

06.2

## **Сверхбыстрое выключение больших токов интегральным тиристором с полевым управлением**

© И.В. Грехов, Л.С. Костина, А.В. Рожков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: rozh@hv.ioffe.rssi.ru

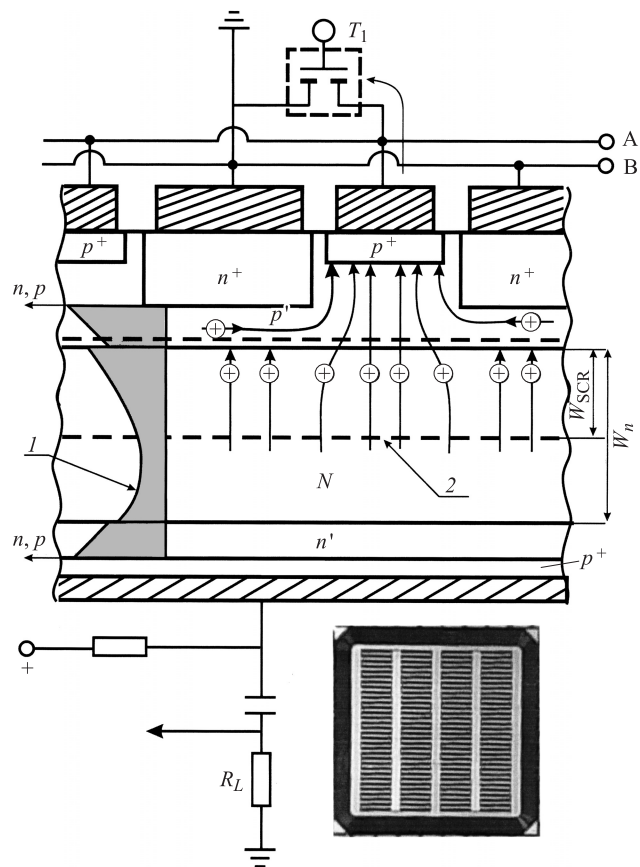
Поступило в Редакцию 3 июня 2010 г.

Представлены результаты исследования процесса выключения нового типа мощного высоковольтного коммутатора — интегрального тиристора с внешним полевым управлением. Изучены динамические характеристики в условиях размыкания больших токов. Рассасывание плазмы при выключении производится полным силовым током. Предельная плотность выключаемого тока составляла  $600 \text{ A/cm}^2$ . Режим замыкания накоротко нескольких десятков тысяч параллельно работающих микротиристорных ячеек достаточно эффективен — длительность спада тока составляет  $\sim 40 \text{ ns}$ , что в несколько раз меньше, чем у всех высоковольтных коммутаторов с рабочими напряжениями более  $1.5 \text{ kV}$ .

Основными активными элементами силовой полупроводниковой импульсной техники являются мощные полупроводниковые замыкающие и размыкающие ключи, параметры которых во многом определяют технический уровень современных полупроводниковых импульсных систем. Одним из важных параметров является быстродействие при включении и выключении. Причем именно быстрое выключение больших токов является наиболее сложной проблемой, особенно при работе в области напряжений порядка нескольких киловольт. Наиболее мощными и быстродействующими полупроводниковыми размыкателями являются диодные размыкатели: дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ) и SOS-диоды, способные размыкать за единицы наносекунд ток с плотностью в сотни и даже тысячи  $\text{A/cm}^2$  при напряжении на единичном приборе  $1\text{--}2 \text{ kV}$  (обзор [1] и литература в нем). Для генерации наносекундного импульса с помощью этих двухэлектродных приборов необходимы генераторы импульсов прямого и обратного токов; резкий обрыв обратного тока диодом формирует наносекундный фронт импульса. Значительно более простые, но существенно менее

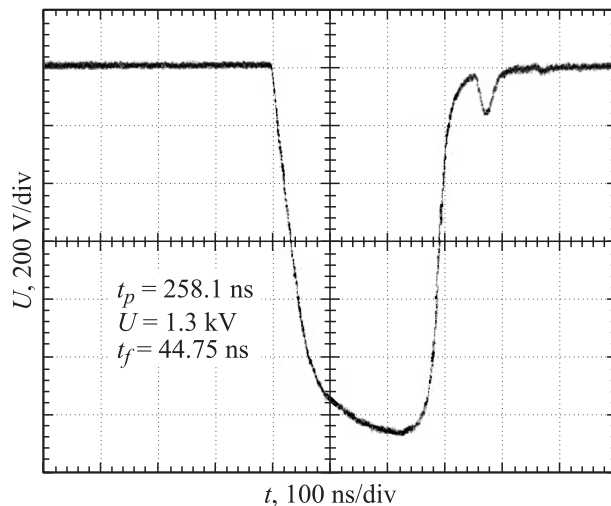
быстродействующие импульсные устройства могут быть созданы на основе трехэлектродных приборов. Наиболее быстродействующие из них — полевые транзисторы MOSFETs, работающие при напряжении до 200 V, выключают ток в 50 A за 25 ns, а работающие при напряжении до 1 kV — 10 A за 50 ns. Более мощные трехэлектродные ключи — биполярные транзисторы IGBTs, являющиеся в настоящее время основными приборами силовой электроники, выключают ток 50 A за 300 ns при размере чипа  $12 \times 12$  mm и рабочем напряжении 1.2 kV. Целью настоящей работы является исследование характеристик нового прибора силовой электроники — интегрального тиристора (ИТ) с внешним полевым управлением — в режиме быстрого размыкания большого тока.

Полупроводниковый чип ИТ состоит из нескольких десятков тысяч параллельно работающих микротиристорных ячеек, выключение которых осуществляется замыканием накоротко цепи эмиттер–база всех ячеек одним внешним низковольтным полевым транзистором с очень малым сопротивлением канала [2–4 и др.]. Конструкция чипа ИТ показана на рис. 1; ширина эмиттерных  $n^+$ -областей  $8 \mu\text{m}$ , глубина  $2 \mu\text{m}$ , глубина коллекторного  $p$ – $N$ -перехода  $6 \mu\text{m}$ , толщина  $N$ -базы  $330 \mu\text{m}$ , концентрация легирующей примеси  $3 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ , напряжение пробоя коллектора 3.3 kV. Вид чипа в плане показан на врезке; размер кристалла  $9 \times 9$  mm, рабочая площадь  $7 \times 7$  mm<sup>2</sup>. Включение осуществляется коротким импульсом прямого тока в цепи управления АВ (минус на  $n^+$ -слое). Распределение электронно-дырочной плазмы в базовых слоях тиристорной структуры при протекании импульса прямого тока схематически показана в левой части рисунка. Включение транзистора  $T_1$  (IRF3205 сопротивление канала  $8 \text{m}\Omega$ ) приводит к одновременному прекращению инжекции электронов всеми  $n^+$ -эмиттерными ячейками; после этого силовой ток переносится дырками через  $p^+$ -базовые контакты, а электроны уходят в  $N$ -базу, вызывая соответствующую инжекцию дырок  $p^+$ -эмиттером. Для полного прекращения инжекции электронов необходимо, чтобы падение напряжения на всей цепи базы, включая сопротивление канала транзистора, было меньше напряжения начала эффективной инжекции  $n^+p'$ -перехода, т. е.  $\leq 0.6$  V. Тогда  $p'$ -база и прилегающая к коллектору часть  $N$ -базы быстро освобождаются от плазмы, у коллектора формируется область объемного заряда  $W_{SCR}$ , сопротивление прибора возрастает, а ток в цепи уменьшается. Процесс этот, в принципе, может быть очень быстрым, поскольку в ИТ рассасывание плазмы на начальном этапе производится, по сути,



**Рис. 1.** Конструкция единичного чипа интегрального тиристора с внешним полевым управлением. На врезке приведена фотография ИТ, иллюстрирующая топологию токоведущих дорожек.

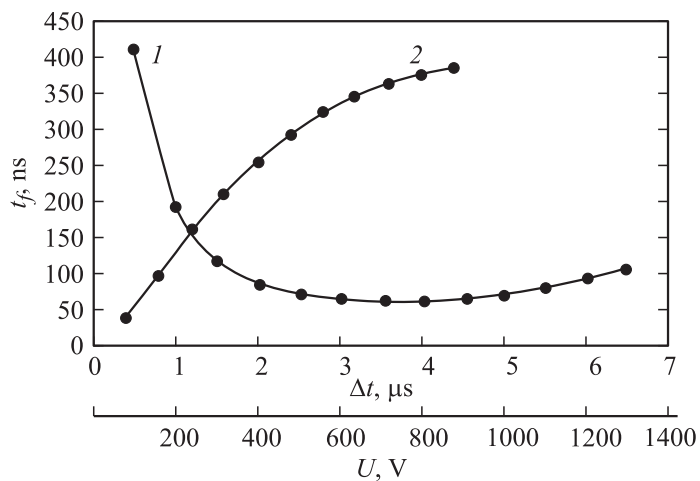
полным силовым током. Этот процесс, естественно, будет тем быстрее, чем больше плотность тока и чем меньше общее количество плазмы, которое необходимо удалить этим током из той части  $N$ -базы, где будет расположена область объемного заряда  $W_{SCR}$  обратносмещенного коллекторного перехода. Уменьшить количество плазмы в базовых слоях можно, например, путем сокращения длительности импульса



**Рис. 2.** Осциллограмма напряжения на  $100 \Omega$  нагрузке при напряжении  $1.3 \text{ kV}$  в силовой цепи и длительности импульса прямого тока  $258 \text{ ns}$ .

прямого тока  $t_p$ , которая регулируется изменением времени задержки между импульсами, включающими ИТ и  $T_1$ . Типичная форма импульса тока при напряжении в цепи АС  $U = 1.0 \text{ kV}$  и сопротивление нагрузки  $R_L = 100 \Omega$  приведена на рис. 2. На рис. 3 приведены зависимости времени резкого спада тока  $t_f$  ( $0.9$ – $0.1$  амплитуды) от напряжения в силовой цепи и от длительности импульса прямого тока  $t_p$ . Как и следовало ожидать, время спада существенно уменьшается с уменьшением длительности импульса; минимальная длительность ( $\sim 200 \text{ ns}$ ) определяется временем задержки начала резкого спада тока, которая складывается из времени формирования канала в транзисторе  $T_1$  и времени рассасывания плазмы в  $p'$ -базе интегрального тиристора.

Время спада тока при минимальной длительности импульса составляет  $\sim 40 \text{ ns}$ , что в несколько раз меньше, чем у IGBT с аналогичным рабочим напряжением. Следует отметить, что исследованный ИТ был разработан для применения в силовой преобразовательной технике, где более важным параметром, чем быстродействие, является предельная величина выключаемого тока, которая в исследованном чипе составляла  $300 \text{ A}$  ( $600 \text{ A/cm}^2$ ) при напряжении  $300 \text{ V}$  и  $100 \text{ A}$  при  $1.5 \text{ kV}$ . Для применения в силовой импульсной технике, очевидно, необходимо несколько



**Рис. 3.** Зависимость времени спада тока  $t_f$  от напряжения в силовой цепи  $U$  (1) и длительности импульса прямого тока  $t_p$  (2).

изменить конструкцию чипа — уменьшить толщину  $p$ - и  $N$ -базовых слоев, повысить уровень их легирования, а также использовать в качестве ключа  $T_1$  более быстродействующий транзистор с меньшим сопротивлением канала. По нашим оценкам, это должно увеличить быстродействие прибора еще в 2–3 раза и существенно расширить области его применения.

## Список литературы

- [1] Грехов И.В., Месяц Г.А. // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 7. С. 735–744.
- [2] Грехов И.В., Костина Л.С., Рожков А.В., Зитта Н.Ф., Матвеев В.И. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 12. С. 78–85.
- [3] Грехов И.В., Рожков А.В., Костина Л.М., Зитта Н.Ф., Матвеев В.И. // Электронные компоненты. 2008. В. 9. С. 58–62.
- [4] Грехов И.В., Рожков А.В., Костина Л.С., Зитта Н.Ф., Матвеев В.И., Машовец Д.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 1. С. 155–158.