

УДК 621.794.61

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

В.В. МУРАВЬЕВ, В.Н. МИЩЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 27 января 2017*

**Аннотация.** Приведены результаты моделирования процессов переноса электронов в трехмерной структуре из 4H-SiC карбида кремния с использованием метода Монте-Карло. Использование материала 4H-SiC по сравнению с другими модификациями карбида кремния позволяет получить ряд преимуществ при изготовлении приборов и последующей эксплуатации. Получены зависимости средней дрейфовой скорости, средней энергии электронов, подвижности электронов, а также коэффициента диффузии от напряженности электрического поля.

*Ключевые слова:* карбид кремния, процессы переноса электронов, метод Монте-Карло.

**Abstract.** The results of the simulation of electron transfer processes in the three-dimensional structure of 4H-SiC silicon carbide are presented using the Monte Carlo method. The dependence of the average drift velocity, average energy and electron mobility of electrons and the diffusion coefficient from the electric field are obtained.

*Keywords:* silicon carbide, electron transfer processes, Monte Carlo method.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 104, No. 2, pp. 53-58**

**Modeling of electrons transfer in silicon carbide semiconductor structures**

**V.V. Murav'ev, V.N. Mishchenka**

### Введение

Исследование процесса переноса электронов для полупроводниковых соединений и особенно для материала SiC, продолжает оставаться актуальной задачей, которая связана с разработкой мощных и быстродействующих приборов диапазонов СВЧ и КВЧ. Физические свойства карбида кремния, такие как большая ширина запрещенной зоны (2,2-3,2 эВ), высокая величина напряжения пробоя (2,5-3 МВ/см) и высокая теплопроводность (4-5 Вт/см·К), делают его привлекательным кандидатом для создания приборов с большим напряжением, высокой рабочей температурой и высокой выходной мощностью [1-3]. Одним из существенных преимуществ карбида кремния является возможность создания на его поверхности стабильного слоя оксида кремния, что позволяет изготавливать конструкции МОП устройства на их основе. Большие перспективы связаны с использованием карбида кремния в составе новых полупроводниковых приборов, которые используют новый двухмерный материал электроники – графен. Исследования показали, что материал 4H-SiC обладает более высокой подвижностью электронов, более высокой скоростью электронов при насыщении. Также материал 4H-SiC превосходит материалы 6H-SiC и 3C-SiC по величине напряжения пробоя, что позволяет создавать более мощные полупроводниковые структуры. Еще одним преимуществом материала 4H-SiC является самое низкое значение коэффициента анизотропии, равное приблизительно 0,83, в то время как значение этого параметра у материала 6H-SiC составляет величину приблизительно 5,2, что вызывает определенные недостатки у создаваемых на их основе полупроводниковых приборов [1-3]. В силу отмеченных достоинств

является актуальным изучение процессов переноса электронов в трехмерной структуре из материала 4H-SiC.

Наиболее корректным методом анализа физических процессов в такого рода структурах считается применение статистического метода Монте-Карло, который позволяет учесть все механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводнике и получить зависимости их распределения для стационарных и нестационарных процессов.

### Метод и особенности моделирования

Известно, что результаты моделирования с использованием метода Монте-Карло зависят от значений основных электрофизических параметров материала и параметров модели зоны проводимости. Материал карбид кремния вида 4H-SiC описывается моделью, представленной на рис. 1 и состоящей из электронных долин M-L-Г [4]. В разработанной программе моделирования процессов переноса носителей заряда с использованием метода Монте Карло для материала SiC были учтены наиболее важные механизмы рассеяния: на полярных оптических фононах, на примесях, на акустических фононах, междолинное рассеяние между неэквивалентными долинами [5–7]. При моделировании были использованы параметры для материала 4H-SiC, данные о которых приведены в табл. 1–2 [3]. При моделировании учитывались долины  $M_1$  и  $M_2$ , величина зазора между которыми определяется величиной параметра  $E_{SM} = 0,122$  эВ, и долина L.

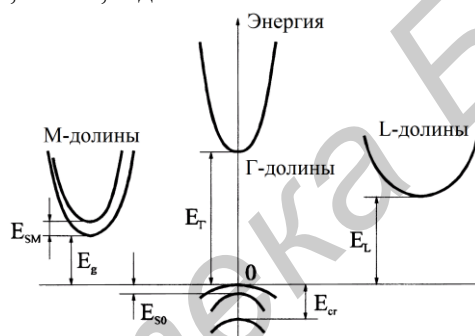


Рис. 1. Структура электронных долин в материале 4H-SiC

Таблица 1. Электрофизические параметры материала 4H-SiC

| Параметр, размерность                              | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Акустический деформационный потенциал, (эВ)        | 1,5                |
| Энергия полярного оптического фонона, (эВ)         | 0,12               |
| Константа междолинной связи, (эВ /м)               | $7 \cdot 10^{10}$  |
| Энергия междолинных и внутривалинных фононов, (эВ) | 0,0854             |
| Ширина запрещенной зоны $E_g$ , эВ                 | 3,2                |
| Плотность, (гр/см <sup>3</sup> )                   | 3,2                |
| Статическая диэлектрическая проницаемость          | 9,7                |
| Высокочастотная диэлектрическая проницаемость      | 6,5                |

Таблица 2. Параметры электронных долин материала 4H-SiC

| Долины   | $M_1$ | $M_2$ | L    |
|--|-------|-------|------|
| Эффективная масса электрона в параллельном направлении     | 0,28  | 0,71  | 0,15 |
| Эффективная масса электрона в перпендикулярном направлении | 0,42  | 0,35  | 0,66 |
| Междолинный зазор (эВ)                                     | –     | 0,122 | 0,7  |
| Коэффициент непараболичности (эВ <sup>-1</sup> ),          | 0,323 | 0,45  | 0,2  |

### Результаты моделирования

Используя процедуру метода Монте-Карло были исследованы особенности процесса переноса электронов в трехмерной SiC структуре при температуре  $T = 300$  К. Количество моделируемых частиц принималось равным 40000, количество элементарных ячеек (шагов) по длине структуры равнялось 100, по высоте – 20, а по ширине – 4. Концентрация электронов в структуре принималась равной  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При этом влияние высоколегированных контактных

областей на процессы переноса носителей заряда не учитывалось. Результаты моделирования процессов переноса электронов в материале 4H-SiC в зависимости от напряженности электрического поля  $F$  представлены на рис. 2–6.

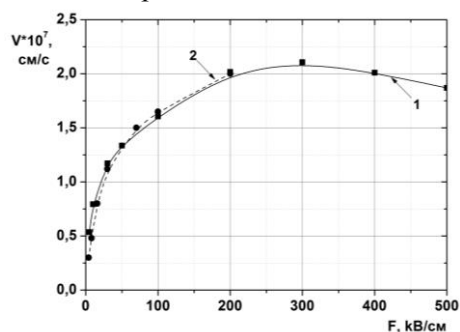


Рис. 2. Зависимость средней дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля

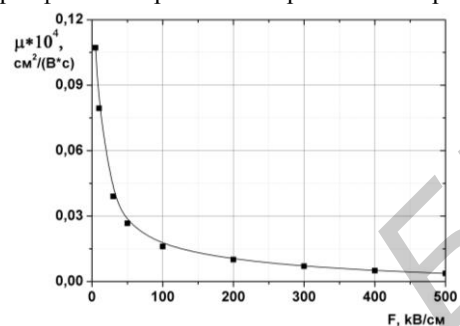


Рис. 3. Зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля

Зависимость средней дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля, полученная в результате моделирования, представлена кривой 1 на рис. 2. На этом же рисунке представлена кривой 2 аналогичная зависимость, полученная экспериментально для материала 4H-SiC в [8]. Как видно из анализа кривых 1 и 2, представленных на рис. 2, наблюдается довольно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

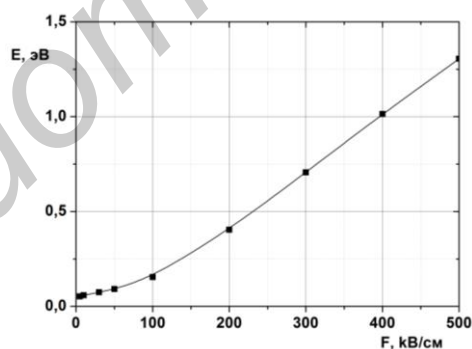


Рис. 4. Зависимость средней энергии электронов от напряженности электрического поля

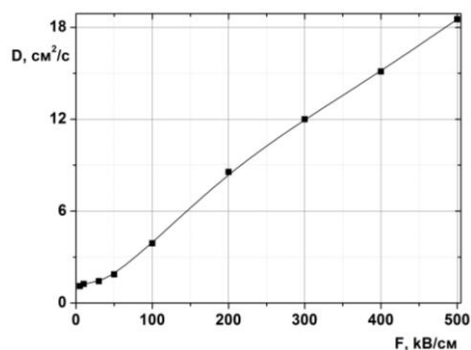


Рис. 5. Зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля

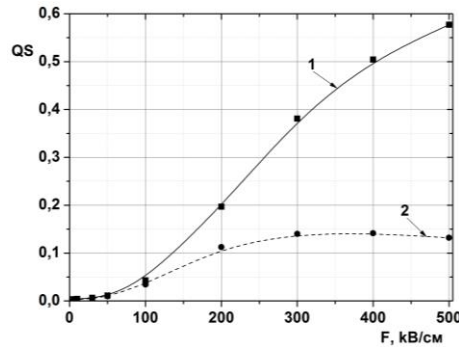


Рис. 6. Зависимости заселенности верхних долин  $M_2$  (кривая 1) и L (кривая 2) от напряженности электрического поля

На рис. 3 представлена зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля. Как видно из этого рисунка, величина подвижности электронов монотонно убывает с ростом напряженности электрического поля. Такой вид зависимости объясняется тем, что с ростом напряженности поля величина средней скорости не возрастает пропорционально, а замедляет свой рост и близка к насыщению при больших значениях  $F$ , что видно из рис. 2.

На рис. 4 показана зависимость средней энергии электронов от напряженности электрического поля. Величина средней энергии электронов монотонно увеличивается с ростом напряженности электрического поля. Такой же характер зависимости наблюдается для зависимости коэффициента диффузии электронов, представленной на рис. 5.

Зависимости заселенности верхних по отношению к долине  $M_1$  долин  $M_2$  (кривая 1) и L (кривая 2) от напряженности электрического поля представлены на рис. 6. Как видно из анализа рис. 6, количество электронов, которые заселяют долину  $M_2$  (кривая 1) увеличиваются быстрее, чем количество электронов, которые заселяют долину L (кривая 2). Данная особенность объясняется тем, что энергетический зазор между долинами  $M_1$  и  $M_2$  равен 0,122 эВ (табл. 2), в то время как энергетический зазор между долинами  $M_1$  и L значительно больше и составляет 0,7 эВ (табл. 2). Это означает, что при росте напряженности электрического поля увеличивается энергия согласно зависимости средней энергии электронов от напряженности электрического поля, представленной на рис. 4. При достижении достаточной энергии вначале происходят процессы междолинного переноса фононов при переходе электронов вначале из долины  $M_1$  в долину  $M_2$ , а затем – из долины  $M_1$  в долину L.

Путем моделирования получены основные характеристики переноса носителей заряда – средней дрейфовой скорости, средней энергии, подвижности, коэффициента диффузии в полупроводниковой структуре, использующей материал 4H-SiC. Известно, что физические факторы переноса носителей заряда прямо влияют на выходные характеристики полупроводниковых структур и приборов. Таким образом, полученные результаты исследований могут найти широкое применение в радиоэлектронных, радиолокационных и радионавигационных системах благодаря предполагаемому существенному улучшению выходных характеристик полупроводниковых структур, которые предназначены для работы в области сантиметровых и миллиметровых длин волн.

### Заключение

Выполнено моделирование процессов переноса электронов в трехмерной структуре из карбида кремния вида 4H-SiC. Получены зависимости средней дрейфовой скорости, средней энергии электронов, подвижности электронов, а также коэффициента диффузии. Результаты моделирования средней дрейфовой скорости электронов в трехмерной структуре показали хорошее соответствие экспериментальным данным.

### Список литературы

1. Silicon carbide high-power devices / C.E. Weitzel et. al. // IEEE Transaction Electron Devices. 1996. Vol. 43, P. 1732-1741.
2. Shenoy J.N., Cooper J.A., Melloch M.R. High-Voltage Double-Implanted Power MOSFETs in 6H-SiC. IEEE Electron Dev. Lett. 1997. Vol. 18, № 3. P. 93–105.

- 3 Vasileska D., Goodnick S.M. Computational Electronics. Morgan and Claypool, 2006. 216 p.
- 4 Persson C., Lindefelt U. Dependence of energy gaps and effective masses on atomic positions in hexagonal SiC. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 86. № 11. P. 5036–5039.
- 5 Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987. 640 с.
- 6 Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
- 7 Fawcett W., Boardman D.A., Swain S. Monte Carlo determination of electron transport properties in gallium arsenide // Journal of Physical Chemistry Solids. 1970. Vol. 31. P. 1963–1990.
- 8 Khan I.A., Cooper J.A. Measurement of High-Field Electron Transport in Silicon Carbide. IEEE Transaction on Electron Devices. 2000. Vol. 47, № 2. P. 269–273.

### References

1. Silicon carbide high-power devices / C.E. Weitzel et. al. // IEEE Transaction Electron Devices. 1996. Vol. 43. P. 1732–1741.
2. Shenoy J.N., Cooper J.A., Melloch M.R. High-Voltage Double-Implanted Power MOSFETs in 6H-SiC. IEEE Electron Dev. Lett. 1997. Vol. 18, № 3. P. 93–105.
3. Vasileska D., Goodnick S.M. Computational Electronics. Morgan and Claypool, 2006. 216 p.
4. Persson C., Lindefelt U. Dependence of energy gaps and effective masses on atomic positions in hexagonal SiC. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 86. № 11. P. 5036–5039.
5. Hokni R., Istvud Dzh. Chislennoe modelirovanie metodom chastic. M.: Mir, 1987. 640 p. (in Russ.)
6. Shur M. Sovremennye pribory na osnove arsenida gallija. M.: Mir, 1991. 632 c. (in Russ.)
7. Fawcett W., Boardman D.A., Swain S. Monte Carlo determination of electron transport properties in gallium arsenide // Journal of Physical Chemistry Solids. 1970. Vol. 31. P. 1963–1990.
8. Khan I.A., Cooper J.A. Measurement of High-Field Electron Transport in Silicon Carbide. IEEE Transaction on Electron Devices. 2000. Vol. 47, № 2. P. 269–273.

### Сведения об авторах

Муравьев В.В., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор кафедры систем телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мищенко В.Н., к.т.н., доцент, доцент кафедры систем телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Murav'ev V.V., D. Sci., professor, corresponding member of NAS of Belarus, professor of telecommunication systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Mishchenka V.N., PhD, associate professor, associate professor of telecommunication systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-86-41;  
e-mail: muravyev@bsuir.by  
Муравьев Валентин Владимирович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university of informatics and  
radioelectronics  
tel. +375-17-293-86-41;  
e-mail: muravyev@bsuir.by  
Murav'ev Valentin Vladimirovich