CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-24-32

УДК 621.382.323

СУПЕРПЕРЕХОДНЫЙ БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ И ВЕРТИКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КАНАЛА С ЭКРАНИРОВАННЫМ ПЛАВАЮЩИМ СЛОЕМ НАКОПЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

ЧОНГ ТХАНЬ НГУЕН, И. Ю. ЛОВШЕНКО, В. С. ВОЛЧЁК, П. Э. НОВИКОВ, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Предложена и исследована посредством компьютерного моделирования приборная структура суперпереходного биполярного транзистора с изолированным затвором с плавающим слоем накопления носителей заряда. В рассматриваемой структуре слой накопления экранируется расположенным под ним *p*-слоем. Установлено, что концентрация в слое накопления носителей заряда не влияет на напряжение пробоя, а предлагаемая приборная структура биполярного транзистора с изолированным затвором обладает более высокой эффективностью по сравнению с традиционным суперпереходным траншейным биполярным транзистором с изолированным затвором, суперпереходными траншейными биполярными транзисторами с изолированным затвором с плавающей *p*-областью и с адаптивным путем экстракции дырок. Так, при одинаковом падении напряжения в открытом состоянии 0,946 В энергия потерь при выключении у предлагаемого прибора на 75,38 % меньше, чем у суперпереходного траншейного биполярного транзистора с изолированным затвором с плавающей *p*-областью, и на 52 % меньше, чем у транзистора с адаптивным путем экстракции дырок. При одинаковой энергии потерь при выключении 2,3 мДж/см^2 падение напряжения в открытом состоянии у предлагаемого прибора на 39,86 % меньше, чем у суперпереходного траншейного биполярного транзистора с изолированным затвором.

Ключевые слова: баланс заряда, моделирование, напряжение пробоя, падение напряжения в открытом состоянии, силовая электроника, слой накопления носителей заряда, суперпереходный биполярный транзистор с изолированным затвором, транзистор траншейного типа, экранирующий плавающий слой, энергия потерь.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Суперпереходный биполярный транзистор с изолированным затвором и вертикальным расположением канала с экранированным плавающим слоем накопления носителей заряда / Чонг Тхань Нгуен [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 24–32. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-24-32.

SUPER-JUNCTION INSULATED-GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH A VERTICAL CHANNEL ARRANGEMENT AND A SHIELDED FLOATING CHARGE-CARRIER ACCUMULATION LAYER

TRONG THANH NGUYEN, IVAN LOVSHENKO, VLADISLAV VOLCHECK, PAVEL NOVIKOV, VIKTOR STEMPITSKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A device structure for a superjunction insulated-gate bipolar transistor featuring a floating charge-carrier accumulation layer has been proposed and investigated via computer simulation. In this structure, the accumulation layer is shielded by an underlying *p*-type layer. It is established that the charge-carrier concentration within the accumulation layer does not affect the breakdown voltage. Furthermore, the proposed insulated-gate bipolar transistor structure demonstrates superior efficiency compared to conventional superjunction trench insulated-gate bipolar transistor's, as well as those utilizing a floating *p*-region or an adaptive hole-

extraction path. Specifically, at an identical on-state voltage drop of 0.946 V, the turn-off energy loss of the proposed device is 75.38 % lower than that of a superjunction trench insulated-gate bipolar transistor with a floating *p*-region, and 52 % lower than that of a device with an adaptive hole-extraction path. Conversely, for a constant turn-off energy loss of 2.3 mJ/cm^2, the on-state voltage drop of the proposed device is 39.86 % lower than that of a standard superjunction trench insulated-gate bipolar transistor.

Keywords: charge balance, modeling, breakdown voltage, on-state voltage drop, power electronics, charge-carrier accumulation layer, superjunction insulated-gate bipolar transistor, trench-gate transistor, floating shielding layer, energy loss.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Trong Thanh Nguyen, Lovshenko I., Volcheck V., Novikov P., Stempitsky V. (2026) Super-Junction Insulated-Gate Bipolar Transistor with a Vertical Channel Arrangement and a Shielded Floating Charge-Carrier Accumulation Layer. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 24–32. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-24-32 (in Russian).

Введение

В связи с развитием современной промышленности возрастает потребность в высокоэффективных силовых полупроводниковых приборах. Биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ, англ. insulated-gate bipolar transistor, IGBT) благодаря высокому напряжению пробоя и малым статическим потерям широко применяется в возобновляемой энергетике, электротранспорте и интеллектуальных силовых модулях [1]. Быстрое развитие указанных областей стимулирует постоянное совершенствование структур БТИЗ для удовлетворения промышленных требований. Таким образом, повышение надежности и снижение потерь остаются основными тенденциями развития БТИЗ [2]. БТИЗ траншейного типа на основе кремния (ТБТИЗ, англ. trench IGBT, TIGBT) стал одним из основных типов силовых полупроводниковых приборов благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам [3, 4]. Для ТБТИЗ компромиссная зависимость между падением напряжения в открытом состоянии V_{on} и энергией потерь при выключении E_{off}, как правило, оптимизируется за счет применения такого элемента, как слой, ограничивающий распространение электрического поля [5].

Суперпереходный БТИЗ (СПБТИЗ, англ. super-junction IGBT, SJ-IGBT) обладает более низким сопротивлением в открытом состоянии благодаря высокой концентрации легирования *n*- и *p*-столбов дрейфа по сравнению с обычным БТИЗ [6]. В СПБТИЗ низкие потери достигаются за счет взаимного обеднения и компенсации заряда между *n*- и *p*-столбами [7]. В [8] проведено сравнение обычного БТИЗ и СПБТИЗ, содержащего слой, ограничивающий распространение электрического поля.

На протяжении ряда лет проводились многочисленные исследования, направленные на улучшение компромисса между падением напряжения в открытом состоянии и энергией потерь при выключении при сохранении напряжения пробоя. Используя барьер для дырок, создаваемый сильно легированным слоем накопления носителей заряда (СННЗ) *n*-типа, расположенным под *p*-базовой областью, был разработан ТБТИЗ с СННЗ [9, 10]. Повышение концентрации легирования СННЗ позволило снизить прямое падение напряжения и улучшить компромисс между величинами V_{on} и E_{off}. Однако увеличение концентрации в СННЗ существенно снижает напряжение пробоя прибора, что ограничивает дальнейшее улучшение его характеристик. Таким образом, оптимизация соотношения между концентрацией в СННЗ, напряжением пробоя и компромиссом между V_{on} и E_{off} остается ограниченной.

В статье предлагается новая структура – суперпереходный траншейный БТИЗ (СПТБТИЗ, англ. SJ-TIGBT), сочетающая технологию суперперехода, плавающего СННЗ и экранирующего *p*-слоя, расположенного под СННЗ и напрямую соединенного с эмиттером через *p*-базу. Благодаря этому влияние положительных зарядов из обедненного СННЗ на напряжение пробоя полностью экранируется отрицательными зарядами *p*-области, поэтому напряжение пробоя прибора не зависит от СННЗ, а падение напряжения в открытом состоянии значительно снижается.

Приборная структура

На рис. 1 показаны конструктивные решения предлагаемой структуры (*a*), стандартной структуры СПТБТИЗ (*b*) и СПТБТИЗ с плавающей *p*-областью (*p*-СПТБТИЗ) (*c*). На рис. 1, *a* WP – ширина *p*-области для экстракции дырок, TD – толщина *n*-дрейфовой области. В СПТБТИЗ *p*-область

непосредственно соединена с *p*-эмиттером, что затрудняет усиление эффекта накопления носителей в дрейфовых областях и приводит к большому значению V_{on}. В *p*-СПТБТИЗ используется плавающая *p*-область, расположенная под затвором, что позволяет усилить эффект накопления носителей в дрейфовых областях и получить малое значение V_{on}; однако это сопровождается уменьшением напряжения пробоя из-за влияния плавающей *p*-области. Ширина траншеи для предлагаемой структуры (рис. 1, *a*) и СПТБТИЗ (рис. 1, *b*) одинакова и составляет 0,7 мкм, а для *p*-СПТБТИЗ (рис. 1, *c*) – 2,2 мкм. Основные параметры трех конструкций приведены в табл. 1.

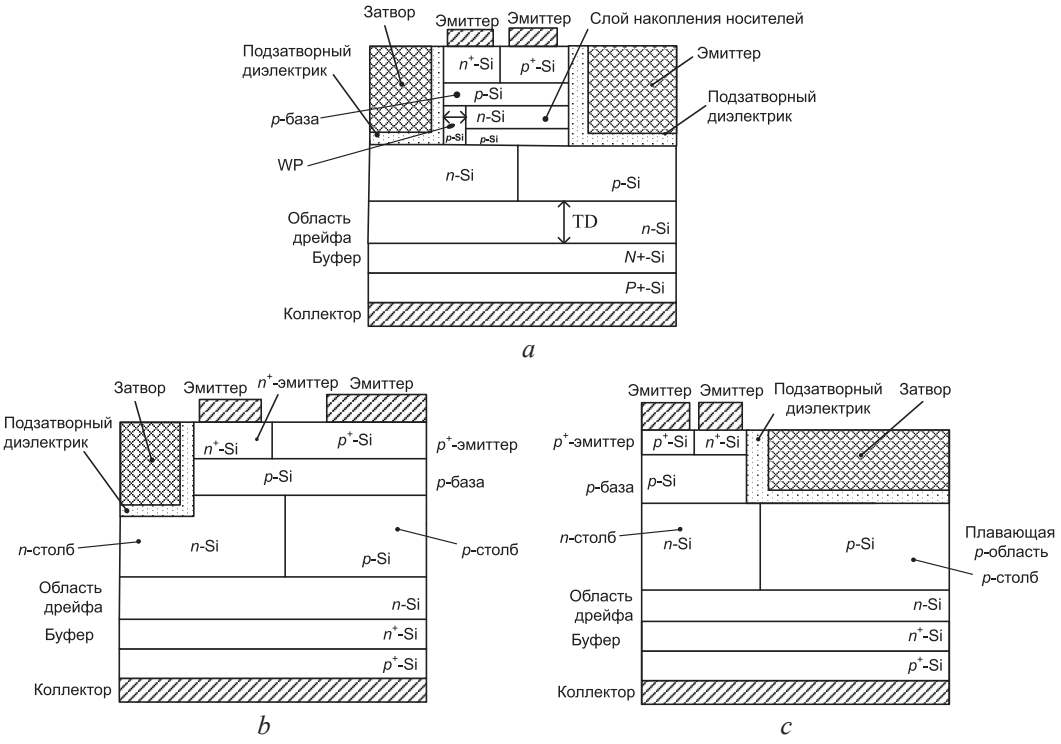


Рис. 1. Конструктивные решения приборной структуры суперпереходного траншейного биполярного транзистора с изолированным затвором: *a* – предлагаемая; *b* – стандартная; *c* – с плавающей *p*-областью

Fig. 1. Design configurations for the device structure of a superjunction trench insulated-gate bipolar transistor: *a* – proposed; *b* – standard; *c* – with a floating *p*-region

Таблица 1. Основные конструктивные параметры рассматриваемых приборных структур

Table 1. Main design parameters of the considered device structures

Параметр	Приборная структура		
	Предлагаемый вариант	СПТБТИЗ	*p*-СПТБТИЗ
Толщина оксида, мкм	0,1	0,1	0,1
Концентрация примеси p^+-коллектора, см$^{-3}$	10^{18}	10^{18}	10^{18}
Концентрация примеси n^+-эмиттера, см$^{-3}$	10^{19}	10^{19}	10^{19}
Концентрация примеси в *n*-буфере, см$^{-3}$	10^{17}	10^{17}	10^{17}
Концентрация примеси в СННЗ, см$^{-3}$	$5 \cdot 10^{16}$	–	–
Концентрация примеси в *p*-слое, расположенном под СННЗ, см$^{-3}$	$1{,}5 \cdot 10^{16}$	–	–
Концентрация примеси в *p*-области для экстракции дырок, см$^{-3}$	$4 \cdot 10^{15}$	–	–
Концентрация примеси в *n*- и *p*-столбах, см$^{-3}$	$4 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{15}$
Концентрация примеси в области *n*-дрейфа, см$^{-3}$	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$
Ширина *n*- и *p*- столбов, мкм	2,0	2,0	2,0
Толщина *n*- *и p*-столбов, мкм	92,5	92,5	92,5
Сумма толщин *n*- и *p*-столбов и области *n*-дрейфа, мкм	97,5	97,5	97,5

Предлагаемая структура содержит плавающий СННЗ, который сформирован не полностью. Этот слой создает барьер для экстракции дырок через эмиттерный *p*–*n*-переход, что увеличивает

концентрацию носителей в дрейфовой области и снижает падение напряжения в открытом состоянии. Под СННЗ расположен экранирующий *p*-слой. В закрытом состоянии транзистора этот *p*-слой напрямую соединен с *p*-базой и эмиттерным электродом, выполняя функцию экранирования СННЗ, благодаря чему концентрация примеси слоя СННЗ не влияет на напряжение пробоя структуры.

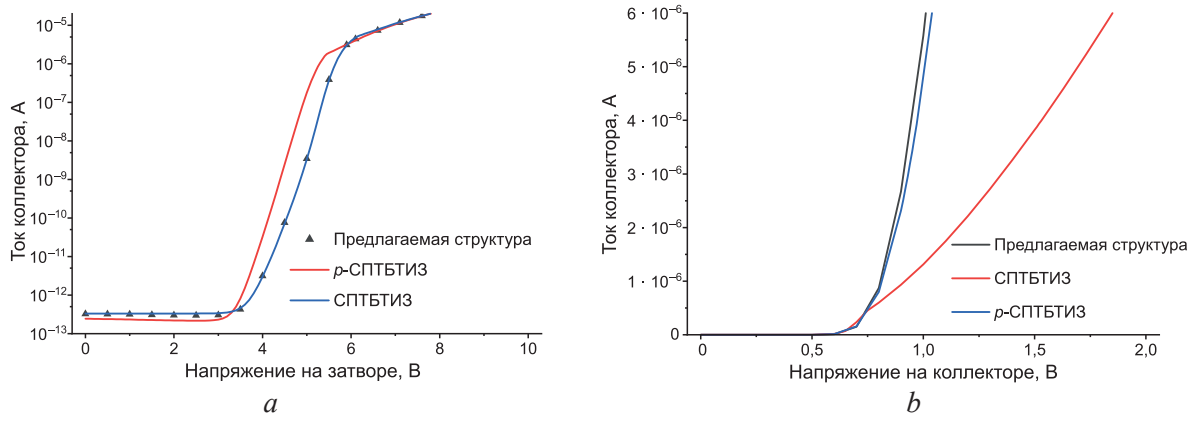
Во включенном состоянии *p*-область для экстракции дырок, расположенная между СННЗ и левым затвором, обедняется под действием положительного напряжения на затворе, что повышает квазиуровень Ферми для дырок в области, прилегающей к *p*-базе. Поскольку СННЗ в предлагаемой структуре является плавающим, эффект накопления носителей ослабляется по сравнению со структурой с полностью сформированным слоем из-за уменьшения его ширины, что приводит к увеличению значения V_{on}. Однако эта низколегированная *p*-область для экстракции дырок, расположенная вблизи *p*-базы, формирует барьер для дырок во включенном состоянии, способствуя снижению V_{on}.

В момент выключения *n*- и *p*-столбы взаимно обедняются, так что дырки концентрируются преимущественно в *p*-столбе и экстрагируются к эмиттеру, а электроны – в *n*-столбе и экстрагируются к коллектору. В моменте выключения низколегированная *p*-область, расположенная между СННЗ и левым затвором и соединенная с *p*-базой, восстанавливается из обедненного состояния, формируя путь для экстракции дырок и обеспечивая быстрое выключение прибора.

Результаты моделирования

В процессе исследований электрические характеристики приборных структур СПТБТИЗ были промоделированы с помощью программного комплекса компании Silvaco. Время жизни носителей заряда принималось равным 5 мкс. При моделировании использовались следующие физические модели: подвижности Ломбарди, зависимости подвижности от концентрации примесей и электрического поля, рекомбинации Шокли – Рида – Холла, Оже-рекомбинации, сужения запрещенной зоны и генерации носителей при ударной ионизации.

На рис. 2, *a* представлены передаточные характеристики при напряжении на коллекторе 15 В для исследуемых структур. Пороговое напряжение всех трех структур практически одинаково и составляет 5,4 В. При этом предлагаемая структура демонстрирует более высокий ток коллектора по сравнению с двумя другими. На рис. 2, *b* приведены выходные характеристики при напряжении на затворе $U_з$ = 15 В. За условное включенное состояние принималась плотность коллекторного тока 100 А/см^2, что соответствует току коллектора $4 \cdot 10^{-6}$ А. При этом прямое падение напряжения для предлагаемой структуры, СПТБТИЗ и *p*-СПТБТИЗ составляло 0,95, 1,53 и 0,97 В соответственно. Наибольшее значение V_{on} у СПТБТИЗ обусловлено непосредственным соединением *p*-столба с эмиттером. СННЗ в предлагаемой структуре значительно снижает V_{on}, делая его даже меньшим, чем в структуре *p*-СПТБТИЗ.



a *b*

Рис. 2. Характеристики трех приборных структур:
a – передаточные, при напряжении на коллекторе 15 В; *b* – выходные, при напряжении на затворе 15 В
Fig. 2. Characteristics of three device structures: *a* – transfer characteristics, at a collector voltage of 15 V; *b* – output characteristics, at a gate voltage of 15 V

На рис. 3 показано распределение концентрации носителей вдоль координат x = 1 мкм (*a*) и x = 3 мкм (*b*) в *n*- и *p*-столбах. Для структуры СПТБТИЗ концентрации электронов и дырок

существенно различаются вблизи эмиттера и становятся сопоставимыми только вблизи коллектора, что свидетельствует о смешанном униполярно-биполярном режиме проводимости. Напротив, для предлагаемой структуры и *p*-СПТБТИЗ разница между концентрациями электронов и дырок невелика, что указывает на их работу в биполярном режиме.

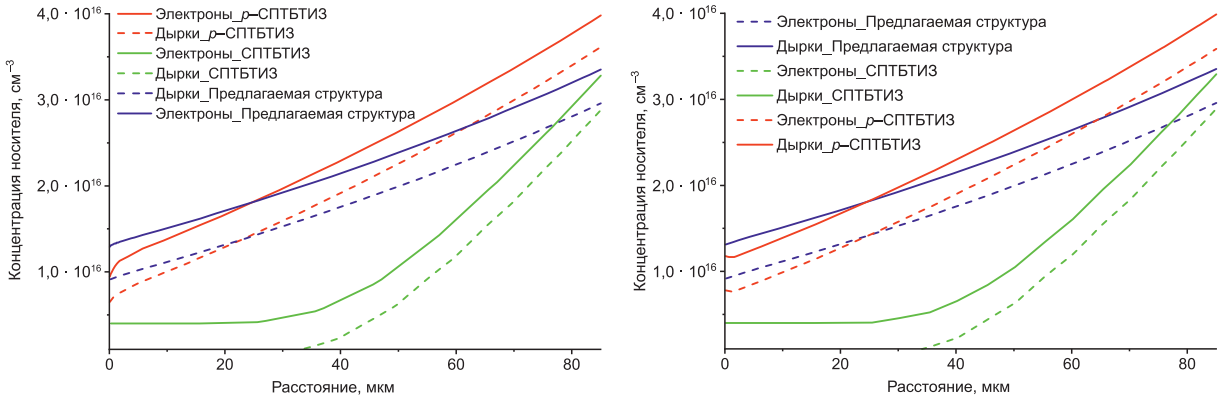


Рис. 3. Распределение концентраций носителей в *n*- и *p*-столбах при напряжении на затворе 15 В и плотности тока коллектора 100 А/см^2 вдоль: *a* – *x* = 1 мкм; *b* – *x* = 3 мкм

Fig. 3. Distribution of carrier concentrations in the *n*- and *p*-pillars at a gate voltage of 15 V and a collector current density of 100 A/cm^2, along: *a* – *x* = 1 μm; *b* – *x* = 3 μm

Напряжение пробоя предлагаемой структуры, СПТБТИЗ и *p*-СПТБТИЗ составило 1520, 1528 и 1200 В соответственно. СННЗ не влияет на напряжение пробоя предлагаемой структуры, поскольку в выключенном состоянии *p*-слой обеспечивает экранирование СННЗ и удержание его потенциала на низком уровне. Напряжение пробоя *p*-СПТБТИЗ ниже, чем у СПТБТИЗ и предлагаемой структуры, так как в блокирующем режиме потенциал *p*-области под затвором возрастает с увеличением напряжения на коллекторе, что приводит к усилению электрического поля и более раннему пробою.

На рис. 4, *a* показана зависимость напряжения пробоя (англ. breakdown voltage, BV) и величины V_{on} от дисбаланса заряда для различных приборных структур. Условие баланса заряда заключается в равенстве заряда в *n*-столбе заряду в *p*-столбе. Так как ширина столбов определена (2 мкм), дисбаланс заряда достигается путем изменения концентрации легирования. Дисбаланс заряда в данном исследовании реализован поддержанием концентрации N_a акцепторной примеси в *p*-столбе на уровне $4 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$ и изменением концентрации N_d донорной примеси в *n*-столбе. Дисбаланс заряда количественно характеризуется степенью компенсации (англ. compensation degree, CD), которая может быть определена (в процентах) как $CD = (N_a - N_d) \cdot 100\ \%/N_d$.

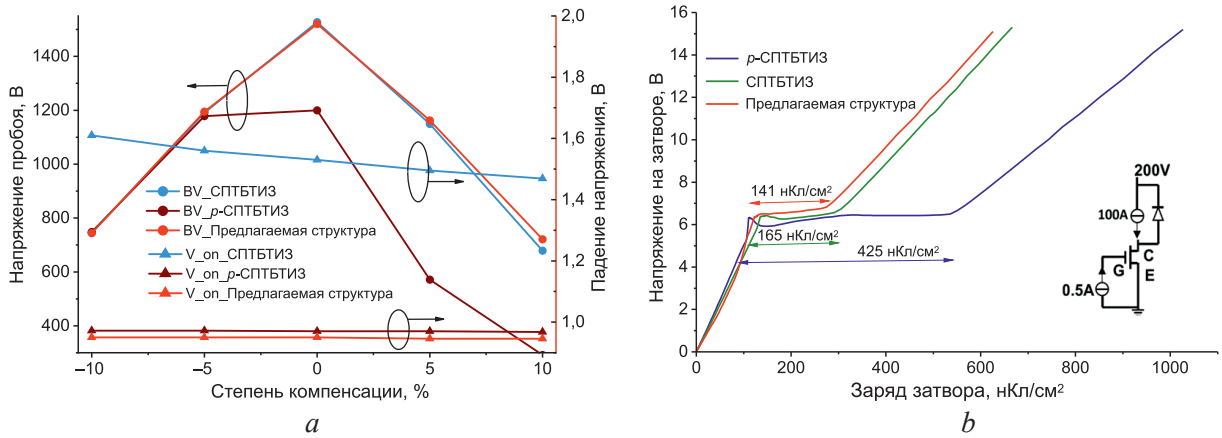


Рис. 4. Зависимость напряжения пробоя и падения напряжения в открытом состоянии от степени компенсации (*a*) и заряда затвора от напряжения на затворе (*b*)

Fig. 4. Dependence of breakdown voltage and on-state voltage drop on the degree of compensation (*a*), and of gate charge on gate voltage (*b*)

Полученные результаты показывают, что величина V_{on} для *p*-СПТБТИЗ и предлагаемой структуры слабо зависит от дисбаланса заряда, тогда как для СПТБТИЗ данная зависимость выражена значительно сильнее. При этом напряжение пробоя всех исследуемых структур существенно определяется величиной дисбаланса заряда. СПТБТИЗ отличается повышенной концентрацией примесей в *n*- и *p*-столбах по сравнению с БТИЗ. Высокое напряжение пробоя обеспечивается совместным действием поперечного и продольного электрических полей. Поскольку структура СПТБТИЗ основана на принципе баланса заряда, для поддержания высокого напряжения пробоя необходимо взаимное компенсирование зарядов в *n*- и *p*-столбах. Для каждой структуры максимальное напряжение пробоя достигается при нулевом дисбалансе заряда.

На рис. 4, *b* изображена зависимость заряда затвора $Q_з$ от напряжения затвора $U_з$ для трех приборных структур. Предлагаемая конструкция характеризуется наиболее короткой площадкой Миллера, при этом для нее заряд затвор–коллектор $Q_{зк}$, определяемый по ширине площадки Миллера вдоль оси $Q_з$, составляет 141 нКл/см^2; для СПТБТИЗ $Q_{зк}$ = 165 нКл/см^2. Наибольшее значение $Q_{зк}$ = 425 нКл/см^2 наблюдается у *p*-СПТБТИЗ, что связано с наибольшей шириной затвора данной структуры и, как следствие, приводит к увеличению емкости затвор–коллектор.

На рис. 5 показано поперечное сечение структуры СПТБТИЗ с адаптивным путем экстракции дырок (АСПТБТИЗ, англ. self-adaptive hole-extracting SJ-TIGBT, SAHE-SJ-TIGBT), исследованной в [11]. В рассматриваемом в данной статье случае АСПТБТИЗ используется в качестве сравнительной структуры для анализа компромисса между падением напряжения в открытом состоянии и энергией потерь при выключении. Принцип работы АСПТБТИЗ заключается в следующем. В открытом состоянии *p*-область, расположенная между двумя затворами и непосредственно соединенная с эмиттером, обедняется под действием положительного напряжения на затворе, формируя потенциальный барьер для дырок и усиливая эффект накопления носителей заряда в *n*- и *p*-столбах. В выключенном состоянии обедненная *p*-область адаптивно восстанавливается, и избыточные дырки экстрагируются через нее в эмиттер.

На рис. 6 представлены характеристики выключения предлагаемой приборной структуры, *p*-СПТБТИЗ и АСПТБТИЗ при одинаковом значении V_{on} = 0,946 В, обеспеченном за счет изменения концентрации примеси *p*-коллектора. Характеристики выключения были получены при следующих параметрах тестовой схемы: напряжение питания V_{bus} = 600 В, сопротивление затвора R_G = 5 Ом, ток нагрузки I_L = 100 А и паразитная индуктивность L_S = 10 нГн. Благодаря наличию в предлагаемой структуре пути для экстракции дырок, формируемого небольшой частью *p*-области между СННЗ и левым затвором, энергия потерь при выключении составляет 3,2 мДж/см^2, что существенно меньше по сравнению со структурой *p*-СПТБТИЗ, для которой E_{off} = 13 мДж/см^2. Кроме того, время выключения предлагаемой структуры составляет около 1,2 мкс при E_{off} = 3,2 мДж/см^2, тогда как для АСПТБТИЗ – примерно 2,6 мкс при E_{off} = 6,7 мДж/см^2. АСПТБТИЗ также имеет большую емкость затвор–коллектор, что приводит к более длительной задержке выключения.

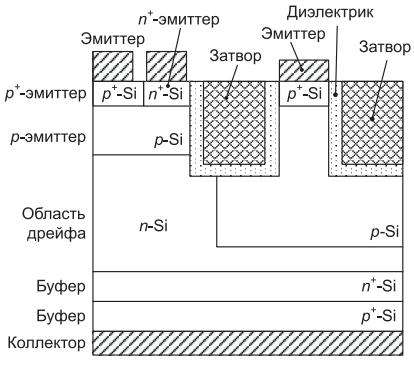


Рис. 5. Приборная структура суперпереходного траншейного биполярного транзистора с изолированным затвором с адаптивным путем экстракции дырок
Fig. 5. Device structure of super junction trench insulated gate bipolar transistor with adaptive hole extraction path

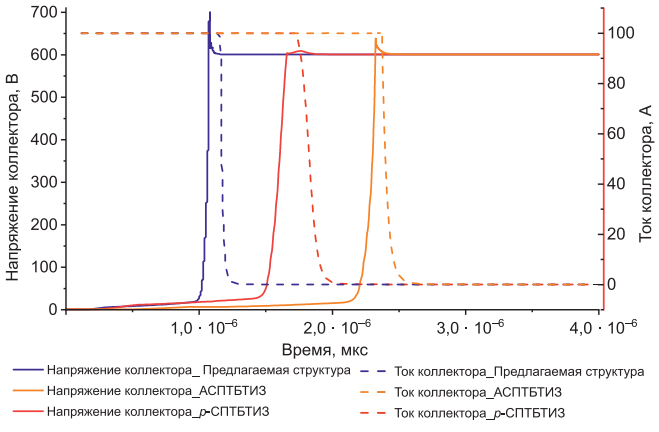
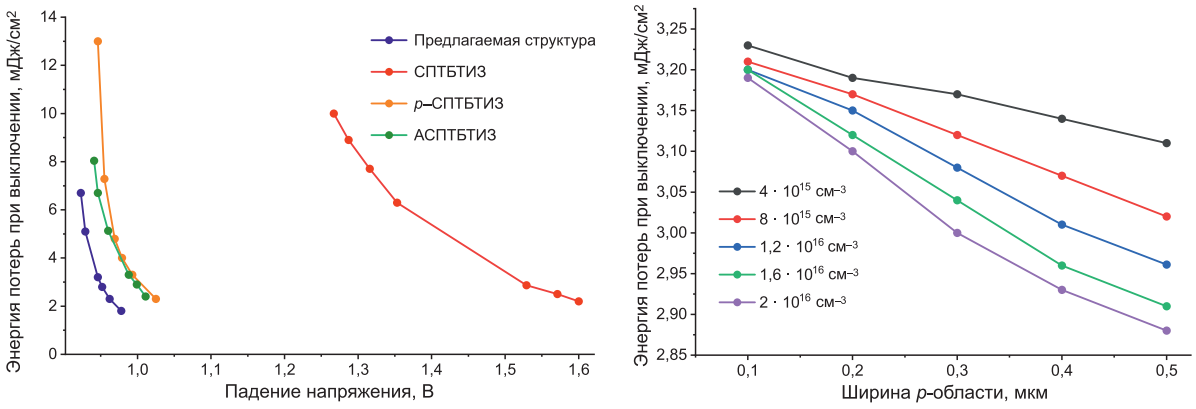


Рис. 6. Характеристики выключения и схема измерений различных структур биполярных транзисторов при одинаковом V_{on} = 0,946 В
Fig. 6. Turn-off characteristics and measurement circuit for various bipolar transistor structures at an identical V_{on} = 0.946 V

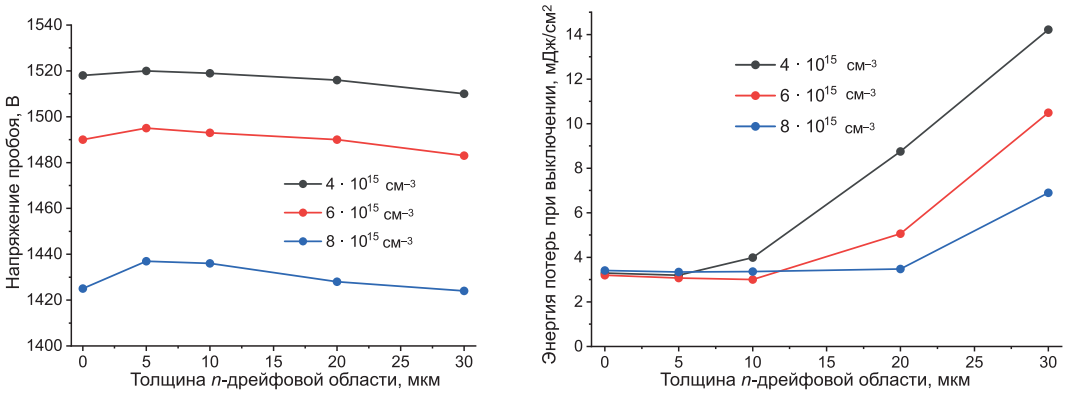
На рис. 7, *a* представлены зависимости, характеризующие компромисс между падением напряжения в открытом состоянии и энергией потерь при выключении E_{off}. При одинаковом V_{on} = 0,946 В предлагаемая структура обеспечивает уменьшение значения E_{off} на 75,38 % по сравнению с *p*-СПТБТИЗ и на 52 % – по сравнению с АСПТБТИЗ [11]. При одинаковом E_{off} = 2,3 мДж/см^2 предлагаемая структура обеспечивает уменьшение значения V_{on} на 39,86 % по сравнению с СПТБТИЗ. На рис. 7, *b* показаны зависимости энергии потерь при выключении предлагаемой структуры от ширины WP и концентрации легирования *p*-области для экстракции дырок. Установлено, что значение E_{off} уменьшается с увеличением ширины этой области и повышением степени ее легирования. Это объясняется тем, что более широкая и сильнее легированная *p*-область создает канал для экстракции дырок к эмиттеру в процессе выключения с меньшим сопротивлением. Напротив, значение V_{on} снижается при уменьшении ширины *p*-области и понижении ее концентрации. В этом случае область формирует более высокий потенциальный барьер для дырок.



a *b*

Рис. 7. Зависимость энергии потерь при выключении: *a* – от падения напряжения; *b* – от ширины и концентрации легирования *p*-области для экстракции дырок
Fig. 7. Dependence of turn-off energy loss: *a* – on voltage drop; *b* – on the width and doping concentration of the *p*-region for hole extraction

Установлено, что толщина столбов практически не влияет на величину V_{on}. При фиксированном значении толщины *n*-дрейфовой области TD увеличение концентрации легирования *n*- и *p*-столбов приводит к незначительному уменьшению V_{on}. На рис. 8 показано влияние суммарной толщины *n*- и *p*-столбов и толщины *n*-дрейфовой области TD и степени легирования столбов на напряжение пробоя (*a*) и величину E_{off} (*b*) предлагаемой структуры.



a *b*

Рис. 8. Влияние толщины *n*-дрейфовой области и степени легирования столбов: *a* – на напряжение пробоя; *b* – на энергию потерь при выключении
Fig. 8. Influence of the *n*-drift region thickness and the doping level of the pillars: *a* – on the breakdown voltage; *b* – on the turn-off energy loss

При суммарной толщине более 10 мкм напряжение пробоя снижается для всех трех значений концентрации примеси *n*- и *p*-столбов. При фиксированном значении TD напряжение пробоя

уменьшается с увеличением концентрации, поскольку пиковое электрическое поле в суперпереходной структуре может возрастать при увеличении концентрации легирования *n*- и *p*-столбов, а также потому, что более высокая концентрация затрудняет полное обеднение этих столбов при обратном смещении. Так, при TD = 5 мкм напряжение пробоя достигает максимального значения. При фиксированной концентрации E_{off} сперва уменьшается, а затем возрастает с увеличением концентрации, что означает существование ее оптимального значения, при котором достигаются минимальная величина E_{off} и оптимальный компромисс между E_{off} и V_{on}. При суммарной толщине более 20 мкм энергия потерь при выключении прибора уменьшается с увеличением концентрации легирования *n*- и *p*-столбов, так как при более высокой концентрации область *n*-дрейфа обедняется быстрее, что приводит к исчезновению токового хвоста.

Заключение

1. Благодаря сочетанию суперпереходной структуры и плавающего слоя накопления носителей заряда *n*-типа в предлагаемой конструкции биполярного транзистора с изолированным затвором обеспечивается низкое падение напряжения в открытом состоянии. Слой накопления носителей заряда *n*-типа экранируется расположенным под ним *p*-слоем, соединенным с эмиттером, что способствует экстракции дырок при выключении и предотвращает снижение напряжения пробоя.

2. Результаты моделирования показали, что при одинаковом падении напряжения в открытом состоянии 0,946 В значение энергии потерь при выключении у предлагаемого прибора на 75,38 % меньше, чем у суперпереходного траншейного биполярного транзистора с изолированным затвором с плавающей *p*-областью, и на 52 % меньше, чем у транзистора с адаптивным путем экстракции дырок. При одинаковой энергии потерь при выключении (2,3 мДж/см^2) падение напряжения в открытом состоянии у предлагаемого прибора на 39,86 % меньше, чем у суперпереходного траншейного биполярного транзистора с изолированным затвором.

3. Исследования выполнены в рамках задания 1.6 «Радиационные эффекты в приборных структурах на кремнии, кремний-германии и нитриде галлия» Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии».

Список литературы / References

1. Iwamuro N., Laska T. (2017) IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 64 (3), 741–752. https://doi.org/10.1109/TED.2017.2654599.
2. Wang H., Su M., Sheng K. (2017) Theoretical Performance Limit of the IGBT. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 64 (10), 4184–4192. https://doi.org/10.1109/TED.2017.2737021.
3. Bernet S. (2000) Recent Developments of High Power Converters for Industry and Traction Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 15 (6), 1102–1117. https://doi.org/10.1109/63.892825.
4. Shenai K. (2015) The Invention and Demonstration of the IGBT. *IEEE Power Electronics Magazine*. 2 (2), 12–16. https://doi.org/10.1109/MPEL.2015.2421751.
5. Laska T., Munzer M., Pfirsch F., Schaeffer C., Schmidt T. (2000) 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*. 355–358. https://doi.org/10.1109/ISPSD.2000.856842.
6. Zhang W., Zhang B., Qiao M., Li Z., Luo X., Li Z. (2017) The $R_{ON,min}$ of Balanced Symmetric Vertical Super Junction Based on R-Well Model. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 64 (1), 224–230. https://doi.org/10.1109/TED.2016.2632113.
7. Antoniou M., Udrea F., Bauer F. (2010) The Superjunction Insulated Gate Bipolar Transistor Optimization and Modeling. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 57 (3), 594–600. https://doi.org/10.1109/TED.2009.2039260.
8. Oh K. H., Lee J., Lee K. H., Kim Y. C., Yun C. (2006) A Simulation Study on Novel Field Stop IGBTs Using Superjunction. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 53 (4), 884–890. https://doi.org/10.1109/TED.2006.870278.
9. Takahashi T., Tomomatsu Y., Sato K. (2008) CSTBT (III) as the Next Generation IGBT. *Proceedings of the 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's*. 72–75. https://doi.org/10.1109/ISPSD.2008.4538900.
10. Zhang J. P., Deng H. N., Zhu R. R., Li Z. H., Zhang B. (2022) High Performance Carrier Stored Trench Bipolar Transistor with Dual Shielding Structure. *Chinese Physics B*. 32 (3). https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac873d.

11. Wei J., Zhang S., Luo X., Fan D., Zhang B. (2021) Low Switching Loss and EMI Noise IGBT with Self-Adaptive Hole-Extracting Path. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 68 (5), 2572–2576. https://doi.org/10.1109/TED.2021.3065898.

Поступила 21.09.2026
Received: 21 September 2026

Принята в печать 16.10.2026
Accepted: 16 October 2026

Вклад авторов

Чонг Тхань Нгуен предложил усовершенствование стандартной конструкции, выполнил компьютерные эксперименты, подготовил рукопись статьи.

Ловшенко И. Ю. выполнил анализ полученных результатов.

Волчёк В. С., Новиков П. Э. привели рукопись статьи в соответствие с требованиями журнала, внесли правки в текстовую и графическую информацию.

Стемпицкий В. Р. определил цель и задачи исследования.

Authors' contribution

Trong Thanh Nguyen proposed an improvement to the standard design, conducted computer experiments, and prepared a manuscript for an article.

Lovshenko I. analyzed of the obtained results.

Volcheck V., Novikov P**.** brought the manuscript of the article into compliance with the journal's requirements and made revisions to the text and graphical content.

Stempitsky V. determined the goal and objectives of the research.

Сведения об авторах

Чонг Тхань Нгуен, асп. каф. микро- и наноэлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ловшенко И. Ю., зав. науч.-исслед. лаб. «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем» (НИЛ 4.4), БГУИР

Волчёк В. С., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИЛ 4.4, БГУИР

Новиков П. Э., мл. науч. сотр. НИЛ 4.4, БГУИР

Стемпицкий В. Р., канд. техн. наук, доц., науч. рук. НИЛ 4.4, проректор по научной работе, БГУИР

Information about the authors

Trong Thanh Nguyen, Postgraduate of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Lovshenko I., Head of the Research Laboratory "Computer-Aided Design of Micro- and Nanoelectronic Systems" (Lab. 4.4), BSUIR

Volcheck V., Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher at the Lab. 4.4, BSUIR

Novikov P., Junior Research at the Lab. 4.4, BSUIR

Stempitsky V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Scientific Director of the Lab. 4.4, Vice-Rector for Research, BSUIR

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-79
E-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Волчёк Владислав Сергеевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-79
E-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Volcheck Vladislav