

Исследование влияния технологических режимов создания “field-stop” слоя на характеристики SPT-IGBT

П.С. Абрашин, А.Ю. Красюков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

г. Москва, Россия

e-mail: abrashin.pasha@mail.ru

Research of influence of technological modes of “field-stop” layer creation on SPT-IGBT characteristics

P.S. Abrashin, A.Y. Krasukov

National Research University of Electronic Technology – MIET

Moscow, Russia

e-mail: abrashin.pasha@mail.ru

Аннотация: В современных SPT-IGBT “field-stop” (FS) слой, необходимый для снижения потерь при переключении, реализуется с помощью процесса ионной имплантации и последующей лазерной активации. Однако, при проектировании IGBT существует компромисс между прямым падением напряжения и временем выключения, поэтому необходимо учитывать эффективность инжекции Р-коллектора и время жизни дырок в FS-слое. В данной работе исследовалась конструкция SPT-IGBT с разными профилями легирования FS-слоя и Р⁺-коллектора. Активация примесей реализована с помощью модели Sentaurus TCAD “Melt Laser Anneal”. Моделирование показало, что одностадийный процесс с энергией 400 кэВ обеспечивает потери, сопоставимые с высокоэнергетическим двухстадийным легированием (600/300) кэВ. Результаты согласуются с аналитическими моделями и подтверждают возможность использования данного подхода для создания SPT-IGBT.

Ключевые слова: SPT-IGBT, field-stop слой, потери при включении и выключении, лазерный отжиг, MLA, высокоэнергетическое легирование, Sentaurus TCAD

Abstract: Modern SPT-IGBTs utilize a field-stop (FS) layer, essential for reducing switching losses, which is fabricated through ion implantation followed by laser activation. However, IGBT design involves a trade-off between forward voltage drop and turn-off time, necessitating careful consideration of P-collector injection efficiency and hole lifetime in the FS layer. This study investigates the design of SPT-IGBTs with different doping profiles for the FS layer and P⁺-collector. Impurity activation was simulated using the Sentaurus TCAD "Melt Laser Anneal" model. The simulations demonstrated that a single-step implantation process at 400 keV achieves losses comparable to high-energy two-step doping (600/300 keV). The results align with analytical models and confirm the feasibility of this approach for SPT-IGBT fabrication.

Keywords: SPT-IGBT, field-stop layer, turn-on and turn-off losses, laser annealing, MLA, high-energy alloying, Sentaurus TCAD

В последнее десятилетие, благодаря внедрению процессов ионной имплантации обратной стороны (ОС) пластины, была разработана оптимизированная версия асимметричного IGBT – «Soft Punch Through» (SPT) с «field-stop» (FS-слой или N⁺-буфер) [1-3]. Эта конструкция с тонкой N-дрейфовой областью и оптимизированным буфером сочетает преимущества технологий «Punch Through» (низкие потери за счет тонкой области дрейфа) и «Non Punch Through» (мягкое выключение за счет низкой эффективности P⁺-коллектора) IGBT, как показано на рис.1.

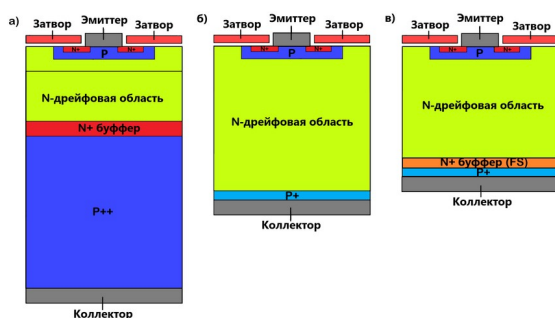


Рис. 1 – Конструкции базовых ячеек а) PT-IGBT, б) NPT-IGBT и в) SPT-IGBT

Однако, при реализации данной конструкции возникают трудности из-за необходимости активации фосфора в FS-слое. В силовых приборах металлические контакты и полиимидная пассивация на лицевой стороне - наиболее термочувствительные элементы,

расположенные в непосредственной близости от слоев, требующих активации примесей, особенно для тонких пластин. Решение заключается в формировании буфера и коллектора на завершающих этапах маршрута изготовления прибора (FEOL).

Для формирования FS-слоя наиболее эффективна лазерная активация ионно-имплантированного фосфора [4]. При изготовлении силовых приборов применяются наносекундные лазерные импульсы, при чем режим расплава обеспечивает ускорение диффузии примесей на 7 порядков [5]. Глубина термического воздействия напрямую зависит от длительности лазерного импульса. В данной работе использовалась модель "Melt Laser Anneal" от разработчиков Sentaurus с длиной волны УФ-лазера 308 нм, плотностью энергии 6,1 Дж/см² и длительностью импульса 155 нс [6]. В этом случае имитируемая глубина плавления составляет приблизительно 1,1 мкм.

Другой важной частью формирования SPT-IGBT является выбор профилей буферного и коллекторного легирования. Характеристики прибора в статическом и динамическом режимах определяются коэффициентом усиления встроенного PNP-транзистора, что создает компромисс между прямым падением напряжения и временем выключения [7]. Данное исследование направлено на анализ влияния доз легирования буфера (фосфором) и коллектора (бором) при пониженных энергиях имплантации на характеристики SPT-IGBT.

Для технологического моделирования использовалась стандартная планарная ячейка IGBT (рис.1), рассчитанная на напряжение 1700 В. За эталонную взята структура ОС с режимами из проекта Sentaurus TCAD с двухстадийным процессом легирования обратной стороны фосфором с энергиями 600 кэВ и 300 кэВ [6]. При переходе на режим с энергией 400 кэВ рассматривались несколько профилей легирования ОС, как показано на рис.2.

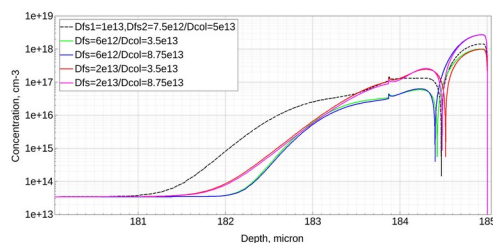


Рис. 2 – Профили распределения примеси SPT IGBT при стандартном легировании FS-слоя (600/300) кэВ и при 400 кэВ с различными дозами имплантации буфера D_{FS} и коллектора D_{COL} .

Для исследования работы SPT-IGBT с менее глубоким FS-слоем при включении и выключении было проведено электрофизическое моделирование прибора с использованием Sentaurus TCAD. Рассматривались две аналитических модели ассиметричной структуры IGBT – с низким и высоким временами жизни дырок в N^+ -буфере. Падение напряжения быстро увеличивается, при увеличении концентрации легирования в FS-слое выше $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (высокоуровневая модель, $D_{FS}=2e13 \text{ см}^{-3}$), а максимальной концентрацией легирования для низкоуровневого времени жизни является $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (низкоуровневая модель, $D_{FS}=6e12 \text{ см}^{-3}$) [7]. Обе модели были так же рассмотрены в сочетании со слаболегированным и сильнолегированным коллектором. Во всех случаях рассчитанное значение напряжение пробоя составило более 2000 В. Результаты расчета выходных ВАХ и характеристик выключения SPT-IGBT с разными режимами легирования ОС представлены на рис.3.

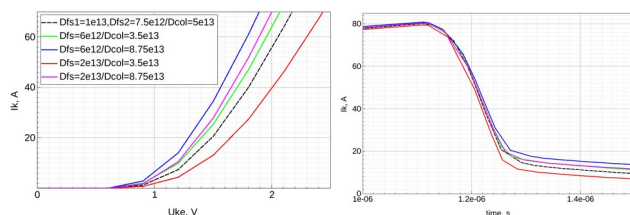


Рис. 3 – Выходные ВАХ (слева) и характеристики выключения (справа) SPT-IGBT при стандартном легировании FS-слоя (600/300) кэВ и при 400 кэВ с различными дозами имплантации буфера D_{FS} и коллектора D_{COL} . Режимы моделирования одиночного импульса: $V_{CC}=900 \text{ В}$, $R_g=30 \text{ мОм}$, $L_c=72 \text{ нГн}$

Можно заметить, что падение напряжения в высокоуровневом буфере может быть снижено путем увеличения концентрации легирования в коллекторе, когда концентрация легирования N^+ -буфера увеличивается. Такая же ситуация происходит при низкоуровневом буфере, однако, в данном случае концентрацию в P^+ -коллекторе необходимо уменьшать. Это происходит за счет сохранения эффективности инжекции дырок на нижнем PN-переходе.

Процесс выключения становится быстрее, когда концентрация легирования N^+ -буфера увеличивается, так как время жизни дырок сокращается, что делает ее очень эффективной областью рекомбинации электронно-дырочных пар во время выключения прибора. При

увеличении концентрации легирования в P^+ -коллекторе накапливается большой заряд в дрейфовой области, что ведет к дальнейшему увеличению времени выключения.

Таким образом, при уменьшении глубины залегания FS-слоя в следствии снижения энергии легирования можно контролировать потери при включении и выключении. Это реализуемо как для низкоуровневой модели асимметричной структуры IGBT, при которой необходимо уменьшать уровень легирования P^+ -коллектора, так и для высокоуровневой модели, при которой необходимо увеличивать концентрацию в P^+ -коллекторе соответственно. При этом необходимо учитывать, что структура ОС SPT-IGBT более чувствительна к изменению концентрации легирования P^+ -коллектора нежели N^+ -буфера.

В настоящей работе были исследованы и проанализированы характеристики включения и выключения SPT-IGBT. Отличный компромисс между потерями при включении и выключении был достигнут путем изменения концентрации легирования как N^+ -буфера, так и P^+ -коллектора. Результаты согласуются с аналитическими моделями асимметричных структур прибора. Подобранные технологические режимы могут применяться для создания IGBT по технологии “field-stop”.

Библиографический список

1. Dewar S. et al. Soft punch through (SPT)—setting new standards in 1200V IGBT //Proc. PCIM. – 2000. – С. 593-600.
2. Laska T. et al. The field stop IGBT (FS IGBT). A new power device concept with a great improvement potential //12th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Proceedings (Cat. No. 00CH37094). – IEEE, 2000. – С. 355-358.
3. Nakamura K. et al. Advanced wide cell pitch CSTBTs having light punch-through (LPT) structures //Proceedings of the 14th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics. – IEEE, 2002. – С. 277-280.
4. Seino T. et al. Backside activation of power device IGBTs by microsecond-pulsed green laser annealing thermally assisted with CW diode laser //2010 18th International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors (RTP). – IEEE, 2010. – С. 140-143.
5. Huet K. Laser annealing applications for semiconductor devices manufacturing //Laser Annealing Processes in Semiconductor Technology. – Woodhead Publishing, 2021. – С. 137-173.

6. Manual S. D. U. Sentaurus Process User Manual //CA, USA: Synopsys, Synopsys. – 2017.
7. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – Springer, 2018.