

О.Л.РЕЗИНКИН, канд. техн. наук; **В.В.ВЫТРИШКО**; НТУ «ХПИ»

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ SOS-ЭФФЕКТА

Досліджено деякі параметри SOS-ефекту в структурі високовольтного кремнієвого випрямного діоду. Розроблено твердотільний генератор імпульсів високої напруги наносекундного діапазону з частотою повторювання до 3 кГц для випробувань на електромагнітну сумісність.

SOS-effect parameters for silicon rectifier diode was investigated. Solid state high voltage generator of nanosecond range pulse duration with up to 3 kHz repetition rate for tests on electromagnetic compatibility was elaborated.

Генерирование импульсов высокого напряжения наносекундной и суб-наносекундной длительности является одной из актуальных задач электрофизики. Например, для оценки качества функционирования электротехнических, радиоэлектронных и электронных изделий, оборудования и аппаратуры при воздействии наносекундных импульсных помех необходимы испытательные генераторы способные работать при частоте следования импульсов в единицы килогерц [1]. Следует отметить, что применение искровых разрядников в данном случае сопряжено с рядом трудностей, обусловленных жесткими требованиями к времени деионизации разрядного промежутка. Кроме того, общеизвестны такие недостатки искровых коммутаторов, как малый ресурс работы и нестабильность коммутационных характеристик, особенно в режиме самопробоя.

В настоящее время весьма перспективной тенденцией в развитии высоковольтной импульсной техники представляется замена искровых коммутаторов полупроводниковыми. В течение нескольких предшествующих лет в этой области были достигнуты значительные успехи [2-4]. К наиболее успешным примерам применения полупроводников в качестве высоковольтных коммутаторов следует отнести FID-коммутаторы, SOS-диоды, дрейфовые диоды с резким восстановлением и импульсные тиристоры. В результате применения полупроводниковых коммутаторов появляется возможность создания высоковольтных импульсных устройств, не содержащих подвижных частей и разрядных плазменных промежутков, то есть являющихся полностью твердотельными.

Твердотельные коммутаторы, использующие SOS-эффект являются размыкающими. Для получения импульса высокого напряжения используется быстрый (в течение несколько наносекунд) обрыв тока индуктивного накопителя энергии. Накачка плазмы в полупроводниковую структуру коммутатора производится предшествующим импульсом тока прямой

проводимости. SOS- эффект наблюдается в кремниевых полупроводниковых приборах, в том числе – в серийно выпускаемых выпрямительных диодах. Для исследования динамических характеристик размыкающего коммутатора на SOS-эффекте был создан стенд, схема которого представлена на рис. 1.

Твердотельный коммутатор состоит из шести высоковольтных столбов VD1-VD6 включенных параллельно. В качестве первичного коммутатора F используется искровой управляемый разрядник ПУ-62, который в данном генераторе срабатывает при достижении заданного уровня напряжения, определяемого соотношением плеч омического делителя R2, R3.

Емкостной накопитель C состоящий из двух последовательно соединенных конденсаторов КВИ-3 3300 пФ 10 кВ, заряжается через сопротивление R1 до напряжения ≈ 10 кВ. После срабатывания разрядника F, в цепи накачки, образованной емкостью C, разрядником F, индуктивным накопителем L, параллельно включенными диодами VD1-VD6 и коаксиальным шунтом $R_{ш1}$ начинает протекать ток. Параметры схемы подобраны таким образом, что импульс тока имеет колебательный характер. При этом во время прохождения положительной полуволны через диоды проходит прямой ток накачки. Во время прохождения отрицательной полуволны тока происходит удаление неосновных носителей из полупроводниковой структуры сопровождаемое резким обрывом тока проводимости.

Индуктивность накопителя $L = 3$ мкГн. При срабатывании разрядника импульс прямой полярности длится 140 нс, обратной – 70 нс. Обрыв тока происходит за время около 20 нс. При этом на нагрузке $R_n = 170$ Ом формируется импульс напряжения амплитудой 21,5 кВ и длительностью на полувысоте 20 нс; длительность фронта импульса составляет ≈ 10 нс.

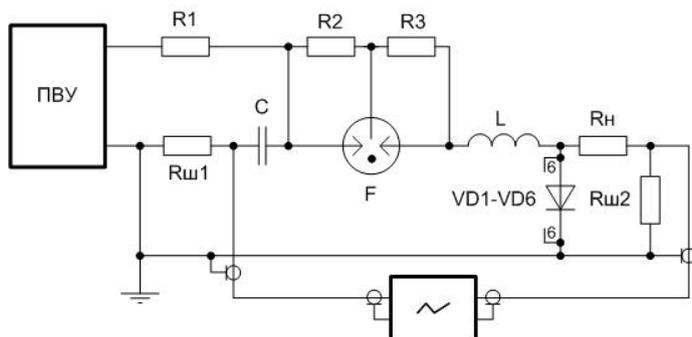


Рисунок 1 – Совмещенная схема SOS-генератора с разрядником ПУ-62:
 ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; $R_{ш1}$, $R_{ш2}$ – коаксиальные шунты;
 R1 – зарядный резистор; F – разрядник; L – индуктивный накопитель;
 Rn – сопротивление нагрузки; VD1-VD6 – кремниевые полупроводниковые SOS-
 диоды; C – емкостной накопитель энергии

Конструкция генератора представлена на рис. 2. Данный генератор представляет собой коаксиал диаметром 65 мм.

Коаксиальные шунты 2, 8, имеющие сопротивление 0,1 Ом, позволяют осциллографировать токи индуктивного накопителя 5 и нагрузки 3. Осциллограммы приведены на рис. 3.

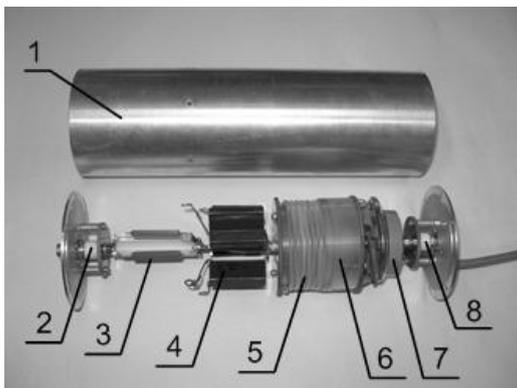


Рисунок 2 – Конструкция SOS-генератора с разрядником РУ-62:
 1 – металлический корпус; 2, 8 – коаксиальные шунты; 3 – эквивалент нагрузки;
 4 – SOS-диоды; 5 – индуктивный накопитель; 6 – разрядник;
 7 – емкостной накопитель энергии

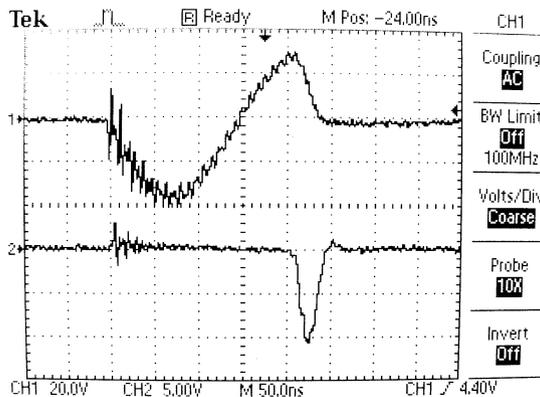


Рисунок 3 – Осциллограммы тока индуктивного накопителя – кривая 1
 и тока в нагрузке – кривая 2

Применение в качестве первичного коммутатора искрового управляемого разрядника РУ-62 ограничило частоту следования импульсов уровнем $f_{ср} \leq 10^3$ Гц. Для повышения частоты следования импульсов был разработан твердотельный генератор, схема которого приведена на рис. 4.

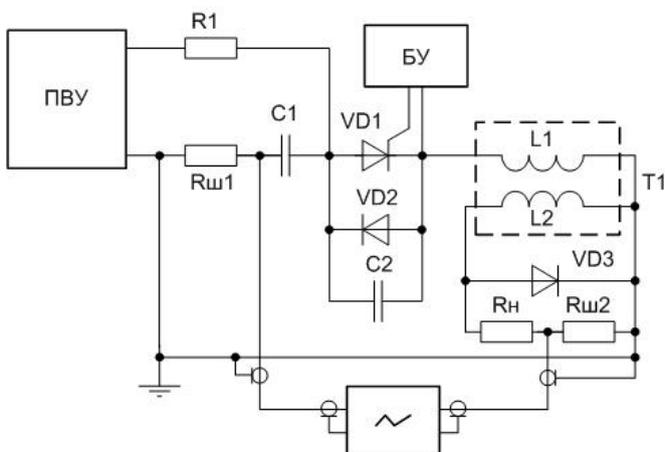


Рисунок 4 – Совмещенная блок-схема твердотельного генератора:
 ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; БУ – блок управления;
 $R_{ш1}$, $R_{ш2}$ – коаксиальные шунты; R1 – зарядный резистор; VD1 – тиристор;
 T1 – трансформатор-индуктивный накопитель; R_n – сопротивление нагрузки;
 VD3 – SOS-диоды; C1 – емкостной накопитель энергии

В качестве первичного коммутатора в данной схеме генератора применен импульсный тиристор КУ222А (VD1), зашунтированный в обратном направлении двумя диодами HER157 (VD2, VD3). Параллельно коммутатору был включен конденсатор К78-2 22нФ 1000В (C2). Конструкция данного генератора приведена на рис. 5.

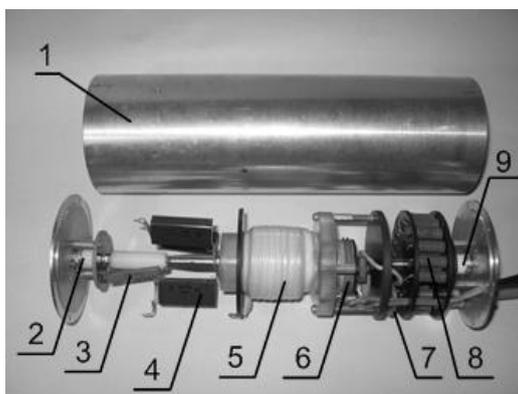


Рисунок 5 – Конструкция твердотельного генератора:
 1 – металлический корпус; 2, 9 – коаксиальные шунты; 3 – нагрузка;
 4 – SOS-диоды; 5 – трансформатор-индуктивный накопитель; 6 – тиристор;
 7 – емкостной накопитель энергии; 8 – зарядный резистор

Емкостной накопитель энергии 7 состоит из двух конденсаторов K15-5 0,01 мкФ 1,6 кВ, включенных последовательно. Зарядное напряжение равное 1,5 кВ соответствует предельно допустимому для тиристора КУ222А в данном режиме эксплуатации. Емкость С1 после включения тиристора VD1 разряжается на первичную обмотку L1 данного трансформатора. В качестве индуктивного накопителя в данной схеме используется вторичная обмотка воздушного трансформатора Т1. Трансформатор Т1 является согласующим. Его использование позволяет привести в соответствие предельно допустимое напряжение тиристора и необходимый уровень энергии, передаваемой за один импульс от емкостного накопителя к индуктивному. В качестве размыкающего твердотельного коммутатора, подключенного к выходу вторичной обмотки L2 трансформатора, использовались 1-3 кремниевых выпрямительных столба.

Осциллограммы токов в первичной обмотке трансформатора Т1, а также тока в нагрузке приведены на рис. 6.

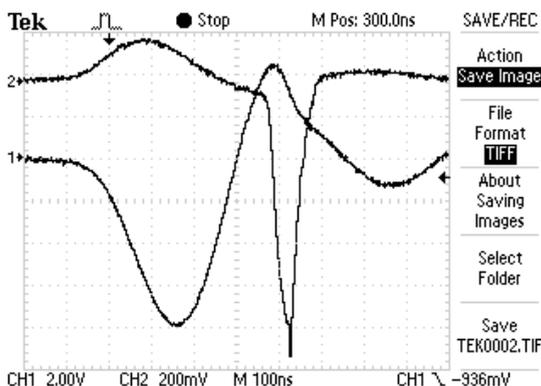


Рисунок 6 – Осциллограммы тока индуктивного накопителя – кривая 1 и тока в нагрузке – кривая 2

Поскольку нагрузка генератора $R_{н}$ носила активный характер, форма напряжения на ней совпадала с формой тока, а его амплитуда легко может быть пересчитана по закону Ома. Наличие предимпульса обратной (положительной) полярности на осциллограмме тока в нагрузке объясняется влиянием сопротивления столбов в процессе их накачки. При увеличении количества параллельно включенных столбов амплитуда предимпульса падает. С другой стороны, эксперименты по снижению активного сопротивления цепи индуктивного накопителя энергии за счет параллельного включения нескольких SOS – коммутаторов показали, что максимальная эффективность работы генератора наблюдается, при использовании одного диода. По-видимому, снижение уровня выходного напряжения при увеличении количества размыкающих коммутаторов связано с их несинхронным срабатыванием. Кроме того,

на параметры выходного импульса заметное влияние оказывают сопротивление SOS-диода в открытом состоянии, а также индуктивность накопителя. При работе на низком напряжении эффективность работы генератора снижается из-за слишком медленного запирающего кремниевого р-п перехода.

В данном генераторе длительность импульса накачки структуры составляет 340 нс при токе 80 А. Длительность освобождения р-п перехода от плазмы и обрыва тока составила 70 нс. На нагрузке $R_{н} = 140$ Ом, при этом, формируется импульс напряжения амплитудой 1,9 кВ, длительность фронта импульса составляет 50 нс, длительность спада – 60 нс.

Твердотельный генератор позволил формировать последовательности импульсов с частотой следования до 5 кГц. Выходное напряжение генератора зависит, главным образом, от достигнутой длительности запирающего SOS-коммутатора, которая в свою очередь определяется скоростью ввода энергии тиристором КУ222А, а также добротностью контура питания первичной обмотки L1 трансформатора-накопителя.

Для проведения испытаний электротехнических, радиоэлектронных и электронных изделий на устойчивость к наносекундным импульсным помехам в ряде случаев требуются источники импульсов с более жесткими уровнями воздействующих параметров. Так, например, для испытаний по [1] требуется генератор импульсов напряжения с амплитудой до 2 кВ (до 4 кВ на внутренней нагрузке генератора в режиме холостого хода), длительностью фронта 5 нс и частотой повторения до 5 кГц. Для достижения данных уровней жесткости испытаний требуется оптимизация параметров твердотельного генератора. В качестве коммутатора энергии емкостного накопителя целесообразно рассмотреть возможность применения высоковольтных IGBT-транзисторов. Кроме того, повышение эффективности работы приведенного в данной статье генератора и уменьшение длительности фронта его выходного импульса может быть достигнуто более точным подбором параметров скорости ввода и плотности тока накачки структуры SOS-коммутатора, а также увеличением отношения индуктивности первичной обмотки трансформатора T1 к собственной индуктивности ее цепи питания.

Список литературы: 1. ГОСТ 29156 – 91 (МЭК 801 – 4 – 88) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Технические требования и методы испытаний. 2. Грехов И.В., Месяц Г.А. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов // УФН, 2005. т. 175. №7 С. 735-744. 3. Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Степанянц А.Л. Высоковольтные Р.В.Д.-переключатели субмегаамперных импульсов тока микросекундного диапазона длительности // ПТЭ. – 2003. – № 1. – С. 53-59. 4. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

Поступила в редколлегию 18.10.2006.