УДК 621.382

4H-SiC ТРАНШЕЙНЫЙ БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ С НИЗКИМ ПАДЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Нгуен Чонг Тхань, Ветошкин В.В., Якуш В.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, nguyentrongt123@gmail.com

Аннотация: в работе представлено исследование конструкции 4H-SiC траншейного БТИЗ с P-экранирующим слоем. В состоянии запирания P-экран фиксируется при низком потенциале за счет проводимости PMOS-транзистора, обеспечивая эффективное экранирование окисла траншейного затвора от сильного электрического поля. В открытом состоянии P-экран изолирован от эмиттерного электрода слоем N-кармана, что способствует усилению эффекта инжекции носителей. При высоких напряжениях коллектор-эмиттер P-экран напрямую соединяется с эмиттером через эффект прокола (punch-through) PNP-транзистора с открытой базой, что позволяет снизить ток насыщения.

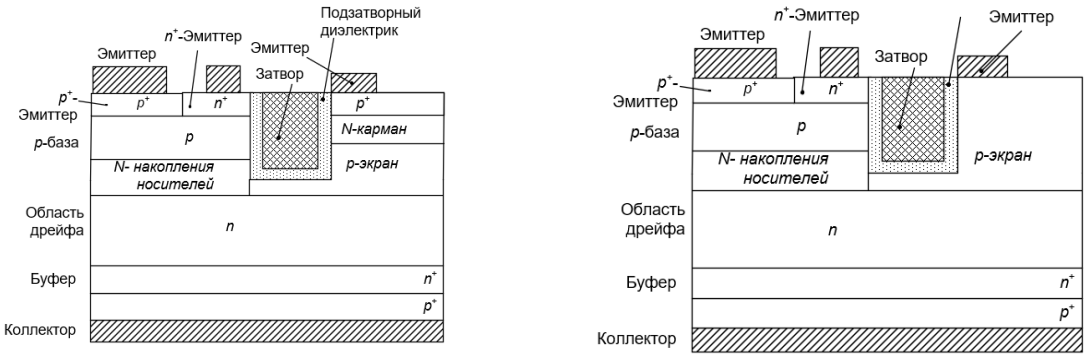
Ключевые слова: 4H-SiC БТИЗ, траншейный затвор, P-экран, SCP-IGBT, падение напряжения.

I. ВВЕДЕНИЕ

4H-SiC БТИЗ обладают сверхвысокой блокирующей способностью, высокой рабочей температурой перехода и превосходными переключательными характеристиками, что демонстрирует большой потенциал в передаче постоянного тока высокого напряжения, бестрансформаторных интеллектуальных подстанциях, преобразовании интеллектуальных сетей и так далее [1-3]. Однако в высоковольтных приложениях устройство сталкивается с проблемой надёжности оксида затвора на дне траншеи [4,5]. Для защиты оксида затвора на дне траншейного затвора были предложены структуры с заземлённым P-экраном (GS-IGBT) [6,7]. Однако, поскольку в структуре GS-IGBT слой P-экран заземлён, дырки в дрейфовой области могут напрямую уходить через эмиттер, что приводит к увеличению падение напряжения V_{on}. В данной работе исследуется предложенная новая структура: траншейный SiC IGBT с самозакреплённым P-экраном – сокращённо SCP-IGBT.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Этот прибор имеет низкое падение напряжения V_{on} и низкое электрическое поле в оксиде затвора по сравнению с GS-IGBT. На рисунке 1 представлены структуры SCP-IGBT (а) и GS-IGBT(б). Все две структур IGBT используют слой накопления носителей (англ. carrier-stored layer - CSL) для улучшения компромисса между потерям E_{off} и падением напряжения V_{on} ,поскольку CSL действует как барьер для дырок, усиливая эффект инжекционного усиления (англ. Injection Enhancement - IE).



а б

Рисунок 1. Рассматриваемые структуры 4H-SiC IGBT: SCP-IGBT (а), GS-IGBT (б)

Отличие структуры SCP-IGBT от GS IGBT заключается в том, что структура SCP-IGBT имеет N-карман (N-well), расположенный между заземлённой P^+-областью и плавающим P-экраном (floating P-shield). Эта сэндвичевая структура образует биполярный PNP-транзистор. Одновременно N-карман, P^+, P-экран и траншейный затвор формируют PMOS. В закрытом состоянии электростатический потенциал P-экрана и N-кармана (V_N) возрастает с увеличением напряжения V_{ce}. Когда напряжение затвор-N-карман (V_{GN}) становится достаточно низким для достижения порогового напряжения PMOS-транзистора, последний активируется, и потенциал P-экрана фиксируется на низком уровне благодаря проводимости PMOS. В открытом состоянии N-карман играет роль глубокого потенциального барьера

для дырок, накопленных в P-экране, что значительно усиливает эффект инжекции и снижает V_{on}. При дальнейшем росте V_N в условиях высокого V_{ce} может возникнуть эффект прокола (англ. punch-through) N-кармана, когда граница области обеднения в нем достигает P-экрана. В этом случае P-экран напрямую соединяется с P^+-эмиттером, что приводит к снижению тока насыщения.

На рисунке 2 показаны зависимость тока коллектора $I_К$ от обратного напряжения на коллекторе $U_К$ при напряжении на затворе $U_З$=0 В. Обе структуры имеют одинаковое напряжение пробоя, $V_{ПРОБ}$ = 14900 В.

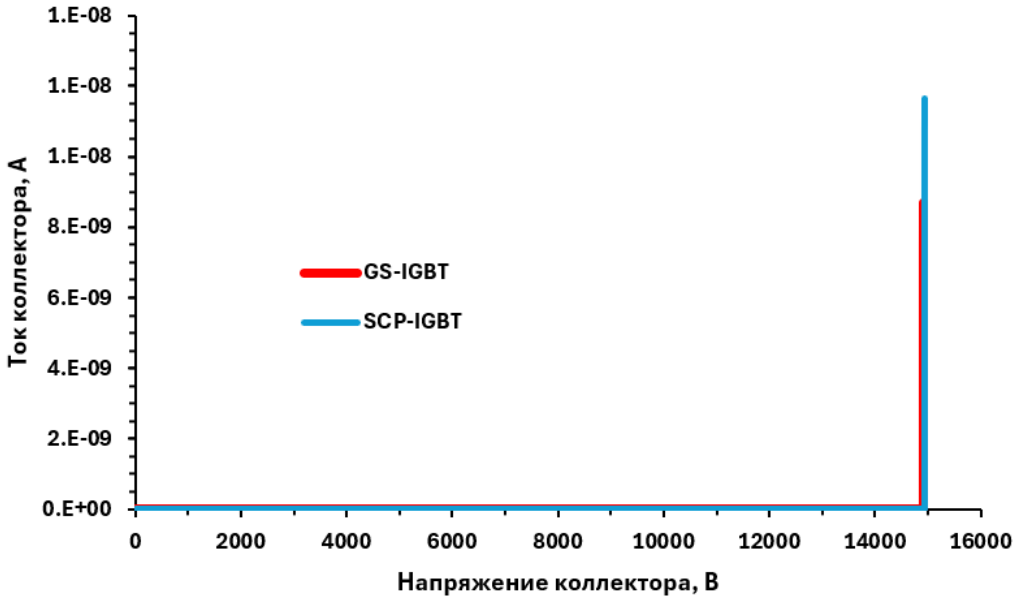


Рисунок 2. Зависимость тока коллектора $I_К$ от обратного напряжения на коллекторе $U_К$ при напряжении на затворе $U_З$ = 0 В

На рисунке 3 показаны зависимость тока коллектора $I_К$ от обратного напряжения на коллекторе $U_К$ при напряжении на затворе $U_З$=15 В.

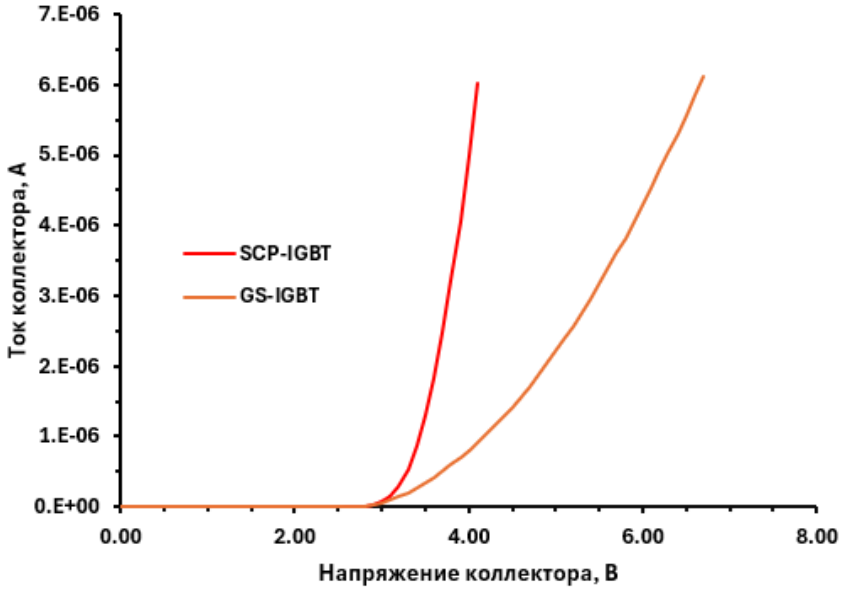


Рисунок 3. Зависимости тока коллектора от напряжения на затворе при напряжении на коллекторе равном 15 В для рассматриваемых структур

Предположим, что устройство находится во включенном состоянии, если плотность тока коллектора $J_К$ достигает 100 А/см², что соответствует величине тока коллектора $I_К = 4\times10^{-6}$ А. Тогда падение напряжения во включенном состоянии V_{on} для GS-IGBT и SCP-IGBT соответственно равны: 5,9 В и 3,9 В. Результаты моделирования показывают, что структура SCP-IGBT достигает напряжения пробоя, как и структура GS-IGBT, но имеет более низкое падение напряжения.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и исследована перспективная структура траншейного 4H-SiC БТИЗ с самозакреплённым P-экраном (SCP-IGBT), которая позволяет успешно решить проблему надёжности оксида затвора без ухудшения характеристик в открытом состоянии. За счёт введения N-кармана и формирования скрытого PNP-транзистора, P-экран эффективно экранирует дно траншеи от высокого электрического поля при запирании, а во включенном состоянии создает глубокий потенциальный барьер для дырок, усиливая эффект инжекционного усиления. Результаты моделирования показали, что структура SCP-IGBT не только обеспечивает защиту затвора и снижение тока насыщения за счет эффекта прокола при высоких напряжениях, но и позволяет значительно уменьшить падение напряжения в открытом состоянии (с 5,9 В до 3,9 В) по сравнению с классической структурой с заземленным P-экраном (GS-IGBT) при сохранении высокого напряжения пробоя в 14900 В.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Zhang, Q. 12-kV p-Channel IGBTs With Low On-Resistance in 4H-SiC / Q. Zhang, M. Das, J. Sumakeris [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – 2008. – Vol. 29, no. 9. – P. 1027–1029.

[2] Ryu, S. Ultra high voltage (>12 kV), high performance 4H-SiC IGBTs / S. Ryu, C. Capell, C. Jonas [et al.] // Proc. ISPSD. – 2012. – P. 257–260.

[3] Yonezawa, Y. Low Vf and highly reliable 16 kV ultrahigh voltage SiC flip-type n-channel implantation and epitaxial IGBT / Y. Yonezawa, T. Mizushima, K. Takenaka [et al.] // IEDM Tech. Dig. – 2013. – P. 6.6.1–6.6.4.

[4] Vechalapu, K. Comparative Evaluation of 15-kV SiC MOSFET and 15-kV SiC IGBT for Medium-Voltage Converter Under the Same dv/dt Conditions / K. Vechalapu, S. Bhattacharya, E. Van Brunt [et al.] // IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. – 2017. – Vol. 5, no. 1. – P. 469–489.

[5] Kim, M. Evaluation of Long-Term Reliability and Overcurrent Capabilities of 15-kV SiC MOSFETs and 20-kV SiC IGBTs During Narrow Current Pulsed Conditions / M. Kim, J. J. Forbes, E. A. Hirsch [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2020. – Vol. 48, no. 11. – P. 3962–3967.

[6] Kaji, N. Ultrahigh-Voltage SiC p-i-n Diodes With Improved Forward Characteristics / N. Kaji, H. Niwa, J. Suda, T. Kimoto // IEEE Trans. Electron Devices. – 2015. – Vol. 62, no. 2. – P. 374–381.

[7] Kitagawa, M. A 4500 V injection enhanced insulated gate bipolar transistor (IEGT) operating in a mode similar to a thyristor / M. Kitagawa, I. Omura, S. Hasegawa [et al.] // IEDM Tech. Dig. – 1993. – P. 679–682.

4H-SiC TRENCH INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH LOW ON-STATE VOLTAGE DROP

Nguyen Trong Thanh, V.V. Vetoshkin, V.S.Yakush

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
nguyentrongt123@gmail.com

Abstract: this paper presents an investigation of a 4H-SiC trench IGBT structure with a P-shielding layer. In the off-state, the P-shield is fixed at a low potential due to the conductivity of a PMOS transistor, providing effective shielding of the trench gate oxide from the strong electric field. In the on-state, the P-shield is isolated from the emitter electrode by an N-well layer, which enhances the carrier injection effect. At high collector-emitter voltages, the P-shield is directly connected to the emitter through the punch-through effect of an open-base PNP transistor, which allows for a reduction in the saturation current.

Keywords: 4H-SiC IGBT, trench gate, P-shield, SCP-IGBT, voltage drop.