

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МОЩНЫЙ СВЧ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР ШОТТКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

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

¹ *ОАО Научно-исследовательский институт электронной техники,*
² – *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 11.03.2015 г.

Аннотация. В работе представлены модели расчета воздействия высоких температур на электрофизические характеристики мощных СВЧ полевых транзисторов с затвором Шоттки на основе карбида кремния. Проведено моделирование влияния высокотемпературного воздействия. Представлены зависимости порогового напряжения, сопротивления канала, а так же крутизны передаточной характеристики транзистора. Проведено исследование саморазогрева транзисторной структуры. Выполнена оценка влияния толщины подложки на максимальную температуру, а так же токи насыщения транзисторного кристалла при саморазогреве. Также в работе обсуждается теоретический предел применения мощных СВЧ полевых транзисторов с затвором Шоттки на основе карбида кремния при повышенных температурах.

Ключевые слова: полевой транзистор с затвором Шоттки, карбид кремния, моделирование полупроводниковых приборов, термостабильность.

SIMULATION OF HIGH TEMPERATURE INFLUENCE ON SiC RF POWER MESFET

M. I. Chernykh, A. N. Tsotsorin, V. A. Kozhevnikov

Abstract. Paper presents a model of the influence of high temperatures on the electrical characteristics of power RF SiC MESFET. The influence of high temperature treatment on the electrical characteristics of RF power SiC MESFET was simulated. The dependence of the threshold voltage, the channel resistance and the slope of the transfer characteristic of the transistor was shown. The simulation of self-heating of the transistor structure was carried out. The influence of substrate thickness on the maximum temperature of the crystal at self-heating was estimated. The theoretical limit of the using of power RF SiC MESFET at high temperatures was discussed.

Keywords: MESFET, SiC, simulation of semiconductor devices, thermal stability.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время заметно возрос интерес к мощным СВЧ транзисторам на основе широкозонных полупроводников, таких как карбид кремния и нитрид галлия. Приборы, созданные на основе данных полупроводников, не только обладают электрофизическими характеристиками, превосходящими характеристики транзисторов, созданных на основе традиционных полупроводниковых материалов, но и обладают большей стойкостью к воздействиям высоких температур и радиации. С точки зрения применения мощных СВЧ транзисторов при повышенных температурах наиболее перспективным является использование карбида кремния, в



Рис. 1. Схематическое изображение конструкции ПТШ транзистора.

качестве основы для их создания. Одним из распространенных типов мощных СВЧ транзисторов на основе карбида кремния является полевой транзистор с затвором Шоттки (ПТШ). Конструкция карбид кремниевый ПТШ схематично представлена на рисунке 1. Данный тип приборов создается на эпитаксиальных структурах карбида кремния, сформированных на полуизолирующей подложке карбида кремния с высоким удельным сопротивлением, порядка

$10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Эпитаксиальная структура для создания ПТШ, в общем случае, содержит буферный слой p-типа проводимости, каналный слой n-типа проводимости и высоколегированный слой p+ типа для формирования омических контактов к областям стока и истока [1], [2].

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа поведения ПТШ при воздействии высоких температур было проведен ряд виртуальных экспериментов в программном комплексе Sentaurus TCAD. Была создана конструктивная модель транзистора рассчитанная на питание 50 В. Параметры структуры выбирались таким образом, чтобы обеспечить пороговое напряжение транзистора 11,7 В и пробивное напряжение между стоком и истоком при закрытом канале транзистора более 100 В при температуре 300 К. Для упрощения приведения данных, ширина затвора выбрана 1 мм. Для моделирования электрофизических свойств при температурном воздействии расчет производился по двум различным моделям. Первая модель не учитывала саморазогрев активной области транзисторной структуры. Температура ПТШ считалась константой в пределах одного виртуального эксперимента и проводилось моделирование только активной области кристалла транзистора. Вторая модель подразумевала учет саморазогрева активной области кристалла транзисторной структуры и добавлялось термодинамическое распределение температуры в объеме кристалла. При этом структурная ячейка транзистора моделировалась полностью, вместе с полуизолирующей подложкой. Моделирование было проведено для различных толщин подложек от 300 мкм до 100 мкм. В данном виртуальном эксперименте изменялась изначальная температура структуры и температура теплоотвода подведенного к подложке ПТШ.

Для расчета электрофизических параметров использовалось решение фундаментальной системы уравнений, состоящей из уравнения Пуассона, уравнений непрерывности для электронов и дырок и выражений для электронного J_n и дырочного J_p токов:

$$\text{div}(\varepsilon \cdot \text{grad}\psi) = -q(p - n + C);$$

$$\text{div}J_n = -q(G - R);$$

$$\text{div}J_p = q(G - R);$$

$$J_n = -q(\mu_n n \cdot \text{grad}\psi - D_n \text{grad}n);$$

$$J_p = -q(\mu_p p \cdot \text{grad}\psi - D_p \text{grad}p),$$

где ε — диэлектрическая проницаемость; ψ — электростатический потенциал; q — заряд электрона; n, p — концентрации электронов и дырок соответственно; C — концентрация электрически активных примесей; G, R — скорости генерации и рекомбинации соответственно; μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок соответственно; D_n, D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно [3].

Количество теплоты, выделяемое структурой при саморазогреве структуры рассчитывается по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = \frac{U^2}{R(T)t}$$

где, U — напряжение, $R(T)$ — сопротивление канала транзистора, зависящее от температуры, t — время. При этом сопротивление будет определяться выражением:

$$R = \rho(T) \frac{L}{AB} = \frac{1}{en(T)\mu(T)} \frac{L}{AB},$$

где L — длина канала ПТШ, A — ширина канала ПТШ, B — глубина канального слоя, e — заряд электрона. Подвижность носителей заряда в свою очередь определяется выражением [4]:

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

где μ_{\max} , B_i , α_i , β_i — константы, T_0 — температура 300 К, T — температура среды. Кроме изменения подвижности зарядов, с изменением температуры будет меняться концентрация носителей заряда в канале транзистора. Концентрация собственных носителей будет определяться выражением:

$$n_i(T) = (N_C N_V)^{1/2} \exp(-E_g/(2kT)),$$

где k — постоянная Больцмана. При этом в карбиде кремния собственная концентрация носителей заряда будет пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией носителей, привнесенных легирующей примесью (10^{15} – 10^{19} см⁻³) вплоть до 1000 К. Кроме собственной концентрации носителей заряда в карбиде кремния с изменением температурой будет изменяться количество носителей заряда привнесенных легирующей примесью. Дело в том, что при температуре 300 К в карбиде кремния имеет место не полная ионизация примесных центров и примесные атомы не будут полностью ионизированы [5], [6]. Для расчета концентрации ионизированных доноров и акцепторов предложены следующие зависимости, для донорной примеси:

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

и для акцепторной примеси:

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

где N_{D0} и N_{A0} — концентрации легирующей примеси, $G_A(T)$ и $G_D(T)$ — факторы ионизации. 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием первой модели был проведен расчёт влияния температуры среды на пороговое напряжение, сопротивление канала и крутизну ПТШ. При возрастании температур окружающей среды пороговое напряжение плавно увеличивается. Зависимость изменения порогового напряжения от температуры представлена на рисунке 2.

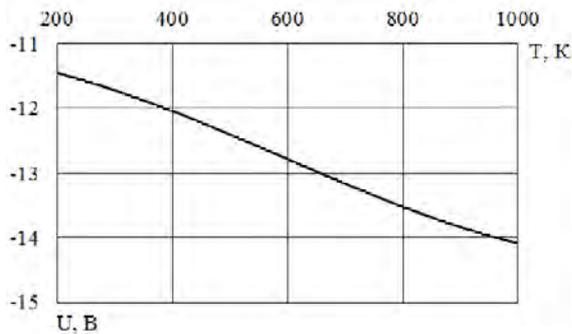


Рис. 2. Зависимость порогового напряжения ПТШ от температуры среды.

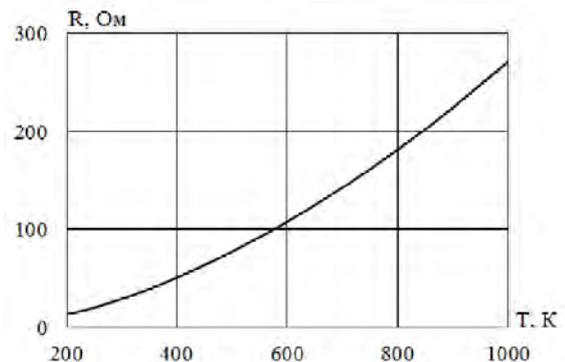


Рис. 3. Зависимость сопротивления ПТШ от температуры среды.

Зависимость сопротивления канала транзистора от температуры представлена на рисунке 3. Полученная зависимость хорошо коррелирует с моделью изменения подвижности носителей от температуры предложенной в [7]. Сопротивление транзистора резко возрастает с увеличением температуры среды. Уже при 600 К сопротивление транзистора более чем 5 раз превышает сопротивление при 300 К.

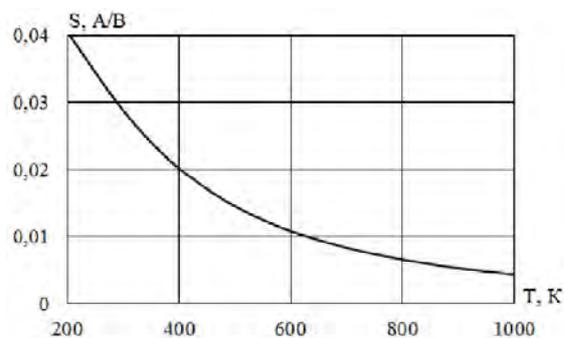


Рис. 4. Зависимость крутизны передаточной характеристики ПТШ от температуры среды.

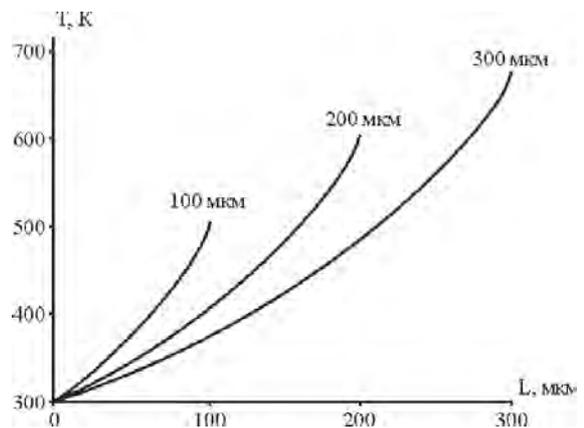


Рис. 5. Распределение температуры в ПТШ при различной толщине подложки.

На рисунке 4 показана зависимость крутизны передаточной характеристики ПТШ от температуры среды. Зависимость носит убывающий характер. Такое поведение обуславливается уменьшением тока стока ПТШ вследствие уменьшения подвижности носителей, а так уменьшением скорости распространения обедненной области перехода Шоттки вглубь канального слоя из-за увеличения концентрации носителей заряда в объеме карбида кремния.

При введении в расчет термодинамической модели и модели саморазогрева активной области кристалла было проведено моделирование работы прибора при 300 К. На рисунке 5 показано распределение температуры в кристалле ПТШ при различной толщине полуизолирующей подложки при саморазогреве структуры при статическом режиме работы при напряжении питания 50 В и нулевом смещении на затворе. За начало координат выбран контакт подложки кристалла и теплоотвода. Модель подразумевает теплоотвод идеальным, то есть температура края подложки кристалла остается неизменной. Наибольший разогрев структуры происходит в области канала ПТШ со стороны стока транзистора. В указанной области за счет обеднения канального слоя образуются участок с наибольшим сопротивлением, что вызывает локальное увеличение температуры.

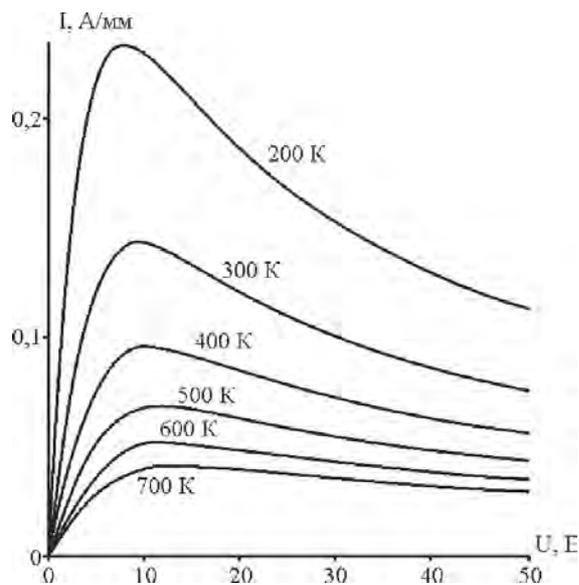


Рис. 6. Выходная вольтамперная характеристика ПТШ с толщиной подложки 300 мкм с учетом саморазогрева структуры при различных значениях температуры окружающей среды и теплоотвода.

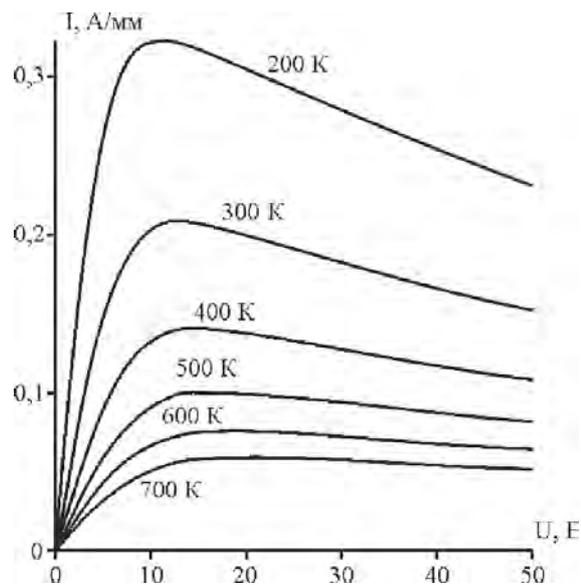


Рис. 7. Выходная вольтамперная характеристика ПТШ с толщиной подложки 100 мкм с учетом саморазогрева структуры при различных значениях температуры окружающей среды и теплоотвода.

Разогрев транзисторной структуры приводит к снижению проводимости канала ПТШ. Что в свою очередь снижает ток стока в режиме насыщения транзистора. При сильном саморазогреве велика роль теплоотвода. На рисунках 6 и 7 показаны выходные вольтамперные характеристики ПТШ с учетом саморазогрева структуры для подложки 300 мкм и 100 мкм соответственно.

Как видно из сравнения рисунков 6 и 7 ПТШ сформированные на неутоненной подложке уступают по токам насыщения в полтора раза ПТШ сформированных на утоненной до 100 мкм подложке. Кроме того максимальная температура при саморазогреве ПТШ сформированного на подложке толщиной 300 мкм более чем на 100 К превышает максимальную температуру саморазогрева ПТШ сформированного на утоненной до 100 мкм подложке.

ВЫВОДЫ

ПТШ на основе карбида кремния показывают высокую работоспособность при повышенных температурах активной области кристалла вплоть до 1000 К. При работе в статическом режиме ПТШ приведенной конструкции выделяет большое количество тепла. Это обуслов-

лено высоким сопротивлением канальной области. Не смотря на высокую теплопроводность карбида кремния, при использовании неутоненной подложки толщиной 300 мкм, отвод тепла от активной области транзистора происходит неэффективно, что приводит к сильному разогреву транзисторного кристалла. Данный эффект можно минимизировать используя в качестве подложки утоненные до 100 мкм пластины полужолирующего карбида кремния. Это позволяет уменьшить максимальную температуру активной области кристалла ПТШ в статическом режиме более чем на 100 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fabrication of SiC MESFET's for Microwave Applications / Ji-Hak Jung, Hoon Park, Jin-Kuk Park, Hyun-Chang Park // Journal of the Korean Physical Society. — 2002. — Vol. 40, № 4. — P. 588–591.
2. Полевой транзистор с затвором Шоттки на основе 4H-SiC и оценка его СВЧ-характеристик / В.А. Гудков, А.С. Мокеев, В.Е. Земляков и др. // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. — 2007. — вып. 3. — С. 3–9.
3. Sentaurus Device User Guide // Version I-2013.12.
4. Универсальный метод аналитической аппроксимации подвижности основных носителей заряда в полупроводниках в широком диапазоне температур и уровней легирования / Т.Т. Мнацаканов, М.Е. Левинштейн, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков // Физика и техника полупроводников. — 2004. — Т. 38, № 1. — С. 56–60.
5. Matsuura H. Influence of Excited States of Deep Acceptors on Hole Concentration in SiC / H. Matsuura // International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM), Tsukuba, Japan. — 2001. — P. 679–682.
6. Yu P. Y. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties / P. Y. Yu, M. Cardona. — Berlin: Springer, 1999.
7. Мнацаканов Т.Т. Полуэмпирическая модель подвижности носителей заряда в карбиде кремния для анализа её зависимости от температур и легирования / Т.Т. Мнацаканов, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков // Физика и техника полупроводников. — 2011. — Т. 35, № 4. — С. 406–409.

REFERENCES

1. Ji-Hak Jung, Hoon Park, Jin-Kuk Park, Hyun-Chang Park, Fabrication of SiC MESFET's for Microwave Applications. Journal of the Korean Physical Society, 2002, vol. 40, no. 4, pp. 588–591.
2. Gudkov V.A., Mokeev A.S., Zemlyakov V.E. et. al. 4H-SiC MESFET and his RF properties. [Gudkov V.A., Mokeev A.S., Zemlyakov V.E. et. al. Polevoj tranzistor s zatvorom Shottki na osnove 4H-SiC i ocenka ego SVCh-xarakteristik]. *E'lektronnaya texnika. Ser. 1: SVCh-texnika — Electronic engineering, ser. 1, RF engineering*, 2007, iss. 3, pp. 3–9.
3. Sentaurus Device User Guide. Version I-2013.12.
4. Mnatsakanov T.T., Levinshtein M.E., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. Universal analytical approximation of the carrier mobility in semiconductors within a wide range of temperatures for a variety of doping densities. [Mnatsakanov T.T., Levinshtejn M.E., Pomorceva L.I., Yurkov S.N. Universal'nyj metod analiticheskoy approksimacii podvizhnosti osnovnyx nositelej zaryada v poluprovodnikax v shirokom diapazone temperatur i urovnej legirovaniya]. *Fizika i texnika poluprovodnikov — Semiconductors*, 2004, vol. 38, iss. 1, pp. 56–60.
5. Matsuura H. Influence of Excited States of Deep Acceptors on Hole Concentration in SiC. International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM), Tsukuba, Japan, 2001, pp. 679–682.
6. P. Y. Yu and M. Cardona, Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. Berlin: Springer, 1999.

7. Mnatsakanov T.T., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. A semiempirical model in analyzing the charge carrier mobility dependence on temperature and doping in silicon carbide. [Mnatsakanov T.T., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. Polue'mpiricheskaya model' podvizhnosti nositelej zaryada v karbide kremniya dlya analiza eyo zavisimosti ot temperatur i legirovaniya]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov — Semiconductors*, 2011, vol. 35, iss. 4, pp. 406–409.

*Черных Максим Игоревич, аспирант физического факультета Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: che@niiet.ru*

*Cherhykh Maksim Igorevich, post-graduate student, Faculty of Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: che@niiet.ru*

*Цоцорин Андрей Николаевич, начальник лаборатории НИИ Электронной Техники, кандидат физико-математических наук, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: tsotsorin@niiet.ru*

*Tsotsorin Andrey Nikolaevich, head of laboratory, Research institute of electronic engineering, Candidate of physical and mathematical sciences, Voronezh, Russian Federation
E-mail: tsotsorin@niiet.ru*

*Кожевников Владимир Андреевич, начальник отдела НИИ Электронной техники, кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: vak@niiet.ru*

*Kozhevnikov Vladimir Andreevich, department head, Research institute of electronic engineering, Candidate of technical science, Voronezh, Russian Federation
E-mail: vak@niiet.ru*