

УДК 621.314

Применение тиристоров со статической индукцией в качестве быстрых ключей высокой мощности для мощных импульсных устройств

SHOZO ISHII¹, JUN-ICHI NISHIZAWA², NAOHIRO SHIMIZU³ and YUICHIRO IMANISHI³

¹Department of Electrical & Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552 (Japan)

²Semiconductor Research Institute, Semiconductor Research Foundation, Kawauchi, Aoba-ku, Sendai 980-0862 (Japan)

³NGK Insulators Ltd., 2-56 Suda-cho, Mizuho-ku, Nagoya 467-8530, Japan

E-mail: nisizawa@hanken-sri.or.jp

Аннотация

Силовые полупроводниковые приборы широко используются в мощных импульсных устройствах. Первой целью в развитии приборов является получение высоких значений параметра di/dt , таких как у искровых разрядников, а именно: 10^{12} А/с. Мы провели изучение характеристик включения СИ-тиристоров для быстрых высоковольтных импульсных генераторов. СИ-тиристоры имеют структуру с захороненным затвором, в которой электроды затвора расположены в области n -базы. Поскольку СИ-тиристоры нормально включенные, на электроды затвора должно быть подано отрицательное смещение, чтобы поддерживать выключенное состояние. СИ-тиристоры во включенном состоянии ведут себя подобно pin -диодам. Мы охарактеризовали три типа СИ-тиристоров, два из которых были использованы в устройствах силовой электроники с номинальным напряжением 4000 В. Прибор, обозначенный как RT201, был разработан для мощных импульсных применений. Разница между ними заключается в структуре прибора вблизи анода. Для того чтобы улучшить характеристики выключения при использовании приборов в силовой электронике, обычно используются структуры с проницаемым затвором и короткозамкнутым анодом. Прибор RT201 с номинальным напряжением 5500 В имеет структуру с проницаемым затвором и не является прибором с короткозамкнутым анодом. Скорость включения в основном определяется скоростью инжекции носителей в область n -базы. Поэтому качество цепи управления затвором влияет на быстроту включения. При использовании вновь разработанного сильноточного драйвера затвора получено наиболее быстрое включение прибора RT201 с $T_f = 35$ нс и $di/dt = 9.5 \cdot 10^{10}$ А/с. Для того чтобы охарактеризовать работу в режиме повторений и при более высоком напряжении, мы сделали составную переключающую ячейку на СИ-тиристорах. Ячейка состояла из трех тиристоров, каждый из которых имел драйвер затвора. Переключающая ячейка успешно функционировала на частоте повторения 2 кГц на 10 кВ.

ВВЕДЕНИЕ

Технология мощных импульсов включает физику и технику быстрых импульсов высокой мощности, которые используются в ускорителях частиц, источниках плазмы, импульсных газовых лазерах, источниках коротковолнового излучения и т. д. Переключающие приборы, которые могут управлять высокими напряжениями и большими токами, в большой степени определяют качество мощных импульсных генераторов [1]. Для переключения высоких напряжений и больших

токов обычно использовались переключатели разрядного типа, такие как искровые разрядники или водородные тиратроны. Искровой переключатель может закрыть схему в течение нескольких наносекунд. Искровые разрядники высокого давления используются для переключения более высоких напряжений. Время жизни искрового разрядника ограничено эрозией электродов при больших токах разряда. Мощные переключатели подразделяются на закрывающие переключатели и открывающие. Быстрые закрывающие ключи необходимы для генерации быстрых или

очень коротких импульсов. Открывающие переключатели требуются для генераторов мощных импульсов, в которых токи разряда должны быть переданы в другую цепь. При использовании открывающих ключей легко генерируются прямоугольные импульсы. Хотя переключатели разрядного типа способны к быстрому закрыванию, для них достаточно трудно открыть цепь. Приборы силовой электроники все более широко используются, в особенности в промышленных генераторах мощных импульсов. Хотя мощные приборы для силовой электроники были разработаны и усовершенствованы, чтобы иметь превосходные характеристики выключения, быстрые характеристики включения также требуются для мощных импульсных применений.

ПРИБОРЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ БЫСТРОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

По сравнению с переключателями разрядного типа силовые полупроводниковые приборы имеют преимущество в компактности, большом времени эксплуатации и отсутствии необходимости обслуживания. Способность к переключению больших мощностей зависит от характеристик прибора, а именно: от пиковых токов, напряжений выключения, времени переключения и потерь энергии на переключение. Силовые приборы позволяют мощному генератору импульсов работать на высокой частоте. Более того, надежность и качество систем генерирования будут значительно улучшены. Первая цель в разработке приборов для мощных импульсных применений – достижение высокой скорости нарастания тока, сравнимой с этим показателем для искровых переключателей – 10^{12} А/с.

Имеется несколько претендентов на роль быстрых мощных ключей в мощных полупроводниковых устройствах, которые могут быть классифицированы по механизмам их включения. Тиристоры и ГТО приводятся в действие инжекцией тока из затворов. Носители в слоях истощения управляют СИ-транзисторами и СИ-тиристорами. IGBT, IEGT (усиленные инжекцией полевые транзисторы),

МОП-полевые транзисторы и МАГТ (тиристоры, переключаемые МОП-затвором) имеют МОП-структуры затвора. Лавинный эффект применяется в RSD (обратно включенных динисторах) и FID (динисторах с быстрой ионизацией). Генерация носителей энергией фотонов используется в фотопереключаемых тиристорах и фотопроводящих объемных полупроводниковых переключателях.

У силовых приборов барьерного типа обычные напряжения выключения варьируют в пределах от 4000 до 6500 кВ, а максимальное значение пикового тока составляет менее 50 кА. Поэтому используют последовательное соединение приборов, чтобы получить большее рабочее напряжение, и параллельное соединение приборов для получения большего импульса тока. Номинальное напряжение более 10 кВ крайне необходимо в практике применения газовых лазеров и источников плазмы. Для получения более высоких напряжений выключения слой базы должен быть более толстым. Следовательно, время выключения становится больше. Имеется компромисс между номиналом прибора и возможностью переключения.

При использовании в мощных импульсных генераторах приборы обычно работают в экстремальных режимах. Структура прибора должна быть разработана особенно тщательно по сравнению с аналогичной для обычной аппаратуры силовой электроники. Данные о характеристиках приборов, полученные из опыта применения в силовой электронике, иногда бесполезны, поскольку условия применения были не столь критическими, как в мощных импульсных системах. Всегда требуется сокращение потерь энергии на переключение, что определяет эффективность генератора и расход энергии на системы охлаждения. Деграция и ее механизмы в силовых приборах, которые недостаточно хорошо известны, должны быть поняты с учетом влияния сильного электромагнитного поля. Электрический пробой также представляет серьезную проблему в разработке и производстве мощного прибора с высоким напряжением выключения. Крутой высокий импульс напряжения иногда разрушает мощные полупроводниковые приборы. Механические

напряжения в приборах не могут быть проигнорированы, особенно при длительных импульсах или очень больших токах. Поскольку отказы приборов приводят к серьезным повреждениям, как их самих, так и импульсных систем, необходимо избегать появления электромагнитных шумов в цепях затвора.

СИ-ТИРИСТОР КАК БЫСТРЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЙ ПРИБОР

СИ-тиристоры перспективны для использования в качестве переключателей больших токов и высоких напряжений, так как с их помощью можно обеспечивать высокую скорость повторения операций. СИ-тиристор был предложен Дж. Нишизавой в 1975 году [2]. Низкое напряжение включения СИ-тиристора обусловлено его действием, которое сопровождается эффектом инжекции носителей вокруг канала затвора. Прибор также устойчив к электромагнитному шуму, что обеспечивается низким сопротивлением его затвора. Быстрые и с низкими потерями характеристики исключительны по сравнению с другими мощными полупроводниковыми приборами с напряжениями выключения выше 3 кВ. СИ-тиристоры имеют структуру с захороненным затвором, в которой электроды затвора расположены в *n*-базе вблизи катода. Мы уверены, что структура с захороненным затвором годится для быстрого СИ-тиристора на большие токи и высокие напряжения. Поскольку приборы нормально включенные, на электроды затвора должно быть подано отрицательное смещение. Отрицательное напряжение смещения на затворе формирует низкопроводящую область истощения вокруг затвора, и СИ-тиристор поддерживает выключенное состояние. При подаче на затвор импульса положительного напряжения область истощения наполняется носителями и прибор становится открытым. Переходное время процесса включения главным образом определяется временем инжекции носителей. Временное и пространственное поведение дырок и электронов в СИ-тиристоре было количественно оценено с использованием компьютерного моделирования прибора. Было обнаружено однородное распределе-

ние тока, особенно тока дырок. В фазе включения СИ-тиристор действует подобно *pin*-диоду. Мы экспериментально изучили во включенном состоянии токовые характеристики обоих приборов, имеющих одинаковые диаметры. Результаты были получены в виде характеристик импульсного выключения приборов.

Мы измерили характеристики включения СИ-тиристоров для быстрых высоковольтных импульсных генераторов [3]. Характеризация была осуществлена на СИ-тиристорах трех типов, два из которых, а именно: тип С и тип D, были для использования в силовой электронике с номинальным напряжением 4000 В. Прибор, названный RT201, был специально разработан для мощных импульсных применений. Различие между ними заключалось в структуре прибора вблизи анода. Структуры с проницаемым затвором и короткозамкнутым анодом обычно используются, чтобы улучшить характеристики выключения для применения в силовой электронике. Однако RT201 с номинальным напряжением 5500 В имеет структуру с проницаемым затвором и не относится к приборам с короткозамкнутым анодом. Все они были приборами с обратной проводимостью, антипараллельно которым были включены диоды. Обратный ток, который возникает при разряде LC-цепи, должен протекать через диод. Тестовая цепь для характеристики была составлена из конденсатора 38 нФ и коаксиально подобранной обратной цепи с остаточной индуктивностью 13 нГн [4]. Временные зависимости анодных напряжений и анодных токов в фазе включения показаны на рис. 1, где зарядное напряжение было 1 кВ. Для всех типов приборов di/dt становилось больше при возрастании зарядного напряжения до 3 кВ. Скорость нарастания тока для RT201 всегда больше, чем для других приборов. Скорость включения главным образом определяется скоростью инжекции носителей в область *n*-базы СИ-тиристора. Поэтому качество цепи драйвера затвора влияет на скорость включения. Мы разработали драйвер высокого тока затвора с низкоиндуктивным модулем на полевом транзисторе, который мог периодически генерировать токи через затвор большие, чем

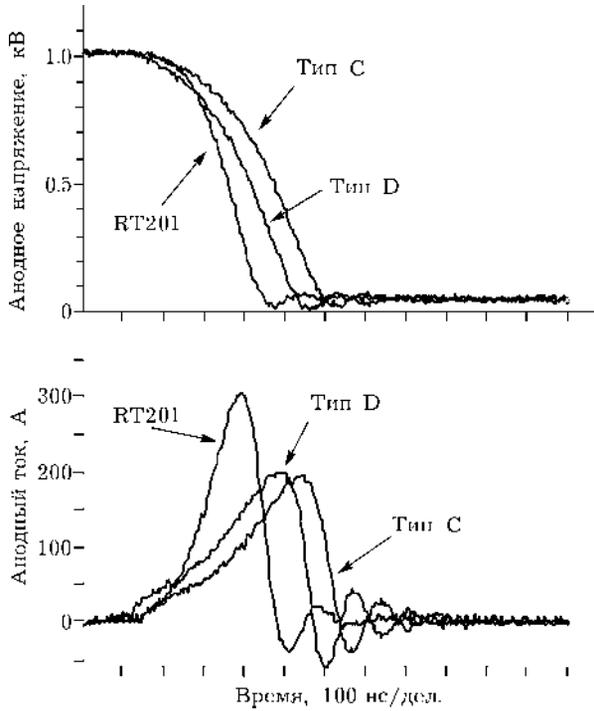


Рис. 1. Характеристики включения СИ-тиристоров трех типов.

300 А. Мы обозначили драйвер высокого тока как цепь-4. Драйвер затвора был соединен с электродом затвора как можно более коротким способом, чтобы минимизировать остаточную индуктивность. Мы использовали также два других драйвера затвора для силовой электроники – драйвер низкого тока (цепь-1) и драйвер среднего тока (цепь-3). Характеристики включения для трех драйверов представлены на рис. 2, где показаны пиковые значения di/dt и время спада напряжения на аноде T_f . При использовании для управления RT201 драйвера цепь-4 была достигнута самая быстрая возможная возможность включения с $T_f = 35$ нс и $di/dt = 9.5 \cdot 10^{10}$ А/с. Было продемонстрировано, что характеристики включения СИ-тиристора улучшены благодаря тщательной разработке структуры прибора.

Для того чтобы охарактеризовать работу в режиме повторений и при более высоком напряжении, мы сделали составную переключающую ячейку на СИ-тиристорах. Ячейка состояла из трех тиристоров, каждый из которых имел драйвер затвора. В этом эксперименте тип использованных тиристоров отличался от обсуждаемых выше. В тестовой

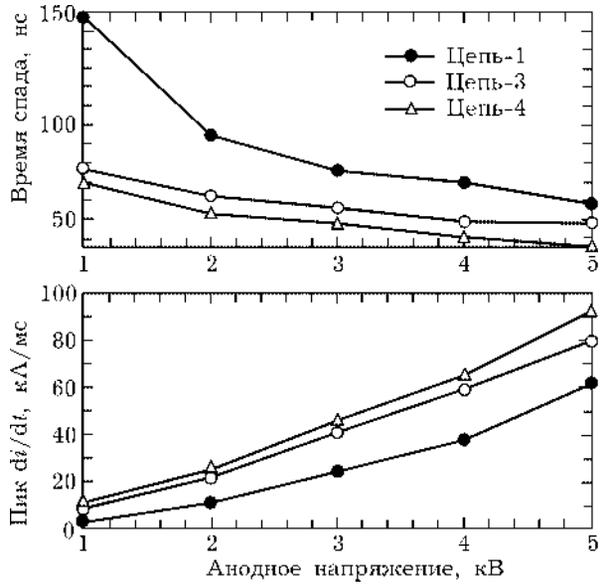


Рис. 2. Зависимость характеристик включения RT201 от напряжения для различных драйверов затвора.

цепи заряжаемый конденсатор 40 нФ был соединен с нагрузочным сопротивлением 1 Ом через переключающую ячейку. Сопротивления по 2 Ом были соединены параллельно каждому из тиристоров, чтобы сделать распределение напряжения эквивалентным. Однако в случае больших скоростей повторения операций распределение напряжения становилось неоднородным из-за дополнительной емкости при включенной ячейке. Для компенсации дополнительной емкости параллельно высоковольтному плечу присоединялся конденсатор на 120 пФ. Ток через цепь и напряжение на аноде для каждого импульса показаны на рис. 3.

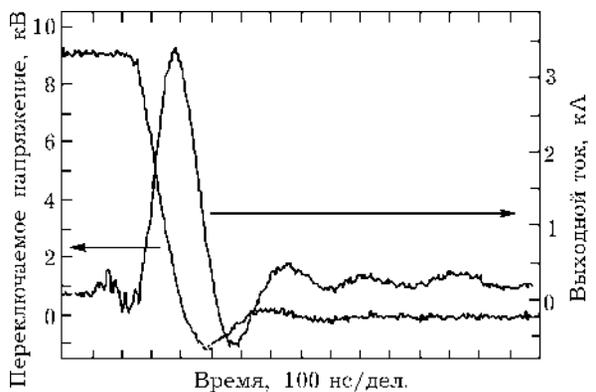


Рис. 3. Формы импульсов тока и напряжения генератора импульсов с составной переключающей ячейкой. Зарядное напряжение 9 кВ, скорость повторения 2 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Силовые полупроводниковые приборы наиболее перспективны для применения в качестве потенциально быстрых мощных ключей для технологии мощных импульсов. Для получения более быстрых характеристик включения и выключения необходимо дальнейшее развитие. СИ-тиристоры демонстрируют способность к быстрому переключению больших токов, сравнимую с параметрами искровых разрядников. Прорыв в разработке мощных полупроводниковых приборов будет обеспечен аккумулярованием экспериментальных данных о свойствах приборов в экстремальных условиях. Детальное

поведение носителей в приборах, действующих при быстром переключении большой мощности, должно быть проанализировано и изучено теоретически и экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 I. C. Martin, in T. H. Martin, A. H. Guenther and M. Krittiansen (Eds.), *Pulsed Power*, Plenum Press, New York, 1996.
- 2 J. Nishizawa, T. Terasaki and J. Shibata, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-22 (1975) 185.
- 3 S. Ibuka, T. Osada, K. Jingushi *et al.*, 12th IEEE Pulsed Power Conf., 1999, p. 1441.
- 4 S. Ibuka, A. Yamamoto, Y. Hironaka *et al.*, Conf. Record of the 23rd International Power Modulator Symp., 1998, p. 106.