

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ В РЕЖИМАХ КОММУТАЦИИ СУБМИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

© 2011 г. С. В. Коротков, А. Л. Жмодиков

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

Поступила в редакцию 02.08.2010 г.

Приведены результаты исследований реверсивно включаемых динисторов (р.в.д.) с рабочим напряжением 2 кВ и диаметром структур 12 мм при коммутации мощных импульсов тока субмикросекундной длительности. Показано, что в этом временном диапазоне коммутационные потери энергии в р.в.д. значительно ниже, чем у тиристорных и IGBT-транзисторов, имеющих практически ту же площадь полупроводниковых структур и предельно допустимое блокируемое напряжение. Определено время коммутации (менее 0.4 мкс), при котором использование р.в.д. становится малоэффективным.

Реверсивно включаемые динисторы (р.в.д.) [1, 2] были разработаны в ФТИ им. А.Ф. Иоффе специально для коммутации импульсов тока с высокой скоростью нарастания. Р.в.д. являются полупроводниковыми приборами тиристорного типа. Принципиальной особенностью их конструкции (рис. 1) является отсутствие электрода управления и выполнение анодного эмиттера в виде чередующихся участков p^+ - и n^+ -типа с характерным размером меньше ширины n -базы.

Включение р.в.д. осуществляется путем кратковременного реверса блокируемого напряжения. При приложении небольшого обратного напряжения пробивается низковольтный $n^+ - p$ -переход транзисторных секций 1 и через образовавшиеся диодные $n^+ - n - p$ -каналы протекает ток управления. В результате у коллекторного перехода формируется тонкий слой запускающих носителей 3.

После окончания импульса тока управления и восстановления исходной полярности напряжения дырки из слоя 3 перемещаются полем в p -базу, вызывая встречную инжекцию электронов из n^+ -эмиттеров тиристорных секций 2 и одновременное включение этих секций. Высокая плотность тиристорных секций обеспечивает практически равномерное распределение коммутируемого тока по площади р.в.д. и малые коммутационные потери энергии.

В процессе коммутации на р.в.д. возникает короткий пик напряжения. Его амплитуда зависит от скорости нарастания коммутируемого тока и величины запускающего заряда, накопленного при пропуске тока управления.

Время спада пикового напряжения до установившегося значения определяется временем диффузионного переноса электронов и дырок, запол-

няющих базовые области р.в.д. в процессе модуляции проводимости, и составляет несколько сотен наносекунд.

Сравнительно большое время установления стационарной проводимости определяет наибольшие перспективы использования р.в.д. в микросекундном диапазоне, где они способны переключать рекордные для полупроводниковых приборов импульсные мощности и коммутировать токи с амплитудой в сотни килоампер и скоро-

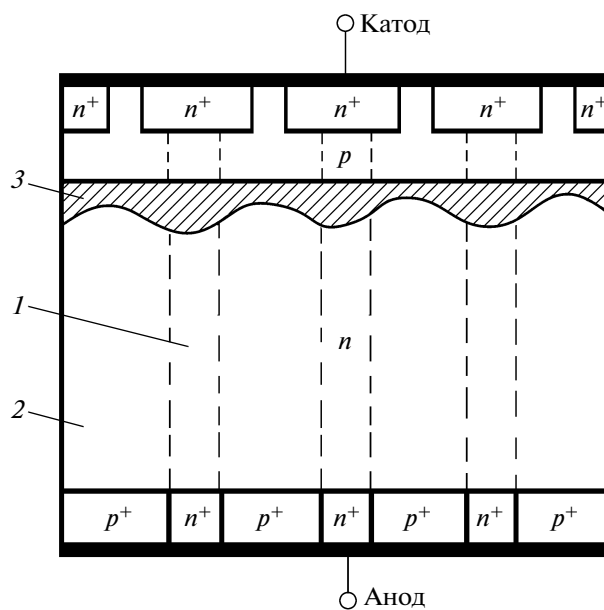


Рис. 1. Конструкция р.в.д. 1 – транзисторные секции, 2 – тиристорные секции, 3 – слой запускающих носителей.

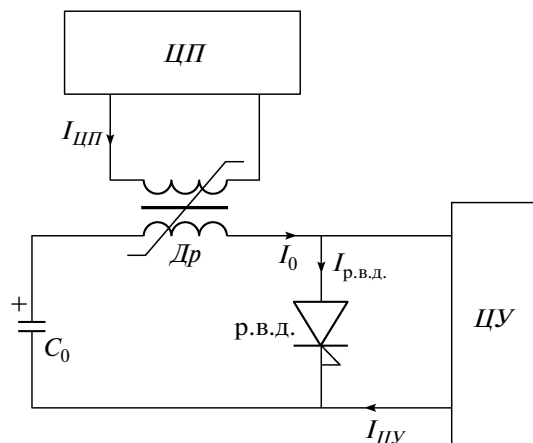


Рис. 2. Структурная схема испытательного стенда. ЦУ – цепь управления, ЦП – цепь перемагничивания.

стью нарастания в десятки килоампер в микросекунду [3–5].

Целью данной статьи является оценка перспектив использования р.в.д. в нетрадиционном для них режиме коммутации импульсов тока субмикросекундной длительности, представляющем большой интерес для многих областей современной науки и техники. Оценка проводилась путем определения коммутационных потерь энергии в р.в.д. и сравнения их с потерями энергии в альтернативных полупроводниковых приборах – тиристорах и IGBT-транзисторах.

Исследовались р.в.д. с диаметром структур 12 мм и рабочим напряжением 2 кВ. Для проведения экспериментов был собран стенд, позволяющий формировать импульсы тока с амплитудой в несколько сотен ампер и длительностью <1 мкс. Структурная схема стенда приведена на рис. 2.

Принцип действия стенда заключается в следующем. В исходном состоянии р.в.д. блокирует напряжение зарядки силового конденсатора C_0 . При включении цепи управления ЦУ происходит реверс напряжения на р.в.д., и через него протекает ток управления. В процессе управляющего воздействия дроссель с насыщающимся сердечником $Др$ имеет большую индуктивность. При этом скорость нарастания силового тока I_0 очень мала и ток управления р.в.д. фактически равен току $I_{ЦУ}$ цепи управления.

Под воздействием напряжения зарядки конденсатора C_0 сердечник дросселя быстро перемагничивается и насыщается. В момент насыщения сердечника индуктивность дросселя резко уменьшается и силовой ток быстро нарастает. В результате к р.в.д. прикладывается напряжение с исходной полярностью, он без задержки переключается и коммутирует ток разряда силового конденсатора.

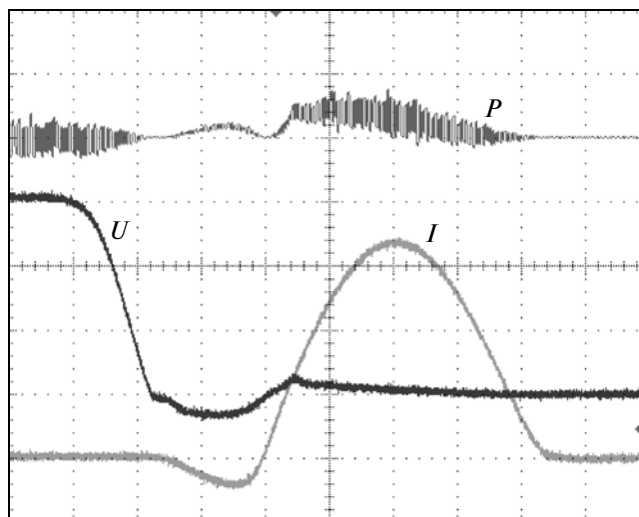


Рис. 3. Осциллограммы тока I и напряжения U на р.в.д. и эпюра мощности P коммутационных потерь энергии при длительности импульса 0.9 мкс. Масштабы по вертикали: тока – 150 А/клетка, напряжения – 500 В/клетка, мощности – 60 кВт/клетка; по горизонтали – 200 нс/клетка.

После окончания процесса коммутации цепь перемагничивания ЦП переводит сердечник дросселя $Др$ в исходное состояние. Амплитуда и длительность коммутируемого тока определяются напряжением зарядки и емкостью силового конденсатора и индуктивностью дросселя $Др$ после насыщения сердечника.

На рис. 3 приведены осциллограммы процесса коммутации тока с амплитудой 500 А и длительностью 0.9 мкс. Малое время коммутации приводит к тому, что напряжение на р.в.д. в несколько раз превышает установившееся значение (~5 В для тока 500 А). Несмотря на это, потери энергии в р.в.д. составляют всего ~10 мДж, что позволяет использовать их в этом режиме коммутации при частоте следования импульсов в несколько килогерц.

На рис. 4 показаны осциллограммы процесса коммутации тока силовой цепи $C_0-Др$, полученные при замене р.в.д. на тиристор 40TPS16 с рабочим напряжением 1.6 кВ, предельным импульсным током 500 А и практически с той же, что и р.в.д., площадью полупроводникового элемента. Для уменьшения коммутационных потерь энергии переключение тиристора осуществлялось мощными импульсами тока управления с амплитудой 5 А и фронтом нарастания 10 нс. Сравнение осциллограмм на рис. 3 и рис. 4 показывает, что коммутационные потери энергии в тиристоре более чем в 3 раза превышают потери энергии в р.в.д. и составляют ~30% от энергии, запасаемой в силовом конденсаторе C_0 .

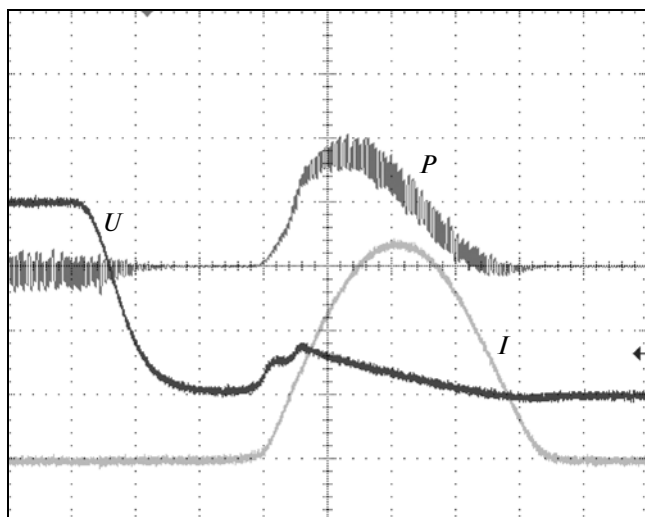


Рис. 4. Осциллограммы тока I и напряжения U на тиристоре и эпюра мощности P коммутационных потерь энергии при длительности импульса 0.9 мкс. Масштабы по вертикали: тока – 150 А/клетка, напряжения – 500 В/клетка, мощности – 60 кВт/клетка; по горизонтали – 200 нс/клетка.

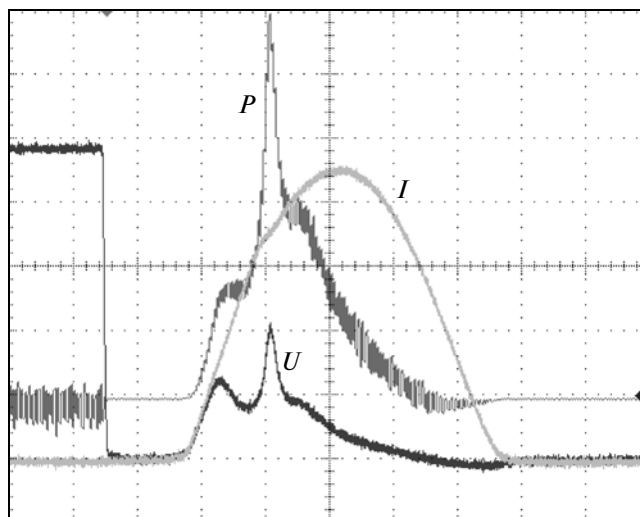


Рис. 5. Осциллограммы тока I и напряжения U на транзисторе и эпюра мощности P коммутационных потерь энергии при длительности импульса 0.9 мкс. Масштабы по вертикали: тока – 60 А/клетка, напряжения – 200 В/клетка, мощности – 15 кВт/клетка; по горизонтали – 200 нс/клетка.

На рис. 5 приведены осциллограммы, полученные при замене тиристора 40TPS16 на IGBT-транзистор 32N170AH1, имеющий те же размеры и практически то же рабочее напряжение (1.7 кВ). Из осциллограмм видно, что коммутационные возможности транзистора ограничены уровнем тока ~250 А.

На рис. 6 показаны зависимости потерь энергии в р.в.д. от амплитуды коммутируемого тока. Они получены при длительности импульса тока управления ~300 нс и амплитуде тока управления, составляющей примерно 15% от амплитуды коммутируемого тока. Кривая 1 соответствует длительности

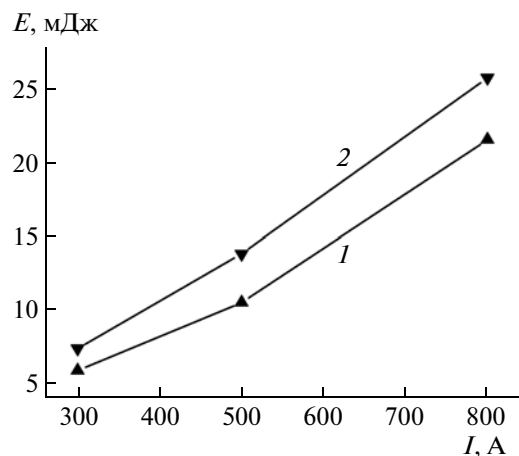


Рис. 6. Зависимости потерь энергии в р.в.д. от амплитуды коммутируемых импульсов тока при длительности импульсов 0.9 мкс (1) и 0.6 мкс (2).

сти импульсов коммутируемого тока 0.9 мкс, кривая 2 – 0.6 мкс.

На рис. 7 приведены результаты испытаний р.в.д. в режиме коммутации тока амплитудой ~300 А и длительностью 0.4 мкс. В этом режиме коммутационные потери энергии в р.в.д. составляют более 20% от энергии силовой цепи, что ограничивает возможности их эффективного использования.

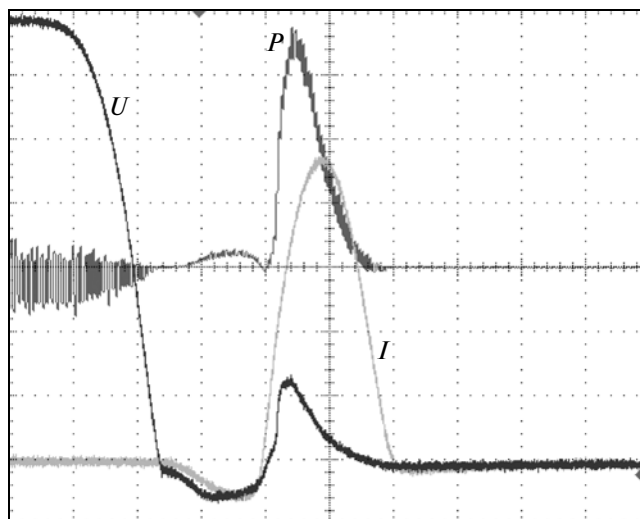


Рис. 7. Осциллограммы тока I и напряжения U на р.в.д. и эпюра мощности P коммутационных потерь энергии при длительности импульса 0.4 мкс. Масштабы по вертикали: тока – 60 А/клетка, напряжения – 200 В/клетка, мощности – 15 кВт/клетка; по горизонтали – 200 нс/клетка.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в субмикросекундном диапазоне при коммутации импульсов тока длительностью более 600 нс коммутационные потери энергии в р.в.д. невелики, а их коммутационные возможности значительно превышают возможности типовых тиристоров и IGBT-транзисторов, имеющих практически ту же площадь полупроводниковых структур и предельно допустимое блокируемое напряжение.

Полученные результаты, а также известные достоинства р.в.д. (однородное переключение, позволяющее существенно улучшить коммутационные характеристики при увеличении рабочей площади, и высокая надежность высоковольтных р.в.д.-сборок, переключаемых общим для всех

приборов импульсом тока управления) определяют хорошие перспективы для их использования в мощных устройствах субмикросекундной импульсной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатюк А.В., Грехов И.В., Коротков С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 11. С. 685.
2. Коротков С.В. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 5.
3. Грехов И.В., Коротков С.В. // Изв. РАН. Сер. Энергетика. 1998. № 1. С. 107.
4. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степанянц А.Л. // ПТЭ. 2003. № 1. С. 53.
5. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. и др. // ПТЭ. 2010. № 1. С. 172.