

# Полуэмпирическая модель подвижности носителей заряда в карбиде кремния для анализа ее зависимости от температуры и легирования

© Т.Т. Мнацаканов<sup>¶</sup>, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков

Всероссийский электротехнический институт,  
111250 Москва, Россия

(Получена 21 августа 2000 г. Принята к печати 7 сентября 2000 г.)

Проанализированы экспериментальные данные по подвижности электронов и дырок в трех поли типах карбида кремния: 4H-SiC, 6H-SiC и 3C-SiC. Предложена полуэмпирическая модель для описания зависимости подвижности основных носителей заряда от температуры и уровня легирования. Модель хорошо описывает сумму накопленных к настоящему времени экспериментальных данных и может оказаться полезной для моделирования характеристик многослойных структур на основе карбида кремния.

1. Карбид кремния (SiC) является одним из наиболее перспективных материалов современной силовой электроники [1]. На основе карбида кремния к настоящему времени уже созданы мощные выпрямительные диоды [2,3], фотодиоды [4] и диоды Шоттки [5], различные типы тиристоров [6,7] и транзисторов [8,9]. Дальнейший прогресс в разработке и оптимизации приборов на основе SiC невозможен без численного моделирования характеристик структур [10,11]. Опыт широкого использования численных методов для расчета характеристик кремниевых структур свидетельствует о том, что эффективность моделирования в значительной мере определяется адекватностью аппроксимаций, использованных для описания основных электрофизических параметров материала. Для кремния такие аппроксимации предложены и хорошо известны [12]. Однако для SiC ситуация оказывается прямо противоположной, в частности, для такого важного параметра материала, как подвижность носителей заряда. В литературе опубликован ряд работ [13–22], содержащих экспериментальные данные о зависимости подвижности от температуры и уровня легирования в различных поли типах SiC. Однако до сих пор не было предпринято попыток проанализировать накопленные к настоящему времени данные с единой точки зрения. Поэтому цель данной работы заключается в разработке соотношений и подборе параметров, позволяющих единым образом описать зависимость подвижности от температуры и легирования в карбиде кремния.

2. Экспериментальные данные, характеризующие зависимость подвижности основных носителей заряда от концентрации примесей при  $T = 300$  К, практически во всех исследованных полупроводниковых материалах хорошо описываются известным соотношением, предложенным в работе [23],

$$\mu_i = \mu_i^{\min} + \frac{\mu_i^{\max} - \mu_i^{\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i}} \quad (1)$$

где  $i = n, p$ ; значения параметров  $\mu_i^{\max}$ ,  $\mu_i^{\min}$ ,  $N_{ig}$ ,  $\gamma_i$  зависят от типа полупроводникового материала,  $N$  — концентрация легирующей примеси.

Проведенный нами анализ экспериментальных данных, приведенных в работах [13,14,16,20], показывает, что карбид кремния не является исключением из этого правила. В результате удалось установить, что в трех наиболее часто используемых поли типах карбида кремния 4H-SiC, 6H-SiC и 3C-SiC параметры  $\mu_i^{\max}$ ,  $\mu_i^{\min}$ ,  $N_{ig}$  и  $\gamma_i$  имеют значения, приведенные в таблице.

Тип носителей заряда	Поли тип	$\mu_i^{\max}$ , см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>	$\mu_i^{\min}$ , см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>	$N_{ig}$ , см <sup>-3</sup>	$\gamma_i$
Электроны	4H-SiC	880	30	$2 \cdot 10^{17}$	0.67
	6H-SiC	400	25	$10^{18}$	0.8
	3C-SiC	800	25	$3 \cdot 10^{17}$	0.87
Дырки	4H-SiC	117	33	$10^{19}$	0.5
	6H-SiC	95	25	$5 \cdot 10^{18}$	0.4

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные результаты измерения холловской подвижности электронов и дырок в 4H-SiC и 6H-SiC в зависимости от уровня легирования, полученные в работе [16], и расчетные кривые холловской подвижности, полученные с помощью формулы (1) и данных по фактору Холла, взятых из работы [20], а также найденных параметров расчета, представленных в таблице.

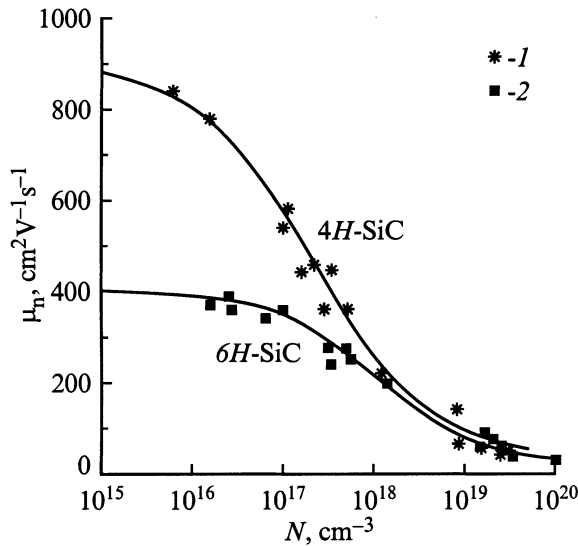
Зависимость подвижности от температуры может быть введена в рассматриваемую модель с помощью следующего рассуждения. При низком уровне легирования и достаточно высокой температуре рассеяние на фонах оказывается основным механизмом рассеяния носителей заряда. В соотношении (1) принимаем

$$\mu_i^{\max} = \mu_{iL} \quad (2)$$

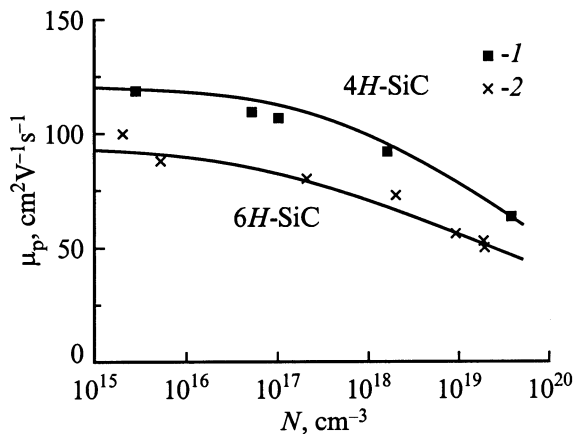
Записав зависимость подвижности от температуры в виде

$$\mu_L(T) = \mu_L(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\alpha},$$

<sup>¶</sup> E-mail: mnatt@vei.ru



**Рис. 1.** Зависимости холловской подвижности электронов от уровня легирования при  $T = 300$  К. 1 — экспериментальные данные для 4H-SiC из работы [16], 2 — то же для 6H-SiC; сплошные линии соответствуют расчету по формуле (1) с учетом данных по холл-фактору из работы [20].



**Рис. 2.** Зависимости холловской подвижности дырок от уровня легирования при  $T = 300$  К. Экспериментальные данные 1, 2 и сплошные линии — то же, что и на рис. 1.

из соотношения (2) получаем

$$\mu_i^{\max}(T) = \mu_i^{\max}(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\alpha_i}, \quad (3)$$

где  $T_0 = 300$  К.

Величину вклада рассеяния носителей на заряженных примесях можно получить, вычитая из соотношения (1) вклад, обусловленный рассеянием на фонах, с помощью правила Матиссена

$$\mu_{il} = \mu_i^{\max} \left[ \frac{\mu_i^{\max}}{\mu_i^{\max} - \mu_i^{\min}} \frac{1 + \left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i}}{\left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i}} - 1 \right]. \quad (4)$$

Используя (2) и (4), легко получить, что

$$\frac{\mu_i^{\max} - \mu_i^{\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i}} \left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i} = \frac{\mu_{iL}}{1 + \frac{\mu_{iL}}{\mu_i}}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (1) и учитывая, что [12]

$$\mu_L(T) = \mu_L(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\alpha}$$

и

$$\mu_I(T) = \mu_I(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta},$$

соотношение (1) можно привести к виду

$$\mu_i(N, T) = \mu_i^{\max}(T_0) \frac{B_i(N) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta_i}}{1 + B_i(N) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\alpha_i + \beta_i}}, \quad (6)$$

где

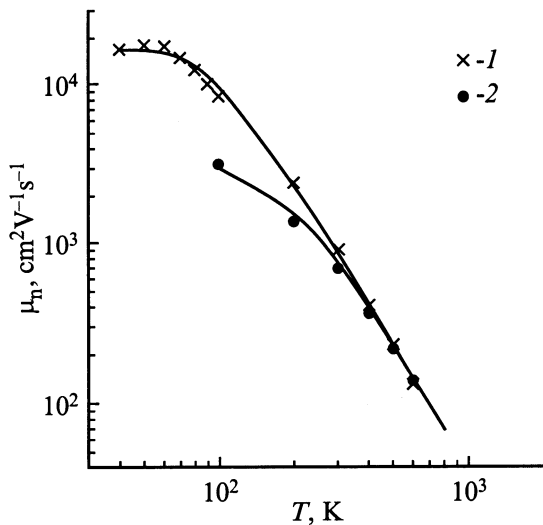
$$B_i(N) = \left[ \frac{\mu_i^{\max}}{\mu_i^{\max} - \mu_i^{\min}} \frac{1 + \left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i}}{\left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i}} - 1 \right]_{T=T_0}, \quad (7)$$

а  $T_0 = 300$  К.

3. Соотношения (6) и (7) качественно правильно описывают зависимость подвижности от температуры в пределах слабого и сильного легирования. При фиксированном уровне легирования соотношение (6) описывает наблюдающуюся экспериментально немонотонную зависимость подвижности от температуры, причем зависимость точки экстремума  $T = T_m$ , в которой  $d\mu/dT = 0$ , от уровня легирования и других параметров может быть представлена в виде

$$T_{mi} = T_0 \left[ \frac{\beta_i}{\alpha_i} \frac{1}{B_i(N)} \right]^{\frac{1}{\alpha_i + \beta_i}}. \quad (8)$$

Сопоставление соотношений (6)–(8) с имеющимися в литературе данными дает возможность определить эффективные значения входящих в них параметров. На рис. 3 приведены температурные зависимости холловской подвижности электронов в образцах 4H-SiC [15,16]. Наклон экспериментальных зависимостей в области высоких температур  $T \gtrsim 500$  К позволяет определить величину  $\alpha_n = 2.6$  для электронов. Значение  $T_{mn} \approx 50$  К для кривой 1 на рис. 1, которая, согласно расчету по формуле (1), соответствует концентрации доноров  $N = N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , позволяет определить величину  $\beta_n \approx 0.5$ . Результаты расчета зависимости  $\mu_n(T)$  в широком диапазоне температур для двух значений уровня легирования с помощью соотношений (1) и (6) показаны на рис. 3 сплошными линиями.



**Рис. 3.** Зависимости холловской подвижности электронов от температуры. Концентрация доноров  $N_d$ ,  $\text{см}^{-3}$ : 1 —  $5 \cdot 10^{14}$ , 2 —  $4 \cdot 10^{16}$ ; сплошные кривые — расчет по формулам (6) и (7) с учетом данных по холл-фактору из работы [20].

Воспользовавшись экспериментальными данными по политу типу 6H-SiC, приведенными в работах [16–19,22], можно получить, что в 6H-SiC эффективные значения параметров равны  $\alpha_n = 2.1$ ,  $\beta_n = 0.7$ ,  $\alpha_p = 2.0$ .

Обработка данных по политу типу 3C-SiC, приведенных в работах [13,14], позволила получить для 3C-SiC значения  $\alpha_n = 2.5$ ,  $\beta_n = 0.3$ ,  $\alpha_p = 2.2$ .

4. Полученные значения параметров  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  отличаются от теоретических, полученных в рамках простой зонной структуры полупроводника в [24]. Впрочем, такая же картина наблюдается и в других полупроводниковых материалах, например в германии ( $\alpha_n = 1.66$ ,  $\alpha_p = 2.33$ ), в кремнии ( $\alpha_n = 2.42$ ,  $\alpha_p = 2.2$ ), в арсениде галлия ( $\alpha_n = 1.0$ ,  $\alpha_p = 2.1$ ).

В качестве причин, обуславливающих это различие, можно назвать, во-первых, вклад дополнительных механизмов рассеяния, которые могут быть существенно различными в разных материалах, во-вторых, отличие реальной зонной структуры полупроводника от простой, использованной в [24]. В каждом конкретном материале выяснение этих причин требует дополнительного рассмотрения, которое может занять продолжительное время. В этих условиях предложенные соотношения (1), (6)–(8) могут быть полезными для описания и моделирования характеристик многослойных структур на основе карбида кремния.

Авторы благодарны М.Е. Левинштейну и П.А. Иванову за обсуждение работы и сделанные замечания.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

## Список литературы

- [1] T.P. Chow, V. Khemka, J. Fedison, N.R. Ramungul, K. Matocha, Y. Tang, R.J. Gutmann. *Sol. St. Electron.*, **44**, 277 (2000).
- [2] Y. Sugawara, K. Asano, R. Singh, J.W. Palmour. *Abstracts of Int. Conf on SiC and related materials (ICSCRM 1999)* Pres. 170.
- [3] A. Flasser, M. Chezzo, N. Krishnamurthy, J. Kretchmer, A.W. Glock, D.M. Brown, T.P. Chow. *Sol. St. Electron.*, **44**, 317 (2000).
- [4] F. Yang, J.H. Zhao, G.N. Olsen. *Sol. St. Electron.*, **44**, 341 (2000).
- [5] K.J. Schoen, J.M. Woodall, J.A. Cooper, M.R. Malloch. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **45**, 1595 (1998).
- [6] N.V. Dyakonova, P.A. Ivanov, V.A. Koslov, M.E. Levinstein, J.W. Palmour, S.L. Rumyantsev, R. Singh. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **46**, 2188 (1999).
- [7] B. Li, L. Cao, J.H. Zhao. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **20**, 219 (1999).
- [8] J. Spitz, M.R. Melloch, J.A. Cooper, M.A. Capano. *Mater. Sci. Forum*, **264–268**, 1005 (1999).
- [9] R. Schörner, P. Friedrichs, D. Peters, D. Stephani. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **20**, 241 (1999).
- [10] J. Wang, B.W. Williams. *Semicond. Sci. Technol.*, **13**, 806 (1998).
- [11] A. Elford, P.A. Mawby. *Microelectronics J.*, **30**, 524–527 (1999).
- [12] S. Selberherr. *Analysis and simulation of semiconductor devices*, (Wien-N.Y., Springer Verlag, 1984).
- [13] M. Yamanaka, H. Daimon, E. Sakuma, S. Misawa, S. Yoshida. *J. Appl. Phys.*, **61**, 599 (1987).
- [14] M. Shinohara, M. Yamanaka, H. Daimon, E. Sakuma, H. Okumura, S. Misawa, K. Endo, S. Yoshida. *Jap. J. Appl. Phys.*, **27**, L433 (1988).
- [15] W.J. Choyke, G. Pensl. *Mater. Res. Bull.*, № 25 (1997)
- [16] W.J. Schaffer, H.S. Kong, G.N. Nagley, J.W. Palmour. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **137**, 155 (1994).
- [17] R. Mickevicius, J.H. Zhao. *J. Appl. Phys.*, **83**, 3161 (1998).
- [18] G.D. Chen, J.Y. Lin, H.X. Jaing. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1341 (1996).
- [19] D.L. Barrett, R.B. Campbell. *J. Appl. Phys.*, **38**, 53 (1967).
- [20] G. Rutsch, R.P. Devaty, W.J. Choyke, D.W. Langer, L.B. Rowland. *J. Appl. Phys.*, **84**, 2062 (1998).
- [21] T. Kinoshita, M. Schadt, K.M. Itoh, J. Muto, G. Pensl. *Abstracts of Int. Conf. on SiC, III-Nitrides and Related Mater.* (Stockholm, Sweden, 1997) p. 631.
- [22] H.J. van Daal, W.F. Knippenberg, J.D. Wasscher. *J. Phys. Chem. Sol.*, **24**, 109 (1963).
- [23] D.M. Caughey, R.E. Thomas. *Proc. IEEE*, **55**, 2192 (1967).
- [24] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1977).

Редактор Т.А. Полянская

## **A semiempirical model in analysing the charge carrier mobility dependence on temperature and doping in silicon carbide**

T.T. Mnatsakanov, L.I. Pomortseva, S.N. Yurkov

All-Russian electrotechnical Institute,  
111250 Moscow, Russia

**Abstract** Experimental data on charge carrier mobility have been analyzed for three polytypes of the silicon carbide: *4H*-SiC, *6H*-SiC and *3C*-SiC. On the basis of this analysis, a semiempirical model for description of the charge carrier mobility dependence on temperature and doping is proposed. The model adequately describes experimental data accumulated by now in the current literature. The model can be applied for modeling and simulating SiC multilayer device characteristics.