

Высоковольтный интегральный тиристор с полевым управлением

© И.В. Грехов,¹ А.В. Рожков,¹ Л.С. Костина,¹ А.В. Коновалов,² Ю.Л. Фоменко²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ЗАО ВЗЗП-Микрон,
394033 Воронеж, Россия
e-mail: konst@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 13 марта 2012 г.)

Рассмотрены конструктивные особенности и технологические аспекты изготовления мощного интегрального тиристора с внешним полевым управлением — нового энергосберегающего прибора для силовой преобразовательной техники. Приведены осциллограммы и обсуждены механизмы процессов включения и выключения микротиристорного чипа с тиристорной $n^+p'N^-n'p^+$ -структурой в элементарной ячейке. Экспериментально исследовано явление развития локального динамического пробоя при выключении. Приведена осциллограмма такого процесса и продемонстрирован экспериментально наблюдаемый при плотности тока $\sim 150 \text{ A/cm}^2$ характер разрушения. Вольт-амперные характеристики в проводящем направлении при комнатной температуре и при 125°C свидетельствуют о том, что при плотности тока более 60 A/cm^2 температурная зависимость меняет знак и становится положительной, что является принципиально важным для параллельной работы микротиристорных чипов в модуле. Показано, что по своим статистическим и динамическим характеристикам интегральные тиристоры с внешним полевым управлением при относительной простоте конструкции успешно конкурируют с базовым прибором современной силовой преобразовательной техники — биполярным транзистором с изолированным затвором.

Введение

Основным активным элементом полупроводникового преобразователя электрической энергии является полностью управляемый мощный переключатель (транзистор либо запираемый тиристор). Синусоида рабочего тока в преобразователе формируется из большого числа импульсов тока переменной ширины и амплитуды, поэтому требования к частотным характеристикам переключателя являются очень жесткими. В то же время эти приборы должны иметь малое остаточное напряжение в проводящем состоянии при большой плотности прямого тока. Одновременное удовлетворение этих требований является сложной технической задачей.

В качестве переключателей в мощных преобразователях в диапазоне мощностей от киловатт до мегаватт, где потребляется основное количество электроэнергии, используются, как правило, биполярно-полевые транзисторы, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Элементарная ячейка такого прибора состоит из высоковольтного биполярного транзистора, в цепь управления которого включен полевой транзистор (MOSFET) [1,2]. Коммутационные процессы в IGBT протекают очень быстро, однако высокое падение напряжения на приборе во включенном состоянии (вследствие того, что биполярный транзистор структуры IGBT во включенном состоянии работает в ненасыщенном режиме) является существенным и принципиальным недостатком IGBT. Альтернативу IGBT представляет интегральный тиристор с внешним полевым управлением [3,4], который свободен от недостатков IGBT и может быть быстро и эффективно выключен путем замыкания накоротку

цепи эмиттер-база низковольтным полевым транзистором с очень малым сопротивлением канала.

Настоящая работа продолжает цикл работ, посвященных теоретическому [4,5] и экспериментальному [6] исследованиям технологических и электрофизических параметров интегрального тиристора с внешним полевым управлением. Рассматриваются конструктивные особенности силового чипа и элементарной тиристорной ячейки; приводится анализ физических процессов, протекающих в тиристорном чипе при включении и выключении; представлены результаты экспериментального исследования статических и динамических характеристик и явления развития локального динамического пробоя при выключении.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

1. *Конструктивные и технологические особенности интегрального тиристора с внешним полевым управлением.* Элементарная ячейка интегрального тиристора по конструкции существенно проще, чем ячейка IGBT, поскольку содержит только микротиристор. Расчет и эксперименты показали, что при ширине n^+ -эмиттерной полосы $10\text{--}12 \mu\text{m}$, толщине p -базы $4 \mu\text{m}$ и поверхностной концентрации акцепторной примеси в ней $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ тангенциальное сопротивление базы достаточно мало и не является фактором, ограничивающим предельную амплитуду выключаемого тока [5,6]. При такой ширине элементарной ячейки топологическое разрешение $1.2\text{--}2 \mu\text{m}$ вполне достаточно для производства микротиристорных чипов. На рис. 1 приведены

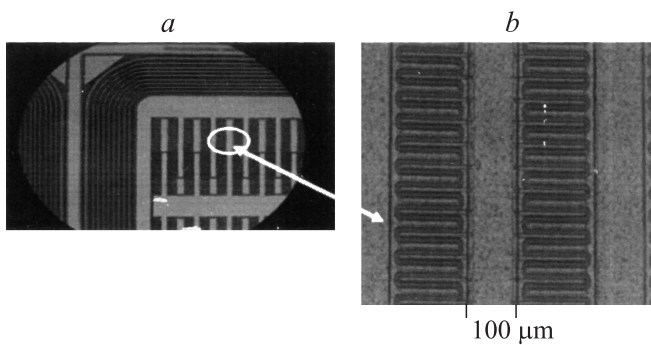


Рис. 1. *a* — фотография микротиристорного чипа. Размер чипа 11.3×9.15 mm, размер рабочей зоны 7.5×6 mm, $S_p = 0.45$ mm². По периметру расположена система охранных колец с напряжением пробоя ~ 4.5 kV. *b* — фотография участка рабочей зоны при большем увеличении.

фотографии опытного образца чипа интегрального тиристора с системой охранных колец на напряжение 4.5 kV и его рабочей зоны при большем увеличении.

Технологический маршрут изготовления такого чипа состоит из обычных технологических процессов, используемых, например, в производстве биполярных транзисторов: имплантация, диффузия, окисление, фотолитография, напыление и т.д. Время жизни дырок τ_p в N^- -базе, измеренное после металлизации чипа и сборки на керамическую плату, обычно составляет 50–70 μs; γ -облучением оно снижалось до 10–15 μs.

2. Исследование процессов переключения. Включение тиристорной $n^+p'N^-n'p^+$ -структуры в элементарной ячейке интегрального тиристора инициируется коротким импульсом прямого тока в цепи АВ (рис. 2) с амплитудой примерно на 2 порядка меньшей силового тока. Электроны, инжектируемые из n^+ -эмиттера, быстро проходят тонкую ($\sim 4\text{--}5$ μm) p' -базу и область объемного заряда (ООЗ) коллекторного $p'N^-$ -перехода, попадают в нейтральную часть N^- -базы и вызывают встречную инжекцию дырок p^+ -эмиттером. Этот процесс развивается лавинообразно, в результате чего базовые области заполняются электронно-дырочной плазмой высокой плотности, и тиристор переходит во включенное состояние. В отличие от IGBT, электронно-дырочная плазма при протекании прямого тока заполняет всю N^- -базу тиристора, причем максимум концентрации плазмы расположен у коллекторного $p'N^-$ -перехода (рис. 2). Это, естественно, значительно снижает падение напряжения при протекании силового тока, но сильно затрудняет процесс выключения, поскольку для восстановления блокирующего состояния коллекторного $p'N^-$ -перехода необходимо удалить всю плазму из приколлекторной области базовых слоев. В обычных силовых запираемых тиристорах удаление плазмы производится мощным импульсом тока в цепи управления с амплитудой, примерно равной силовому току. Для формирования таких импульсов необходимы сложные и энергоемкие устройства. Именно поэтому запираемые тиристоры были вытеснены почти изо всех основных областей применения

легко управляемыми IGBT. Однако наши эксперименты показали, что в тиристор в микроэлектронном исполнении с шириной эмиттерной n^+ -ячейки порядка 10 μm одновременное выключение всех ячеек может быть осуществлено вообще без импульса тока управления путем замыкания цепи АВ (эмиттер-база, см. рис. 2) одним низковольтным полевым транзистором с очень малым сопротивлением канала, формируемого импульсом напряжения в цепи ВС (рис. 2). Протекающие при этом процессы показаны на рис. 2. После замыкания цепи АВ прекращается инжекция электронов из n^+ -эмиттера, и силовой ток протекает в виде тока дырок вдоль p' -базы под n^+ -эмиттером и далее через полевой транзистор во внешнюю силовую цепь. Принципиально важно, чтобы сопротивление всей замыкающей цепи было достаточно малым, и протекающий по ней ток создавал падение напряжения меньше, чем напряжение порога начала инжекции электронов n^+p' -переходом, т.е. ≤ 0.7 V. В этом случае происходит быстрое рассасывание плазмы из приколлекторной области — дырки выводятся во внешнюю цепь, а освободившиеся электроны дрейфуют в N^- -базу, вызывая соответствующую инжекцию дырок из p^+ -эмиттера. Освободившийся от плазмы коллекторный $p'N^-$ -переход смещается в запирающем направлении, около него формируется ООЗ, напряжение на приборе растет, а ток резко уменьшается. Несмотря на высокую

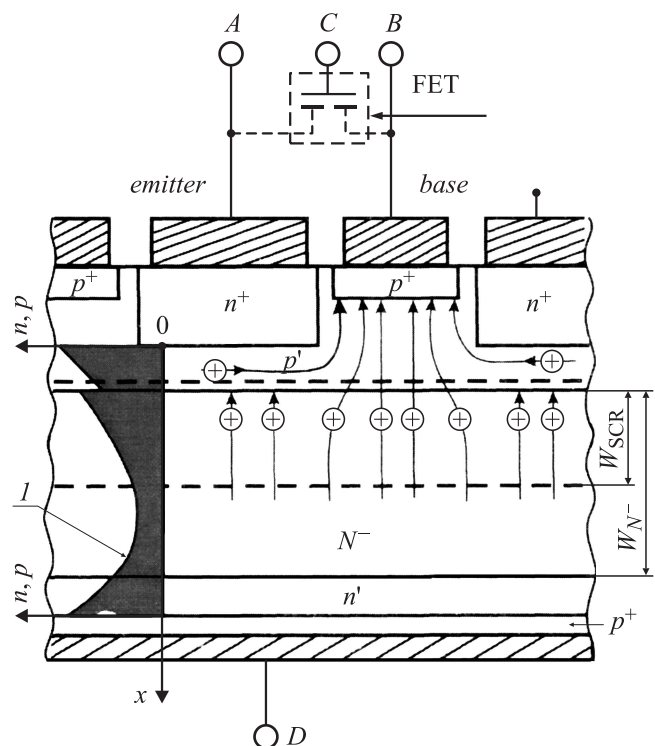


Рис. 2. Элементарная ячейка микротиристорного чипа. Стрелками показано направление протекания дырочного тока при выключении; слева показано распределение концентрации электронно-дырочной плазмы при протекании прямого тока (кривая *I*). Глубина $p'N^-$ -перехода ~ 6 μm, глубина n^+p' -перехода ~ 2 μm, ширина N^- -базы $W_{N^-} = 500$ μm, $\rho_{Si} = 250$ Ω · cm.

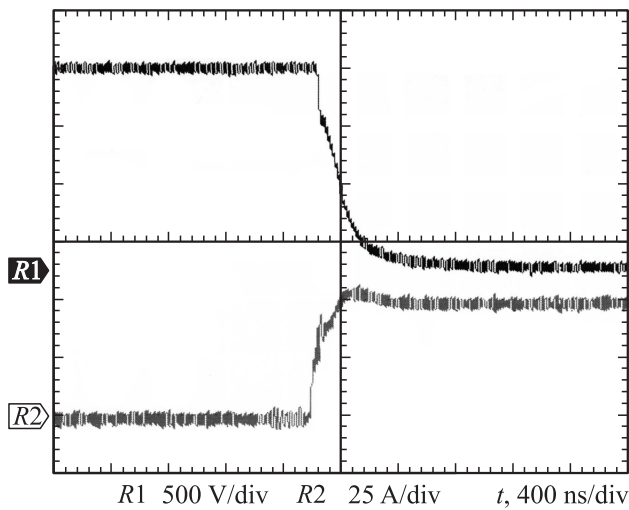


Рис. 3. Осциллограммы, иллюстрирующие процесс включения микрокристаллического тиристора: *R1* — кривая спада напряжения на тиристоре при подаче импульса управления, *R2* — кривая нарастания тока в силовой цепи.

начальную концентрацию плазмы в приколлекторной области, процесс ее рассасывания протекает очень быстро, поскольку он производится полным силовым током; в таком режиме длительность этой фазы процесса выключения тиристора вполне сопоставима с аналогичным процессом в IGBT. Вторая фаза процесса выключения, одинаковая для IGBT и тиристора, определяется рекомбинацией плазмы, оставшейся в квазинейтральной части N^- -базы и в n' -буфере. Длительность этой фазы примерно на порядок больше, чем первой. В принципе ее можно сократить, уменьшая время жизни носителей в плазме путем введения центров рекомбинации в N^- -базу, но это приводит к увеличению остаточного напряжения во включенном состоянии.

Осциллограмма процесса включения микрокристаллического тиристора в цепи с омической нагрузкой приведена на рис. 3. Запуск осуществляется импульсом тока с амплитудой 2 А, нарастающего со скоростью $dI/dt = 100 \text{ А}/\mu\text{с}$. Задержка включения в этих условиях составляет $\sim 50 \text{ нс}$, время резкого нарастания тока $\sim 1.2 \mu\text{с}$. Согласно приведенным кривым спада напряжения и нарастания тока в силовой цепи, времена задержки минимальны относительно момента подачи импульса управления и не превышают нескольких десятков наносекунд. Времена нарастания тока и соответственно спада напряжения на микрокристаллическом тиристоре составляют не более 500 нс.

Осциллограмма процесса выключения приведена на рис. 4. Выключение осуществлялось путем замыкания накоротко цепи АВ (рис. 2) полевым транзистором с рабочим напряжением 15 В и сопротивлением канала $9 \text{ м}\Omega$; площадь чипа составляла $5 \times 5.6 \text{ мм}^2$. Для выключения микрокристаллического тиристора на затвор транзистора подавался импульс напряжения $\sim 10 \text{ В}$ со скоростью нарастания $1000 \text{ В}/\mu\text{с}$. В этих условиях задержка выключения составляла $< 1.5 \mu\text{с}$, время резкого

спада $\sim 1.6 \mu\text{с}$ и длительность „хвоста“ тока $\sim 3 \mu\text{с}$. После выключения чипа полевой транзистор остается во включенном состоянии и выключается непосредственно перед началом следующего цикла, т.е. перед подачей включающего импульса тока в цепи АВ. Это повышает устойчивость чипа к резким всплескам напряжения и другим внешним воздействиям, когда чип находится в выключенном состоянии и блокирует напряжение силовой цепи.

3. Предельная плотность выключаемого тока. Рассмотрим процесс выключения микрокристаллического тиристора (осциллограмма на рис. 4) более детально. Одновременно с процессом нарастания напряжения на приборе в силовой цепи (кривая *R4*, стрелкой отмечен момент включения полевого транзистора) регистрировалась динамика спада тока в силовой цепи (кривая *R3*) и нарастания тока в цепи полевого транзистора (кривая *R1*). Хорошо видно, что амплитуда тока в силовой цепи резко падает на 25 А практически сразу после начала выключающего импульса, и на эту же величину возрастает ток в цепи полевого транзистора. Это свидетельствует о достаточно высокой эффективности шунтировки эмиттерного перехода полевым транзистором при его включении. Дальнейший спад тока в силовой цепи и нарастание тока в цепи полевого транзистора наблюдаются вплоть до момента полного выноса электронно-дырочной плазмы и начала нарастания напряжения на коллекторном $p'N^-$ -переходе. Важно отметить, что восстановление блокирующих свойств коллекторного $p'N^-$ -перехода происходит при наличии электронно-дырочной плазмы в толще слаболегированной N^- -базы, о чем свидетельствует динамика спада тока в силовой цепи (кривая *R3*) и нарастания напряжения на микрокристаллическом тиристоре (кривая *R4*). Исследования и расчеты, выполненные ранее, показали,

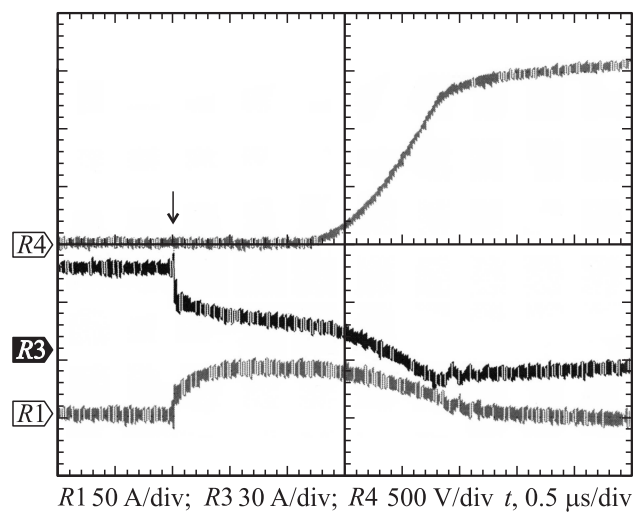


Рис. 4. Осциллограммы, иллюстрирующие процесс выключения микрокристаллического тиристора. *R1* — кривая нарастания тока в цепи полевого транзистора, *R3* — кривая спада тока в силовой цепи тиристора, *R4* — кривая нарастания напряжения на тиристоре при выключении.

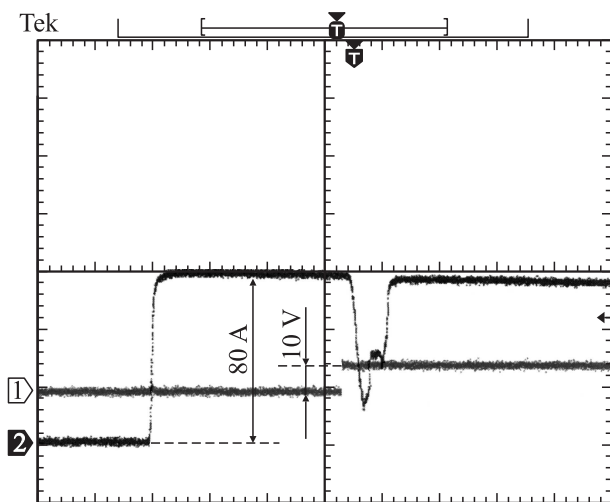


Рис. 5. Осциллограмма процесса разрушения чипа при выключении. 1 — напряжение на затворе полевого транзистора, 2 — ток в силовой цепи. Сопротивление нагрузки 20 Ω .

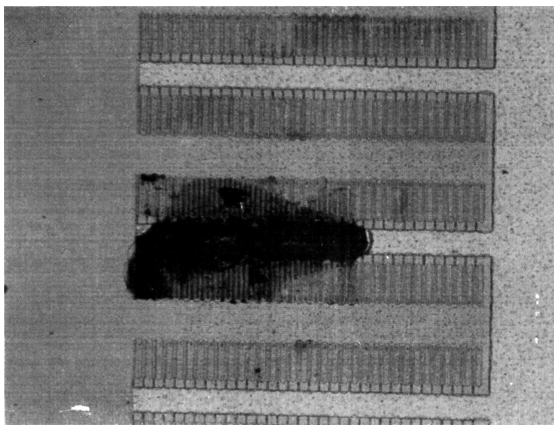


Рис. 6. Фотография чипа со снятой металлизацией после разрушения.

что при определенных условиях это может приводить к локальному динамическому пробоя [7,8]. Этот пробой возникает обычно в конце процесса выключения, когда напряженность поля у коллектора, создаваемая суммарным зарядом ионизированных доноров и свободных дырок в потоке, выносимом из электронно-дырочной плазмы в N^- -базе, превышает критическую величину для лавинного пробоя. Осциллограмма такого процесса приведена на рис. 5, а характер разрушения показан на рис. 6. Плотность рабочего тока перед выключением была $\sim 150 \text{ A/cm}^2$, а напряжение в силовой цепи 1.5 kV. Разрушение началось в углу, образованном двумя эмиттерными шинами, где сформировался сквозной „кратер“, а затем прошедший через него по базовой шине силовой ток разрушил эту шину. Такой характер разрушения связан с тем, что дырки из электронно-дырочной плазмы, накопленной под эмиттерными шинами при протекании прямого тока, при выключении выводятся через базовые

пальцы, ближние к этим шинам, создавая там повышенную плотность заряда и инициируя динамический пробой. Это, естественно, снижает допустимую среднюю плотность выключаемого тока. Определенные изменения в конструкции микрокристаллического чипа позволяют в значительной степени уменьшить этот эффект.

4. *Статические вольт-амперные характеристики (ВАХ).* ВАХ микрокристаллического чипа в проводящем направлении при комнатной температуре и при 125 $^{\circ}\text{C}$ приведена на рис. 7. При плотности тока более 60 A/cm^2 температурная зависимость меняет знак и становится положительной, что является принципиально важным для параллельной работы чипов в модуле. Там же приведены ВАХ модуля HiPaK фирмы АВВ с блокируемым напряжением 4.5 kV, сделанного по новейшей SPT $^+$ -технологии [9]. Как и ожидалось, микрокристаллический чип имеет существенно меньшее остаточное напряжение во всем диапазоне плотностей тока.

В таблице приведены основные характеристики микрокристаллического чипа с блокируемым напряжением 4.5 kV и для сравнения характеристики IGBT-модуля

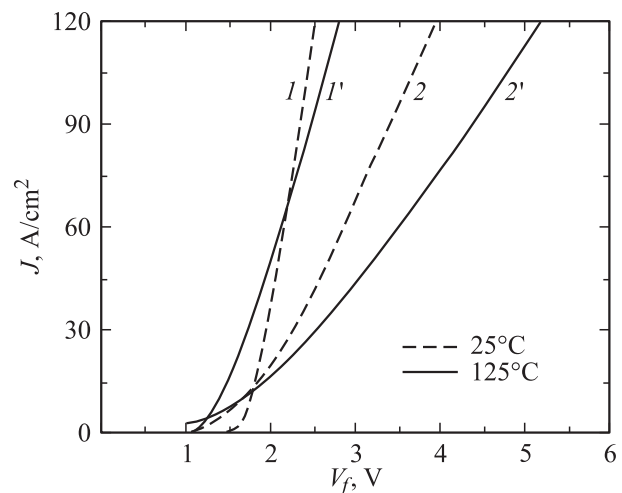


Рис. 7. ВАХ в проводящем направлении: 1 и 1' — микрокристаллического чипа при 25 и 125 $^{\circ}\text{C}$ соответственно. 2 и 2' — IGBT-модуля HiPaK при 25 и 125 $^{\circ}\text{C}$, перестроенные в плотность тока.

Выходные характеристики микрокристаллического чипа

	Разработанный микрокристаллический чип	IGBT — модуль фирмы АВВ
Блокируемое напряжение, V	4500	4500
Остаточное напряжение при $j = 60 \text{ A/cm}^2$, $T = 25^{\circ}\text{C}$, V	2.1	2.8
Задержка включения	50 ns	1.0 μs
Время резкого нарастания тока, μs	1.2	0.5
Задержка выключения, μs	1.0	2.2
Время резкого спада тока, μs	1.6	1.0

HiPaK фирмы АВВ с аналогичным блокируемым напряжением [9].

Из приведенных в таблице результатов измерений следует, что при одинаковом рабочем напряжении и примерно одинаковых динамических характеристиках остаточное падение во включенном состоянии на микротиристорном чипе существенно ниже, чем на современных IGBT.

Заключение

Интегральный тиристор с внешним полевым управлением, конструкция и выходные характеристики которого обсуждаются в настоящей работе, представляет собой новый прибор силовой микроэлектроники, параметры которого в области больших рабочих напряжений аналогичны либо превышают параметры современных IGBT ведущих зарубежных фирм. При этом конструкция элементарной ячейки микротиристорного чипа такого прибора существенно проще, чем конструкция ячейки IGBT, благодаря чему интегральный тиристор может выпускаться в промышленных масштабах на имеющихся в России технологических линиях с топологическим разрешением 1.5–2 мкм.

Силовые чипы с микротиристором в качестве элементарной ячейки в сочетании с разработанными, испытанными и к настоящему времени промышленно освоенными чипами ультрабыстрых обратных диодов с „мягким“ восстановлением и чипами мощных полевых транзисторов составили элементарную базу принципиально новых, изготовленных в России силовых приборов — интегральных тиристорных модулей с полевым управлением на напряжение 3.3–4.5 кВ и током до 600 А. Снижение остаточного напряжения во включенном состоянии в интегральных тиристорных модулях примерно в 1.5 раза в сравнении с коммутаторами на основе IGBT обеспечивает повышение энергоэффективности преобразовательных устройств, уменьшение их веса, габаритов и стоимости.

Список литературы

- [1] Baliga B.J. Power Semiconductor Devices. Boston. PWS Publish. Comp., 1994. 600 с.
- [2] Baliga B.J., Adler M.S., Love R.P., Gray P.V., Zommer N. // IEEE Tr. El. Dev. 1984. Vol. ED-31. P. 821–828.
- [3] Грехов И.В., Костина Л.С., Рожков А.В., Матвеев В.И., Зитта Н.Ф. // Мощный интегральный тиристор с полевым управлением. Патент № (21)2006120349/22 от 06.06.2006.
- [4] Грехов И.В., Мнацаканов Т.Т., Юрков С.Н., Тандоев А.Г., Костина Л.С. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 80–87.
- [5] Грехов И.В., Мнацаканов Т.Т., Юрков С.Н., Тандоев А.Г., Костина Л.С. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 76–81.
- [6] Грехов И.В., Костина Л.С., Рожков А.В., Зитта Н.Ф., Матвеев В.И. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 12. С. 78–84.
- [7] Wachuta G.K. // IEEE Tr. El. Dev. 1991. Vol. 38. N 6. P. 1516.
- [8] Горбатюк А.В., Грехов И.В., Гусин Д.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 10. С. 80–88.
- [9] Kopta A., Rahimo M., Sciapbach U., Schnell R., Schneider D. // Proceedings of PCIM. 2007. Nuremberg. P. 1–6.