

Влияние инжекционной способности анодного эмиттера на характеристики комбинированных СИТ–МОП транзисторов

© А.С. Кюреган⁺, А.В. Горбатьюк*, Б.В. Иванов[‡]

⁺ Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина, 111250 Москва, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: semlab@yandex.ru

(Получена 10 ноября 2015 г. Принята к печати 25 ноября 2015 г.)

С помощью двумерного численного моделирования изучена возможность оптимизации высоковольтных комбинированных СИТ–МОП транзисторов (КСМТ) путем локального уменьшения времени жизни вблизи анодного эмиттера и(или) снижения его инжекционной способности тремя различными способами. Показано, что с физической точки зрения все четыре способа оптимизации эквивалентны и позволяют уменьшить энергию потерь в КСМТ при выключении E_{off} на 30–40%, как и в биполярных транзисторах с изолированным затвором (БТИЗ). Однако при прочих равных условиях энергия E_{off} в КСМТ оказалась на 15–35% меньше, чем в эквивалентных БТИЗ траншейной конструкции.

1. Введение

В настоящее время биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ) являются наиболее эффективными и распространенными ключевыми элементами для преобразователей средней мощности [1,2]. Наилучшими характеристиками обладают БТИЗ траншейной конструкции, содержащие дополнительный стоп-слой между p^+ -коллектором и высокоомной n -базой [3] (в англоязычной литературе такой прибор называют Carrier Storage Trench Bipolar Transistor, CSTBT), однако для его производства необходима технологическая база очень высокого уровня (см. рис. 1, *a*). Гораздо более прост в изготовлении комбинированный СИТ–МОП транзистор (КСМТ), который является полным функциональным аналогом CSTBT. Это гибридный прибор, содержащий высоковольтный тиристор с электростатическим управлением (СИТ) и управляющий низковольтный МОП транзистор, соединенный с ним по каскадной схеме [4] (см. рис. 1, *b*). Результаты экспериментальных исследований опытных образцов КСМТ [5,6] и численного моделирования [7,8] показали, что эти приборы превосходят CSTBT по ряду параметров. Однако в [5–8] не изучались возможности минимизации потерь в КСМТ путем локального уменьшения времени жизни вблизи анодного эмиттера или снижения его инжекционной способности, которые были предложены для БТИЗ [9–12] и применимы для любых биполярных переключателей с распределенными по площади микрозатворами [13]. В настоящей работе мы изучим возможность оптимизации СИТ подобным образом с помощью численного моделирования. Будет показано, что: а) с физической точки зрения все способы эквивалентны, б) оптимизация позволяет уменьшить энергию потерь в КСМТ при выключении E_{off} на 30–40% при фиксированном падении напряжения на открытом со-

стоянии U_{on} и в) при прочих равных условиях энергия потерь в КСМТ во всех случаях на 15–35% меньше, чем в CSTBT.

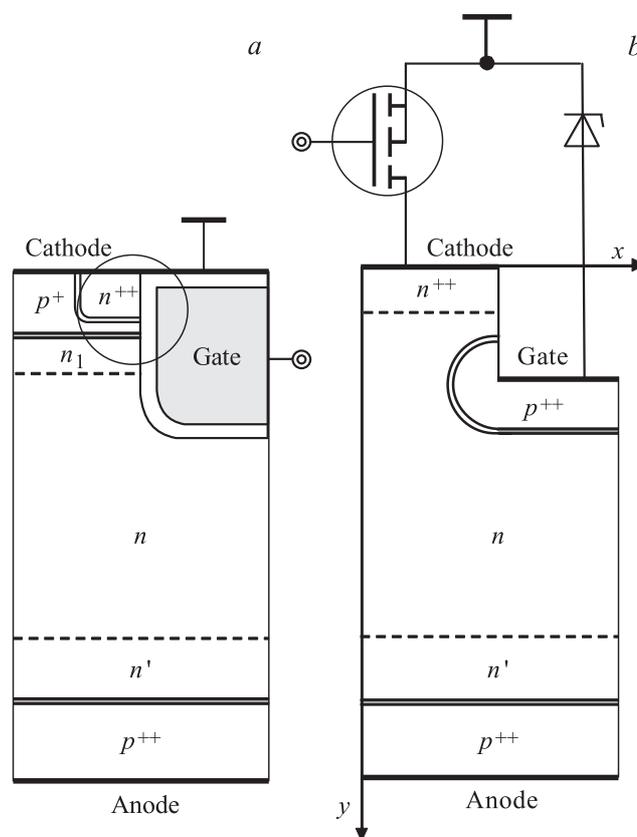


Рис. 1. Схематическое изображение поперечной ячейки CSTBT (*a*) и комбинированного СИТ–МОП транзистора, т.е. КСМТ (*b*). Окружностью выделен интегрированный в основной чип CSTBT МОП транзистор, который в КСМТ изготавливается на отдельном чипе.

Расчетные параметры

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметра
Параметры управляемого катода СИТ		
Глубина диффузии доноров в истоке	x_s	1.5 мкм
Поверхностная концентрация доноров в истоке	N_s	10^{20} см^{-3}
Глубина p - n -перехода затвора	x_g	3 мкм
Поверхностная концентрация акцепторов в затворе	N_g	10^{18} см^{-3}
Параметры управляемого катода БТИЗ		
Толщина подзатворного диэлектрика	h_{SiO_2}	0.015 мкм
Ширина n^+ -истока	l_s	1.67 мкм
Глубина перехода n^+ -истока	x_s	1.5 мкм
Поверхностная концентрация доноров в n^+ -истоке	N_s	10^{20} см^{-3}
Глубина перехода коллектора	x_c	4 мкм
Поверхностная концентрация акцепторов в коллекторе	N_c	10^{18} см^{-3}
Толщина n_1 -стоп-слоя	h_1	1.5 мкм
Концентрация доноров в n_1 -стоп-слое	N_1	10^{16} см^{-3}
Общие постоянные параметры БТИЗ и СИТ		
Ширина ячейки	L	10 мкм
Глубина затворной траншеи	h	8 мкм
Ширина затворной траншеи	l_g	5 мкм
Толщина высокоомной n -базы	w	450 мкм
Концентрация доноров в n -базе	N_d	$1.75 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Напряжение пробоя	U_b	4.6 кВ
Общие переменные параметры БТИЗ и СИТ		
Время жизни электронов и дырок в n -базе	τ_0	2–64 мкс
Время жизни электронов и дырок в n' -слое	τ_{buff}	0.03–64 мкс
Поверхностная концентрация доноров в буферном n' -слое	N_{buff}	$7 \cdot 10^{16} - 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
Толщина буферного n' -слоя	h_n	20 или 12 мкм
Поверхностная концентрация акцепторов в анодном p^+ -слое	N_A	$1.8 \cdot 10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$
Толщина анодного p^+ -слоя	h_p	10 или 2 мкм

2. Конструкции приборов и метод моделирования их характеристик

Значения геометрических и электрофизических параметров КСМТ и ССТВТ, для которых выполнялись расчеты, приведены в таблице. Распределения легирующих примесей в истоке и затворе СИТ, а также в истоке и коллекторе БТИЗ задавалось функциями Гаусса. Легирование стоп-слоя n_1 в ССТВТ предполагалось однородным. Распределение акцепторов в анодном эмиттере и доноров в буферном n' -слое задавалось функцией ошибок (при $h_p = 10$ мкм и $h_n = 20$ мкм) или функцией Гаусса (при $h_p = 2$ мкм и $h_n = 12$ мкм).

Как известно, электронные процессы в подобных структурах описываются системой двух уравнений непрерывности и уравнения Пуассона, в которых должны быть учтены все нелинейные эффекты, в том числе, Оже-рекомбинация, зависимости подвижностей электронов, дырок $\mu_{e,h}$, коэффициентов диффузии электронов, дырок $D_{e,h}$, ширины запрещенной зоны \mathcal{E}_g и времени жизни τ от суммарной концентрации N легирующих примесей. Проблема моделирования усугубляется тем,

что структуры СИТ и БТИЗ сильно неоднородны по объему, а процессы в прикатодных областях существенно неоднородны. С целью адекватного численного решения столь сложной задачи мы использовали программный продукт фирмы TCAD SENTAURUS [14]. Для построения неоднородной сетки конечных элементов, соответствующей структурам СИТ и БТИЗ, использовались стандартные процедуры этой программы, обеспечивающие „сгущение“ сетки в областях с наибольшими градиентами концентрации легирующих примесей, и особенно в инверсионном канале МОП транзистора, встроенного в БТИЗ. Зависимости $\mu_{e,h}(N)$, $D_{e,h}(N)$ и $\mathcal{E}_g(N)$ описывались формулами, предложенными в работах [15,16]. Для определенности мы считали равными параметры τ_{n0} , τ_{p0} в формуле Шокли–Рида для рекомбинации через глубокий уровень, расположенный в середине запрещенной зоны кремния. Зависимость $\tau(N)$ описывалась формулой

$$\tau_{p0}^{-1} = \tau_{n0}^{-1} = \tau^{-1} = \tau_0^{-1} + \tau_N^{-1} N/N_c, \quad (1)$$

где τ_0 — время жизни, соответствующее рекомбинации через однородно распределенные центры, введение которых (например, с помощью электронного или

γ -облучения) позволяет регулировать быстродействие приборов, а второе слагаемое в правой части описывает увеличение концентрации „естественных“ центров рекомбинации с ростом уровня легирования донорами и акцепторами. Мы использовали значения параметров $\tau_N = 4$ мкс и $N_c = 10^{17}$ см⁻³.

В использованной нами модели коммутация приборов осуществлялась путем мгновенного изменения потенциалов затворов управляющих МОП транзисторов с -20 до +20 В (при включении) и обратно (при выключении). Согласно расчетам [7], при этом приведенное сопротивление $R_{ds\text{on}}$ открытого МОП транзистора в CSTBT равно ~ 1 МОм·см². Это же значение $R_{ds\text{on}}$ мы использовали для управляющего МОП транзистора в КСМТ. В качестве регулирующего элемента КСМТ, соединяющего затвор СИТ с заземленным электродом КСМТ, мы использовали стабилитрон [4] с напряжением стабилизации 1.6 В и емкостью при нулевом смещении 20 нФ/см².

3. Результаты моделирования и их обсуждение

В этом разделе приведены результаты моделирования коммутационных характеристик приборов в цепи с активной нагрузкой 24 Ом·см², напряжением источника питания $U_{\text{off}} = 2.4$ кВ и плотностью тока в открытом состоянии $J_{\text{on}} = 100$ А/см². Типичная зависимость мощности $P = U_A J_A$ (U_A и J_A — мгновенные значения анодного напряжения и плотности тока), рассеиваемой КСМТ, от времени приведена на рис. 2. Средняя по времени плотность мощности потерь равна

$$P_{\text{av}} = (U_{\text{on}} J_{\text{on}} T_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{on}}) T^{-1}, \quad (2)$$

где T_{on} — длительность импульсов, T^{-1} — частота их повторения, а

$$E_{\text{on}} = \int_0^{T_{\text{on}}} (P - U_{\text{on}} J_{\text{on}}) dt, \quad E_{\text{off}} = \int_{T_{\text{on}}}^T P dt \quad (3)$$

— плотности энергии коммутационных потерь при включении и выключении. Оптимизация приборов состоит в выборе конструкции, которая обеспечит минимальную мощность P_{av} при заданных значениях U_b , J_{on} , U_{off} , T_{on} . В стандартных приборах с высокоэффективным анодным эмиттером для этого используется электронное или γ -облучение, которое уменьшает время жизни τ_0 однородно по всей толщине структуры. В дополнение к этому мы использовали четыре других способа:

1) локальное уменьшение времени жизни τ_0 до величины τ_{buff} в прианодной области буферного слоя толщиной 6 мкм при $N_{\text{buff}} = 7 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $h_n = 20$ мкм, $N_A = 10^{20}$ см⁻³, $h_p = 10$ мкм (распределения легирующих примесей и времени жизни вблизи анода изображены для этого случая на рис. 3);

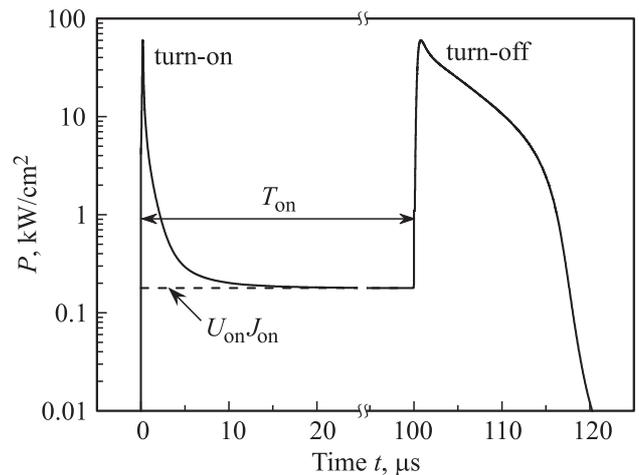


Рис. 2. Зависимость мощности, рассеиваемой стандартным КСМТ за один цикл коммутации, при $\tau_0 = \tau_{\text{buff}} = 4$ мкс, $N_{\text{buff}} = 7 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и $N_A = 10^{20}$ см⁻³.

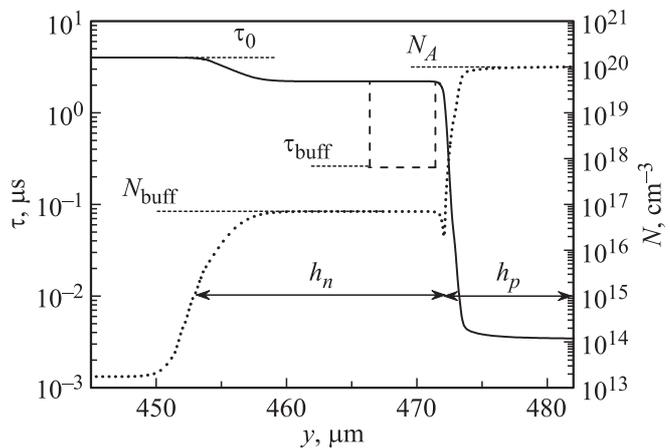


Рис. 3. Распределения легирующих примесей N (точки) и времени жизни носителей заряда τ (линии) около анода. Вертикальные штриховые линии ограничивают область, в которой время жизни уменьшается до величины $\tau_{\text{buff}} \leq \tau$.

2) уменьшение толщины h_p анодного эмиттера до 2 мкм и изменение поверхностной концентрации акцепторов N_A в пределах $(0.07-2) \cdot 10^{18}$ см⁻³ при $\tau_{\text{buff}} = \tau_0$, $N_{\text{buff}} = 7 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и $h_n = 20$ мкм;

3) изменение поверхностной концентрации доноров N_{buff} в пределах $(0.02-1) \cdot 10^{20}$ см⁻³ при $h_n = 12$ мкм, $N_A = 10^{20}$ см⁻³, $h_p = 2$ мкм и $\tau_{\text{buff}} = \tau_0$;

4) изменение поверхностной концентрации доноров N_{buff} в пределах $(0.6-5) \cdot 10^{17}$ см⁻³ при $h_n = 20$ мкм, $N_A = 10^{20}$ см⁻³, $h_p = 10$ мкм и $\tau_{\text{buff}} = \tau_0$.

В последних двух случаях увеличение N_{buff} приводило не только к уменьшению инжекционной способности анодного эмиттера, но и к уменьшению времени жизни в буферном слое в соответствии с формулой (1). Поэтому способы 3 и 4 являются фактически комбинациями способов 1 и 2.

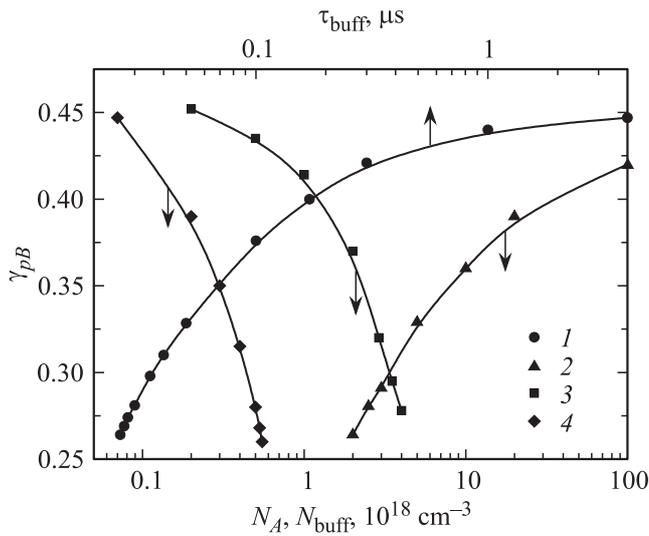


Рис. 4. Зависимости коэффициента инжекции дырок γ_{pB} в n -базу открытого СИТ с $\tau_0 = 4$ мкс от τ_{buff} (1 — способ 1), от N_A (2 — способ 2) и от N_{buff} (3 — способ 3, 4 — способ 4).

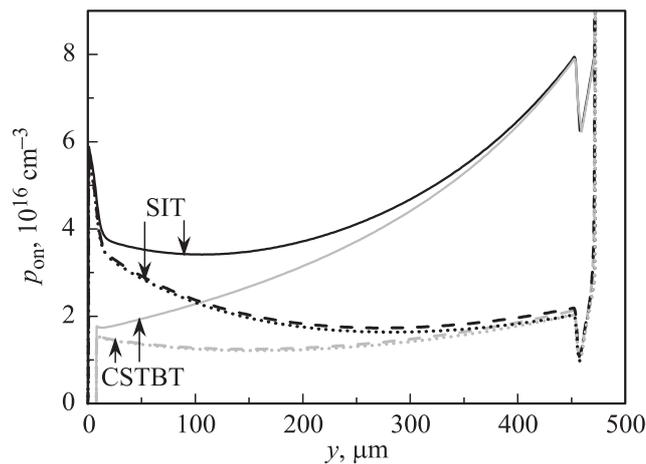


Рис. 5. Распределения дырок в открытых СИТ (SIT) и БТИЗ (CSTBT) при $\tau_0 = 16$ мкс, $N_{buff} = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ и $\tau_{buff} = 16$ мкс, $N_A = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (сплошные линии, стандартные приборы), $\tau_{buff} = 35$ нс, $N_A = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (штриховые линии — способ 1), $\tau_{buff} = 16$ мкс, $N_A = 3.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (точки — способ 2).

Величины U_{on} и E_{off} определяются главным образом распределениями $p_{on}(y) \approx n_{on}(y)$ неравновесных дырок и электронов в толстой высокоомной n -базе открытых приборов. Так как вдали от катода (при $y > 3L$) эти распределения практически одномерны (т.е. не зависят от x) [17], влияние на них электрофизических и геометрических характеристик буферного и анодного слоев проявляется через единственный параметр $\gamma_{pB} = J_p/J$ — отношение плотности тока дырок J_p на границе между n -базой и буферным слоем (в нашем случае при $y = 450$ мкм — см. рис. 3) к полной плотности тока анода J . По сути дела γ_{pB} является коэффициентом инжекции дырок виртуальным эмиттером, состоящим

из буферного слоя и реального анодного p^+ -эмиттера. Величина γ_{pB} зависит от τ_{buff} , профиля легирования буферного слоя и соотношения между концентрациями N_A и N_{buff} . Поэтому все четыре описанных выше способа позволяют изменять γ_{pB} , как это изображено на рис. 4. Уменьшение γ_{pB} приводит к изменениям распределений $p_{on}(y)$, примеры которых приведены на рис. 5.

Как и следовало ожидать, при уменьшении γ_{pB} падение напряжения U_{on} в открытом состоянии и энергия E_{on} , рассеиваемая при включении, увеличиваются, а энергия E_{off} , рассеиваемая при выключении, уменьшается. Причина таких изменений, пример которых приведен на рис. 6, очевиден: уменьшение γ_{pB} приводит к замедлению процесса наполнения n -базы дырками (и, следовательно, к росту E_{on}), уменьшению концентрации плазмы в открытом состоянии (т.е. к снижению проводимости n -базы и росту U_{on}) и уменьшению времени извлечения накопленного в базе заряда при выключении (т.е. к снижению E_{off}). Так как способ регулирования

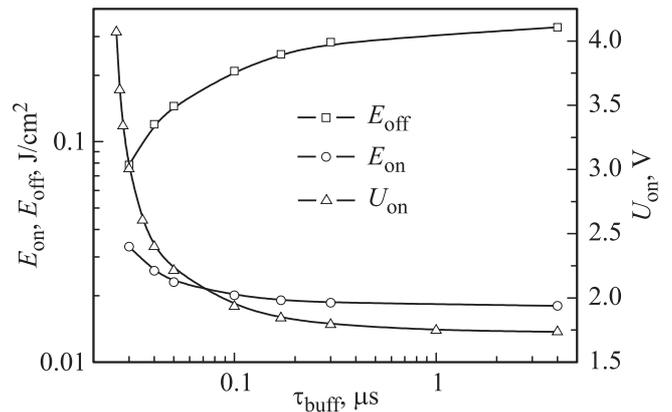


Рис. 6. Зависимости энергий потерь в КСМТ при выключении E_{off} , включения E_{on} и напряжения в открытом состоянии U_{on} от τ_{buff} (способ 1) при $\tau_0 = 4$ мкс.

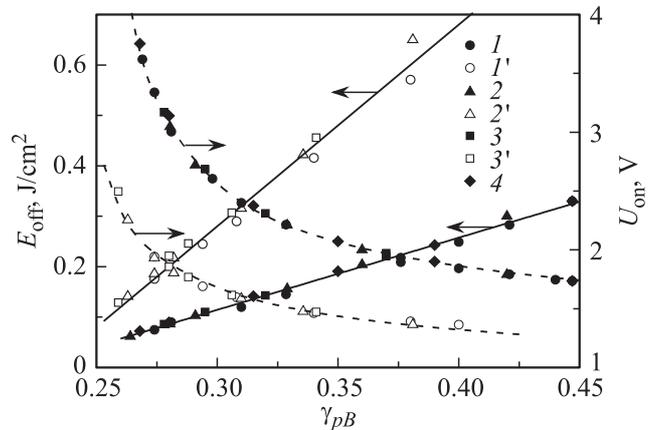


Рис. 7. Зависимости энергии потерь КСМТ при выключении E_{off} (сплошные линии) и напряжения в открытом состоянии U_{on} (штриховые линии) при $\tau_0 = 4$ мкс (1–4) и 16 мкс (1'–3') от коэффициента инжекции γ_{pB} , который изменяется при варьировании τ_{buff} (1, 1' — способ 1), N_A (2, 2' — способ 2) и N_{buff} (3, 3' — способ 3, 4 — способ 4).

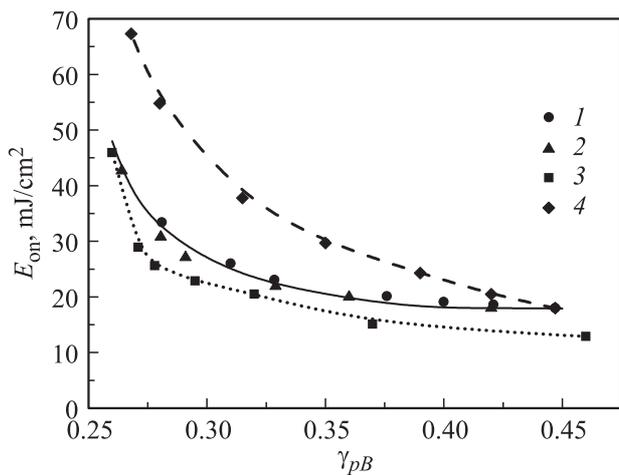


Рис. 8. Зависимости энергии потерь КСМТ при включении E_{on} при $\tau_0 = 4$ мкс от коэффициента инжекции γ_{PB} , который изменяется при варьировании τ_{buff} (1 — способ 1), N_A (2 — способ 2) и от N_{buff} (3 — способ 3, 4 — способ 4).

величины γ_{PB} практически не влияет на изменение распределений $p_{on}(y)$ (см. рис. 5), то зависимости $U_{on}(\gamma_{PB})$ и $E_{off}(\gamma_{PB})$ для всех способов совпадают (см. рис. 7). Однако энергия E_{on} зависит не только от γ_{PB} , но и от распределения доноров $N(y)$ в буферном слое, как это изображено на рис. 8. Если $N(y)$ не изменяется (как при использовании способов 1 и 2), то зависимости $E_{on}(\gamma_{PB})$ совпадают. При использовании способа 3 время пролета дырок через буферный слой t_B уменьшается из-за уменьшения h_n и появления встроенного поля, поэтому процесс наполнения n -базы дырками при включении ускоряется, а энергия E_{on} уменьшается при тех же значениях γ_{PB} . Напротив, при использовании способа 4 подвижность дырок в буферном слое уменьшается из-за роста N_{buff} , поэтому время t_B и энергия E_{on} увеличиваются. Заметим также, что величина E_{on} практически не зависит от времени жизни τ_0 в n -базе при прочих равных условиях.

В стандартных приборах с большими γ_{PB} обычно выполняется сильное неравенство $E_{off} \gg E_{on}$. Поэтому для минимизации P_{av} используются так называемые „оптимизационные кривые“ (trade-off curves), определяющие взаимосвязь между E_{off} и U_{on} при рабочих плотностях тока и коммутируемом напряжении. Совпадение зависимостей $U_{on}(\gamma_{PB})$ и $E_{off}(\gamma_{PB})$ для всех способов регулирования γ_{PB} приводит к тому, что кривые $E_{off}(U_{on})$ также совпадают (см. рис. 9). Однако в отличие от стандартного способа повышения быстродействия приборов путем уменьшения τ_0 , уменьшение γ_{PB} приводит не только к снижению E_{off} , но и к росту E_{on} , особенно сильно при малых γ_{PB} . Кроме того, при приближении γ_{PB} к некоторому критическому значению (равному ~ 0.26 в рассмотренных нами случаях) напряжение U_{on} начинает очень резко увеличиваться и достигает сотен и даже тысяч вольт, так что фактически прибор перестает включаться. Это предъявляет очень жесткие требования

к точности воспроизведения параметров буферного слоя и анодного эмиттера при $\gamma_{PB} < 0.3$.

Для оптимизации приборов с использованием формулы (2) можно использовать аппроксимации

$$E_{on} = \hat{E}_{on} \exp(U_{on}/\hat{U}_{on}), \quad E_{off} = \frac{\hat{E}_{off}}{(U_{on}/\hat{U}_{off} - 1)^a}, \quad (4)$$

где $\hat{E}_{on,off}$, $\hat{U}_{on,off}$ и a — подгоночные параметры, которые зависят от U_b , J_{on} , U_{off} и τ_0 . В рассмотренных нами случаях наилучшее согласие с результатами моделирования получилось при $\hat{E}_{on} = 18.5$ мДж/см², $\hat{U}_{on} = \infty$, $\hat{E}_{off} = 0.2$ Дж/см², $\hat{U}_{off} = 1.15$ В, $a = 0.73$ для стандартного прибора с постоянным значением $\gamma_{PB} = 0.45$, $\hat{E}_{on} = 4.5$ мДж/см², $\hat{U}_{on} = 1$ В, $\hat{E}_{off} = 0.12$ Дж/см², $\hat{U}_{off} = 1.23$ В, $a = 0.75$ при $\tau_0 = 16$ мкс и $\hat{E}_{on} = 9.3$ мДж/см²,

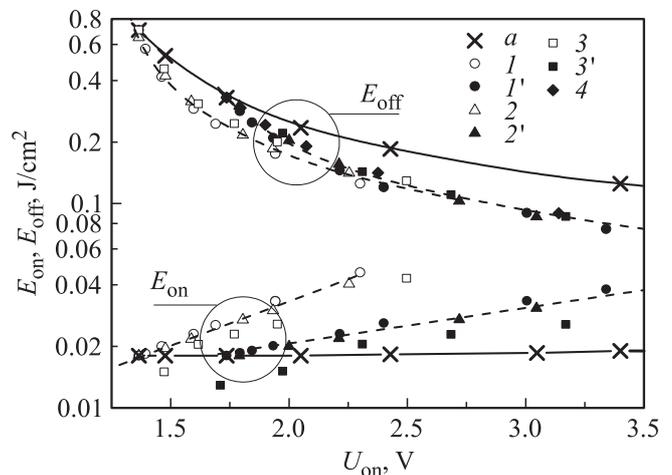


Рис. 9. Взаимосвязи между E_{off} и U_{on} при изменении $\tau_0 = \tau_{buff} = 2-64$ мкс, $N_{buff} = 7 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $N_A = 10^{20}$ см⁻³ (а), $\tau_{buff}(I, I'$ — способ 1), N_A (2, 2' — способ 2) и N_{buff} (3, 3' — способ 3, 4 — способ 4) при $\tau_0 = 16$ мкс ($I-4$), $\tau_0 = 4$ мкс ($I'-3'$). Линии — расчет по формулам (4).

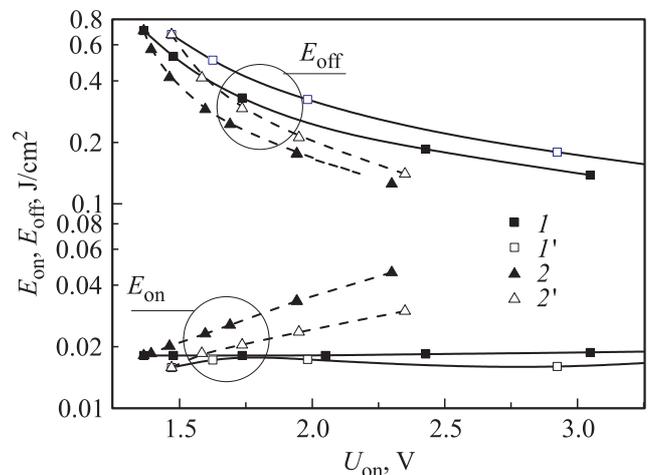


Рис. 10. Взаимосвязи между E_{off} и U_{on} для КСМТ ($I, 2$) и CSTBT ($I', 2'$) при изменении $\tau_0 = \tau_{buff} = 2-64$ мкс (I, I') или только τ_{buff} при $\tau_0 = 16$ мкс ($2, 2'$ — способ 1).

$\hat{U}_{on} = 2.5 \text{ В}$, $\hat{E}_{off} = 0.09 \text{ Дж/см}^2$, $\hat{U}_{off} = 1.5 \text{ В}$, $a = 0.7$ при $\tau_0 = 4 \text{ мкс}$ для приборов с пониженными значениями γ_{pB} .

Все описанные выше закономерности в равной степени относятся и к изученным нами CSTBT. Количественные различия обусловлены относительно низкой инжекционной способностью катодного эмиттера CSTBT. Вследствие этого уменьшение γ_{pB} приводит к тому (см. рис. 5), что распределение $p_{on}(y)$ в CSTBT превращается из наилучшего (когда максимум p_{on} расположен вблизи анода — вариант **A** по терминологии работы [9]) в промежуточное (когда $p_{on} \approx \text{const}$ — вариант **B**), а в СИТ — из наилучшего в оптимальное (когда максимум p_{on} расположен вблизи катода — вариант **C**). Сравнение „оптимизационных кривых“, приведенных на рис. 10, показывает, что при одинаковых значениях U_{on} и прочих равных условиях энергия E_{off} потерь в СИТ оказывается заметно меньше (на 15–35% в рассмотренных нами случаях), чем в эквивалентных CSTBT.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-07-00943).

Список литературы

- [1] V.K. Khana. *The Insulated gate bipolar transistor (IGBT): theory and design* (Wiley-Intersci. Publ., 2003).
- [2] B.J. Baliga. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices* (N. Y., Springer Science, 2008).
- [3] H. Takahashi et al. *Proc. 8th Int. Symp. on Power Semiconductor Devices and ICs* (USA, Maui Hawaii, 1996) p. 349.
- [4] О.И. Бономорский, П.А. Воронин. Патент РФ на изобретение № 2199795. Бюллетень „Изобретения и полезные модели“. Бюл. № 6, 27.02.2003.
- [5] О. Бономорский, П. Воронин, В. Куканов, Н. Щепкин. Компоненты и технологии: Силовая электроника, № 1, 18 (2004).
- [6] О. Бономорский, П. Воронин, В. Куканов, Н. Щепкин. Компоненты и технологии: Силовая электроника, № 8, 68 (2004).
- [7] О.И. Бономорский, А.С. Кюрегян, А.В. Горбатюк, Б.В. Иванов. *Электротехника*, № 2, 51 (2015) [O.I. Bonomorskii, A.S. Kyuregyan, A.V. Gorbatyuk, B.V. Ivanov. *Russian Electrical Engin.*, **86**, 93 (2015)].
- [8] А.С. Кюрегян, А.В. Горбатюк, Б.В. Иванов. *Электротехника*, 2016, в печати.
- [9] K. Cheng, F. Udrea, G.A.J. Amaratunga. *Sol. St. Electron.*, **44**, 1573 (2000).
- [10] A.R. Hefner, D.L. Blackburn. *IEEE Trans. Power Electron.*, **PE-2**, 194 (1987).
- [11] X. Yuan, F. Udrea, L. Coulbeck et al. *Sol. St. Electron.*, **46**, 75 (2002).
- [12] D.W. Green, K.V. Vershinin, M. Sweet, E.M.S. Narayanan. *IEEE Trans. Power Electron.*, **22**, 1857 (2007).
- [13] А.В. Горбатюк, И.В. Грехов. *Письма ЖТФ*, **34**, 61 (2008).
- [14] *Synopsys Dev. Simulation. TCAD Sentaurus Manual* // <http://www.synopsys.com>.
- [15] G. Masetti, M. Severi, S. Solmi. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **ED-30**, 764 (1983).
- [16] D.B.M. Klaassen, J.W. Slotboom, H.C. de Graaff. *Sol. St. Electron.*, **35**, 125 (1992).
- [17] W. Feiler, W. Gerlach, U. Wiese. *Sol. St. Electron.*, **38**, 1781 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

The effect of anode emitter injection capability on characteristics of hybrid SIT–MOS transistors

A.S. Kyuregyan⁺, A.V. Gorbatyuk^{*}, B.V. Ivanov[‡]

⁺ All-Russian Electrical Engineering Institute, 111250 Moscow, Russia

^{*} Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

[‡] St. Petersburg Electrotechnical University LETI, 197376 St. Petersburg, Russia

Abstract The possibility of optimization of high voltage hybrid SIT–MOS transistors (HSMT) by local reduction of the lifetime near anode emitter and/or reduction of the anode emitter injection ability by three different ways has been investigated using two-dimensional numerical simulation. It has been shown that all of these methods proposed previously for optimisation of insulated-gate bipolar transistor (IGBT) are physically equivalent and makes it possible to reduce turn-off energy losses E_{off} in HSMT by 30–40%. Importantly that energy E_{off} in optimized HSMT appears to be 15–35% less than in equivalent trench IGBT under other equal conditions.