

Рис. 3. Функциональная схема измерений оптоволоконного пирометра ИИ – источник излучения с генератором высоких частот; Л – линза; а – расстояние от источника излучения до линзы; f – фокусное расстояние линзы; OB – оптическое волокно; ПИ – приемник излучения с электронной схемой усиления и цифровой обработки сигнала; ЭПС – электронный преобразователь сигнала; УИ – устройство индикации

#### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По паспортным данным пирометра ПД-10 быстродействие прибора составляет 2 мс, что подтвердилось в результате эксперимента. А также выяснили, что без конденсатора уровень шума равен уровню получаемого сигнала. Поэтому необходимо уменьшать емкость до тех пор, пока уровень шума станет намного меньше уровня сигнала. При этом достигнуть максимального быстродействия.

## VI. Выводы и заключение

В результате работы можно сделать следующие выводы: паспортные значения пирометра подтвердились, необходимо найти компромисс между быстродействием и уровнем шума.

Для уменьшения постоянной времени и уровня шумов необходимо провести следующую модернизацию пирометра: уменьшить емкость конденсатора фильтра, создать новое программное обеспечение, в котором внутренняя фильтрация сведена к минимуму.

## Список литературы

1. Смирнов А. Н., Неделькович Л., Джурджевич М. [и др.]. Расчет температуры ликвидус стали // Сталь. 1996. № 3. С. 15–19.

2. Жуков Л. Ф., Гончаров А. Л., Бунза А. Б. [и др.]. Термоэлектрический и оптический периодический контроль температуры металла // Литье-2013: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 80–81.

3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

# УДК 621.315.592

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ДЫРОК В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

И. В. Иванов<sup>1</sup>, А. Г. Козлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия <sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования подвижности дырок в трёх политипах карбида кремния (SiC): 3C, 4H и 6H. Рассмотрены два подхода: использование температурнозависимой модели Caughey-Thomas и применение модели Arora. Использованы параметры моделей, приведённые в литературе. Показано, что существующая модель подвижности дырок в 3C-SiC может быть значительно усовершенствована. Предложены новые параметры модели Arora, позволяющие более точно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC в широком диапазоне температур (100...1000 K). Кроме того, представлены температурные зависимости относительной погрешности моделирования подвижности для трёх рассмотренных политипов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании карбидокремниевых электронных приборов. Ключевые слова: 3C-SiC, карбид кремния, подвижность дырок, температурная зависимость подвижности.

### DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-136-142

## I. Введение

Карбид кремния (SiC) считается перспективным широкозонным полупроводниковым материалом для высоковольтной, высокотемпературной и силовой электроники. Он обладает экстраординарными электрофизическими свойствами и в настоящее время является коммерчески доступным. На основе SiC изготавливаются диоды различных типов, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры и другие полупроводниковые приборы. Современное состояние SiC-электроники подробно описано в работах [1–5].

Существует большое количество различных политипов SiC. Широкое распространение в электронике получили политипы 3C, 4H и 6H. Основные области их применения различны. Так, на основе 3C-SiC изготавливаются силовые приборы, 4H-SiC применяется в силовой и высокочастотной электронике, а 6H-SiC используется при производстве светодиодов [6].

При проектировании полупроводниковых приборов возникает задача моделирования их характеристик. Надлежащему решению данной задачи способствует применение точных моделей основных электрофизических параметров используемых материалов. Одним из таких параметров является подвижность дырок.

#### II. Постановка задачи

В работе [7] была предложена модель Caughey-Thomas (СТ), предназначенная для описания подвижности основных носителей заряда в кремнии как функции концентрации легирующих примесей. В дальнейшем она была дополнена параметром, необходимым для учёта влияния температуры. Коэффициенты, позволяющие моделировать температурную зависимость подвижности дырок в 4H- и 6H-SiC, были подобраны в работах [8, 9].

Модель Arora, характеризующаяся повышенной точностью, была предложена в работе [10]. В настоящее время она находит широкое применение при моделировании подвижности дырок во всех трёх рассматриваемых политипах SiC [11–13].

Целью данного исследования является анализ и доработка существующих температурно-зависимых моделей подвижности дырок в карбиде кремния трёх политипов: 3С, 4Н и 6Н.

# III. ТЕОРИЯ

Зависимость подвижности основных носителей заряда µ от концентрации примесей описывается моделью СТ [7]

$$\mu(N_A, N_D) = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^{\alpha}},$$
(1)

где N<sub>A</sub> – концентрация акцепторов; N<sub>D</sub> – концентрация доноров; μ<sub>min</sub>, μ<sub>max</sub>, N<sub>ref</sub> и α – параметры модели.

Следует отметить, что в работе [7] подвижность дырок описана как функция  $N_A$ . Однако подавляющее большинство современных авторов указывает на то, что подвижность (как дырок, так и электронов) является функцией суммы  $N_A + N_D$  [9, 11, 12].

Влияние температуры *Т* может быть учтено путём введения в (1) дополнительного параметра β [8, 9]:

$$\mu(N_A, N_D, T) = \mu_{min} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^{\alpha}} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta},$$
(2)

$$\mu(N_A, N_D, T) = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^{\alpha}} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta},\tag{3}$$

где  $T_0 = 300$  К.

Более точная модель Arora [10] основана на использовании выражения (1) с температурно-зависимыми параметрами

$$\mu_{min}(T) = \mu_0^{min}(T/T_0)^{\beta_{min}}, \qquad (4)$$

$$\mu_{max}(T) = \mu_0^{max} (T/T_0)^{\beta_{max}}, \qquad (5)$$

$$N_{ref}\left(T\right) = N_0^{ref} \left(T/T_0\right)^{\beta_N},\tag{6}$$

$$\alpha(T) = \alpha_0 (T/T_0)^{\beta_\alpha}, \qquad (7)$$

где  $\mu_0^{min}$ ,  $\mu_0^{max}$ ,  $N_0^{ref}$  и  $\alpha_0$  – значения соответствующих параметров при  $T = T_0$ ;  $\beta_{min}$ ,  $\beta_{max}$ ,  $\beta_{ref}$  и  $\beta_{\alpha}$  – температурные коэффициенты.

Для вычисления погрешности аппроксимации δ может быть использовано выражение

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} \frac{\left(\mu'_{j} - \mu_{j}\right)^{2}}{\mu_{j}^{2}} \times 100\%},$$
(8)

где M – число экспериментальных точек;  $\mu'_j$  – вычисленное значение подвижности носителей заряда;  $\mu_j$  – экспериментальное значение подвижности носителей заряда.

Описанные выше подходы широко используются при моделировании подвижности электронов и дырок в различных политипах SiC [8, 9, 11–15]. Следует отметить, что представленные модели описывают подвижность основных носителей заряда в слабом поле. Для анализа подвижности в сильном поле применяются другие модели [16], рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были построены температурные зависимости подвижности дырок в 4H- и 6H-SiC, полученные на основе моделей (2, 3) и параметров, приведённых в работах [8] и [9] соответственно. В [8] отмечается, что температурный коэффициент β для 4H-SiC находится в диапазоне 1.8...2.0. В настоящем исследовании β принят равным 1.8, поскольку при этом ошибка аппроксимации δ минимальна. Результаты вычислений и экспериментальные данные [14, 17] представлены на рис. 1.



Рис. 1. Подвижность дырок (температурно-зависимая модель СТ): сплошные линии – результаты вычислений, точки – экспериментальные данные

Видно, что температурно-зависимая модель СТ не позволяет точно описывать подвижность дырок в широком диапазоне температур и концентраций. На интервале 300...600 К (силовые приборы обычно проектируются для работы при таких температурах [11, 18]) ошибка аппроксимации δ, вычисленная с использованием выражения (8), составила 125% для 4H- и 28% для 6H-SiC. Попытки моделирования подвижности дырок в 3C-SiC с помощью выражений (2) и (3), насколько известно авторам, в литературе не описаны.

Для получения более точных результатов были построены зависимости, полученные на основе модели Arora (1, 4–7) и параметров, приведённых в работах [11–13]. Результаты вычислений и экспериментальные данные ([19] для 3C-SiC) представлены на рис. 2.



Рис. 2. Подвижность дырок (модель Arora): сплошные линии – результаты вычислений, точки – экспериментальные данные

Ошибка аппроксимации δ на интервале температур 300...600 К составила 26%, 6% и 36% для 3С-, 4H- и 6H-SiC соответственно. В диапазоне 100...1000 К она составила 11% (4H-SiC) и 94% (6H-SiC). Для 3C-SiC ошибка существенно превысила 100%. Таким образом, в широком диапазоне температур результаты моделирования с применением подхода Arora лучше согласуются с экспериментальными данными, чем результаты вычислений, основанных на уравнениях (2, 3). Однако параметры, приведённые в [11], не позволяют адекватно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC при температурах ниже 300 К.

Модель подвижности дырок в 3C-SiC была оптимизирована (рис. 3).



Рис. 3. Подвижность дырок в 3C-SiC (модель Arora с параметрами, предложенными в данной статье): сплошные линии – результаты вычислений, точки – экспериментальные данные

Параметры температурно-зависимой модели СТ и модели Arora, представленные в литературе, а также параметры, полученные в данной работе, приведены в табл. 1.

Параметр	Значение					
	3C		4H		6H	
	Arora [11]	Arora	CT (2) [8]	Arora [12]	CT (3) [9]	Arora [13]
		(данная				
		работа)				
$\mu_0^{min}$ (cm <sup>2</sup> ·B <sup>-1</sup> ·c <sup>-1</sup> )	15.0	15.0	15.9	0.0	5.0	18.0
$\mu_0^{max}$ (cm <sup>2</sup> ·B <sup>-1</sup> ·c <sup>-1</sup> )	70.0	70.0	124.0	113.5	75.0	44.0
$N_0^{ref}$ (cm <sup>-3</sup> )	5.00×10 <sup>19</sup>	$4.50 \times 10^{18}$	$1.76 \times 10^{19}$	$2.40 \times 10^{18}$	$1.00 \times 10^{19}$	$1.50 \times 10^{19}$
$\alpha_0$	0.30	0.55	0.34	0.69	0.50	1.60
β			-1.8		-3.0	
$\beta_{min}$	-0.50	1.30		-0.57		0.40
$\beta_{max}$	-2.5	-3.1		-2.6		-2.5
$\beta_N$	0.0	9.0		2.9		7.8
$\beta_{\alpha}$	0.0	-0.2		-0.2		0.5
δ (%, 300600 K)	26	23	125	6	28	36
δ (%, 1001000 K)		26		11		94

# ТАБЛИЦА 1 ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ

Ошибка аппроксимации  $\delta$  на интервале температур 100...1000 К составила 26%, то есть существенно снизилась. В диапазоне 300...600 К  $\delta$  составила 23%, что несколько ниже ошибки, полученной при использовании параметров из [11] ( $\delta$  = 26%). Модель, описанная в работе [15], также является менее точной (как в диапазоне 100...1000 К, так и на интервале 300...600 К). Таким образом, параметры модели Arora, предложенные в данной статье, способствуют более адекватному моделированию подвижности дырок в 3C-SiC.

### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе работы были подобраны значения параметров, позволяющие более точно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC с помощью подхода Arora. Данные параметры могут быть использованы при моделировании характеристик электронных приборов, основанных на 3C-SiC, в процессе их проектирования.

Температурные зависимости относительной погрешности моделирования  $\epsilon$  (%) были получены с использованием выражения

$$\varepsilon_j = \frac{\mu'_j - \mu_j}{\mu_j} \times 100\% \; .$$

Результаты вычисления є для 3С-, 4Н- и 6H-SiC приведены на рис. 4.

Видно, что модель Агога не позволяет точно описывать подвижность дырок в области низких температур. Так, максимальные абсолютные значения погрешности составляют 49% (при  $N_A + N_D = 1.8 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, T = 100 K) для 4H- и 561% (при  $N_A + N_D = 9.9 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, T = 136 K) для 6H-SiC. Максимальная погрешность моделирования подвижности дырок в 3C-SiC составляет 5 195% (при  $N_A + N_D = 2.5 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, T = 136 K) для параметров из [11] и 66% (при  $N_A + N_D = 2.5 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, T = 147 K) для параметров, предложенных в данной статье. Полученные температурные зависимости погрешности моделирования могут быть полезны при проектировании электронных приборов на основе SiC.



Рис. 4. Температурные зависимости относительной погрешности моделирования

#### VI. Выводы и заключение

Подобраны значения параметров, позволяющие более точно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC на основе подхода Arora. Кроме того, получены температурные зависимости относительной погрешности моделирования подвижности дырок в 3C-, 4H- и 6H-SiC. Представленные результаты могут быть использованы при проектировании карбидокремниевых электронных приборов.

#### Список литературы

1. She X., Huang A. Q, Lucía Ó., Ozpineci B. Review of silicon carbide power devices and their applications // IEEE Trans. Ind. Electron. 2017. Vol. 64, no. 10. P. 8193–8205. DOI:10.1109/TIE.2017.2652401.

2. Iacopi F., Van Hove M., Charles M., Endo K. Power electronics with wide bandgap materials: toward greener, more efficient technologies // MRS Bull. 2015. Vol. 40, no. 5. P. 390–395. DOI:10.1557/mrs.2015.71.

3. Kimoto. T. Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices // Jpn. J. Appl. Phys. 2015. Vol. 54, no. 4. P. 040103. DOI:10.7567/JJAP.54.040103.

4. Millán J., Godignon P., Perpiñà X., Pérez-Tomás A., Rebollo J. A survey of wide bandgap power semiconductor devices // IEEE Trans. Power Electron. 2014. Vol. 29, no. 5. P. 2155–2163. DOI:10.1109/TPEL.2013.2268900.

5. Kaminski N., Hilt O. SiC and GaN devices – wide bandgap is not all the same // IET Circuits, Devices Syst. 2014. Vol. 8, no. 3. P. 227–236. DOI:10.1049/iet-cds.2013.0223.

6. Saddow S. E. Silicon carbide materials for biomedical applications // Silicon carbide biotechnology: a biocompatible semiconductor for advanced biomedical devices and applications, 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2016. P. 1–25. DOI:10.1016/B978-0-12-802993-0.00001-0.

7. Caughey D. M., Thomas R. E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field // Proc. IEEE. 1967. Vol. 55, no. 12. P. 2192–2193. DOI:10.1109/PROC.1967.6123.

8. Schaffer W. J., Negley G. H., Irvine K. G., Palmour J. W. Conductivity anisotropy in epitaxial 6H and 4H SiC // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1994. Vol. 339. P. 595–600. DOI:10.1557/PROC-339-595.

9. Ruff M., Mitlehner H., Helbig R. SiC devices: physics and numerical simulation // IEEE Trans. Electron Devices. 1994. Vol. 41, no. 6. P. 1040–1054. DOI:10.1109/16.293319.

10. Arora N. D., Hauser J. R., Roulston D. J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature // IEEE Trans. Electron Devices. 1982. Vol. ED-29, no. 2. P. 292–295. DOI:10.1109/T-ED.1982.20698.

11. Arvanitopoulos A., Lophitis N., Gyftakis K. N., Perkins S., Antoniou M. Validated physical models and parameters of bulk 3C-SiC aiming for credible technology computer aided design (TCAD) simulation // Semicond. Sci. Technol. 2017. Vol. 32, no. 10. P. 104009. DOI:10.1088/1361-6641/aa856b.

12. Hatakeyama T., Fukuda K., Okumura H. Physical models for SiC and their application to device simulations of SiC insulated-gate bipolar transistors // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60, no. 2. P. 613–621. DOI:10.1109/TED.2012.2226590.

13. Ivanov I. V., Kozlov A. G. Hole mobility model for 6H-SiC thermoresistive sensors simulation // Proc. SIB-CON, Apr. 18–20, 2019. Tomsk, Russia, 2019. URL: http://ieee.tpu.ru/sibcon/sbornik/papers/u730.pdf (дата обращения: 07.03.2019).

14. Koizumi A., Suda J., Kimoto T. Temperature and doping dependencies of electrical properties in Al-doped 4H-SiC epitaxial layers // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106, no. 1. P. 013716. DOI:10.1063/1.3158565.

15. Arvanitopoulos A., Lophitis N., Perkins S., Gyftakis K. N., Belanche Guadas M., Antoniou M. Physical parameterisation of 3C-silicon carbide (SiC) with scope to evaluate the suitability of the material for power diodes as an alternative to 4H-SiC // Proc. IEEE SDEMPED, Aug. 29–Sept. 1, 2017. Tinos, Greece, 2017. P. 565–571. DOI:10.1109/DEMPED.2017.8062411.

16. Canali C., Majni G., Minder R., Ottaviani G. Electron and hole drift velocity measurements in silicon and their empirical relation to electric field and temperature // IEEE Trans. Electron Devices. 1975. Vol. 22, no. 11. P. 1045–1047. DOI:10.1109/T-ED.1975.18267.

17. Van Daal H. J., Knippenberg W. F., Wasscher J. D. On the electronic conduction of  $\alpha$ -SiC crystals between 300 and 1500°K // J. Phys. Chem. Solids. 1963. Vol. 24, no. 1. P. 109–127. DOI:10.1016/0022-3697(63)90046-5.

18. Zetterling C.-M., Hallén A., Hedayati R., Kargarrazi S., Lanni L., Malm B. G., Mardani S., Norström H., Rusu A., Suvanam S. S., Tian Y., Östling M. Bipolar integrated circuits in SiC for extreme environment operation // Semicond. Sci. Technol. 2017. Vol. 32, no. 3. P. 034002. DOI:10.1088/1361-6641/aa59a7.

19. Yamanaka M., Daimon H., Sakuma E., Misawa S., Yoshida S. Temperature dependence of electrical properties of n- and p-type 3C-SiC // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 61, no. 2. P. 599–603. DOI:10.1063/1.338211.