

07

## **Инжекционно-ионизационный механизм неустойчивости тока при выключении интегрального тиристора с полевым управлением**

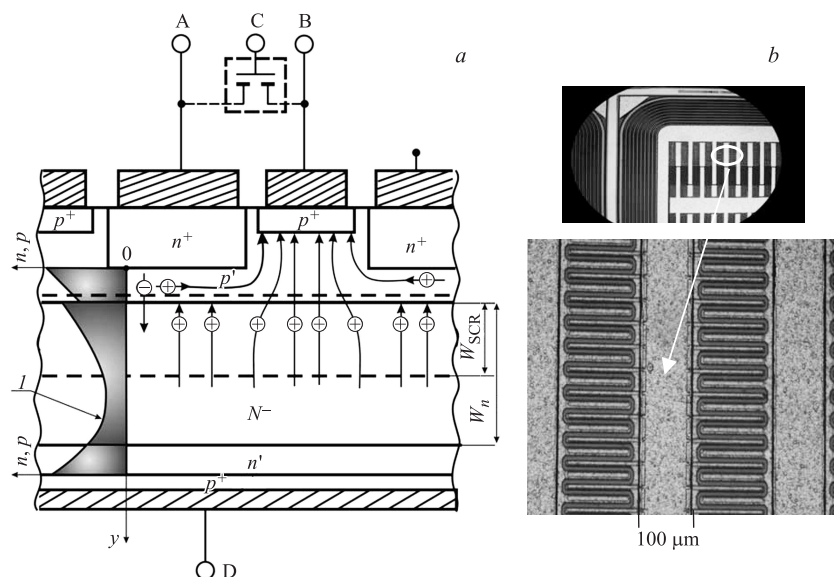
© И.В. Грехов, Д.В. Гусин, Б.В. Иванов, А.В. Рожков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)  
E-mail: grekhov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 июля 2013 г.

Выполнено экспериментальное и расчетное исследование процесса выключения интегрального тиристорного чипа с внешним полевым управлением, работающего в цепи с индуктивной нагрузкой. С помощью независимых измерений анодного и катодного эмиттерного токов установлено, что в реализуемых на практике условиях шунтирование управляемых эмиттеров по внешней цепи не позволяет мгновенно прервать инжекцию электронов во всех элементарных ячейках структуры, и определен максимальный выключаемый ток при работе в таком режиме. Выполненное численное моделирование выявило неустойчивость распределения тока по рабочей площади, способствующую аварийной его локализации, и показало критическую необходимость уменьшения паразитных индуктивностей и сопротивлений в самих чипах и шунтирующей цепи при разработке высоковольтных интегральных тиристоров и силовых модулей на их основе.

Интегральный тиристор (ИТ) — это прибор силовой микроэлектроники, который, в принципе, может быть альтернативой наиболее массовому прибору в этой области — биполярно-полевому транзистору (IGBT) — в определенном диапазоне параметров. Элементарная ячейка кремниевого чипа IGBT состоит из биполярного транзистора, в цепь управления которого включен полевой транзистор, MOSFET; в чипе же ИТ элементарная ячейка представляет собой микротиристор, а полевое управление всеми микротиристорами осуществляется одним внешним полевым транзистором по шинам, объединяющим ячейки. Остаточное



**Рис. 1.** *a* — элементарная ячейка чипа ИТ. Стрелками показано направление протекания дырочного тока при выключении. Слева показано распределение концентрации электронно-дырочной плазмы при протекании прямого тока (кривая *I*). Параметры структуры: глубина  $p'N^-$ -перехода  $6\ \mu\text{m}$ , глубина  $n^+p'$ -перехода  $2\ \mu\text{m}$ , ширина  $N^-$ -базы  $W_n = 340\ \mu\text{m}$ , удельное сопротивление кремния  $150\ \Omega \cdot \text{cm}$ . *b* — фотография чипа ИТ: размер чипа  $11.3 \times 9.15\ \text{mm}$ , размер рабочей зоны  $7.5 \times 6\ \text{mm}$ , рабочая площадь  $0.45\ \text{cm}^2$ , по периметру расположена система охранных колец с напряжением пробоя  $\sim 3.5\ \text{kV}$ .

напряжение во включенном состоянии у ИТ примерно в 1.5 раза меньше, чем у IGBT, а простота конструкции ячейки позволяет производить чипы ИТ на имеющихся в России технологических линиях с топологическим разрешением  $1.5\text{--}2\ \mu\text{m}$ . Однако внешнее полевое управление выключением ИТ приводит к ряду проблем, часть из которых рассматривается в данной работе.

На рис. 1, *a* схематически показана конструкция элементарной ячейки ИТ, а на рис. 1, *b* — один из вариантов конструкции чипа [1]. Распределение электронно-дырочной плазмы во включенном состоянии показано на рис. 1, *a*. Для выключения прибора производится включение

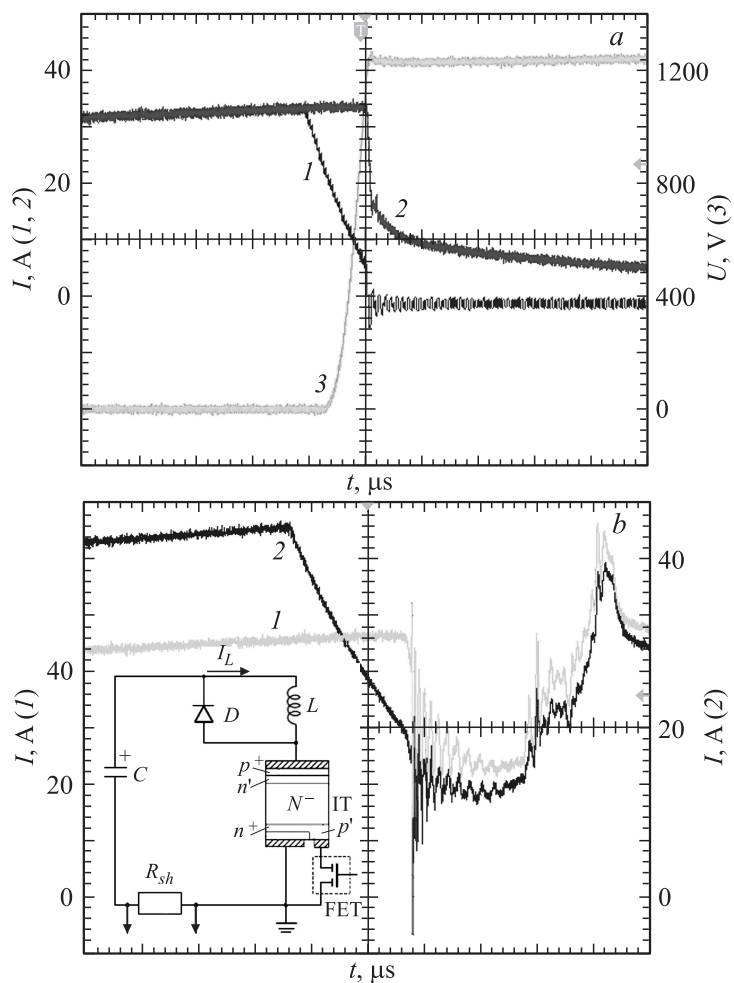
полевого транзистора ПТ, замыкающего накоротко цепь АВ эмиттер–база. Если суммарное сопротивление замыкающей цепи достаточно мало, то инжекция  $n^+ - p$ -эмиттера резко обрывается, и протекающий по цепи ВД ток является током дырок, выносимых во внешнюю цепь из электронно-дырочной плазмы, накопленной в  $N^-$ -базе, и проходящих через формирующуюся у  $p'N^-$ -перехода область объемного заряда (ООЗ) шириной  $W_{ООЗ}$ . В этих условиях предельная величина выключаемого тока должна, как и в IGBT, определяться неустойчивостью однородного распределения плотности дырочного тока  $J_p$ , которая возникает, когда концентрация свободных дырок  $p \geq J_p / qv_{ps}$  (здесь  $q$  — элементарный заряд,  $v_{ps}$  — скорость насыщенного дрейфа дырок в сильных полях) становится сравнимой с концентрацией донорной примеси в  $N^-$ -базе и суммарный положительный заряд создает поле, достаточное для ударной ионизации при внешнем напряжении, значительно меньшем, чем напряжение лавинного пробоя в статических условиях [2–4].

Однако в реальной конструкции чипа значительное сопротивление замыкающей цепи, состоящее из тангенциального сопротивления  $p$ -базы, шин и замыкающего транзистора, не позволяет резко прерывать электронный ток эмиттера, и поэтому процесс выключения усложняется инжекцией электронов, частично компенсирующих заряд свободных дырок. В этих условиях состав тока в ООЗ является биполярным, причем соотношение его электронной и дырочной компонент изменяется в процессе выключения — при замыкании транзистором шунтирующей цепи катодный  $n^+$ -эмиттер продолжает некоторое время инжектировать электроны, а возникающая с ростом напряжения ударная ионизация в ООЗ генерирует дополнительные электронно-дырочные пары. Одновременное действие этих двух механизмов должно сказываться на перераспределении тока между ячейками ИТ в переходном процессе, которое может принимать опасные масштабы и, следовательно, заметно влиять на величину предельного коммутируемого тока  $I_m$ . В рамках упрощенных аналитико-численных моделей особенности функционирования биполярных переключающих приборов в таких специфических режимах и связанные с ними предельные ограничения их характеристик ранее рассматривались в ряде работ [5,6].

В данной работе процесс выключения ИТ исследовался экспериментально в обычной схеме с индуктивной нагрузкой, соответствующей реальным условиям работы прибора в преобразователе (врезка на

рис. 2, *b*). Включение ИТ производится коротким импульсом тока в цепи управления. Когда ток разряда силового конденсатора  $C$  через индуктивность нагрузки  $L$  и интегральный тиристор ИТ нарастает до требуемой величины, производится включение транзистора ПТ, прерывающего инжекцию электронов  $n^+$ -эмиттером. После некоторой задержки, определяемой рассасыванием плазмы в области коллекторного  $p^+N^-$ -перехода, начинается быстрый рост напряжения на нем и формирование ООЗ при практически постоянном токе, поддерживаемом индуктивностью  $L$ . Когда напряжение на ИТ превысит напряжение  $U_p$  на конденсаторе  $C$ , диод  $D$  смещается в проводящем направлении, ток через него резко нарастает и соответственно падает ток через ИТ.

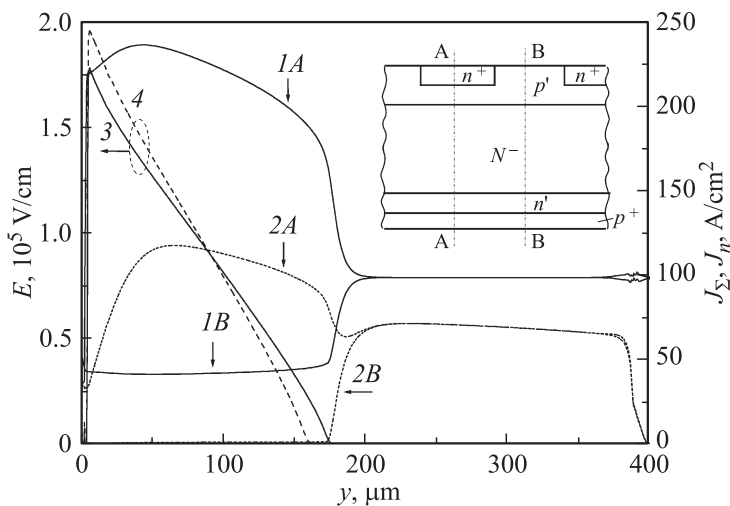
На рис. 2, *a, b* приведены осциллограммы процесса выключения чипа ИТ с рабочим напряжением 3.3 kV; конструкция чипа показана на рис. 1 (справа). При выключении регистрировались одновременно динамика общего тока и напряжения, а также ток в эмиттерной цепи с помощью пояса Роговского. На рис. 2, *a* показан процесс выключения тока с амплитудой 35 А и напряжением 1.25 kV. Замыкание цепи эмиттер-база производилось полевым транзистором с сопротивлением канала 7 мΩ. После небольшой задержки ток эмиттера плавно спадает до  $\sim 5$  А и затем резко спадает до нуля одновременно с резким спадом полного тока до  $\sim 5$  А; дальнейший медленный спад тока определяется скоростью рекомбинации остаточной плазмы в области  $p^+n^+N^-$ -перехода. Нарастание напряжения на ИТ начинается через  $\sim 0.7 \mu\text{s}$  после начала спада эмиттерного тока, а полный ток резко уменьшается одновременно с выходом напряжения на максимум и переходом тока в цепь диода  $D$ . Таким образом, в процессе выключения в течение значительного времени большой ток протекает при большом напряжении на приборе, и при этом происходит инжекция электронов в ООЗ коллектора неполностью запертым эмиттером. Медленный спад эмиттерного тока свидетельствует о значительном суммарном сопротивлении шунтирующей цепи, которое, по нашим оценкам, составляет  $\sim 15 \text{ m}\Omega$ , а индуктивность  $\sim 20 \text{ nH}$ . При повышении тока до 47 А происходит разрушение прибора; осциллограммы этого процесса показаны на рис. 2, *b*. Хорошо видно, что разрушение происходит на этапе быстрого спада тока примерно до амплитуды  $\sim 20$  А. Анализ разрушенных чипов показывает, что разрушается одна или несколько эмиттерных полос, а затем ток короткого замыкания разрушает базовую шину; предельная (разрушающая) плотность тока составила  $\sim 100 \text{ A/cm}^2$ . В IGBT-чипах



**Рис. 2.** Осциллограммы процесса выключения чипа ИТ. *a* — рабочий режим: 1 — эмиттерный (электронный) ток, 2 — общий ток, 3 — напряжение, масштаб временной оси —  $2 \mu s$  в клетке; *b* — аварийный режим: 1 — общий ток, 2 — эмиттерный (электронный) ток, масштаб временной оси —  $1 \mu s$  в клетке. На врезке приведена схема установки с индуктивной нагрузкой.

с блокируемым напряжением 3.3 kV рабочая плотность тока обычно  $50 \text{ A/cm}^2$ , а предельно допустимая  $\sim 150 \text{ A/cm}^2$ .

Таким образом, эксперименты показывают, что предельная средняя плотность выключаемого тока в исследованной конструкции чипа ИТ со значительной инжекцией электронов из неидеально запертого  $n^+$ -эмиттера существенно меньше, чем в аналогичных чипах IGBT с чисто дырочным током через ООЗ при выключении. Для выяснения физического механизма этого явления было проведено численное моделирование процесса выключения чипа ИТ с суммарным сопротивлением шунтирующей цепи  $15 \text{ m}\Omega$  и индуктивностью  $20 \text{ nH}$ . Расчет производился в программе Sentauros Device [7] путем совместного решения двумерной нестационарной системы уравнений для концентраций свободных носителей и потенциала с уравнениями внешней цепи (такой же, как при испытании реальных образцов — см. вставку на рис. 2, *b*). Предварительно рассчитывались этапы включения и нарастания тока до величины  $I^0 = 45 \text{ A}$  (плотность  $100 \text{ A/cm}^2$ ) в модельной структуре чипа с параметрами, соответствующими экспериментальным значениям. Результаты расчета процесса выключения элементарной ячейки чипа с указанными выше параметрами шунтирующей цепи при средней начальной плотности тока  $100 \text{ A/cm}^2$  и конечном напряжении  $1650 \text{ V}$  приведены на рис. 3. Для иллюстрации неоднородного распределения плотности тока в тиристорной ячейке рассмотрены два ее вертикальных сечения (показаны на врезке на рис. 3). Приведенные данные относятся к моменту непосредственно перед спадом анодного тока, который начинается через  $1.8 \mu\text{s}$  после включения цепи АВ. Для этого момента построено также распределение напряженности поля в ООЗ коллекторного  $p'N^-$ -перехода (кривая 3) в реальном режиме с незапертым эмиттером и в режиме полного запираания эмиттера сразу при включении цепи АВ, т.е. при отсутствии инжекции электронов в ООЗ (кривая 4, в этом случае полный ток начинает спадать на  $1 \mu\text{s}$  раньше). Поступление электронов из эмиттера (концентрация которых в сильнополевой области у коллектора пропорциональна значениям плотности тока  $J_n$  на кривой 2А) частично компенсирует заряд свободных дырок, выводимых из плазменной области справа и ионизованных доноров, снижая тем самым напряженность поля у коллектора до  $\sim 1.5 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ . Ионизация дырками в таком поле практически отсутствует, но идет существенная ионизация электронами, коэффициент ионизации которых выше. В результате этого существенно



**Рис. 3.** Расчетные распределения плотностей токов и напряженности поля в ООЗ при выключении чипа ИТ непосредственно перед началом спада анодного тока:  $1A$  и  $2A$  — распределение плотностей полного и электронного токов в сечениях А–А,  $1B$  и  $2B$  — распределения плотностей этих токов в сечениях В–В,  $3$  — распределение напряженности поля в ООЗ при выключении с реальными параметрами шунтирующей цепи,  $4$  — распределение напряженности при полном отсутствии инжекции электронов. На вставке показано расположение сечений А–А и В–В на ячейке.

возрастают плотности электронного (кривая  $2A$ ) и полного (кривая  $1A$ ) токов в области ячейки под эмиттером (сечение А–А), что приводит к соответствующему снижению плотности тока в сечении В–В, который является чисто дырочным (кривые  $1B$ ,  $2B$ ). В эмиттерной секции ячейки плотность тока в максимуме поднимается до  $\sim 230 \text{ A/cm}^2$ , т.е. кратно превышает среднюю по рабочей площади величину. Большая концентрация свободных электронов и дырок в ООЗ сильно деформирует распределение напряженности поля (кривая  $3$ ), в результате чего снижается интеграл от поля по ширине ООЗ, причем более сильно, чем при отсутствии инжекции электронов (кривая  $4$ ). Эти факторы способствуют появлению динамической неустойчивости распределения тока в системе из большого числа ячеек при меньших токах по

сравнению с идеальным режимом, когда весь выключаемый ток идет по базовой цепи [2], и в конечном счете, разрушению чипа при более низком аварийном токе. Таким образом, для повышения динамической устойчивости процесса выключения чипа ИТ и увеличения критической плотности тока необходимо минимизировать инжекцию электронов эмиттером в ООЗ, в частности путем уменьшения паразитных сопротивлений и индуктивностей шунтирующей цепи.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ЗАО „ВЗПП-Микрон“ Ю.Л. Фоменко и А.В. Коновалову за предоставленные для исследования чипы ИТ.

## Список литературы

- [1] *Грехов И.В., Рожков А.В., Костина Л.С.* и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 1. С. 105–109.
- [2] *Oetjen J., Jungblut R., Kuhlmann U.* et al. // Solid-State Electronics. 2000. V. 44. P. 117–123.
- [3] *Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U.* et al. Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 608 p.
- [4] *Rose P., Silber D., Porst A.* et al. // Proc. 14th Int. Symp. ISPSD'2002. P. 165–168.
- [5] *Wachutka G.* // IEEE Trans. Electron Devices. 1991. V. 38. N 6. P. 1516–1523.
- [6] *Горбатюк А.В., Гусин Д.В., Иванов Б.В.* // ФТП. 2013. Т. 47. В. 3. С. 373–382.
- [7] *Sentaurus Device User Guide. Version D-2010.03* (Synopsys, Inc., 2010).