

УДК 621.382

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ В ОБЪЕМНОМ КРЕМНИИ И ПО ТЕХНОЛОГИИ «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ»

ИБРАГИМ ШЕЛИБАК, И.Ю. ЛОВШЕНКО, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

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

Поступила в редакцию 23 сентября 2016

Представлены результаты оптимизации конструктивно-технологических параметров приборных структур биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ), сформированного в стандартном кремнии и по технологии «Кремний на изоляторе» (КНИ). Рассмотрены особенности функционирования различных конструктивных решений БТИЗ. Предложена и исследована конструкция БТИЗ на КНИ структуре с несколькими затворами, что обеспечивает ступенчатое изменение коммутируемого тока.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, конструкция, технология изготовления, статические и динамические характеристики.

Введение

Среди современных приборов силовой электроники доминирующее положение занимают два типа приборов: мощные полевые транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, англ. Isolated Gate Bipolar Transistor, IGBT), а также различные интегрированные структуры на их основе. БТИЗ благодаря наличию уникальных для данного класса приборов функциональных характеристик, которые сочетают положительные свойства мощных полевых и биполярных транзисторов, стал в последнее десятилетие широко используемым силовым устройством. БТИЗ представляет собой повторяющийся массив ячеек, расположенных в соответствии с топологическим макетом, обеспечивающим большое соотношение сторон канала.

Требования создания новых перспективных конструктивных решений мощных полупроводниковых приборов стимулируют исследования и внедрения новых конструкций, технологических процессов изготовления и материалов структурных элементов. Совершенствование структур БТИЗ направлено на повышение их быстродействия, предельных коммутируемых токов и напряжений. БТИЗ, изготовленные по технологии КНИ, обладают рядом преимуществ: высокое входное сопротивление, низкое выходное сопротивление, низкий уровень прямого падения напряжения, высокое напряжение пробоя и совместимость с КМОП-технологией. По сравнению с приборами, изготовленными по технологии объемного кремния, КНИ мощные интегральные схемы предполагают полную изоляцию диэлектриком. При этом уменьшаются токи утечки, увеличивается быстродействие, повышается помехоустойчивость и появляется возможность работы при высокой температуре.

Исследуемые структуры

В качестве исследуемых структур выбраны две традиционно изготавливаемые конструкции БТИЗ – стандартная NPT на объемном кремнии [1] (далее структура № 1) и прибор с вертикальным канавочным затвором (структура № 2), а также горизонтальная

конструкция БТИЗ, сформированного на КНИ-подложке (структура № 3).

Ранее, в рамках исследований, описанных в [2–4], посредством компьютерного моделирования выполнены анализ и оптимизация статических и динамических характеристик приборной структуры №1 (рис. 1, а) в зависимости от технологических параметров ее формирования. Толщина эпитаксиального слоя составила 141 мкм, а толщина p^+ -коллекторного слоя – 17 мкм. Технологический процесс формирования БТИЗ включает три операции ионного легирования и последующего отжига для формирования: глубокой p^+ -области, p -базы и n^+ -эмиттера.

На рис. 1, б представлена приборная структура № 2, практически полностью вытеснившая стандартную структуру затвора – это БТИЗ с вертикальным расположением канала в p -источнике (Trench-IGBT). К недостаткам можно отнести наличие высокой емкости затвора, что сказывается на быстродействии.

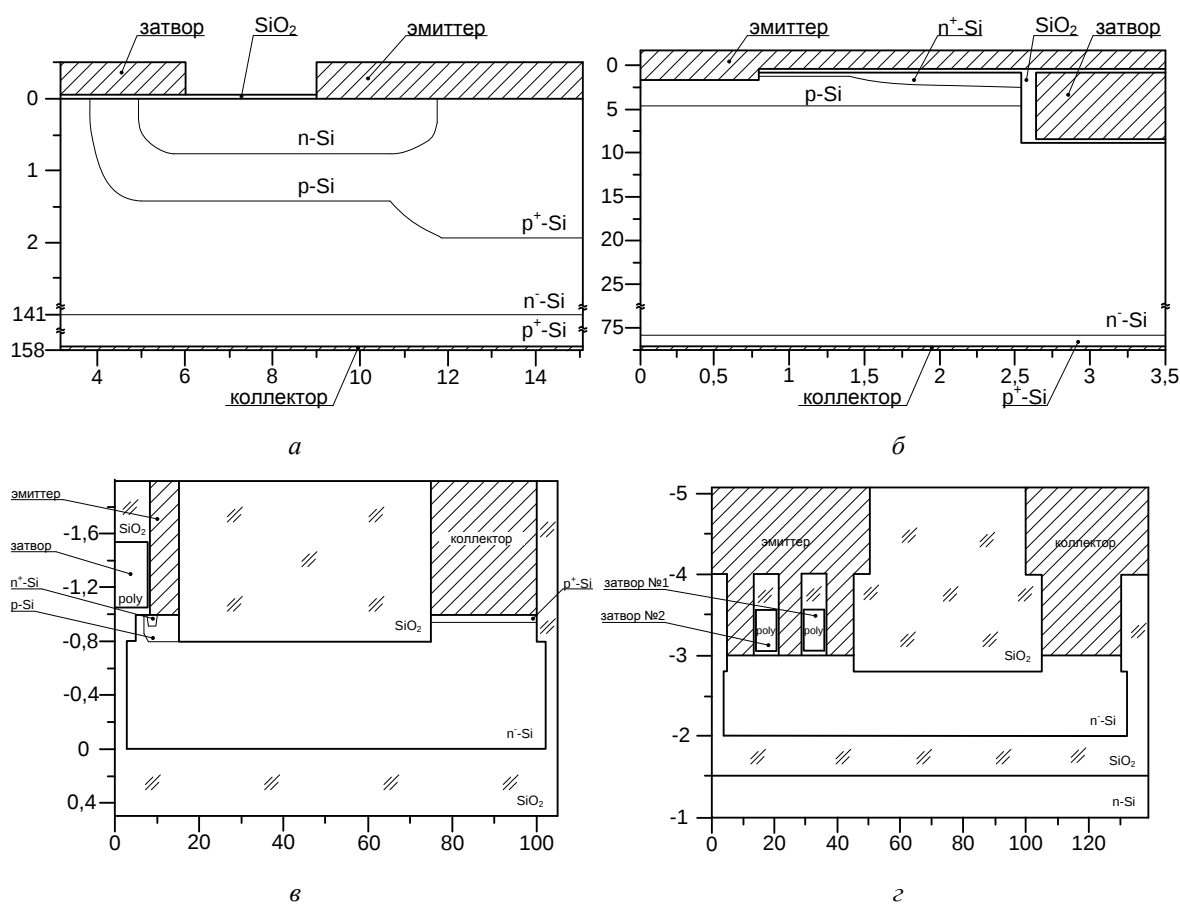


Рис. 1. Конструкции NPT БТИЗ на объемном кремнии (а), канавочного БТИЗ (б), горизонтального одно- (в) и двухзатворного (г) БТИЗ, сформированного по технологии «кремний на изоляторе»

Представленная на рис. 1, в структура БТИЗ на КНИ разработана на основе анализа конструктивных решений, описанных в [5–7]. База транзистора представляет собой пленку кремния, расположенную на изоляционном материале. БТИЗ может быть составлен из приборов любой полярности: биполярный транзистор pnp -типа с n -МОП транзистором или биполярный транзистор prn -типа с p -МОП транзистором. Большая плотность тока в БТИЗ структурах достигается с помощью сформированного n -кармана истока, увеличивающего ток базы биполярного транзистора в БТИЗ. Затворы могут управлять каналами МОП транзисторов. Вертикальные размеры n -типа дрейфовой области увеличены для повышения плотности тока без роста величины падения напряжения на n -дрейфовой области.

Результаты

Моделирование технологического маршрута формирования и электрических характеристик приборных структур БТИЗ выполнялось с использованием программного комплекса компании SILVACO [8].

Задачей определения допустимых областей технологических параметров является определение таких интервалов, которые обеспечивают требуемое значение, либо диапазон выходных характеристик. Традиционно решение такой задачи выполняется для случая одного параметра [9]. Решение задачи определения допустимых областей технологических параметров (допустимых отклонений) для случая нескольких параметров возможно с использованием многооткликовой модели технологического процесса. Данный метод определения технологических допусков позволяет определить независимые интервалы допустимых значений технологических параметров. Указанный метод, кроме того, позволяет выработать рекомендации по настройке технологического процесса для улучшения эксплуатационных характеристик изготавливаемых приборов и увеличения выхода годных изделий [10]

Зависимости тока коллектора I_K от напряжения на затворе V_3 при напряжении на коллекторе $V_K = 5\text{ В}$ для разных приборных структур БТИЗ представлены на рис. 2, а. Зависимости тока коллектора I_K от напряжения на коллекторе V_K при разных значениях напряжения на затворе $V_3 = 5\text{ В}$ для разных приборных структур БТИЗ представлены на рис. 2, б.

Для уменьшения величины порогового напряжения была проведена оптимизация конструкторско-технологических параметров для структуры №1. Поскольку для данной структуры длительность моделирования технологического процесса и электрических характеристик невелика, проведение отсеивающего эксперимента нецелесообразно. Таким образом, оптимизация проводилась по 21 выбранному параметру. Электрические характеристики для оптимизированного набора технологических параметров структуры № 1 представлены на рис. 2.

Для структуры № 3 время расчета достаточно велико, поэтому для выявления наиболее значимых факторов проведен отсеивающий эксперимент по плану Плакетта-Бермана, использующий матрицы Адамара и позволяющий тестировать большое число факторов при использовании минимального количества опытов [11].

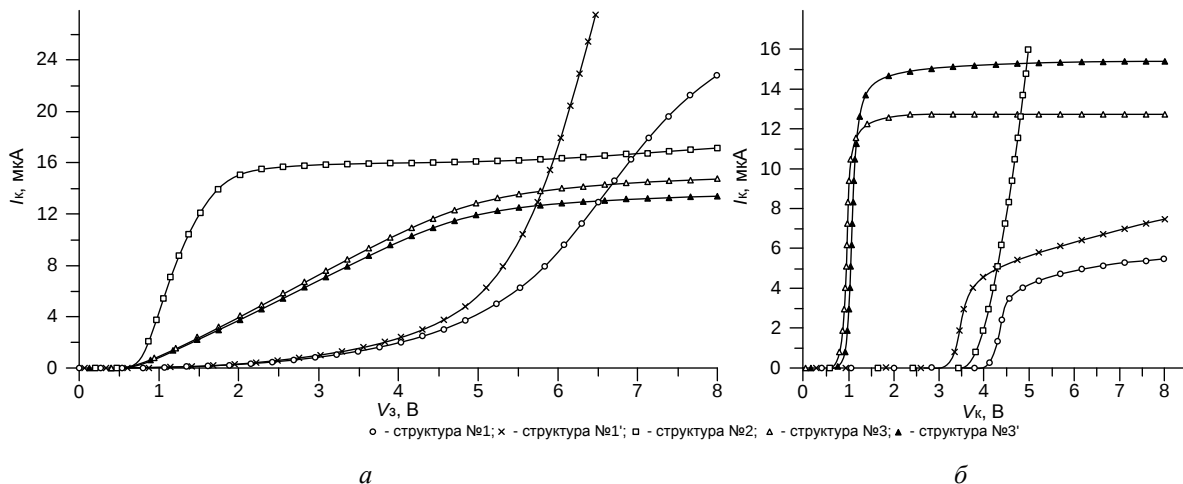


Рис. 2. Зависимости тока коллектора I_K от напряжения на затворе V_3 (а) и от напряжения на коллекторе V_K (б) для разных конструкций БТИЗ

В соответствии с результатами проведенного анализа по вышеописанной методике наиболее значимыми факторами для выбранных характеристик являются:

- концентрация примеси в n^- -базе;
- доза и энергия при имплантации бора при формировании p^+ -эмиттера;
- толщина подзатворного оксида;
- энергия при имплантации мышьяка при формировании n^+ -эмиттера.

В сложных технологических процессах на выходные характеристики изготавливаемого изделия оказывает влияние достаточно большое количество технологических параметров (факторов), но лишь несколько из них являются действительно значимыми.

Электрические характеристики полученной оптимизированной структуры №3 представлены на рис. 2.

На базе оптимизированной структуры однозатворного горизонтального БТИЗ предложена конструкция горизонтального БТИЗ с двумя независимыми затворами (рис. 1, з). Особенностью данной конструкции является возможность ступенчатого изменения величины коммутируемого тока. На рис. 3 представлены статические характеристики предложенной структуры БТИЗ.

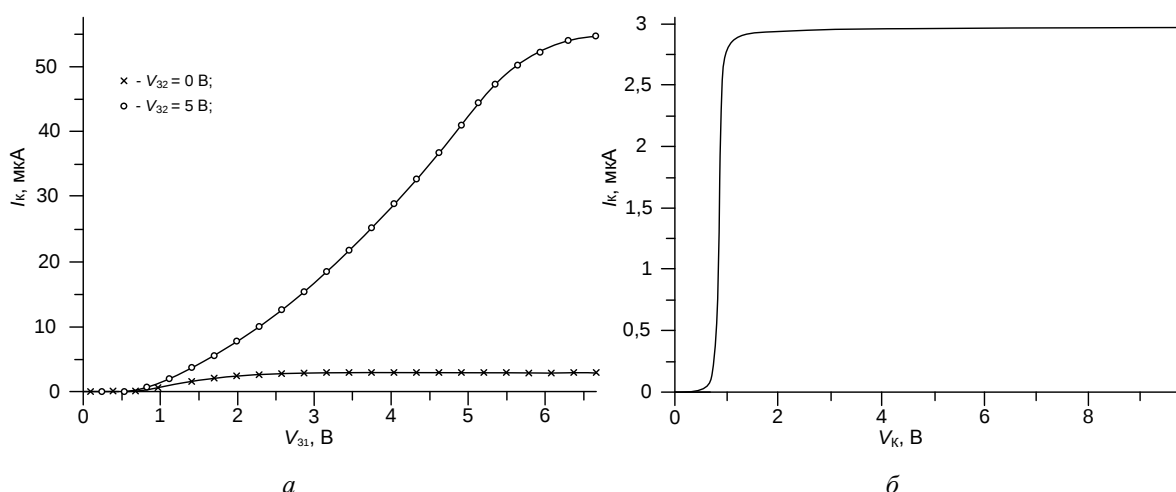


Рис. 3. Зависимость тока коллектора I_K от напряжения на затворе V_3 (а) и от напряжения на коллекторе V_K (б) для горизонтального БТИЗ с двумя независимыми затворами

В таблице приведены данные сравнения особенностей БТИЗ для устройств, изготовленных по технологии КНИ и по технологии объемного кремния. Из представленных результатов сравнения различных конструктивных решений БТИЗ невозможно однозначно выделить оптимальную структуру, т.к. всем им присущи свои достоинства и недостатки. Так, приборы, построенные на основе структуры с вертикальным расположением затвора, обладают меньшей площадью, что делает их производство более дешевым. Однако они проигрывают по быстродействию горизонтальным структурам, сформированным по КНИ технологии.

Следует отметить, что классические структуры БТИЗ на объемном кремнии не потеряли актуальности в тех областях применения, где высокие частотные характеристики прибора не являются ключевым требованием.

Сравнение электрические характеристики приборных структур БТИЗ, сформированных с использование различных технологических процессов

Параметр	БТИЗ на объемном кремнии		Trench-БТИЗ	Горизонтальный БТИЗ на КНИ		
				Один затвор		Два затвора
	Тип.	Оптим.		Тип.	Оптим.	
Ток коллектора, мкА	22,8	57,4	17,1	14,7	13,4	44,5
Пороговое напряжение, В	4,25	3,36	3,84	0,81	0,91	0,91
Время включения, нс	1431	1701	243	88	95	91
Время выключения, нс	105	157	259	65	154	123

Заключение

Посредством приборно-технологического моделирования и методов многооткликовой оптимизации проведено исследование эксплуатационных характеристик конструктивных решений биполярного транзистора с изолированным затвором, изготовленного с использованием различных технологических процессов.

Предложена конструкция горизонтального БТИЗ, изготовленного по технологии «кремний на изоляторе», с независимыми затворами. Данное конструктивное решение

позволяет интегрировать на одном кристалле силовую и логическую части, выполняя роль ключа и обеспечивая возможность ступенчатого изменения величин коммутируемых токов. Подобное решение может найти применение, например, в схемах управления электродвигателями и сварочных аппаратах.

Работа проводилась в рамках реализации этапов выполнения заданий 3.1.01, 3.1.02 и 3.2.01 государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016-2020 гг.

INSULATED-GATE BIPOLAR TRANSISTOR FORMED IN THE BULK SILICON AND USING «SILICON ON INSULATOR» TECHNOLOGY

IBRAHIM SHELIBAK, I.Yu. LOVSHENKO, V.R. STEMPITSKY

Abstract

The results of the optimization of design and technological parameters device structures insulated-gate bipolar transistor (IGBT), formed in bulk silicon and using «Silicon on Insulator» (SOI) technology are presented. The specific features of the functioning of various constructive solutions IGBT are studied. A construction of SOI-IGBT structure with multiple gates, which allows a step change in the switched current, is suggested and investigated.

Keywords: isolated gate bipolar transistor, structure, manufacturing technology, static and dynamic characteristics.

Список литературы

1. *Khanna V.K.* The Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT. Theory and Design. IEEE, 2003.
2. *Ловиенко И.Ю., Стемпитский В.Р., Турцевич А.С. и др.* // Докл. БГУИР. 2013. № 4. С. 10–16.
3. *Ловиенко И.Ю., Стемпитский В.Р., Турцевич А.С. и др.* // Электроника-Инфо. 2013. № 3. С. 23–26.
4. *Artamonov A.M., Nelayev V.V., Shelibak I.M.* // Proc. of XI Int. Conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2011). Lviv, 2011. P. 8–9.
5. *Hideaki Kawahara, Philip Leland Hower.* Lateral insulated gate bipolar transistor / USA Patent № US 2010/0032713 A1.
6. *Masato Taki, Masahiro Kawakami, Kiyoharu Hayakawa et al.* Lateral SOI semiconducting devices and manufacturing method thereof / US Patent № 7943957 B2.
7. *Akio Nakagawa, Norio Yasuhara.* High breakdown voltage semiconductor device / USA Patent № 5241210.
8. SILVACO. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://silvaco.com/>. – Дата доступа: 06.12.2016.
9. Управление и оптимизация производственно-технологических процессов / Под ред. Д.В. Гаскарова. СПб., 1995.
10. *Попов С., Ларина М.* // Вест. НГУ. 2004. № 26. С. 137–141.
11. *Hartman, K., Lezki E., Schafer W.* Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft. Leipzig, 1974.