

М.И. Черных^{1,2}, А.Н. Цоцорин¹, В.А. Кожевников¹

¹ОАО «Научно-исследовательский институт электронной техники»

²Воронежский государственный университет

Особенности физических моделей, применяемых при расчете мощных СВЧ приборов на основе карбида кремния

Рассмотрены такие физические особенности карбида кремния, как анизотропия и неполная ионизация примесных центров. Показана необходимость учитывать данные эффекты при моделировании полупроводниковых приборов на основе карбида кремния. Приведены основные формулы, описывающие модель неполной ионизации примесных центров.

Ключевые слова: карбид кремния, моделирование полупроводниковых приборов, СВЧ транзисторы

В прошедшее десятилетие обширное развитие получила элементная база на основе карбида кремния. Высокие теплопроводность и критическое поле пробоя карбида кремния, позволяют достигать выдающихся параметров приборов. Обладая большой шириной запрещенной зоны и высокой энергией связи элементов кристаллической решетки, карбид кремния стоек к воздействию высоких температур и ионизирующего излучения. К сожалению, на данный момент стоимость подложек и эпитаксиальных структур карбида кремния остается высокой. Из-за этого сильно ограничена возможность проведения экспериментов по выявлению зависимостей характеристик приборов на основе карбида кремния от технологических и топологических параметров их создания. В этой связи важной задачей является моделирование полупроводниковых приборов на основе карбида кремния.

Для карбида кремния свойственно образование различных политипов. Основными политипами, используемыми на данный момент в электронике, являются гексагональные политипы 4Н и 6Н. Политип 4Н обладает большей подвижностью электронов, чем политип 6Н, и видится более перспективным для применения в СВЧ полупроводниковых приборах. Основной особенностью, которую следует учитывать при моделировании полупроводниковых приборов на основе гексагональных политипов карбида кремния, является анизотропия. В таблице 1 приведены основные константы, различающиеся для направлений 0001 и 11-20 для 4Н карбида кремния.

Значительной анизотропии подвержены многие параметры 4Н карбида кремния, но наибольший коэффициент изотропии имеют коэффициенты ударной ионизации a и b для описанной в [2] формулы для расчёта коэффициента ударной ионизации:

$$\alpha = \gamma a e^{\frac{\gamma b}{F}},$$

где γ – функция, зависящая от kT , F движущая сила носителей заряда.

На основании указанных соображения в [3] введена модель для расчёта коэффициента ударной ионизации для 4Н карбида кремния. На рисунке 1 приведена зависимость пробивного напряжения диода Шоттки с охранными кольцами на основе карбида кремния от

Таблица 1. Анизотропные свойства 4Н карбида кремния [1]

	0001 4Н-SiC	11-02 4Н-SiC	Коэффициент анизотропии
Диэлектрическая проницаемость	10,03	9,66	1,04
Теплопроводность, Вт/(К·см)	6,7	4,7	1,4
Подвижность электронов, см ² /(В·с)	1145	950	1,2
Подвижность Дырок, см ² /(В·с)	125	125	1
Коэффициент ударной ионизации для электронов a, см ⁻¹	$1,76 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^7$	8,4
Коэффициент ударной ионизации для электронов b, В/см	$3,3 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	1,9
Коэффициент ударной ионизации для дырок a, см ⁻¹	$3,4 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^7$	11,5
Коэффициент ударной ионизации для дырок b, В/см	$2,5 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	1,6

уровня концентрации легирующей примеси в контактном слое, с применением изотропной и анизотропной модели коэффициента ударной ионизации. Как видно из рисунка при применении изотропной модели происходит значительное завышение пробивного напряжения в области высоких концентраций, а также смещения максимума пробивного напряжения.

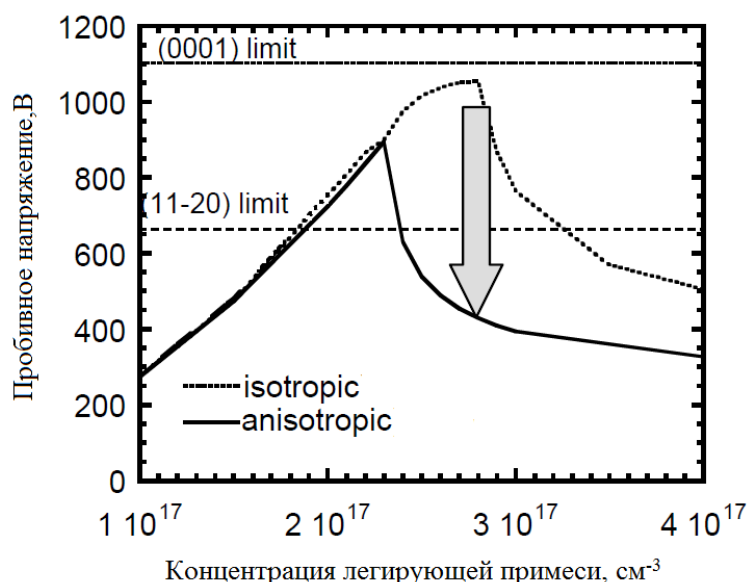


Рисунок 1. Зависимость пробивного напряжения диода Шоттки на основе карбида кремния от уровня концентрации легирующей примеси. [3]

Второй особенностью при расчете приборов на основе карбида кремния является неполная ионизация легирующих примесей при комнатной температуре [4]. Для расчета

концентрации ионизированных доноров и акцепторов предложены следующие зависимости, для донорной примеси:

$$N_D = \frac{N_{D0}}{1 + G_D(T) \cdot \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_C}{kT}\right)},$$

и для акцепторной примеси:

$$N_A = \frac{N_{A0}}{1 + G_A(T) \cdot \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_V}{kT}\right)},$$

где N_{D0} и N_{A0} – концентрации легирующей примеси, kT – тепловая энергия, $G_A(T)$ и $G_D(T)$ – факторы ионизации, обсуждаемые в [5], [6]. Для факторов ионизации приводятся следующие выражения:

$$G_D(T) = g_D \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}\right),$$

$$G_A(T) = g_A \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_A}{kT}\right),$$

где g_A и g_D – факторы вырождения примесных уровней, а ΔE_D и ΔE_A равны:

$$\Delta E_D = E_C - E_D,$$

$$\Delta E_A = E_A - E_V,$$

где E_D и E_A – энергия активации доноров и акцепторов.

На рисунке 2 приведены расчетные концентрации носителей в n области p-n⁺ карбид кремниевой структуре легированной азотом при температуре 300К. Сплошная линия соответствует случаю полностью ионизированной примеси, штриховая линия соответствует концентрации азота при неполной ионизации примесных центров.

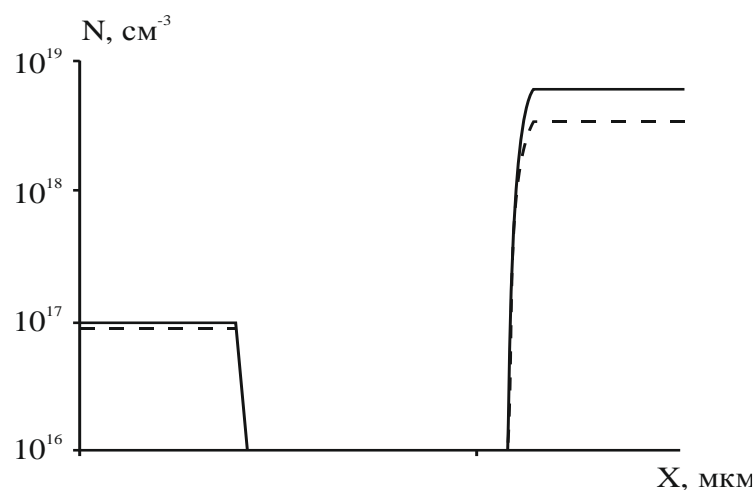


Рисунок 2. Расчетные концентрации носителей в n и p⁺ областях. Сплошная линия – примесные центры полностью ионизированы, штриховая линия – модель неполной ионизации примесных центров.

Таким образом, если не принимать во внимания при моделировании такую ключевую особенность карбида кремния, как анизотропия, то неизбежно значительное завышение пробивных напряжений при моделировании полупроводниковых приборов на основе карбида кремния. Кроме того при моделировании приборов при низкой температуре необходимо учитывать то, что многие примеси в карбиде кремния образуют глубокие центры и не полностью ионизируются при нормальной температуре, что может привести к неверной оценки токовых характеристик моделируемых приборов.

Библиографический список.

1. Под ред. К.А. Джексона и В. Шретера, Энциклопедия технологии полупроводниковых материалов. Том 1//АНО «Издательство «Водолей», 2003 г.
2. A. G. Chynoweth, Ionization Rates for Electrons and Holes in Silicon // *Physical Review*, vol. 109, no. 5, pp. 1537–1540, 1958.
3. T. Hatakeyama et al., Physical Modeling and Scaling Properties of 4H-SiC Power Devices // *International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices*, Tokyo, Japan, pp. 171–174, September 2005.
4. H. Matsuura, Influence of Excited States of Deep Acceptors on Hole Concentration in SiC // *International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM)*, Tsukuba, Japan, pp. 679–682, October 2001.
5. P. Y. Yu and M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* // Berlin: Springer, 2nd ed., 1999.
6. K. F. Brennan, *The Physics of Semiconductors: With applications to optoelectronic devices* // Cambridge: Cambridge University Press, 1999.