

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ ОСЕВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

© 2011 г. И. В. Грехов, В. Б. Воронков, А. Л. Жмодиков, С. В. Коротков,
Л. С. Костина, А. В. Рожков

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, 26*

Поступила в редакцию 18.01.2011 г.

В режиме коммутации мощных (3 кА) и коротких (50 мкс) импульсов тока проведено исследование трех групп кремниевых $p^+ - n - n^+$ -диодов с малым временем выключения, обеспеченным путем облучения заряженными частицами. Диоды первой группы были облучены электронами с энергией 550 кэВ, второй – протонами с энергией 2,5 МэВ, а затем электронами с энергией 6 МэВ, третьей – электронами с энергией 6 МэВ. Исследуемые диоды имели диаметр полупроводниковых элементов 16 мм и предельно допустимое блокируемое напряжение 3 кВ. Дозы облучения выбирались таким образом, чтобы получить примерно одинаковое время жизни носителей тока у $p^+ - n$ -перехода (4 мкс), измеренное методом Лекса при плотности прямого тока 1 А/см^2 . Установлено, что при выключении диодов группы 1 пиковая мощность потерь энергии в 2 или более раз меньше, чем при выключении диодов групп 2 и 3. Диоды группы 1 имеют также существенно меньшее падение напряжения при максимальном значении прямого тока (в 2 раза по сравнению с диодами группы 2 и в 7 раз по сравнению с диодами группы 3) и значительно (в несколько раз) меньшую величину всплеска напряжения в момент резкого нарастания прямого тока.

При разработке генераторов мощных электрических импульсов микросекундной длительности весьма актуальной является задача быстрого обрыва силового тока при изменении его полярности. Обычно она решается с помощью кремниевых $p^+ - n - n^+$ -диодов, способных в микросекундном диапазоне пропускать в прямом направлении ток с плотностью $>1 \text{ кА/см}^2$. Основным условием их эффективного использования является обеспечение малых потерь энергии как в процессе протекания силового тока, так и при его обрыве.

При протекании силового тока в n -базе диода накапливаются электроны и дырки. При смене его полярности происходит вывод накопленной электронно-дырочной плазмы. Когда концентрация дырок у $p^+ - n$ -перехода спадает до равновесной, там формируется область объемного заряда (о.о.з.). В результате протекающий через диод обратный ток резко уменьшается.

Амплитуда обратного тока возрастает при увеличении скорости его нарастания и увеличении исходной концентрации плазмы, накопленной у $p^+ - n$ -перехода. Длительность обратного тока также возрастает с ростом концентрации накопленной плазмы.

В процессе обрыва силового тока на диоде возникает паразитный всплеск обратного напряже-

ния с амплитудой, определяемой э.д.с. самоиндукции, возникающей на индуктивности силовой цепи. Протекание обратного тока в условиях нарастающего напряжения сопровождается интенсивным тепловыделением, что ограничивает коммутационные возможности диода.

Известным способом снижения потерь энергии в диоде при его выключении является уменьшение концентрации накопленной плазмы путем уменьшения времени жизни носителей тока τ_p в n -базе. Обычно это осуществляется в результате создания рекомбинационных центров при облучении электронами с энергией в единицы мегаэлектронвольт, достаточной для создания практически однородного дефектообразования в n -базе.

Однако однородное уменьшение концентрации плазмы в n -базе ведет к значительному увеличению напряжения на диоде в процессе пропуска прямого тока, т.е., к увеличению тепловыделения в проводящем состоянии. Этот недостаток особенно существен в режимах с высокой плотностью коммутируемого тока. Кроме того, при малом τ_p концентрация плазмы в n -базе быстро уменьшается по мере удаления от $p^+ - n$ -перехода. При этом обрыв обратного тока происходит резко, что приводит к большим паразитным всплескам обратного напряжения.

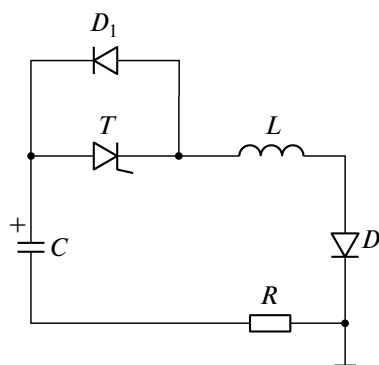


Рис. 1. Электрическая схема испытательного стенда. T – ТБИ543-400-24; D_1 – 80EPF12 (2 шт. последовательно); $R = 1$ МОм (коаксиальный шунт); $L = 2.5$ мкГн; $C = 100$ мкФ.

Более перспективным является метод профильного распределения рекомбинационных центров в n -базе диода, позволяющий обеспечить очень малое τ_p у p^+n -перехода и существенно большее в остальной части n -базы. В результате при протекании прямого тока концентрация плазмы у p^+n -перехода очень мала и обрыв обратного тока наступает быстро. При этом амплитуда обратного тока невелика. По мере продвижения о.о.з. в область n -базы с большей концентрацией накопленных носителей скорость спада обратного тока

уменьшается. “Мягкий” обрыв тока ограничивает амплитуду паразитных всплесков напряжения.

Основным недостатком рассмотренного метода является сложная двухступенчатая технология его осуществления. Сначала диод облучается со стороны p^+n -перехода протонами или α -частицами с энергией, обеспечивающей максимум дефектообразования на границе p^+n -перехода. Затем производится сквозное облучение электронами с энергией в единицы мегаэлектронвольт, определяющее концентрацию рекомбинационных центров в остальной части n -базы. Доза облучения электронами выбирается такой, чтобы обеспечить достаточно малое падение напряжения на диоде при протекании прямого тока.

Необходимость использования протонов или α -частиц существенно увеличивает стоимость процесса облучения и снижает его производительность.

В работе [1] было показано, что в высоковольтных диодах с широкой (≥ 250 мкм) базовой областью профильное распределение рекомбинационных центров может быть получено путем облучения со стороны p^+n -перехода электронным пучком с энергией менее 600 кэВ. При соответствующем подборе энергии и дозы облучения время жизни носителей у p^+n -перехода может быть в 10–15 раз меньше, чем на противоположной стороне n -базы.

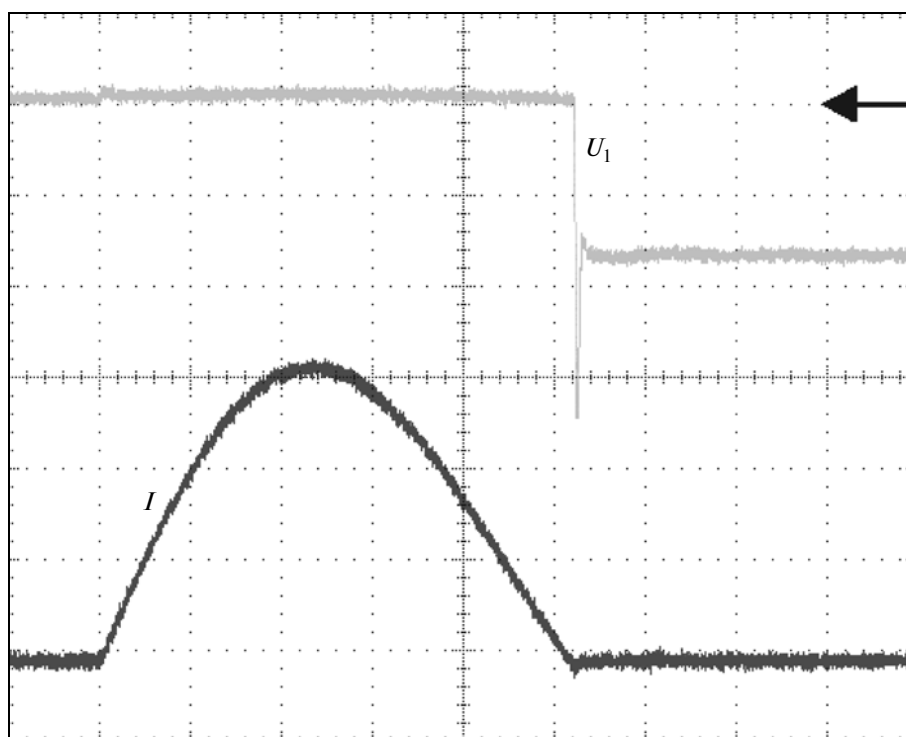


Рис. 2. Осциллограммы тока I и напряжения U_1 на диоде. Масштабы: по вертикали 1000 А/деление и 200 В/деление соответственно, по горизонтали – 10 мкс/деление.

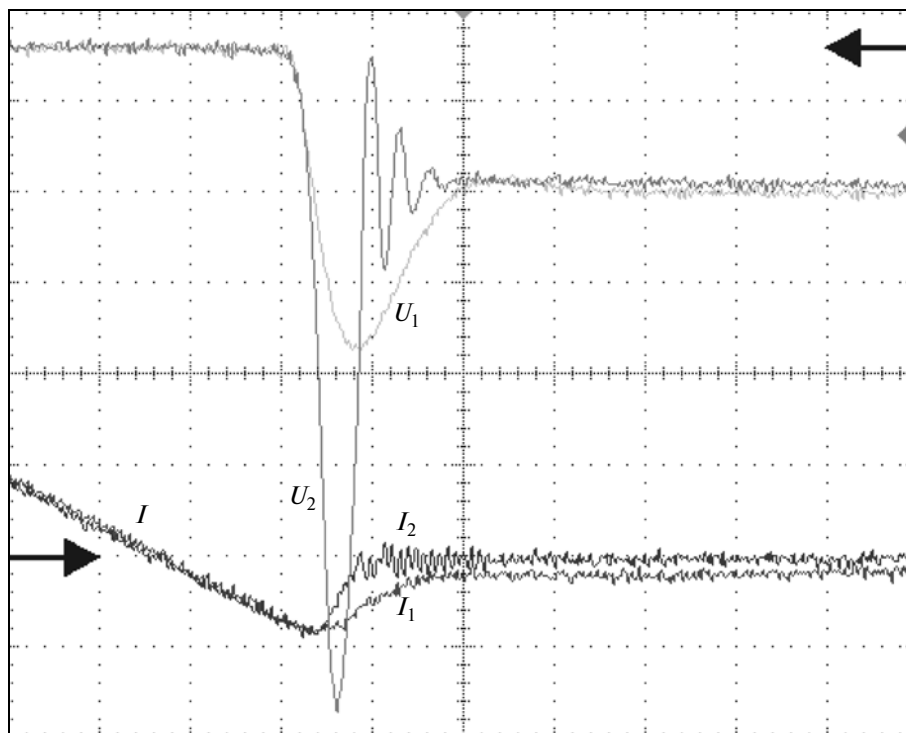


Рис. 3. Осциллограммы токов (I , I_1 , I_2) и напряжений на диодах (U_1 , U_2). Масштабы: по вертикали 100 А/деление и 200 В/деление соответственно, по горизонтали – 400 нс/деление.

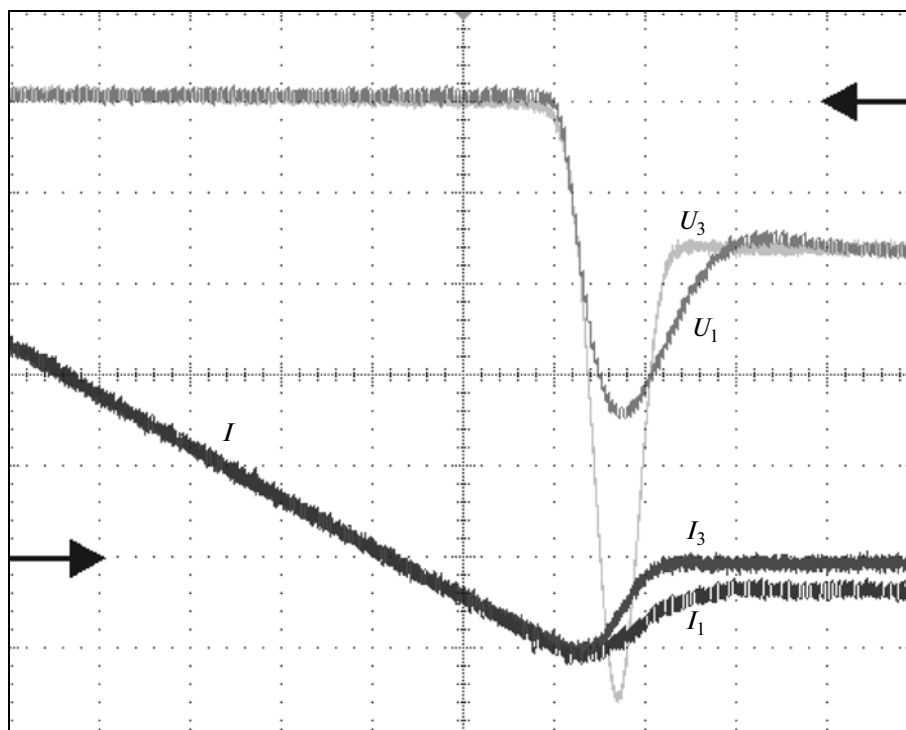


Рис. 4. Осциллограммы токов (I , I_1 , I_3) и напряжений на диодах (U_1 , U_3). Масштабы: по вертикали 100 А/деление и 200 В/деление соответственно, по горизонтали – 400 нс/деление.

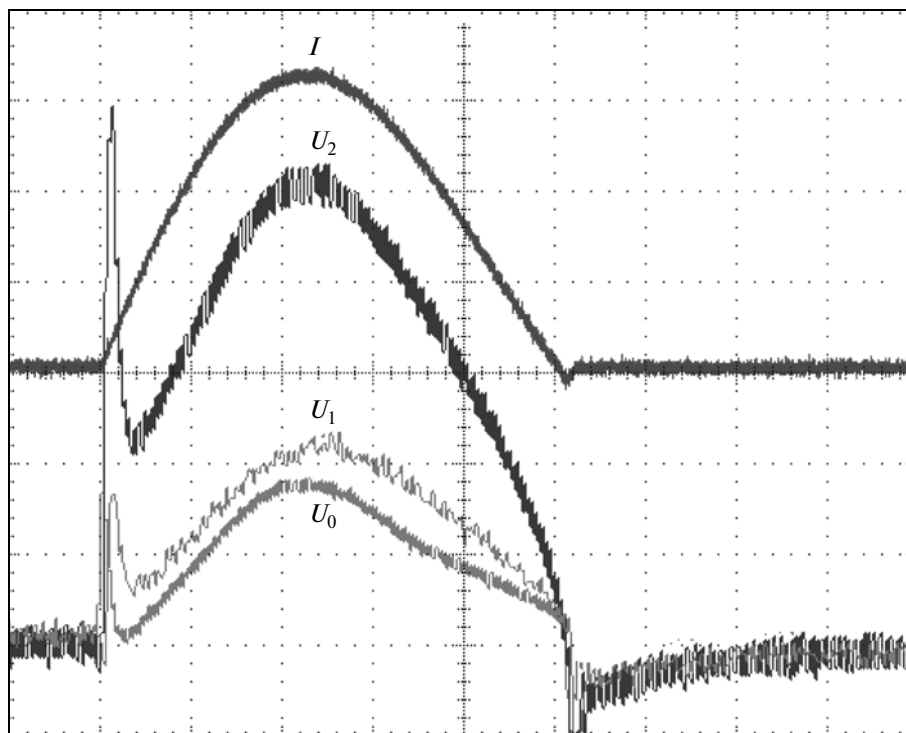


Рис. 5. Осциллограммы тока I и напряжений на диодах (U_0 , U_1 , U_2). Масштабы: по вертикали 1000 А/деление и 5 В/деление соответственно, по горизонтали — 10 мкс/деление.

Целью данной работы является экспериментальная сравнительная оценка эффективности описанных выше методов регулирования τ_p в n -базе высоковольтных кремниевых $p^+ - n - n^+$ -диодов в условиях коммутации мощных и коротких импульсов тока.

Исследовались диоды с диаметром полупроводникового элемента 16 мм и предельным блокируемым напряжением ~ 3 кВ, изготовленные в ОАО “Электровыпрямитель” (Саранск). Глубина диффузионного $p^+ - n$ -перехода составляла ~ 70 мкм при общей толщине исходного кремния ~ 500 мкм.

Использовались диоды из трех групп:

- 1) облученные электронами с энергией ~ 550 кэВ;
- 2) облученные протонами с энергией ~ 2.5 МэВ, а затем электронами с энергией ~ 6 МэВ;
- 3) облученные электронами с энергией ~ 6 МэВ.

Дозы облучения выбирались таким образом, чтобы обеспечить примерно одинаковое $\tau_p \sim 4$ мкс у $p^+ - n$ -перехода, измеряемое методом Лэкса при плотности прямого тока ~ 1 А/см². Исходное время жизни неосновных носителей в необлученных диодах составляло ~ 100 мкс.

Исследования диодов проводились в моноимпульсном режиме на стенде, электрическая схема которого приведена на рис. 1.

При включении тиристора T конденсатор C перезарядается по цепи, содержащей индуктивность L , исследуемый диод D и датчик тока R . После пе-

резарядки конденсатора по цепи $R - D - L - D_1$ протекает импульс обратного (для диода D) тока. При выключении диода D к нему прикладывается обратное напряжение, силовой ток обрывается.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы силового тока I (~ 3 кА) и напряжения U_1 на диодах из 1-й группы. На рис. 3 представлены те же осциллограммы в другом временном масштабе для иллюстрации процесса выключения диодов.

Стрелки показывают положение лучей осциллографа при отсутствии измеряемых сигналов (нулевые уровни).

Приведенные на рис. 3 осциллограммы тока I_2 и напряжения U_2 получены при исследовании диодов из 2-й группы.

На рис. 4 показаны осциллограммы процесса выключения диодов из 3-й группы (кривые I_3 , U_3) и из 1-й группы (кривые I_1 , U_1).

Из осциллограмм на рис. 3 и рис. 4 видно, что исследуемые диоды начинают прерывать силовой ток примерно через 800 нс после изменения его полярности. К этому моменту обратный ток через диоды нарастает до небольшой величины ~ 100 А. Малый уровень обрываемого тока определяет достаточно малые потери энергии при выключении. После выключения диоды блокируют напряжение перезарядки конденсатора C .

Представленные осциллограммы свидетельствуют о том, что диоды из 1-й группы формируют

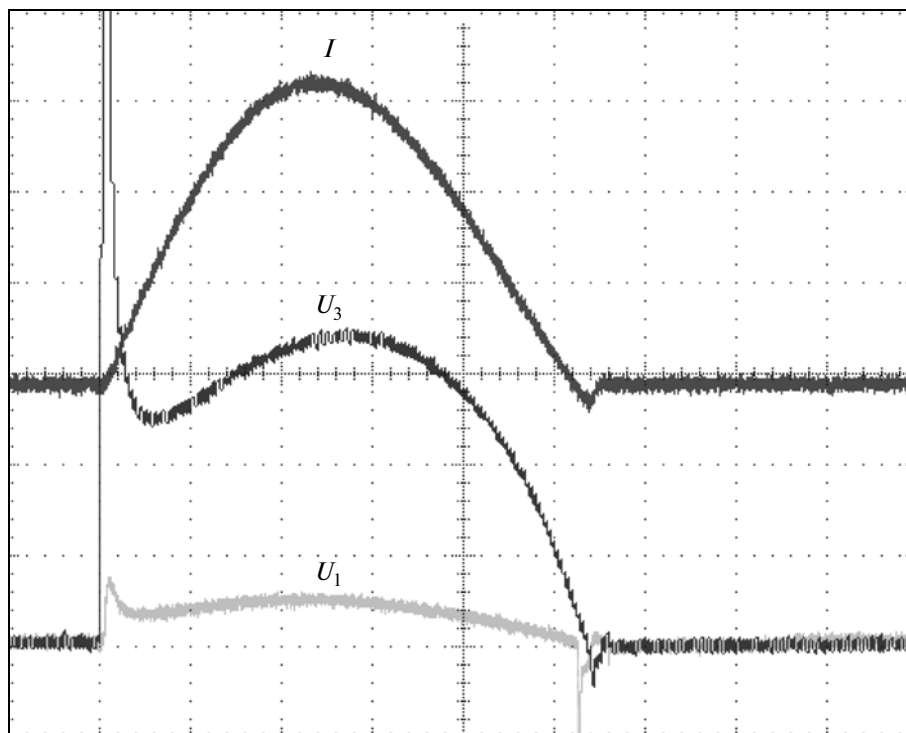


Рис. 6. Осциллограммы тока I и напряжений на диодах (U_1 , U_3). Масштабы: по вертикали 1000 А/деление и 10 В/деление соответственно, по горизонтали — 10 мкс/деление.

более медленный спад обратного тока по сравнению с диодами 2-й и 3-й групп. При этом существенно (более чем в 2 раза) уменьшаются амплитуда паразитного всплеска обратного напряжения и пиковое значение мощности потерь при выключении.

На рис. 5 и рис. 6 приведены типичные осциллограммы падения напряжения на исследуемых диодах при протекании силового тока I . Осциллограмма U_0 соответствует необлученным диодам, осциллограммы U_1 , U_2 , U_3 — облученным диодам из соответствующих групп.

При проведении экспериментов обратное напряжение к диодам не прикладывалось. В стенде на рис. 1 этот режим создавался в результате отключения диода D_1 от тиристора T и подключения его встречно-параллельно диоду D . При этом ток перезарядки силового конденсатора обрывался тиристором T .

Из осциллограмм на рис. 5 и рис. 6 следует, что наименьшими потерями энергии во включенном состоянии обладают диоды, облученные электронами с небольшой энергией (1-я группа).

В этих приборах величина падения напряжения при максимальном значении силового тока более чем в два раза ниже, чем в диодах, облученных протонами и электронами (2-я группа), и почти в 7 раз меньше по сравнению с диодами, облученными электронами с высокой энергией (3-я группа).

Несомненным достоинством диодов 1-й группы является также малая величина пика напряжения в момент резкого нарастания силового тока, определяемая большой скоростью модуляции проводимости n -базы, обусловленной достаточно высоким временем жизни носителей в основной ее части, расположенной за p^+ - n -переходом.

Таким образом, по величине суммарных коммутационных потерь энергии диоды из 1-й группы имеют очевидные достоинства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов И.В., Костина Л.С., Козловский В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 9. С. 105.