

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУБМИКРОСЕКУНДНЫХ КОММУТАТОРОВ НА ОСНОВЕ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ И ДИНИСТОРОВ С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ

© 2012 г. С. В. Коротков, Ю. В. Аристов, Д. А. Коротков

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

Поступила в редакцию 10.08.2011 г.

Приведены результаты сравнительных исследований коммутаторов на основе одиночных реверсивно включаемых динисторов и динисторов с глубокими уровнями (д.г.у.) при коммутации мощных субмикросекундных импульсов тока в условиях с одинаковой энергоемкостью цепей управления. Показано, что в этом режиме д.г.у.-коммутаторы имеют определенные преимущества, обусловленные меньшей собственной индуктивностью и более эффективным переключением при нагреве динисторов.

Развитие современных импульсных технологий невозможно без проведения работ, направленных на повышение эффективности коммутаторов мощных быстронарастающих импульсов тока. В настоящее время наиболее перспективными являются коммутаторы на основе полупроводниковых приборов – тиристоров и транзисторов. Не меньший интерес представляют разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе реверсивно включаемые динисторы (р.в.д.) [1, 2] и динисторы с глубокими уровнями (д.г.у.) [3, 4].

Р.в.д. и д.г.у. являются четырехслойными кремниевыми приборами тиристорного типа и переключаются в состояние с высокой проводимостью путем заполнения электронно-дырочной плазмой базовых слоев, исходно освобожденных от носителей тока сильным полем, формирующимся при блокировании внешнего напряжения. Принципиальные особенности р.в.д. и д.г.у. определяются различием физических процессов, инициирующих процесс переключения.

Переключение р.в.д. осуществляется в результате реверса блокируемого напряжения и пропускания короткого импульса тока управления через встроенную систему каналов обратной проводимости. В результате в базовых слоях накапливается электронно-дырочная плазма, равномерно распределенная по всей площади структуры р.в.д. При приложении напряжения исходной полярности осуществляется инжекция электронов и дырок из эмиттеров и достаточно быстрое (сотни наносекунд) установление стационарной проводимости. Инжектируемые носители заполняют базовые слои в условиях выноса накопленной плазмы, что определяет очень малое электрическое сопротивление р.в.д. при резком нарастании коммутируемого тока.

Субмикросекундное время установления стационарной проводимости снижает эффективность использования р.в.д. при коммутации импульсов тока с фронтом нарастания менее микросекунды, но и в этих режимах они обладают существенно большими коммутационными возможностями по сравнению с современными силовыми тиристорами и транзисторами, имеющими такую же площадь полупроводниковых структур и предельное блокируемое напряжение [5].

Переключение д.г.у. осуществляется в результате приложения высоковольтного импульса напряжения, нарастающего со скоростью не менее 1 кВ/нс. При этом осуществляется инжекция носителей тока из эмиттеров, а у коллектора создается область с сильным электрическим полем, инициирующим волну ударной ионизации кремния электронами с глубокими уровнями в запрещенной зоне. Образованные в результате ударной ионизации носители тока очень быстро заполняют базовые слои д.г.у. и обеспечивают резкое (доли наносекунды) переключение в состояние с высокой проводимостью. В процессе коммутации силового тока инжектированные из эмиттеров электроны и дырки осуществляют модуляцию проводимости д.г.у. до стационарного уровня.

Благодаря существенно меньшему, чем в р.в.д., времени переключения в хорошо проводящее состояние д.г.у. имеют значительно меньшее падение напряжения при коммутации импульсов тока наносекундной длительности (см. осциллограммы на рис. 1). Однако в субмикросекундном диапазоне преимущества д.г.у.-коммутаторов могут быть не столь очевидны.

В этой связи актуальными представляются приведенные в данной статье результаты экспериментального сравнения коммутаторов на осно-

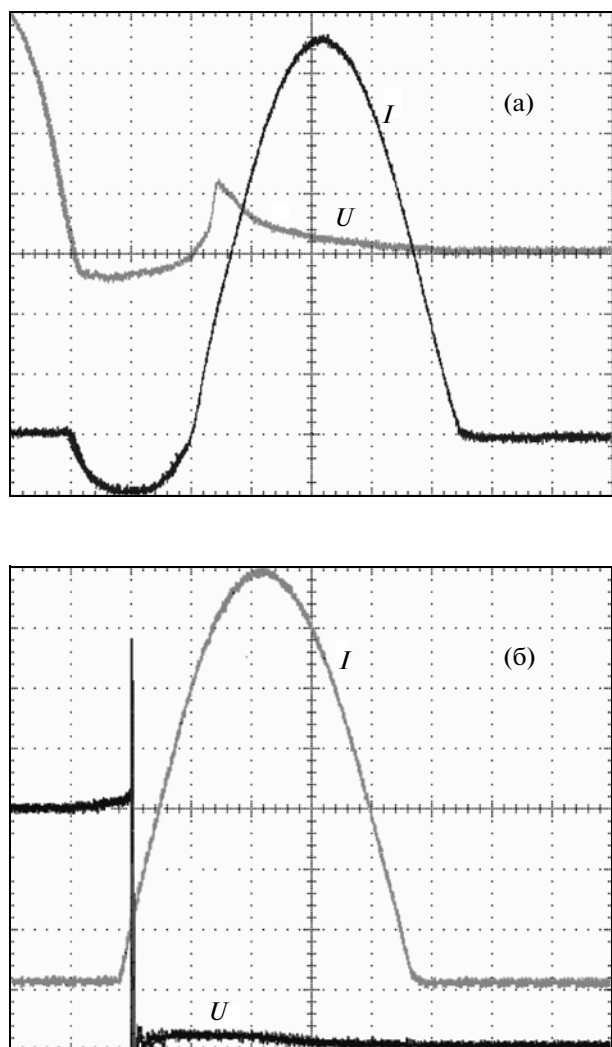


Рис. 1. Осциллограммы коммутируемого тока I и падения напряжения U на р.в.д. (а) и д.г.у. (б) с рабочим напряжением 2000 В и диаметром полупроводниковой структуры 12 мм. Масштабы по вертикали: тока – 100 А/клетка, напряжения – 500 В/клетка; по горизонтали – 100 нс/клетка.

ве р.в.д. и д.г.у. в режимах коммутации мощных субмикросекундных импульсов тока.

Исследовались коммутаторы, состоящие из одиночных р.в.д. и д.г.у. (диаметр структур 16 мм, рабочее напряжение 2000 В) и цепей управления, обеспечивающих их эффективное переключение. Динисторные структуры были помещены в малогабаритные корпуса таблеточного типа и зажаты с усилием ~ 100 кг/см² между токоподводящими медными электродами (диаметр 50 и высота 25 мм). Эксперименты проводились в условиях коммутации униполярных импульсов тока синусоидальной формы с амплитудой ~ 1100 А и длительностью 1.2 мкс. При сравнении коммутаторов учитывалась их собственная индуктивность, потери энергии в динисторах, а также энергоёмкость и габариты цепей управления.

На рис. 2 и 3 приведены электрические схемы испытательных стендов, выполненные на основе малоиндуктивных силовых цепей $C_0-C-D_0-L_0$. В процессе испытаний р.в.д. и д.г.у. коммутируют мощный и короткий ток разряда конденсатора C_0 , обеспечивающий зарядку конденсатора C . В момент окончания процесса зарядки к диодам блока D_0 прикладывается обратное напряжение, и они восстанавливают блокирующую способность и обрывают ток в цепи динисторов. При этом обеспечиваются условия для их выключения. Запасенная в конденсаторе C энергия рассеивается в демпфирующем резисторе R . После выключения динисторов осуществляется зарядка C_0 до исходного напряжения (~ 2 кВ) от источника питания $ИП$.

Основным достоинством рассмотренных схем является то, что демпфирующие резисторы не ограничивают амплитуду и скорость нарастания коммутируемого тока. При этом они могут иметь большую индуктивность и габариты, позволяющие обеспечить эффективное рассеивание энергии силовой цепи при проведении исследований в частотном режиме.

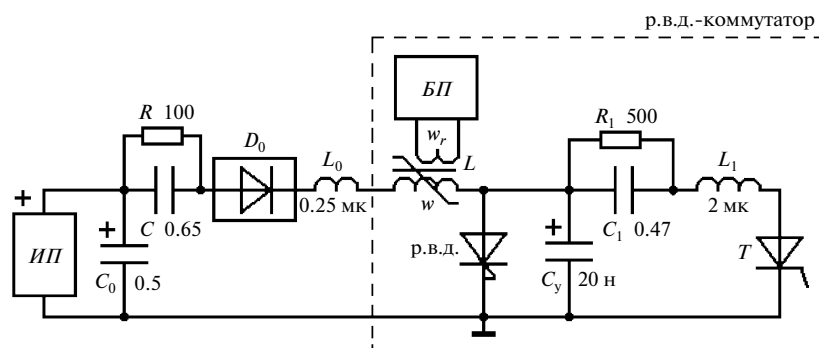


Рис. 2. Электрическая схема стенда для исследований р.в.д.-коммутатора. $ИП$ – источник питания с выходным напряжением 2 кВ, $БП$ – блок перемагничивания с выходным током 1 А; T – КУ242; D_0 – НФА30ТА60С (2 параллельные ветви, в каждой 4 последовательно); $L - w = w_r$ (обмотка размагничивания) = 5, сердечник: феррит № 87 (ЕРКОС), 3 кольца $29.5 \times 19 \times 20$ мм.

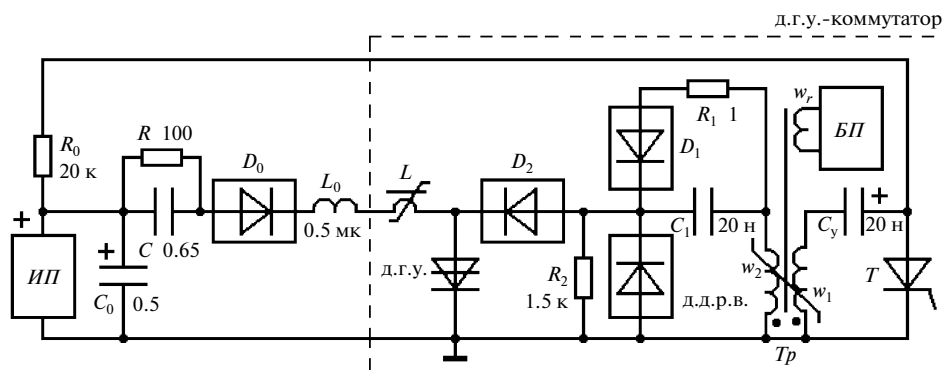


Рис. 3. Электрическая схема стенда для исследований д.г.у.-коммутатора. ИП – источник питания с выходным напряжением 2 кВ, БП – блок перемагничивания с выходным током 1 А; Т – КУ242; D_0 – НФА30ТА60С (2 параллельные ветви, в каждой 4 последовательно), D_1 – HER308 (2 последовательно), D_2 – диодные структуры $\varnothing 8$ мм (3 последовательно), д.д.р.в. – диодные структуры $\varnothing 16$ мм (8 последовательно); L – $w = 1$, сердечник: феррит № 87 (EPKOS), 4 кольца $10 \times 6 \times 4$ мм; Tr – $w_1 = w_2 = w_r = 5$, сердечник: феррит № 87 (EPKOS), $29.5 \times 19 \times 20$ мм.

Р.в.д.-коммутатор (рис. 2) построен по базовой схеме с цепью управления, содержащей дроссель насыщения L и запускающий конденсатор C_y . В исходном состоянии конденсатор C_y заряжен от источника питания ИП, сердечник дросселя L переведен в рабочий режим постоянным током блока перемагничивания БП. При форсированном (скорость нарастания тока управления ~ 200 А/мкс) включении тиристора T конденсатор C_y быстро перезарядился по цепи C_1-L_1 ($C_1 \gg C_y$).

В момент приложения к р.в.д. обратного напряжения через него замыкается ток индуктивности L_1 , являющийся током управления. В процессе управляющего воздействия дроссель L имеет большую индуктивность и препятствует ответвлению тока управления в силовую цепь. В момент насыщения сердечника индуктивность дросселя резко уменьшается, к р.в.д. прикладывается прямое напряжение, и он без задержки переключается и коммутирует ток разряда конденсатора C_0 . После переключения р.в.д. остающаяся в индуктивности L_1 энергия рассеивается в резисторе R_1 .

Переключение д.г.у.-коммутатора (рис. 3) осуществляется традиционной цепью управления на основе блока дрейфовых диодов с резким восстановлением (д.д.р.в.), трансформатора насыщения Tr и запускающего конденсатора C_y . Конденсатор C_y исходно заряжен от источника питания ИП, сердечник трансформатора Tr приведен в рабочее состояние постоянным током блока перемагничивания БП. Блок диодов D_2 и резистор R_2 исключают возможность приложения к блоку д.д.р.в. напряжения силовой цепи.

При разряде C_y в цепь вторичной обмотки w_2 трансформатора Tr коммутируется короткий импульс тока, обеспечивающий зарядку конденсатора C_1 и накопление электронно-дырочной плазмы в структурах д.д.р.в. В момент насыщения сердеч-

ника трансформатора Tr происходит быстрый (~ 100 нс) разряд конденсатора C_1 через д.д.р.в. При этом осуществляется вынос накопленной плазмы и резкое (~ 2 нс) выключение диодов. В процессе выключения ток обмотки w_2 коммутируется в цепь D_2 -д.г.у. и является током управления динистора. В результате происходит зарядка собственной емкости д.г.у., и напряжение на нем быстро нарастает до уровня переключения.

В процессе управляющего воздействия дроссель L препятствует ответвлению тока управления в силовую цепь. После переключения д.г.у. происходит насыщение сердечника дросселя L , его индуктивность резко уменьшается и в цепь д.г.у. коммутируется ток разряда конденсатора C_0 , обеспечивающий перемагничивание сердечника дросселя до исходного состояния. Остающаяся в обмотке w_2 энергия рассеивается в цепи D_1-R_1 .

Благодаря очень малой длительности тока управления д.г.у. габариты дросселя насыщения L в схеме на рис. 3 существенно меньше, чем в схеме на рис. 2, что является несомненным достоинством д.г.у.-коммутатора.

Результаты исследований коммутаторов на основе д.г.у. и р.в.д. в моноимпульсном режиме иллюстрируют осциллограммы на рис. 4а и 4б соответственно. Практически одинаковые амплитуда и длительность коммутируемых импульсов тока достигались благодаря использованию идентичных цепей C_0-C-D_0 и примерному равенству индуктивностей цепей L_0-L -д.г.у. и L_0-L -р.в.д.

Осциллограммы на рис. 4а соответствуют эксперименту с д.г.у.-коммутатором при энергоемкости цепи управления ~ 40 мДж ($C_y = 20$ нФ), позволяющей обеспечить минимальные потери энергии в д.г.у. Осциллограммы на рис. 4б получены при использовании цепи управления р.в.д. с той же энергоемкостью. Представленные на рис. 4 эпюры мощности потерь энергии в р.в.д. и д.г.у. сви-

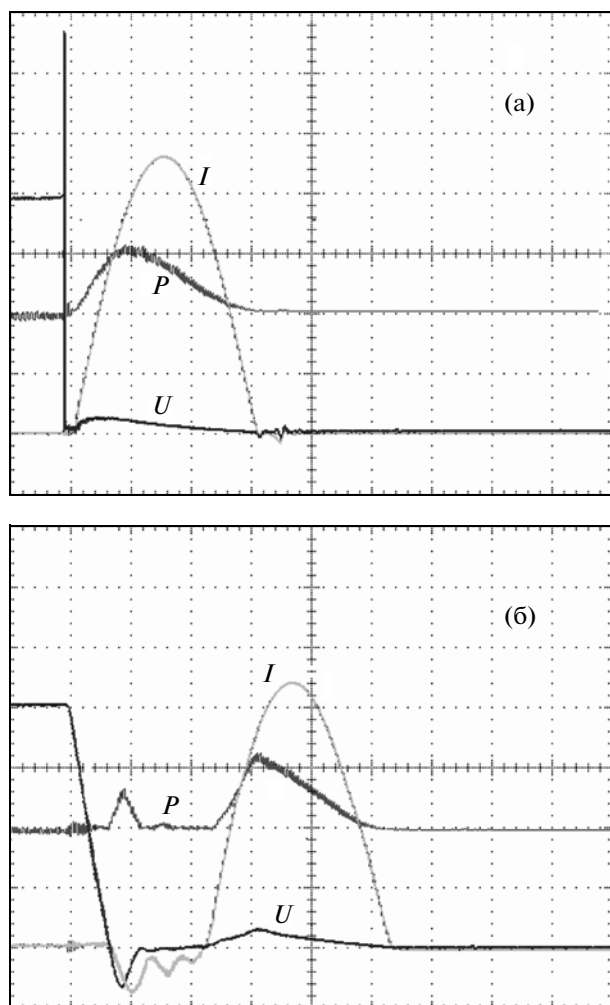


Рис. 4. Осциллограммы коммутируемого тока I и падения напряжения U на д.г.у. (а) и р.в.д. (б) и эпюра мощности потерь энергии P . Масштабы по вертикали: тока – 250 А/клетка, напряжения – 500 В/клетка, мощности – 100 кВт/клетка; по горизонтали – 400 нс/клетка.

детельствуют о практическом равенстве коммутационных потерь энергии в динисторах. Они составляют ~60 мДж. При этом суммарные потери энергии в коммутаторах не превышают 10% от энергии, запасаемой в силовых конденсаторах C_0 .

Так как габариты рассмотренных коммутаторов также почти одинаковы, то определяющим фактором при их сравнении является собственная индуктивность, ограничивающая скорость нарастания коммутируемого тока. Вследствие очень малых габаритов дросселя насыщения д.г.у.-коммутатор имеет существенно меньшую собственную индуктивность, что дает ему определенные преимущества.

Весомое достоинство д.г.у.-коммутатора было определено в результате частотных испытаний. Они проводились на частоте 250 Гц без внешнего охлаждения динисторов при той же, что и в моно-

импульсном режиме, амплитуде коммутируемых импульсов тока. Длительность рабочего цикла составляла ~1000 с. Измерялось падение напряжения на р.в.д. и д.г.у., а также потери энергии в динисторах и температура их структур. Для измерения температуры использовались термопары, смонтированные в основание корпусов динисторов со стороны катода.

В процессе экспериментов наблюдалось радикальное отличие характера изменения падения напряжения и потерь энергии в р.в.д. и д.г.у. при нагреве импульсами коммутируемого тока.

Так, падение напряжения и потери энергии в р.в.д. с ростом температуры плавно увеличивались, что характерно для кремниевых полупроводниковых приборов и обусловлено тепловым рассеиванием носителей тока на атомарной решетке кремния. При нагреве д.г.у. падение напряжения и коммутационные потери энергии плавно уменьшались. Полученный эффект можно объяснить увеличением интенсивности переключающей волны ударной ионизации вследствие тепловой генерации носителей с глубоких уровней запрещенной зоны кремния.

В конце рабочего цикла потери энергии в д.г.у. уменьшились в 1.2 раза относительно исходного значения, а в р.в.д. примерно во столько же раз увеличились. В результате конечная температура д.г.у. была почти на 10°С меньше, чем р.в.д. (соответственно 67 и 76°С), что определяет более высокие коммутационные возможности д.г.у.-коммутаторов в частотном режиме.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что в режиме коммутации мощных субмикросекундных импульсов тока коммутаторы на основе одиночных д.г.у. имеют преимущества относительно аналогичных р.в.д.-коммутаторов, определяемые меньшей собственной индуктивностью и более эффективным переключением д.г.у. в условиях нагрева.

Однако пока не ясно, сохранится ли преимущество д.г.у.-коммутаторов при высоком уровне силового напряжения, определяющем необходимость использования большого количества последовательно соединенных динисторов. Перспективы высоковольтных д.г.у.-коммутаторов могут быть ограничены технической сложностью их переключения.

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. Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Грехов И.В. и др. // ПТЭ. 2007. № 2. С. 87.
4. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б. и др. // ПТЭ. 2009. № 5. С. 90.
5. Коротков С.В., Жмодиков А.Л. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 68.