

УДК 519.248:621.382

ПРОЕКТИРОВАНИЕ IGBT-ПРИБОРА ВЫСОКОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

И.Ю. ЛОВШЕНКО, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ, А.С. ТУРЦЕВИЧ, И. ШЕЛИБАК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2012

Представлены результаты исследования влияния технологических параметров формирования структуры IGBT-прибора на его динамические характеристики. Показано, что быстродействие (время включения и выключения) структуры существенно определяется технологическими параметрами формирования как биполярного транзистора, так и МОП-транзистора – составляющих элементов IGBT-прибора. Показано, что на быстродействие прибора не влияет уровень концентрации примеси в эмиттере биполярного транзистора и проявляется лишь небольшое влияние степени легирования базы. В большей мере динамические характеристики IGBT-структуры определяются дозой и энергией ионов при имплантационном легировании области канала МОП-транзистора (при увеличении дозы в 2 раза время включения и выключения снижаются почти на 20 % каждое, а при увеличении энергии ионов на 20 % длительность выходного импульса увеличивается почти на 25 %).

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, IGBT-структура, конструкция, технология изготовления, динамические характеристики, оптимизация.

Введение

Среди современных приборов силовой электроники в настоящее время доминируют два базовых типа: полевые транзисторы (Metal–Oxide–Silicon–Field Effect Transistor, MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (Isolated Gate Bipolar Transistor, IGBT), а также различные интегрированные структуры на их основе. Многочисленные требования к мощным электронным системам (низкие потери при переключении, малое падение напряжения во включенном состоянии, высокое сопротивление в выключенном состоянии, высокое быстродействие и пр.) стимулируют исследования новых конструкций, технологий изготовления и материалов структурных элементов этих приборов.

IGBT вследствие своих исключительных функциональных характеристик, сочетающих положительные свойства мощных полевых и биполярных транзисторов, широко используется в силовой электронике, в устройствах электрической тяги и двигателях переменного тока, индуктивных системах отопления, радиологических системах, источниках бесперебойного питания, переключающих элементах [1–4].

Совершенствование IGBT приборных структур направлено на повышение быстродействия, а также уровней коммутируемых токов и напряжений.

Методы повышения быстродействия IGBT-структуры

Рассмотрим основные физические явления, происходящие в IGBT-структуре в переходных процессах и определяющие степень быстродействия прибора.

В процессе переключения IGBT-прибора последовательное сопротивление R_{GE} между затвором и эмиттером обеспечивает разряд входной емкости затвор-эмиттер C_{GE} .

При прекращении подачи управляющего импульса ток коллектора уменьшается, и протекание тока в МОП-транзисторе IGBT-структуры останавливается (ток базы биполярного

транзистора равен нулю). Биполярный транзистор возвращается в свое запирающее состояние и IGBT структура оказывается в выключенном состоянии.

Длительность выключения IGBT прибора t_{off} , согласно работе [5], определяется как время, необходимое для уменьшения тока коллектора I_C от 90 % его значения в установившемся режиме (момент времени t_0 на рис. 1) до 10 % этого значения в процессе выключения прибора (момент времени t_0+t_{off}). В переходном процессе выключения IGBT структуры явно выделяются три характерные области зависимости тока коллектора I_C от времени t .

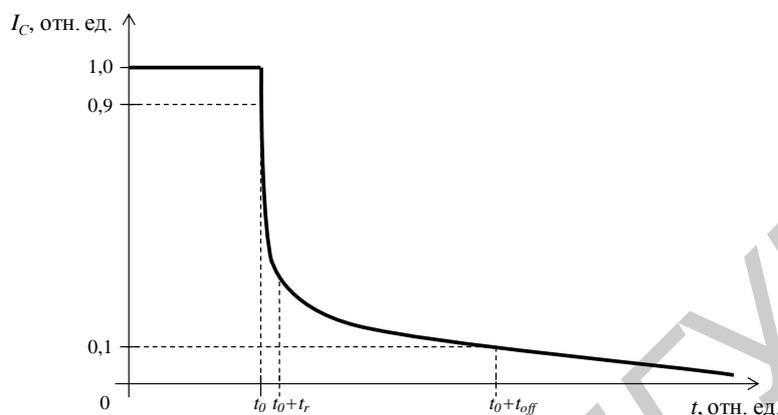


Рис. 1. Типичная зависимость тока коллектора I_C от времени при выключении IGBT [5]

Первая область спада тока коллектора биполярного транзистора при выключении IGBT прибора $t_0 < t \leq (t_0 + t_r)$ характеризуется крутой зависимостью $I_C(t)$, определяющейся постоянной времени разряда емкости затвор-эмиттер C_{GE} и сопротивлением R_{GE} . Очевидно, что посредством варьирования величин R_{GE} и C_{GE} можно регулировать динамические характеристики IGBT-прибора, определяемые этим первым участком зависимости $I_C(t)$.

Вторая область, $(t_0 + t_r) < t \leq (t_0 + t_{off})$, зависимости $I_C(t)$ характеризуется гораздо меньшей скоростью спада тока коллектора биполярного транзистора во времени. В момент выключения IGBT-прибора в базе биполярного транзистора, как составной части IGBT-структуры, устанавливается высокая концентрация дырок и электронов. Кроме рекомбинации, не существует других механизмов, по которым неосновные носители могли бы быть удалены из базы. В результате указанного процесса рекомбинации носителей заряда IGBT-прибор может быть полностью выключен. Таким образом, интервал времени спада $(t_0 + t_r) < t \leq (t_0 + t_{off})$ зависит от времени жизни носителей в базе. Длительность этого интервала зависимости $I_C(t)$ можно уменьшить посредством облучения электронами или имплантации протонов (локализованное уменьшение времени жизни носителей заряда) в n^+ -буферный слой IGBT-структуры. Указанные способы управления интервалом $(t_0 + t_r) < t \leq (t_0 + t_{off})$ длительности выключения IGBT приводят к уменьшению коэффициента усиления биполярного транзистора и к увеличению падения прямого напряжения IGBT-прибора [4].

Следует отметить, что замедленный спад тока коллектора в токовом «хвосте» (третья область, $t > (t_0 + t_{off})$, зависимости $I_C(t)$) приводит к повышению потери энергии при выключении IGBT-структуры.

Моделируемая структура IGBT прибора

Оптимизационные исследования зависимости динамических характеристик IGBT-прибора от технологических параметров его изготовления проводились для структуры, представленной на рис. 2. Моделирование технологического процесса формирования IGBT-структуры осуществлялось с использованием модуля ATHENA, а его электрических характеристик — с использованием модуля ATLAS программного комплекса компании Silvaco [6], предназначенного для приборно-технологического проектирования изделий микроэлектроники. В качестве значимых технологических параметров при оптимизации динамических характеристик исследуемой структуры были выбраны концентрация примесей в базе N_B и в эмиттере N_E биполярного транзистора, а также имплантационные характеристики процесса подлегирования канала МОП-транзистора — доза D_{CH} и энергия E_{CH} ионов акцепторной примеси.

Типичная геометрия IGBT, рассмотренная в работе [4] при анализе электрических характеристик, а также в [7] при исследовании влияния технологических параметров на напряжение пробоя прибора, была выбрана и в данной работе в качестве моделируемой структуры. В этой структуре толщина эпитаксиального слоя равна 141 мкм, а толщина p^+ -коллекторного слоя – 17 мкм.

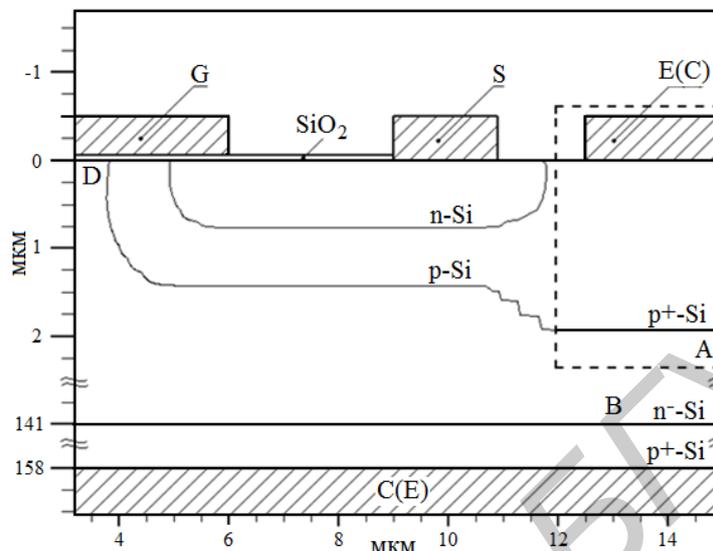


Рис. 2. Геометрия исследованной IGBT-структуры:

E – эмиттер; C – коллектор; B – база; S – исток; G – затвор; D – сток; A – область, использованная в [7]

Результаты исследования влияния технологических параметров на динамические характеристики IGBT

Основная цель работы состояла в исследовании влияния технологических параметров формирования IGBT-структуры на ее динамические характеристики – время включения t_{on} и выключения t_{off} , а также на длительность выходного импульса. В качестве исследуемых факторов технологии формирования структуры были выбраны параметры имплантационных процессов формирования структурных областей IGBT биполярного транзистора и МОП-транзистора как составных частей исследованной структуры.

На рис. 3 представлены форма и длительность управляющего импульса, подаваемого на затвор исследуемой IGBT-структуры.

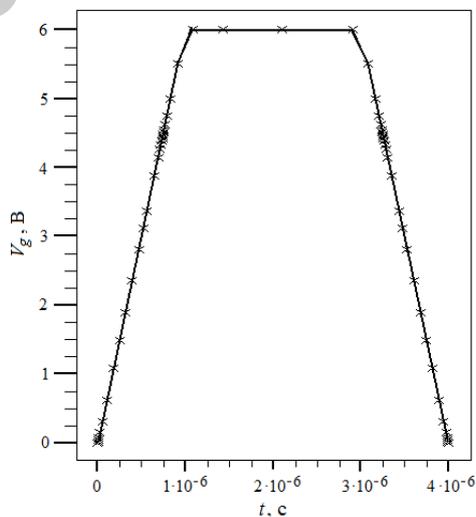


Рис. 3. Управляющий импульс, подаваемый на затвор исследуемой IGBT-структуры

Результаты исследования влияния технологических параметров на динамические характеристики IGBT (зависимости I_C от t) представлены на рис. 4–7.

Влияние концентрации примеси в базе N_B биполярного $p-n-p$ -транзистора – составного элемента исследуемой IGBT структуры на ее динамические характеристики показано на рис. 4. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что изменение величины концентрации примеси N_B в базе биполярного транзистора не оказывает существенного влияния на время включения t_{on} IGBT прибора: 0,9 мкс для $N_B = 6,71 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и 0,89 мкс для $N_B = 6,51 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

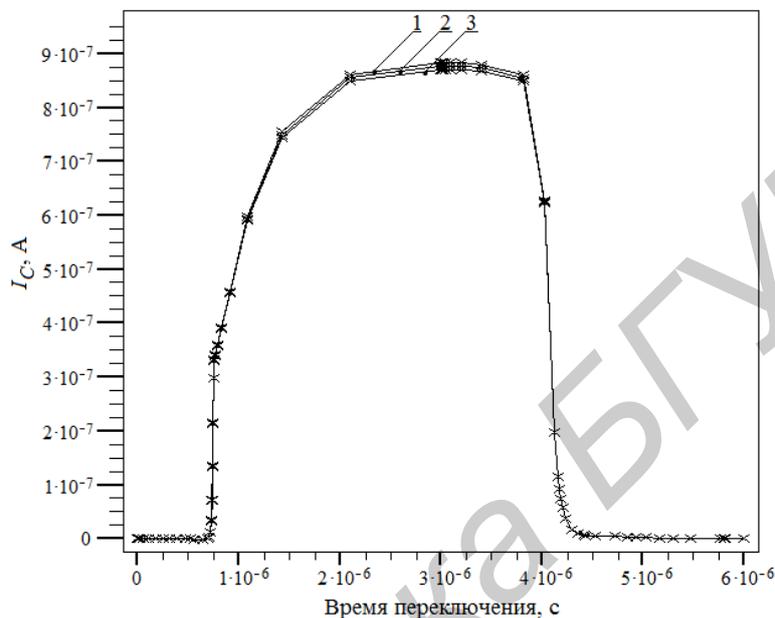


Рис. 4. Динамические характеристики исследуемой IGBT-структуры при вариации концентрации примеси в базе биполярного транзистора N_B , см^{-3} ($N_B = 6,71 \cdot 10^{13}$ (1); $6,61 \cdot 10^{13}$ (2); $6,51 \cdot 10^{13}$ (3))

Проведены исследования зависимости динамических характеристик структуры от величины максимальной концентрации примеси в эмиттере N_E биполярного транзистора. Обобщенные результаты, представленные на рис. 5, показывают, что концентрация примеси в эмиттере биполярного транзистора N_E еще в меньшей степени, чем N_B , влияет на характеристики включения/выключения IGBT.

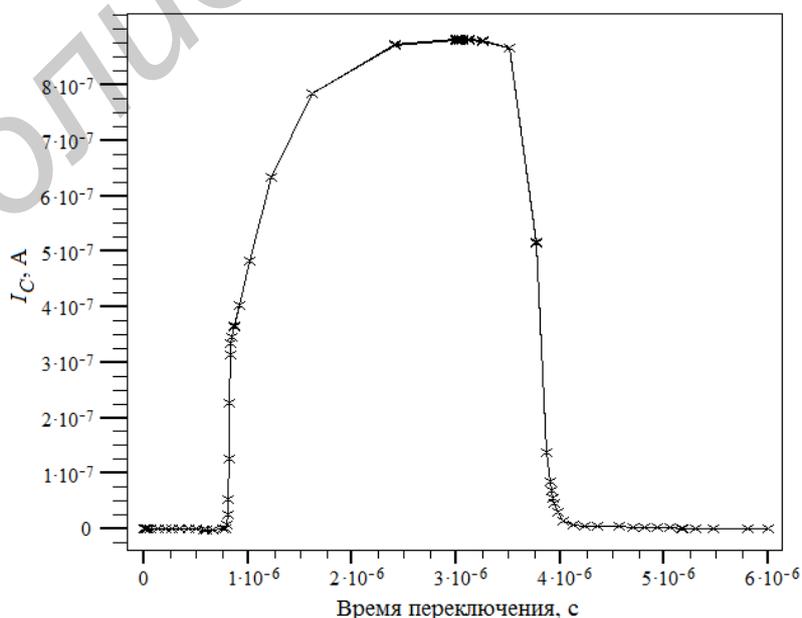


Рис. 5. Динамические характеристики исследуемой IGBT-структуры при вариации концентрации примеси в эмиттере биполярного транзистора N_E , см^{-3} ($1 \cdot 10^{18}$, $1 \cdot 10^{19}$ и $1 \cdot 10^{20}$)

Рассчитанные динамические характеристики для IGBT-структур с разными дозами D_{CH} имплантации примеси в область канала МОП-транзистора приведены на рис. 6. Показано, что этот технологический параметр существенно влияет на динамические характеристики IGBT-структуры. Так, при повышении величины D_{CH} от $3,4 \cdot 10^{13}$ до $7,4 \cdot 10^{13}$ см⁻² время включения t_{on} снижается почти на 25 % (от 1,0 до 0,8 мкс), а время выключения t_{off} – почти на 20 % (от 0,25 до 0,2 мкс). Этот эффект можно объяснить изменением длительности заряда и разряда емкости перехода затвор-эмиттер C_{GE} , определяющейся степенью легирования канала МОП-транзистора.

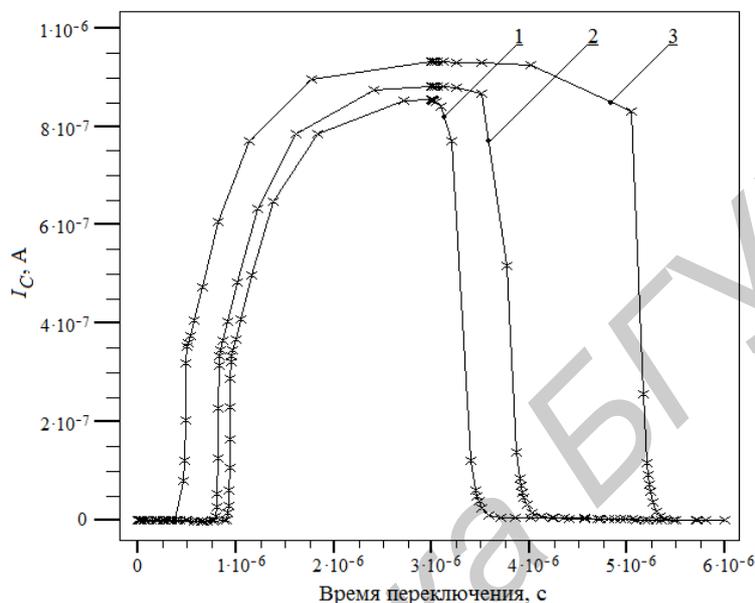


Рис. 6. Динамические характеристики исследуемой IGBT-структуры при вариации дозы имплантированной примеси D_{CH} в области канала МОП-транзистора, см⁻² ($7,4 \cdot 10^{12}$ (1); $6,4 \cdot 10^{12}$ (2); $3,4 \cdot 10^{12}$ (3))

Результаты исследования влияния энергии имплантации примеси в область канала МОП-транзистора E_{CH} на динамические характеристики исследованной структуры представлены на рис. 7. Показано, что при увеличении энергии ионов, имплантируемых в канальную область МОП-транзистора, на 20 % (от 110 до 130 кэВ) длительность выходного импульса увеличивается почти на 25 % (от 2,75 до 3,5 мкс).

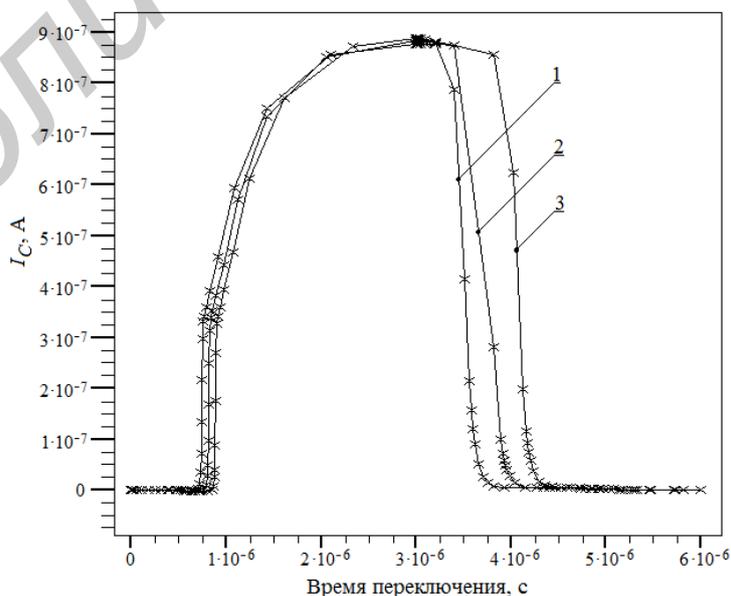


Рис. 7. Динамические характеристики исследуемой IGBT-структуры при вариации энергии имплантации примеси E_{CH} в область канала МОП-транзистора, кэВ (110 (1); 120 (2); 130 (3))

Заклучение

Проведены исследования зависимости длительности выходного импульса IGBT прибора (времени его включения t_{on} и выключения t_{off}) от технологических параметров его формирования. Показано, что концентрация примеси в эмиттере биполярного транзистора как составного элемента IGBT-структуры не влияет на быстродействие прибора. Наибольшее влияние на его динамические характеристики оказывают доза и энергия имплантации примеси в область канала МОП-транзистора (при увеличении дозы в 2 раза время включения t_{on} и выключения t_{off} уменьшается более, чем на 20% каждое, повышение энергии имплантируемых ионов на 20 % приводит к увеличению длительности выходного импульса почти на 25 %). Меньшее влияние на время включения и выключения IGBT прибора оказывает степень легирования базы биполярного транзистора.

Авторы выражают признательность профессору Нелаяву В.В. за основополагающие идеи и конструктивные предложения при обсуждении результатов исследований.

Работа выполнялась при поддержке гранта Белорусской государственной программы научных исследований «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы» подпрограммы «Электроника и фотоника» (задание 1.1.03).

DESIGN OF HIGH-SPEED IGBT DEVICE

I.Yu. LOVSHENKO, V.R. STEMPITSKY, A.S. TURTSEVICH, I. SHELIBAK

Abstract

Results of the investigation of IGBT manufacturing technology parameters influence on its dynamic features are presented. The important role of impurities concentration in various parts of IGBT structure (concentration level in the emitter of the bipolar transistor as a part of the IGBT structure, implantation dose in the MOS channel, the energy of ions implanted in the base of the bipolar transistor) was shown. These effects are discussed with the standpoint of dynamic characteristics of charge carriers. It was discovered that the level of impurity concentration in the emitter does not affect on the device dynamic features and reveals only small influence from the level of impurity concentration in the base. More effect is determined by the dose and energy of implanted ions under the doping of the MOS channel: the two-time dose increasing leads 20 % decreasing of switch on and switch off times of IGBT and the 20 % increasing of the ion energy leads to 25 % increasing of output impulse duration.

Список литературы

1. Vellvehi M., Flores D., Jorda X. et al. // Microelectronics Journal. 2002. № 33. P. 765–769.
2. Lindemann A. A. // Entwurf fur EPE Conference, Graz. 2001. P. 1–7.
3. Dodge J., Hess J. // Application Technology APT0201 Rev. B. 2002. July 7. 15 pp.
4. Dodge J. // Application Technology APT0302 Rev. B. 2003. April 4. 6 pp.
5. Khanna V.K. The Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT. Theory and Design. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Edition. 2003. 544 pp.
6. Virtual Wafer Fab user manual. Silvaco Inc. 2012.
7. Belous A., Lovshenko I., Nelayev V. et. al. / Proc. of the 38th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA'2012). Turkey, Izmir, 5–8 September 2012. P. 13–15.