УДК

Исследование динамических характеристик 4H-SiC MOSFET-транзистора

С.А. Шевченко, А.В. Афанасьев, Б.В. Иванов, Е.А. Тертышная, А.В. Восколович, С.А. Пологов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: приведены результаты расчета вольт-фарадных характеристик силового MOSFET-транзистора с вертикальной структурой на основе карбида кремния. Вместе с расчетом входной емкости C_{iss} проведен расчет зависимости внутреннего сопротивления затвора $R_{g,int}$ от напряжения на затворе U_g . Показано, что качество границы раздела 4H-SiC/SiO2, в частности, концентрация на ней акцепторных ловушек, в значительной степени сказывается на виде зависимостей $C_{iss}(U_g)$ и $R_{g,int}(U_g)$, а также на виде переходных характеристик переключения транзистора.

Ключевые слова: карбид кремния, MOSFET-транзистор, динамические характеристики, вольтфарадные характеристики.

Введение

Современный этап развития силовой преобразовательной техники диктует повышенные требования к компонентной базе. В последние годы среди компонентов силовой электроники доминирующее положение на рынке занимают компоненты на основе широкозонных материалов, в частности нитрида галлия и карбида кремния [1]. Особый интерес представляет последний в силу лучших, по сравнению с традиционным монокристаллическим кремнием, электрофизических характеристик: большей критической напряженности электрического поля, температурной стабильности и меньших массогабаритных параметров.

Несмотря на высокую степень проработанности вопросов, связанных с технологией приборов и физическими принципами работы транзисторов, в этой предметной области все еще остается множество белых пятен. Так, в ряде работ доложено о влиянии качества границы раздела SiC/SiO₂ на процесс переключения силовых MOSFET-транзисторов. Указывается, в частности, что одним из факторов, сказывающихся на виде переходных процессов, является внутреннее сопротивление затвора транзистора $R_{g,int}$, которое, в свою очередь, определяется параметрами поверхностных состояний на границе раздела SiC/SiO₂ [2], проводимостью материала затвора [3-5], а также топологией затвора [6]. Указывается, что данное сопротивление и входная емкость C_{iss} , наряду с другими факторами ограничивает быстродействие приборов и их рабочую полосу частот [6]. Сообщается также о появлении паразитных осцилляций на переходных характеристиках переключения транзисторов, не связанных с индуктивным характером нагрузки, при их переключении с высокими скоростями изменения напряжения на стоке [7].

В русскоязычной литературе практически не сообщается о численном моделировании в средах САПР переходных процессов переключения транзисторов. Более того, сообщения о расчетах внутреннего сопротивления затвора $R_{g,int}$ отсутствуют. Настоящая работа посвящена оценке влияния свойств границы раздела 4H-SiC/SiO₂ на основные динамические характеристики карбидокремниевого MOSFET-транзистора.

Основная часть

В качестве объекта исследования выбран MOSFET-транзистор на основе 4H-SiC с максимальным рабочим напряжением 1200 В и максимально допустимым рабочим током 30 А при площади кристалла 5 мм2 (рисунок 1). Моделирование проводилось в среде САПР ТСАД в диффузионно-дрейфовом приближении при учете эффектов снижения подвижности носителей вблизи границы раздела 4H-SiC/SiO2 [8] и скорости в сильном поле, сужения запрещенной зоны насыщения их В сильнолегированных областях, рекомбинации Шокли-Рида-Холла, Ожерекомбинации, лавинной генерации и неполной ионизации легирующей примеси. Концентрация ловушек на границе раздела 4H-SiC/SiO2 полагалась постоянной вдоль границы и равной 3,5·1012 см-2·эВ-1 [9]. Полагалось при этом, что ловушки относятся к ловушкам акцепторного типа с глубиной залегания в запрещенной зоне 0,3 эВ относительно края зоны проводимости и экспоненциальным распределением по энергиям с девиацией 0,2 эВ. В модель также был введен фиксированный положительный заряд, распределенный по границе раздела 4H-SiC/SiO₂, величина которого принималась равной 3·10¹² Кл·см⁻² [10].



Рисунок 1. Типовая структура MOSFET-транзистора

Расчет вольт-фарадных характеристик транзистора (ВФХ) проводился в малосигнальном приближении при подаче переменного сигнала частотой 1 МГц на затвор при разомкнутом стоке (рисунок 2а). Результатом расчета стала зависимость входной емкости C_{iss} от напряжения на затворе U_g . Результаты расчета были далее преобразованы в зависимость внутреннего сопротивления затвора $R_{g,int}$ от напряжения на нем. Схемотехнический смысл этого параметра заключается в существовании активной составляющей входного импеданса транзистора Z_{11} при разомкнутом стоке [2]: $R_{g,int} = \text{Re}(Z_{11})$.



Рисунок 2. Схема проведения расчета зависимостей $C_{iss}(U_g)$ и $R_{g,int}(U_g)$ (a); зависимости входной емкости C_{iss} и внутреннего сопротивления затвора $R_{g,int}$ от напряжения на затворе U_g при отсутствии ловушек на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ (кривые 1, 2) и при их наличии (3, 4) (б)

На рисунке 26 изображены расчетные зависимости $C_{iss}(U_g)$ и $R_{g,int}(U_g)$ при учете ловушек на границе раздела SiC/SiO₂ и без их учета. По приведенным данным наблюдается сходство характера зависимости $C_{iss}(U_g)$ с видом ВФХ МОП-конденсатора. Так, на характеристике наблюдаются участки, соответствующие аккумуляции дырок в канале при инверсии проводимости в JFET-области (1), аккумуляции электронов в JFET-области при одновременном обеднении *p*-кармана (2) и инверсии проводимости в канале (3). Вышеописанные участки ВФХ обозначены на рисунке 26 цветными маркерами.

По данным рисунка 26 также видно, что наличие глубоких уровней на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ изменяет зависимости $C_{iss}(U_g)$ и $R_{g,int}(U_g)$ по сравнению со случаем отсутствия таковых. Так, по мере изменения напряжения U_g в сторону положительных значений ловушки заполняются носителями заряда, что приводит к их переходу в заряженное состояние. В результате частичной компенсации фиксированного заряда зарядом заполненных ловушек вольт-фарадная характеристика деформируется. Максимумы $R_{g,int}$ при этом соответствуют точкам максимальной крутизны на зависимости $C_{iss}(U_g)$, которые соответствуют напряжению плоских зон в канале (V_{fb} = -10,7 B), напряжению образования аккумуляционного слоя электронов в JFET-области ($V_{acc,el}$ = -6,7 B и $V_{acc,el}$ = -3,8 B в случае отсутствия и наличия ловушек соответственно) и напряжению образования канала (V_{th} = -1 B и V_{th} = 2,1 B в случае отсутствия и наличия ловушек соответственно). Наличие пиков на зависимости $R_{g,int}(U_g)$ обусловлено эффектами рассеяния носителей в тонком приповерхностном слое вблизи границы раздела 4H-SiC/SiO₂.

Расчет переходных характеристик переключения транзистора проводился в схеме согласно рисунку 3, результаты расчета приведены на рисунке 4 и сведены в таблицу 1.



Рисунок 3. Схема, в составе которой был исследован переходный процесс переключения транзистора

В качестве управляющего сигнала на затворе выбран прямоугольный импульс длительностью 5 мкс и амплитудой 15 В при длительностях переднего и заднего фронтов 10 нс. По виду зависимостей напряжения от времени в узле *n*2 видна инерционность процесса изменения напряжения на затворе по отношению к управляющему импульсу, обусловленная влиянием эффекта Миллера.

По данным рисунка 4 видно, что учет ловушек на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ привел к существенному увеличению длительности плато Миллера на этапе перехода транзистора из непроводящего состояния в проводящее по сравнению со расчетом без ловушек. Указанная особенность обусловлена перезарядкой ловушек под действием потенциала затвора и эквивалентна увеличению времени перезарядки входной емкости. Напротив, на этапе выключения транзистора плато Миллера практически отсутствует, что объясняется инерционностью процесса освобождения заряженных ловушек от захваченных носителей.

	<i>t</i> _{d(on)} , HC	<i>t</i> _r , HC	<i>t</i> _{d(off)} , HC	$t_{\rm f}$, HC
Учтен только фиксированный заряд $Q_{\text{int}} = 3 \cdot 10^{12} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$	90	176	470	290
Учтен фиксированный заряд $Q_{int} = 3 \cdot 10^{12} \text{ Kл} \cdot \text{см}^{-2}$,	90	320	300	225
учтены ловушки в концентрации $D_{it} = 3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эB}^{-1}$				

Таблица 1. Параметры процесса переключения транзистора при различных свойствах
границы раздела 4H-SiC/SiO ₂



Рисунок 4. Переходные характеристики переключения транзистора в схеме, изображенной на рисунке 3. Синим цветом обозначено переключение в условиях отсутствия ловушек на границе раздела 4H-SiC/SiO2, красным – в случае их наличия, черным цветом обозначен управляющий импульс на источнике VG

По данным таблицы 1 видно, что введение на границу раздела 4H-SiC/SiO₂ поверхностных ловушек не сказывается на времени задержки включения транзистора $t_{d(on)}$ так же, как и в случае, когда учтен лишь фиксированный заряд на поверхности. Учет ловушек привел к увеличению длительности процесса включения транзистора вследствие вышеуказанного механизма инерционности их перезарядки, при этом указанный механизм также вызывает уменьшение длительности процесса выключения транзистора, что подтверждает представления о существовании гистерезиса порогового напряжения [11] и позволяет выдвинуть предположение о существовании гистерезиса на зарядной характеристике $U_g(Q_g)$.

Заключение

Проведенный анализ показывает принципиальную важность учета поверхностных состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ при расчете динамических характеристик MOSFET-транзисторов. Показано влияние глубоких ловушек на вид вольт-фарадной характеристики прибора, заключающееся в деформации кривой ВФХ вследствие частичной компенсации фиксированного заряда на границе раздела зарядом ловушек, которые захватывают носители заряда по мере формирования инверсного слоя в канале. Установлено, что эффекты, наблюдаемые при перезарядке глубоких уровней во время включения и выключения транзистора, обуславливают длительность процесса переключения.

Список литературы

- 1. А.И. Михайлов, А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, С.А. Решанов, А. Schöner, Силовой МДП-транзистор на 4H-SiC с эпитаксиальным заглубленным каналом, Физика и техника полупроводников, 2020, том 54, выпуск 1, 79–84
- S. Race et al., "Gate Impedance Analysis of SiC power MOSFETs with SiO2 and High-k Dielectric," 2023 35th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Hong Kong, 2023, pp. 9-12, doi: 10.1109/ISPSD57135.2023.10147725
- 3. S. Race et al., "Frequency-Dependent Internal Gate Resistance of SiC Power MOSFETs," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 71, no. 12, pp. 7709-7715, Dec. 2024, doi: 10.1109/TED.2024.3488684.
- Race, S., Kovacevic-Badstubner, I., Stark, R., Tsibizov, A., Belanche, M., Arango, Y., Romano, G., Knoll, L., Grossner, U., 2023. Small-Signal Impedance and Split C-V Characterization of High-κ SiC Power MOSFETs. MSF. https://doi.org/10.4028/p-2388hx
- "Power MOSFET: Rg impact on applications" / G. Longo, F. Fusillo, F. Scrimizzi // ST Microelectronics AN4191 Application note. [Электронный ресурс]. Дата публикации: ноябрь 2012 г. URL: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4191-power-mosfet-rg-impact-onapplications-stmicroelectronics.pdf (дата последнего обращения 15.04.2025 г.)
- D. Lovelace, J. Costa and N. Camilleri, "Extracting small-signal model parameters of silicon MOSFET transistors," 1994 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.94CH3389-4), San Diego, CA, USA, 1994, pp. 865-868 vol.2, doi: 10.1109/MWSYM.1994.335220.
- S. Ogawa, T. Tanaka and K. Nakahara, "Improved Scheme for Estimating the Embedded Gate Resistance to Reproduce SiC MOSFET Circuit Performance," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 70, no. 9, pp. 4743-4748, Sept. 2023, doi: 10.1109/TED.2023.3297567
- 8. А.И. Михайлов, А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, С.А. Решанов, А. Schöner, "Метод увеличения подвижности носителей заряда в канале полевого 4H-SiC-транзистора", Физика и техника полупроводников, 50:6 (2016), С. 839–842.
- L. Maresca, I. Matacena, M. Riccio, A. Irace, G. Breglio and S. Daliento, "TCAD model calibration for the SiC/SiO2 interface trap distribution of a planar SiC MOSFET," 2020 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia), Suita, Japan, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/WiPDAAsia49671.2020.9360298.
- 10. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Cham: Springer International Publishing, 2019
- 11. K. Puschkarsky, H. Reisinger, T. Aichinger, W. Gustin and T. Grasser, "Threshold voltage hysteresis in SiC MOSFETs and its impact on circuit operation," 2017 IEEE International Integrated Reliability Workshop (IIRW), South Lake Tahoe, CA, USA, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/IIRW.2017.8361232.