1, Pt — 0.025, Ni — 0.05, Au — 0.2 [5]; 2 —  $p^+$ -область *pin*-структуры; 3 —  $n^-$ -область *pin*-структуры (эпитаксиальный слой  $n^-$ -типа толщиной 2 или 6 мкм); 4 —  $n^+$ -область *pin*-структуры (подложка  $n^+$ -SiC толщиной 360, 50 или 2 мкм); 5 — омический контакт к  $n^+$ -области (Ni — 0.2, Au — 2 мкм) [5], либо такой же контакт с добавлением интегрального теплоотвода из Au толщиной 45 мкм (гальваническое покрытие); 6 — слой припоя AuGe — 5 мкм; 7 — гальваническое покрытие алмазного пьедестала; Au — 2 мкм; 8 — алмазный пьедестал (алмаз типа Па или типа Пв размером  $0.6 \times 0.6 \times 0.2$  мм); 9 — гальваническое покрытие алмазного пьедестала: Au — 2 мкм; 10 — гальваническое покрытие медного держателя: Au — 5 мкм; 11 — медный диодный держатель (фрагмент корпуса диода), высота пьедестала 0.3 мм, диаметр — 1 мм.

Таблица 1.

Наименование параметра, обозначение	Единица измерения	SiC-4H		Кремний		Алмаз Па	Алмаз Пб
		$n^-$ -тип	$n^+$ -тип	$n^-$ -тип	$n^+$ -тип		
Диэлектрическая постоянная $\epsilon$ , высокочастотная		6.7		11.8			
Теплопроводность $\lambda$	Вт/(см · град)	3.8	2.9	1.45	0.8	22	13
при $T = 300$ К		1.8	1.8	0.8	0.45	10	6
при $T = 500$ К							
Теплоемкость $C_p$	Дж/(г · град)	0.6		0.76		0.63	0.63
Плотность $P$	г/см <sup>3</sup>	3.21		2.32		3.5	3.5

Таблица 2. Расчет  $R_{th}$  SiC-pin-структур с толщиной  $n^-$ -области 2 мкм и с  $C_{pn} = 0.2$  пФ

№ слоя на рис. 1	Материал слоев	$\lambda$ , Вт/(см · град)		pin-структура с $H_{n^+} = 360$ мкм					pin-структура с $H_{n^+} = 50$ мкм				
		300 К	500 К	Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт		Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт	
					верхний	нижний	300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К
3	SiC $n^-$ -область	3.8	1.8	2	92	96	0.8	1.67	2	92	96	0.8	1.67
4	SiC $n^+$ -область, подложка	2.9	1.8	360	96	600	<b>20.17</b>	<b>26.3*</b>	50	96	176	<b>10.02</b>	<b>17.47*</b>
5	Au нижний контакт	3.09	3.0	2	600	600	0.09	0.09 <sup>+</sup>	2	176	179	0.26	0.26 <sup>+</sup>
6	AuGe припой	1.47	~ 1.42	5	600	608	0.47	0.47 <sup>+</sup>	5	179	187	1.38	1.38 <sup>+</sup>
10	Au покрытие держателя	3.09	3.0	5	608	616	0.22	0.22 <sup>+</sup>	5	187	195	0.6	0.6 <sup>+</sup>
11	Cu держатель	3.9	3.7	полубесконечный	616		2.63	2.63 <sup>+</sup>	полубесконечный	195		8.5	8.5 <sup>+</sup>
Суммарное $R_{th}^{tot}$				при 300 К:		2.38		31.38		при 500 К:		29.88	
				при 500 К:		21.56				21.56		29.88	

Примечание. \* расчет  $R_{th}$  в слое проводился с учетом градиента температурного поля внутри слоя;  
<sup>+</sup> значения  $R_{th}$  те же, что и при 300 К, так как в этих слоях температура слоя уже невелика.

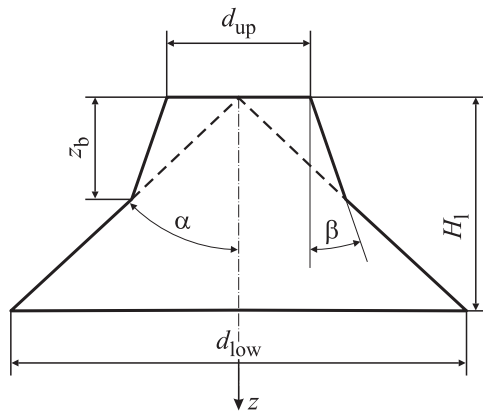


Рис. 2. Схема распространения теплового потока по слою от источника тепла к теплоотводу.

параметрами, растекается по объему слоя сначала под углом  $\beta$  до координаты излома  $z_b$ , а затем растекание потока идет под увеличенным углом  $\alpha$ .

Данная модель расчета применима при следующих ограничениях.

Если толщина теплопроводящего слоя  $H_1 \leq 0.1d_{up}$ , где  $d_{up}$  — диаметр входящего в слой теплового потока от источника тепла, т.е. слой достаточно тонкий. В этом случае тепловое сопротивление слоя  $R_{th}$  рассчитывается по формуле для цилиндрического источника

$$R_{th} = \frac{H_1}{\lambda_1 S} = \frac{4H_1}{\pi d \lambda_1}, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  — теплопроводность, а  $S$  и  $d$  — площадь и диаметр сечения теплопроводящего цилиндрического слоя.

**Таблица 3.** Расчет  $R_{th}$  SiC-pin-структур с толщиной  $n^-$ -области 6 мкм и с  $C_{pn} = 0.2$  пФ

№ слоя на рис. 1	Материал слоев	$\lambda$ , Вт/(см · град)		$pin$ -структура с $H_{n^+} = 360$ мкм					$pin$ -структура с $H_{n^+} = 50$ мкм				
				Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт		Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт	
		300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К
3	SiC $n^-$ -область	3.8	1.8	6	160	170	0.79	1.65	6	160	170	0.8	1.67
4	SiC $n^+$ -область, подложка	2.9	1.8	360	170	600	<b>10.98</b>	<b>14.33*</b>	50	170	253	<b>5.36</b>	<b>7.55*</b>
5	Au нижний контакт	3.09	3.0	2	600	600	0.09	0.09 <sup>+</sup>	2	253	256	0.13	0.13 <sup>+</sup>
6	AuGe припой	1.47	~ 1.42	5	600	608	0.47	0.47 <sup>+</sup>	5	256	264	0.66	0.66 <sup>+</sup>
10	Au покрытие держателя	3.09	3.0	5	608	616	0.22	0.22 <sup>+</sup>	5	264	272	0.3	0.3 <sup>+</sup>
11	Cu держатель	3.9	3.7	полубесконечный	616		2.63	2.63 <sup>+</sup>	полубесконечный	272		6.05	6.05 <sup>+</sup>
Суммарное $R_{th}^{tot}$				при 300 К:		15.38		19.39		при 300 К:		13.29	
				при 500 К:						при 500 К:		16.34	

Примечание. Сноски \* и <sup>+</sup> — то же, что и в табл. 2.

**Таблица 4.** Расчет  $R_{th}$  SiC-pin-структур с угонышенной до 2 мкм  $n^+$ -подложкой на золотом интегральном теплоотводе и с емкостью  $C_{pn} = 0.2$  пФ

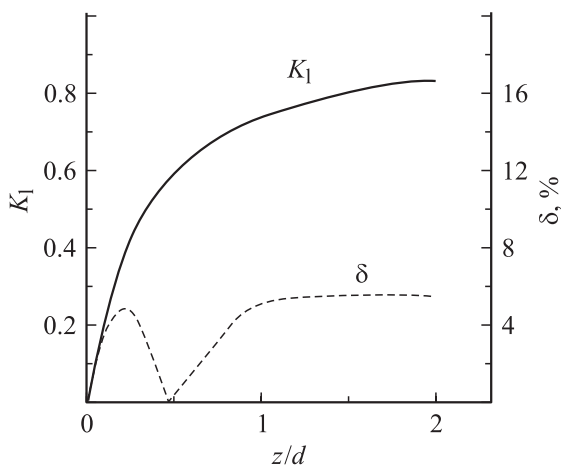
№ слоя на рис. 1	Материал слоев	$\lambda$ , Вт/(см · град)		$pin$ -структура с толщиной $n^-$ -области 6 мкм					$pin$ -структура с толщиной $n^-$ -области 2 мкм				
				Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт		Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт	
		300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К
3	SiC $n^-$ -область	3.8	1.8	6	160	170	0.79	1.65	2	92	96	0.8	1.67
4	SiC $n^+$ -область, подложка	2.9	1.8	2	170	173	0.32	0.51	2	96	99	0.95	1.53
5	Au теплоотвод	3.09	3.0	45	173	247	4.67	4.81	45	99	173	<b>10.61</b>	<b>10.94</b>
6	AuGe припой	1.47	~ 1.42	5	247	255	0.71	0.71 <sup>+</sup>	5	173	181	1.44	1.44 <sup>+</sup>
10	Au покрытие держателя	3.09	3.0	5	255	263	0.32	0.32 <sup>+</sup>	5	181	189	0.63	0.63 <sup>+</sup>
11	Cu держатель	3.9	3.7	полубесконечный	263		<b>6.23</b>	<b>6.23</b>	полубесконечный	189		8.6	8.6 <sup>+</sup>
Суммарное $R_{th}^{tot}$				при 300 К:		13.04		14.23		при 300 К:		23.03	
				при 500 К:						при 500 К:		24.81	

Примечание. Сноска <sup>+</sup> — то же, что и в табл. 2.

**Таблица 5.** Расчет  $R_{th}$  SiC-*pin*-структур с утоньшенной до 2 мкм  $n^+$ -подложкой на золотом интегральном теплоотводе и с емкостью  $C_{pn} = 0.2$  пФ

№ слоя на рис. 1	Материал слоев	$\lambda$ , Вт/(см · град)		<i>pin</i> -структура с толщиной $n^-$ -области 6 мкм					<i>pin</i> -структура с толщиной $n^-$ -области 2 мкм				
		300 К	500 К	Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт		Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт	
					верхний	нижний	300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К
3	SiC $n^-$ -область	3.8	1.8	6	160	170	0.79	1.65	2	92	96	0.8	1.67
4	SiC $n^+$ -область, подложка	2.9	1.8	2	170	173	0.32	0.51	2	96	99	0.95	1.53
5	Au теплоотвод	3.09	3.0	45	173	247	<b>4.67</b>	<b>4.81</b>	45	99	173	<b>10.61</b>	<b>10.94</b>
6	AuGe припой	1.47	~ 1.42	5	247	255	0.71	0.71 <sup>+</sup>	5	173	181	1.44	1.44 <sup>+</sup>
7	Au покрытие алмаза	3.09	3.0	2	255	258	0.13	0.13 <sup>+</sup>	2	181	184	0.25	0.25 <sup>+</sup>
8	Алмаз пьед. тип IIa	22	10	200	258	600	0.73	0.73 <sup>+</sup>	200	184	600	1.09	1.09 <sup>+</sup>
		13	6				1.22	1.22 <sup>+</sup>				1.84	1.84 <sup>+</sup>
9	Au покрытие алмаза	3.09	3.0	2	600	600	0.09	0.09 <sup>+</sup>	2	600	600	0.09	0.09 <sup>+</sup>
10	Au покрытие держателя	3.09	3.0	5	600	608	0.22	0.22 <sup>+</sup>	5	600	608	0.22	0.22 <sup>+</sup>
11	Cu держатель	3.9	3.7	полубесконечный	608		2.63	2.63 <sup>+</sup>	полубесконечный	608		2.63	2.63 <sup>+</sup>
Суммарное $R_{th}^{tot}$ для алмаза тип IIa						при 300 К:		10.29				18.08	
						при 500 К:		11.48				19.86	
для алмаза тип IIb						при 300 К		10.78				18.83	
						при 500 К		11.97				20.61	

Примечание. Сноска <sup>+</sup> — то же, что и в табл. 2.



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента  $K_1$  и относительной погрешности расчета  $\delta$  от толщины слоя ( $z = H_c$ ) и диаметра ( $d$ ) входящего теплового потока.

Если толщина теплопроводящего слоя  $H_1 > 2d_{up}$ , т.е. слой очень толстый. Тогда тепловое сопротивление в нем может быть рассчитано по формуле для растекания в полубесконечное по толщине тело:

$$R_{th} = \frac{1}{\pi d_{up} \lambda_1}. \quad (2)$$

В случае, если толщина слоя  $H_1$  находится в пределах  $0.1d_{up} < H_1 < 2d_{up}$ , то расчет  $R_{th}$  ведется с учетом растекания теплового потока в слое по формуле

$$R_{th} = \frac{2K_1}{\pi d_{up} \lambda_1}, \quad (3)$$

где  $K_1$  — коэффициент, учитывающий растекание теплового потока, определяется по графику [4], показанному на рис. 3.

**Таблица 6.** Расчет  $R_{th}$  SiC-pin-структур с утоньшенной до 50 мкм  $n^+$ -подложкой на алмазном пьедестале и с емкостью  $C_{pn} = 0.2$  пФ

№ слоя на рис. 1	Материал слоев	$\lambda$ , Вт/(см·град)		pin-структура с толщиной $n^-$ -области 6 мкм				pin-структура с толщиной $n^-$ -области 2 мкм					
		300 К	500 К	Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт		Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт	
					верхний	нижний	300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К
3	SiC $n^-$ -область	3.8	1.8	6	160	170	0.79	1.65	2	92	96	0.8	1.67
4	SiC $n^+$ -область, подложка	2.9	1.8	50	170	253	<b>5.36</b>	<b>7.55*</b>	50	96	176	<b>10.02</b>	<b>17.47*</b>
5	Au нижний контакт	3.09	3.0	2	253	256	0.13	0.13 <sup>+</sup>	2	176	179	0.26	0.26 <sup>+</sup>
6	AuGe припой	1.47	~ 1.42	5	256	264	0.66	0.66 <sup>+</sup>	5	179	187	1.38	1.38 <sup>+</sup>
7	Au покрытие алмаза	3.09	3.0	2	264	268	0.12	0.12 <sup>+</sup>	2	187	191	0.24	0.24 <sup>+</sup>
8	Алмаз пьед. тип IIa	22	10	200	268	600	0.78	0.78 <sup>+</sup>	200	191	600	1.05	1.05 <sup>+</sup>
		13	6				1.32	1.32 <sup>+</sup>				1.76	1.76 <sup>+</sup>
9	Au покрытие алмаза	3.09	3.0	2	600	600	0.09	0.09 <sup>+</sup>	2	600	600	0.09	0.09 <sup>+</sup>
10	Au покрытие держателя	3.09	3.0	5	600	608	0.22	0.22 <sup>+</sup>	5	600	608	0.22	0.22 <sup>+</sup>
11	Cu держатель	3.9	3.7	полубесконечный	608		2.63	2.63 <sup>+</sup>	полубесконечный	608		2.63	2.63 <sup>+</sup>
Суммарное $R_{th}^{tot}$		для алмаза тип IIa		при 300 К:		10.78						16.69	
		для алмаза тип IIb		при 500 К:		13.85						25.05	
				при 300 К		11.32						17.4	
				при 500 К		14.39						25.76	

Примечание. Сноски \* и <sup>+</sup> — то же, что и в табл. 2.

Расчет диаметра выходящего из слоя теплового потока  $d_{low}$  определяется следующим образом. Сначала определяется координата излома  $z_b$  (рис. 2) по формуле

$$z_b = \frac{d_{up}}{2(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)} = 0.622d_{up}, \quad (4)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha = 1.699$  и  $\operatorname{tg} \beta = 0.835$  определены в работе [4] для случая круглого источника тепла. Если толщина слоя  $H_1$  не превышает значения координаты излома  $z_b$ , т. е.  $H_1 < 0.622d_{up}$ , то нижний диаметр теплового потока, выходящего из слоя,  $d_{low}$ , составляет

$$d_{low} = d_{up} + 2H_1 \operatorname{tg} \beta = d_{up} + 1.67H_1. \quad (5)$$

Если же толщина слоя  $H_1 > 0.622d_{up}$ , то

$$d_{low} = 2H_1 \operatorname{tg} \alpha \approx 3.4H_1. \quad (6)$$

Но в этом случае может начать действовать ограничение поперечных размеров слоя. Так, например, если размер кристалла SiC составляет  $600 \times 600$  мкм, а толщина  $H_{n^+} = 360$  мкм (см. рис. 1, слой 4, табл. 2), то по формуле (6) диаметр теплового потока достигает размера кристалла 600 мкм уже на расстоянии 176 мкм от поверхности кристалла. В этом случае тепловое сопротивление слоя  $R_{th}$  до толщины 176 мкм определяется по формуле (3), а ниже по слою уже по формуле (1).

Относительная погрешность определения средних значений теплового сопротивления слоев по данной методике не превышает 5% [4].

Расчет теплового сопротивления по вышеуказанным моделям проводился послойно для температуры слоев 300 и 500 К, так как теплопроводность материалов

Таблица 7. Расчет  $R_{th}$  кремниевой *pin*-структуры на золотом интегральном теплоотводе и с емкостью  $C_{pn} = 0.2$  пФ

№ слоя на рис. 1	Материал слоев	$\lambda$ , Вт/(см·град)		Si- <i>pin</i> -структура с толщиной $n^-$ -области 6 мкм					Si- <i>pin</i> -структура с толщиной $n^-$ -области 2 мкм				
				Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт		Толщина, мкм	Диаметр слоя, мкм		$R_{th}$ слоя, град/Вт	
		300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К		верхний	нижний	300 К	500 К
3	Si $n^-$ -область	1.45	0.8	6	121	131	3.59	6.51	2	70	73	3.6	6.52
4	Si $n^+$ -область диффузии	0.8	0.45	1	131	133	0.93	1.64	1	73	74	3.98	5.3
5	Au (ihr) теплоотвод	3.09	3.0	45	133	207	6.76	6.97	45	74	148	<b>15.88</b>	<b>16.35</b>
6	AuGe припой	1.47	~ 1.42	5	207	215	1.01	1.01	5	148	156	1.97	1.97
10	Au покрытие держателя	3.09	3.0	5	215	223	0.44	0.44	5	156	164	0.84	0.84
11	Cu держатель	3.9	3.7	полубесконечный	223		<b>7.4</b>	<b>7.4</b>	полубесконечный	164		9.96	9.96
Суммарное $R_{th}^{tot}$				при 300 К:				20.13					35.23
				при 500 К:				23.97					40.94

Таблица 8.

Параметр	Единицы измерения	Вариант SiC- <i>pin</i> -структуры*														Кремниевая <i>pin</i> -структура	
		1	1	3 (IIa)	3 (IIb)	2	4 (IIa)	4 (IIb)	1	1	3 (IIa)	3 (IIb)	2	4 (IIa)	4 (IIb)		
Толщина $n^-$ -области	мкм	2	2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	6	6	2	6
Толщина $n^+$ -области	мкм	360	50	50	50	2	2	2	360	50	50	50	2	2	2	1	1
$R_{th,n^-}$ при 500 К	град/Вт	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	6.5	6.5
$R_{th,n^+}$ при 500 К	град/Вт	<b>26.3</b>	<b>17.5</b>	<b>17.5</b>	<b>17.5</b>	<u>1.5</u>	<u>1.5</u>	<u>1.5</u>	<b>14.3</b>	<b>7.6</b>	<b>7.6</b>	<b>7.6</b>	<u>0.5</u>	<u>0.5</u>	<u>0.5</u>	5.3	1.6
$R_{th}^{ihr}$ при 500 К	град/Вт	—	—	—	—	<b>10.9</b>	<b>10.9</b>	<b>10.9</b>	—	—	—	—	4.8	<b>4.8</b>	<b>4.8</b>	<b>16.4</b>	7.0
$R_{th}^{dia}$ при 300 К	град/Вт	—	—	1.0	1.7	—	1.1	1.8	—	—	0.8	1.3	—	0.7	1.2	—	—
$R_{th}^{holder}$ при 300 К	град/Вт	2.63	8.5	2.63	2.63	8.6	2.63	2.63	2.63	6.1	2.63	2.63	<b>6.2</b>	2.63	2.63	10.0	7.4
$R_{th}^{tot}$ при $T_{pn} = 300$ К	град/Вт	24.4	21.6	16.7	17.4	23.0	18.1	18.8	15.2	13.3	10.8	11.3	13.0	10.3	10.8	35.2	20.1
$R_{th}^{tot}$ при $T_{pn} = 500$ К	град/Вт	31.4	29.9	25.1	25.8	24.8	<u>19.9</u>	<u>20.6</u>	19.4	16.3	13.9	14.4	14.2	<u>11.5</u>	<u>12.0</u>	40.9	24.0

Примечание. \* 1 — типовая SiC-структура на медном позолоченном диодном теплоотводе; 2 — SiC-структура с полностью удаленной подложкой, на интегральном теплоотводе из Au толщиной 45 мкм и на медном позолоченном диодном теплоотводе; 3 — SiC-структура с утоньшенной подложкой, на алмазном пьедестале и на медном позолоченном диодном теплоотводе; 4 — SiC-структура с полностью удаленной подложкой, на интегральном теплоотводе из Au толщиной 45 мкм, на алмазном пьедестале и на медном позолоченном диодном теплоотводе; IIa и IIb — тип алмазного пьедестала;  $R_{th}^{ihr}$  и  $R_{th}^{dia}$  — тепловые сопротивления интегрального теплоотвода из Au и алмазного пьедестала;  $T_{pn}$  — температура *pn*-перехода.

слоев может достаточно сильно зависеть от температуры, особенно для полупроводников. Результаты расчетов для *pin*-структур с емкостью обедненного *pn*-перехода  $C_{pn} = 0.2$  пФ приведены в табл. 2–7.

Расчет  $R_{th}$  многослойных омических контактов *pin*-структур проводился только по одному слою — гальваническому золотому покрытию, как наиболее толстому и соответственно определяющему величину  $R_{th}$  омического контакта.

Пояснения к данным в таблицах 2–7:

— в графе „диаметр слоя“ начальный диаметр (верхний) определяется площадью *pn*-перехода, исходя из емкости  $C_{pn} = 0.2$  пФ и толщины  $n^-$ -области (слой 3) 2 или 6 мкм;

— увеличение диаметра слоя сверху вниз (рис. 1) объясняется увеличением площади теплового потока по мере движения его от источника (*pn*-перехода) к внешнему теплоотводу.

Ограничение площади потока определяется только размером структуры (в данном случае 600 мкм);

– в графе „ $R_{th}$  слоя“ при 500 К имеется в виду, что  $pn$ -переход разогрет выделяемой в нем мощностью до 500 К, тогда как теплоотвод находится при комнатной температуре;

– расчет  $R_{th}$  для держателя из меди проводился для всех вариантов так же, как при случае растекания в полубесконечное тело;

– жирным шрифтом в таблицах выделены максимальные слоевые значения  $R_{th}$ .

### 3. Анализ полученных результатов

Далее рассматривается расчет теплового сопротивления кремниевого  $pin$ -диода на интегральном теплоотводе с  $C_{pn} = 0.2$  пФ и толщиной  $n^-$ -области 2 и 6 мкм.

Для облегчения анализа результатов расчета и выбора оптимальной с точки зрения минимизации теплового сопротивления конструкции SiC- $pin$ -диода все основные данные сведены в табл. 8. Там же представлены для сравнения данные по кремниевому диоду с  $pin$ -структурой на интегральном теплоотводе.

Из приведенных результатов расчетов видно, что максимальным тепловым сопротивлением при 500 К обладают диодные структуры с толстой  $n^+$ -подложкой толщиной  $H_{n^+} = 360$  мкм, это  $R_{th}^{tot} = 31.4$  град/Вт (табл. 2, 8) и  $R_{th}^{tot} = 19.4$  град/Вт (табл. 3, 8) для структур с толщиной  $n^-$ -области 2 и 6 мкм соответственно, причем основная доля теплового сопротивления приходится на  $n^+$ -подложку, это  $R_{thn^+} = 26.3$  и 14.3 град/Вт соответственно. Уменьшение толщины подложки до 50 мкм позволяет снизить тепловое сопротивление  $n^+$ -области  $R_{thn^+}$  с 26.3 до 17.5 град/Вт (на 35%) и с 14.3 до 7.6 град/Вт (на 47%) соответственно, в то время как общее тепловое сопротивление  $R_{th}^{tot}$  снижается только на 5% для  $n-n^+$ -структур толщиной 2 мкм (с 31.4 до 29.9 град/Вт), а для структур толщиной 6 мкм — на 16% (с 19.4 до 16.3 град/Вт), что связано с усилением роли теплового сопротивления растекания в медном теплоотводе-держателе  $R_{th}^{holder}$  по мере уменьшения диаметра теплового потока:  $R_{th}^{holder}$  увеличивается с 2.63 до 8.5 град/Вт и до 6.1 град/Вт. В идеальном случае, когда  $n^+$ -подложка убрана практически полностью ( $H_{n^+} = 2$  мкм), тепловое сопротивление  $R_{thn^+}$  падает до 1.5 и 0.5 град/Вт для структуры с  $n^-$ -областью 2 и 6 мкм соответственно и уже не является определяющим в составе теплового сопротивления диода. Введение в конструкцию диода алмазного пьедестала (теплоотвода) дает возможность дополнительно снизить  $R_{th}^{tot}$  примерно на 20% с 24.8 до 19.9 град/Вт и с 14.4 до 11.5 град/Вт для структур с базой 2 и 6 мкм ( $n^+$ -областью) соответственно. Как показывают расчеты, влияние модификации алмазного пьедестала (тип Па или Пв) на общее тепловое сопротивление примерно одинаково, разница всего в 3%.

Типовой диод с кремниевой  $pin$ -структурой на интегральном теплоотводе имеет  $R_{th}^{tot}$  на 25–30% больше, чем диод с SiC-структурой на толстой подложке с  $H_{n^+} = 360$  мкм, и в 2 раза больше, чем диод с SiC-структурой на интегральном теплоотводе с алмазным пьедесталом. Основными причинами такой разницы являются высокая диэлектрическая проницаемость кремния  $\epsilon = 11.8$  (у карбида кремния  $\epsilon = 6.7$ ) и относительно низкая теплопроводность  $\lambda = 0.45–0.8$  град/Вт при 500 К у кремния против 1.8 град/Вт у карбида кремния.

### 4. Заключение

В результате проведения расчетов определены значения суммарного теплового сопротивления  $R_{th}^{tot}$  для различных конструктивных моделей SiC- $pin$ -диодов с емкостью перехода  $C_{pn} = 0.2$  пФ. Минимальное значение  $R_{th}^{tot}$  получено для „идеальной“ конструкции диода: SiC-структуры с утоньшенной до 2 мкм подложкой с золотым интегральным теплоотводом толщиной 45 мкм на алмазном теплоотводе (пьедестале размером  $0.6 \times 0.6 \times 0.2$  мм). Минимальные значения сопротивления составляют  $R_{th}^{tot} = 11.5–12$  град/Вт для  $n^-$ -области 6 мкм и  $R_{th}^{tot} = 19.9–20.6$  град/Вт для  $n^-$ -области 2 мкм. Кроме того, эта конструкция должна обладать и минимальным электрическим сопротивлением потерь, так как полностью исключается сопротивление потерь в подложке ( $n^+$ -области). Однако эту конструкцию очень трудно реализовать на практике, так как еще никто не получил SiC-мембраны толщиной 5–10 мкм, что легко осуществляется в кремниевой технологии методом химико-динамического травления.

Из вариантов конструкции SiC-диодов, рассмотренных здесь, интересно и, вероятно, можно реализовать конструкцию  $pin$ -структуры с утоньшенной до 50 мкм подложкой, напаянной на алмазный теплоотвод. Этот вариант позволит уменьшить тепловое сопротивление диода, а также снизить сопротивление потерь диода за счет уменьшения толщины подложки и соответственно повысить уровень коммутируемой диодом СВЧ мощности по сравнению с базовым вариантом.

Работа выполнена при поддержке по программам ИНТАС (01-603) и НАТО (SfP-978011).

### Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, В.Е. Челноков. ФТП, **33**, 1096 (1999).
- [2] E.A. Burgenteister, W. von Muench, E. Pettenpaul. J. Appl. Phys., **50**, 5790 (1979).
- [3] M.E. Levinshstein, S.L. Romyantsev, M.S. Shur. *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons, Inc, 2001) Chap. 5, p. 93.
- [4] А.Л. Захаров, Е.И. Асвадурава. *Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов* (М., Радио и связь, 1983).

- [5] K.V. Vassilevskii, K. Zekentes, A.V. Zorenko, L.P. Romanov.  
Mater. Res. Soc. Symp. **622**, Т 1.8.1. (2000).

Редактор Т.А. Полянская

## Thermal calculation of SiC *pin*-diodes

*P.B. Gamuletskaya\**, *A.V. Kirillov\**, *A.A. Lebedev*,  
*L.P. Romanov\**, *V.A. Smirnov\**

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
\* „Svetlana–Electronpribor“, Co.,  
St. Petersburg, Russia

**Abstract** Calculations of the thermal resistance of SiC for different models of *pin*-diodes were made for the junction capacitance at a reverse voltage  $C_{pn} = 0.2$  pF and substrates of  $-360$ ,  $50$  and  $2\mu\text{m}$ . Results obtained were compared with data for a silicon *pin*-diode structure on an integrated heat sink.