

SOS-ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

© 2011 г. П. В. Васильев, С. К. Любутин, М. С. Педос, А. В. Пономарев, С. Н. Рукин,
А. К. Сабитов, Б. Г. Словиковский, С. П. Тимошенко, С. Н. Цыранов, С. О. Чолах*Институт электрофизики УрО РАН**Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106*

Поступила в редакцию 29.07.2010 г.

Описан твердотельный наносекундный SOS-генератор для применения в электрофизических технологиях. Во входной части генератора энергия поступает в высоковольтный магнитный компрессор через IGBT-модули и повышающий импульсный трансформатор. Входная часть схемы снабжена цепью рекуперации неиспользованной энергии, а при формировании выходного импульса реализуется режим микросекундной накачки полупроводникового прерывателя тока. В результате полный к.п.д. генератора при работе на согласованную нагрузку увеличен с ~40 до 60–62%. Остальные параметры генератора: пиковое напряжение до 60 кВ, ток – до 6 кА, длительность импульса около 40 нс, частота следования импульсов в постоянном режиме 1 кГц, выходная средняя мощность до 9 кВт.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сильноточные наносекундные генераторы с полупроводниковым прерывателем тока на основе SOS-диодов [1, 2] благодаря твердотельной системе коммутации энергии сочетают высокую частоту следования импульсов, стабильность выходных параметров, большой срок службы. Традиционная схема SOS-генератора содержит первичный накопитель энергии с тиристорным коммутатором, магнитный компрессор и собственно полупроводниковый прерыватель тока на SOS-диодах. Магнитный компрессор необходим для сжатия импульса во времени, поскольку характерное время передачи энергии через тиристор лежит в диапазоне 10–100 мкс, а для эффективной работы SOS-диола при плотности тока в единицы кА/см² требуется время прямой накачки не более 30–400 нс. При этом основные потери энергии в схеме происходят в магнитном компрессоре, а полный к.п.д. генератора по этой причине, как правило, составляет около 0.4.

В [3] было показано, что уменьшением плотности тока можно реализовать микросекундный режим накачки SOS-диола и уменьшить число звеньев магнитного компрессора. В этой работе использовались быстрые IGBT-транзисторы в качестве первичного коммутатора, при включении которых энергия передавалась в конденсатор накачки за 1.5 мкс, что соответствовало длительности прямой накачки t^+ прерывателя тока. При выходной энергии импульса 0.5 Дж генератор содержал только один магнитный элемент, к.п.д. генератора достигал 0.7.

В [4] исследована возможность работы полупроводникового прерывателя тока при больших

значениях t^+ и существенно большей энергии и мощности выходного импульса. При t^+ от 2 до 5 мкс энергия импульса составляла около 10 Дж, мощность достигала 540 МВт при длительности импульса 25–30 нс, а к.п.д. по отношению к энергии первичного накопителя лежал в диапазоне 0.50–0.54.

В данной работе описывается SOS-генератор для плазмохимических реакторов по очистке воды и воздуха с помощью стримерного коронного разряда. Параметры генератора: амплитуда импульса 50–60 кВ на нагрузке около 10 Ом, частота следования импульсов F до 1 кГц в постоянном режиме работы, средняя выходная мощность – до 9 кВт. Поскольку генератор предназначен для применения в электрофизических технологиях, основное внимание при его разработке было уделено вопросу увеличения к.п.д.

2. СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ
ГЕНЕРАТОРА

Электрическая схема силовой части генератора приведена на рис. 1. Схема содержит два параллельных транзисторных модуля A_{1-1} и A_{1-2} , расположенных в воздушной части корпуса, и высоковольтный модуль A_2 , элементы которого помещены в металлический бак с трансформаторным маслом. В состав генератора также входят система контроля и управления, схема перемагничивания сердечников магнитных элементов, система охлаждения и внешний пульт управления.

Питание генератора осуществляется от трехфазной сети переменного тока с линейным напряжением 380 В, которое после регулируемого мостового выпрямителя на оптотиристорах $D_1–D_6$

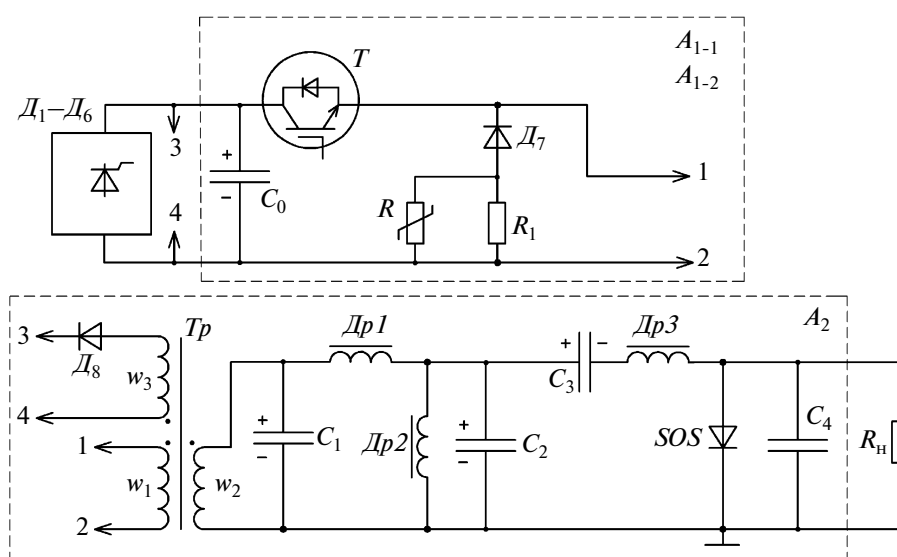


Рис. 1. Электрическая схема генератора. A_{1-1} , A_{1-2} – транзисторные модули (2 параллельно), A_2 – высоковольтный модуль; T – МТКИ-1600-12К; D_1 – D_6 – МТОТО-80-112, D_7 – МДЧ-500-12, D_8 – ДЧ251-160-14 (4 последовательно); Tr – К250 × 155 × 20, 50НП, 10 мкм (2 кольца, $w_1 = 4$, $w_2 = 100$, $w_3 = 16$); $Dp1$ – К320 × 180 × 25, 50НП, 10 мкм (1 кольцо, $w = 57$), $Dp2$, $Dp3$ – К250 × 140 × 25, 50НП, 10 мкм (1 кольцо, $w = 11$ ($Dp2$) и 3 ($Dp3$)); C_0 – К78-41-1000 В-200 мкФ (5 параллельно), C_1 – КВИ-3-3300 пФ-10 кВ (38 параллельно и 3 последовательно), C_2 , C_3 – КВИ-3-1000 пФ-16 кВ (по 40 параллельно и 2 последовательно каждый), C_4 – КВИ-3-680 пФ-20 кВ (8 параллельно и 3 последовательно); R_1 – ПЭВ-100-47 Ом (5 параллельно), R – JVR20N391K (28 параллельно).

заряжает конденсаторы фильтра C_0 . Все магнитные элементы снабжены обмотками, по которым проходит постоянный ток подмагничивания от внешней схемы (на рис. 1 не показана). Указанная полярность напряжения на конденсаторах на рис. 1 соответствует зарядным процессам.

Рассмотрим процесс работы схемы при максимальном напряжении на C_0 , составляющем 540–550 В. При поступлении внешнего импульса управления на драйверы транзисторов T последние замыкаются, и конденсаторы C_0 подключаются к первичной обмотке w_1 трансформатора Tr . При этом из сети происходит отбор порции энергии, величина которой определяется емкостью конденсатора C_1 и коэффициентом трансформации Tr . Поскольку приведенное к первичной обмотке значение емкости C_1 много меньше C_0 , то конденсатор C_1 заряжается в резонансном режиме до напряжения, соответствующего удвоенному коэффициенту трансформации.

Длительность процесса заряда C_1 и амплитуда токов в обмотках Tr определяются, главным образом, индуктивностью рассеяния основных обмоток w_1 и w_2 и составляют около 18 мкс, 1.25 кА (w_1 , ток через один модуль) и 95 А (w_2 , кривая 1 на рис. 2а) соответственно. Амплитуда напряжения на C_1 составляет 25–26 кВ, что соответствует запасенной энергии около 13 Дж. В момент времени, когда ток в обмотках Tr близок к нулю, транзисторы T выключаются.

Далее происходит насыщение сердечника дросселя насыщения $Dp1$ в момент максимального напряжения на C_1 . Конденсатор C_1 разряжается на конденсаторы C_2 и C_3 (участок II осциллограммы на рис. 2б) в согласованном режиме за ~2.5 мкс. Поскольку $C_2 = C_3$, то половина тока разряда конденсатора C_1 протекает через C_3 и SOS , обеспечивая прямую накачку прерывателя тока. После насыщения сердечника дросселя насыщения $Dp2$ конденсатор C_2 перезарядается через его обмотку и меняет полярность напряжения за время около 400 нс. При этом дроссель насыщения $Dp3$ блокирует нарастающее на нем напряжение, а в прерывателе SOS возникает пауза тока.

В момент максимального напряжения на $Dp3$ (~46 кВ) его сердечник насыщается, и конденсаторы C_2 – C_3 , соединенные последовательно, разряжаются через SOS в обратном направлении, обеспечивая режим его обратной накачки. Амплитуда тока в SOS перед его обрывом достигает 6 кА за 50–60 нс. После обрыва тока прерывателем на внешней нагрузке R_n формируется выходной импульс напряжения.

Поскольку звенья магнитного компрессора не могут быть согласованы идеальным образом, часть неиспользованной энергии возвращается обратно в конденсатор C_1 . В нашем случае этому процессу соответствует участок III осциллограммы на рис. 2б. При этом конденсатор C_1 заряжается до ~7 кВ (соответствует возвращенной энергии около 1 Дж) с полярностью, противоположной указанной на

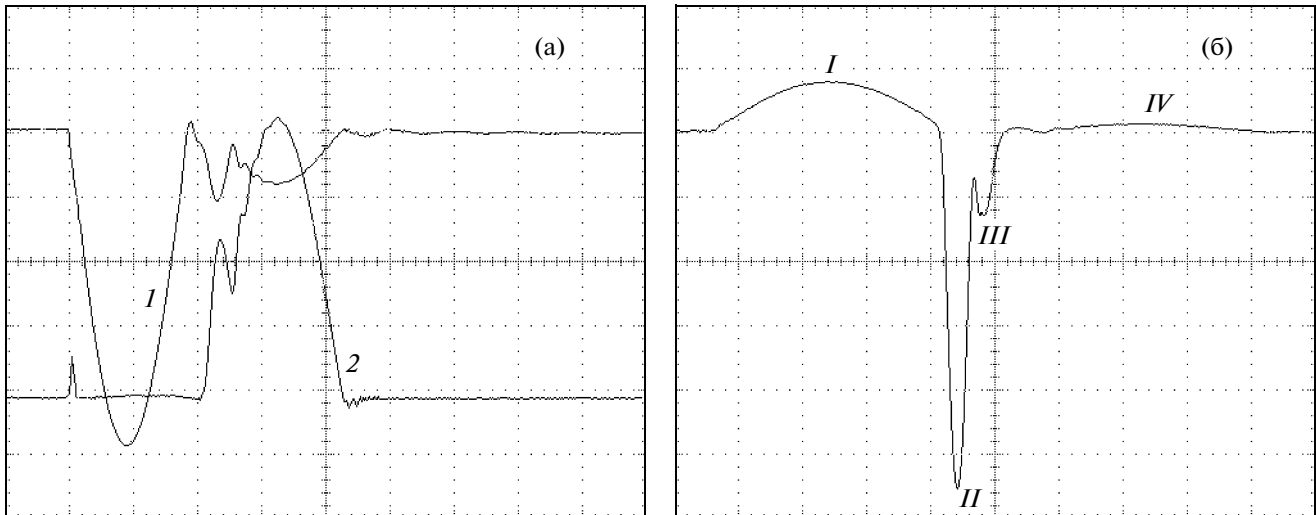


Рис. 2. Осциллограммы токов: **а** – через вторичную обмотку Tp (I , масштаб по вертикали 19 А/деление) и обмотку рекуперации w_3 (2 , 25 А/деление), масштаб по горизонтали 10 мкс/деление; **б** – через конденсатор C_1 (I – заряд конденсатора через Tp , II – разряд на конденсаторы C_2 и C_3 , III – возврат в C_1 неиспользованной энергии, IV – разряд C_1 через цепь рекуперации), масштаб по вертикали 120 А/деление, по горизонтали 5 мкс/деление.

рис. 1. Для возвращения этой энергии обратно в источник питания, как и в [5, 6], применена схема рекуперации. Схема содержит дополнительную обмотку w_3 в трансформаторе Tp и диодную сборку D_8 . Сборка D_8 блокирует напряжение обмотки w_3 на стадии рабочего импульса, когда заряжается конденсатор C_1 , и открывается при смене полярности напряжения на нем, передавая остаточную энергию из C_1 обратно в источник питания. Поскольку приведенное значение емкости C_1 к обмотке рекуперации w_3 много меньше емкости конденсаторов C_0 , то для полной передачи остаточной энергии из C_1 число витков в обмотке w_3 выбрано таким, чтобы ее напряжение превышало напряжение питания в ~ 2 раза.

Процесс рекуперации энергии иллюстрируется осциллограммами токов на рис. 2. Длительность процесса составляет около 20 мкс, амплитуда тока разряда C_1 имеет величину около 18 А (участок IV на рис. 2б), амплитуда тока в обмотке рекуперации – около 110 А (кривая 2 на рис. 2а). Из ~ 1 Дж остаточной энергии рекуперировается в источник питания около 0.8 Дж. Оставшиеся ~ 0.2 Дж рассеиваются в резисторах R_1 транзисторных модулей, поскольку при обратном напряжении на C_1 диоды D_7 открыты.

Цепи $R-D_7$ выполняют защитные функции. В случае превышения тока через транзистор T выше рабочего уровня на драйверы поступает команда для медленного выключения транзисторов. Ток из цепи транзисторов переключается в цепь $R-D_7$, ограничивая напряжение на транзисторах. Для снижения всплеска напряжения на индуктивности участка переключения элементы C_0 , T и цепь $R-D_7$ максимально приближены друг к другу.

Схема регулировки напряжения имеет нелинейную зависимость амплитуды выходного импульса от напряжения на конденсаторах источника питания C_0 , позволяя значительно изменять напряжение на выходе генератора при малом (около 20°) изменении угла управления тиристорами D_1-D_6 в выпрямителе. При снижении напряжения на C_0 от максимального значения 540 до 380 В (~ 0.7 от максимального) выходное напряжение на нагрузке снижается в ~ 2 раза. Это связано с тем, что при снижении напряжения источника питания и соответственном снижении напряжения заряда конденсатора C_1 после завершения зарядного процесса возникает задержка во времени перед моментом насыщения сердечника дросселя $Dp2$, поскольку его вольт-секундный интеграл остается неизменным. В течение этой задержки конденсатор C_1 частично разряжается обратно в источник питания через трансформатор Tp и внутренние обратные диоды транзисторных модулей T , дополнительно снижая входное напряжение магнитного компрессора.

Внутренняя система контроля и управления генератором содержит 3 основных функциональных блока: блок диагностики, плату управления драйверами транзисторов и плату управления тиристорами в выпрямителе. Внешний пульт управления связан с генератором тремя оптоволоконными кабелями. По одному из них в генератор поступает сигнал запуска, по другому происходит управление тиристорами выпрямителя, третий используется для передачи в пульт управления сигнала готовности систем генератора перед подачей запускающего импульса либо, наоборот,

сигнала ошибки, блокирующего подачу импульса запуска.

Команда ошибки перед подачей импульса запуска выдается при отсутствии напряжения питания на каком-либо блоке генератора, а также при отсутствии потока воды и циркуляции масла в системе охлаждения. После включения транзисторов во время передачи энергии в конденсатор C_1 из блока диагностики в плату управления драйверами поступает информация о текущем значении тока через транзистор. При токе выше рабочего значения плата управления выдает команду на режим плавного отключения тока транзисторами и команду ошибки в пульт управления, которая блокирует подачу следующего импульса запуска.

С пульта управления задается режим работы выпрямителя для регулировки входного напряжения генератора и соответственно амплитуды выходного импульса, а также частота следования импульсов, время работы либо количество импульсов.

Элементы транзисторных модулей охлаждаются вентиляторами (резисторы R_1) и проточной водой (все полупроводниковые элементы). Высоковольтный модуль размещен в металлическом баке, заполненном трансформаторным маслом. Масло в баке циркулируется и охлаждается водой в теплообменниках с использованием двух параллельных каналов. В каждом канале используются насос VILLO STAR-RS 30/7 и теплообменник B28 фирмы SWEP International AB (Швеция) с передаваемой мощностью 5 кВт. Охлажденное масло подается в место, где расположены прерыватель тока SOS и дроссель насыщения $Dp3$, сердечник которого имеет максимальную удельную тепловую нагрузку.

Прерыватель тока содержит пять параллельных SOS-диодов, каждый из которых состоит из 40 последовательных элементарных SOS-диодов. Параметры элементарного SOS-диода: количество последовательных полупроводниковых структур — 4, площадь структуры 2 см^2 , толщина структуры 330 мкм, глубина залегания $p-n$ -перехода 190 мкм, охладители — медные пластины размером 30×30 и толщиной 0.5 мм.

Габариты корпуса генератора: 1.5 (длина) \times \times 0.8 (ширина) \times 0.5 м (высота). Масса устройства с маслом около 380 кг. Расход проточной воды в системе охлаждения 8 л/мин.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Средства измерения включали пояса Роговского и дифференциальные пробники для измерения параметров импульсов в транзисторных модулях и токовые шунты в высоковольтном модуле. Шунты имели собственное время нарастания сигнала $\leq 1 \text{ нс}$. Для регистрации выходных импульсов использовался осциллограф TDS684 с полосой про-

пускания 1 ГГц и широкополосные ослабители сигналов фирмы Varth Electronics (США).

В качестве резистивной нагрузки R_n при кратковременных включениях генератора и в режиме пачек импульсов использовались резисторы ТВО-10 и ТВО-20. Для проведения испытаний в продолжительном режиме работы в качестве нагрузки генератора использовался цилиндр из капролона с внутренним диаметром 150 и длиной 110 мм, снабженный двумя торцевыми металлическими электродами. Со стороны заземленного электрода цилиндр соединялся с охлаждаемым резервуаром объемом 0.2 м^3 , в котором содержался раствор NaCl в воде. Из резервуара раствор прокачивался через нагрузку по замкнутому циклу со скоростью $\sim 10 \text{ л/мин}$ и охлаждался в теплообменнике. Сопротивление нагрузки при испытаниях находилось в диапазоне от 9 до 10 Ом.

3.1. Передача энергии в нагрузку через SOS

Основное внимание при настройке генератора было уделено оптимизации процесса передачи энергии из конденсаторов C_2-C_3 в нагрузку через прерыватель тока. Наряду с экспериментами проводилось численное моделирование процессов динамики электронно-дырочной плазмы в структурах прерывателя тока.

Отметим, что используемая схема накачки SOS с паузой тока так же, как и двухконтурная схема без паузы тока [1], обеспечивает равенство введенного заряда в прерыватель тока на стадии прямой накачки и выведенного из него заряда к моменту максимального обратного тока на стадии обратной накачки (без учета активных потерь). Это обеспечивается тем, что уменьшение емкости конденсатора накачки в 2 раза в течение паузы тока при переключении C_2-C_3 в последовательное соединение компенсируется соответствующим увеличением напряжения на нем.

При длительности обратной накачки, сравнимой с длительностью выходного импульса, для полной передачи энергии из конденсатора накачки в нагрузку необходимо, чтобы прерыватель сбрасывал до момента достижения током своего максимального значения. В этом случае заряд, остающийся в конденсаторе накачки к моменту начала обрыва тока, выводится из него на следующей стадии, когда ток протекает через нагрузку. Момент времени начала отключения тока прерывателем определяется интенсивностью процессов рекомбинации электронно-дырочной плазмы в структурах прерывателя тока.

В экспериментах изменялось число параллельно соединенных SOS-диодов в прерывателе тока, соответственно менялись плотность тока, концентрация плазмы и время ее рекомбинации. Наибольшее значение энергии импульса в нагрузке было получено, когда число SOS-диодов в

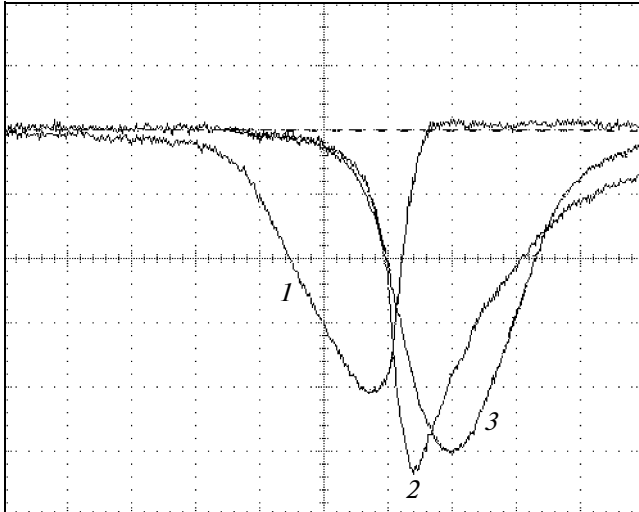


Рис. 3. Осциллограммы обратного тока через один из пяти SOS-диодов (1, масштаб по вертикали 300 А/деление) и напряжения на нагрузке $R_H = 10.7$ Ом (2 и 3, 11 кВ/деление) без шунтирующих конденсаторов C_4 (2) и с ними (3), масштаб по горизонтали 20 нс/деление.

прерывателе тока составляло от 4 до 5. В этом случае обратный ток перед обрывом нарастал до 6 кА за 50–60 нс, а из конденсатора накачки C_2 – C_3 к этому моменту выводилось около 40% накопленного заряда. Оставшиеся ~60% заряда конденсатора, соответствующие остаточной энергии около 3–4 Дж, выводились далее на стадиях обрыва и протекания тока через нагрузку.

Емкость шунтирующих прерыватель тока конденсаторов C_4 также подбиралась экспериментально. Конденсатор C_4 компенсирует индуктивность узла подключения генератора к нагрузке (~100 нГн) и снижает потери энергии в прерывателе тока, поскольку рост напряжения на нем на стадии отключения тока происходит более полого, что также способствует увеличению энергии, передаваемой в нагрузку. Рис. 3 демонстрирует влияние шунтирующих конденсаторов на форму импульса напряжения в нагрузке. Без шунтирующих конденсаторов энергия, выделившаяся в нагрузке, составляет 7.5 Дж, с конденсаторами — 8.6 Дж.

Потери энергии в прерывателе тока оценивались по осциллограммам тока через один из пяти SOS-диодов и напряжения на нем. Полагая, что полный ток прерывателя распределяется по SOS-диодам равномерно, расчетные значения потерь энергии составили 3.0 Дж без конденсаторов C_4 и 1.9 Дж с конденсаторами. Расчетное значение мощности потерь в одном SOS-диоде с шунтирующими конденсаторами при $F = 1$ кГц составляет 380 Вт, что соответствует удельной тепловой нагрузке на охладители элементарных диодов ~0.7 Вт/см².

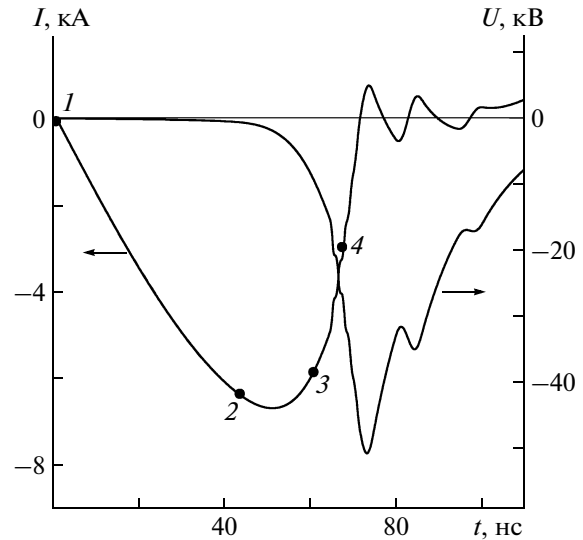


Рис. 4. Расчетные зависимости обратного тока через SOS и напряжения на нагрузке $R_H = 10.7$ Ом от времени в схеме без шунтирующих конденсаторов. Точками 1–4 отмечены моменты времени, для которых на рис. 5 приведены распределения концентрации плазмы и электрического поля в структуре SOS.

3.2. Численное моделирование

Численное моделирование процессов динамики электронно-дырочной плазмы в структурах прерывателя тока проводилось с использованием модели [7]. Модель основана на совместном решении уравнений непрерывности для электронов и дырок, уравнения Пуассона для электрического поля и уравнений Кирхгофа, описывающих работу электрической схемы. Результаты расчетов приведены на рис. 4 и рис. 5.

Расчетные значения амплитуды обрываемого тока и времени обрыва, а также амплитуды импульса напряжения на нагрузке отличались от экспериментальных значений в пределах 10%. Низкая плотность тока прямой накачки в сочетании с микросекундной длительностью процесса приводит к тому, что за счет процессов диффузии и рекомбинации накопленная плазма распределена вдоль структуры практически однородно (кривая 1 на рис. 5).

Величина заряда, прошедшего через конденсатор C_3 и SOS на стадии прямой накачки, составила 0.48 мКл. Величина заряда, оставшегося в структурах прерывателя тока к моменту начала процесса обратной накачки (момент времени 1 на рис. 4), определялась интегрированием распределения плазмы 1 на рис. 5 и составила 0.26 мКл (~54% от величины прошедшего заряда).

Далее плазма из структур выводится обратным током. К моменту максимума обратного тока выводится около 0.2 мКл, а оставшиеся ~0.06 мКл удаляются затем на стадии обрыва тока. Таким

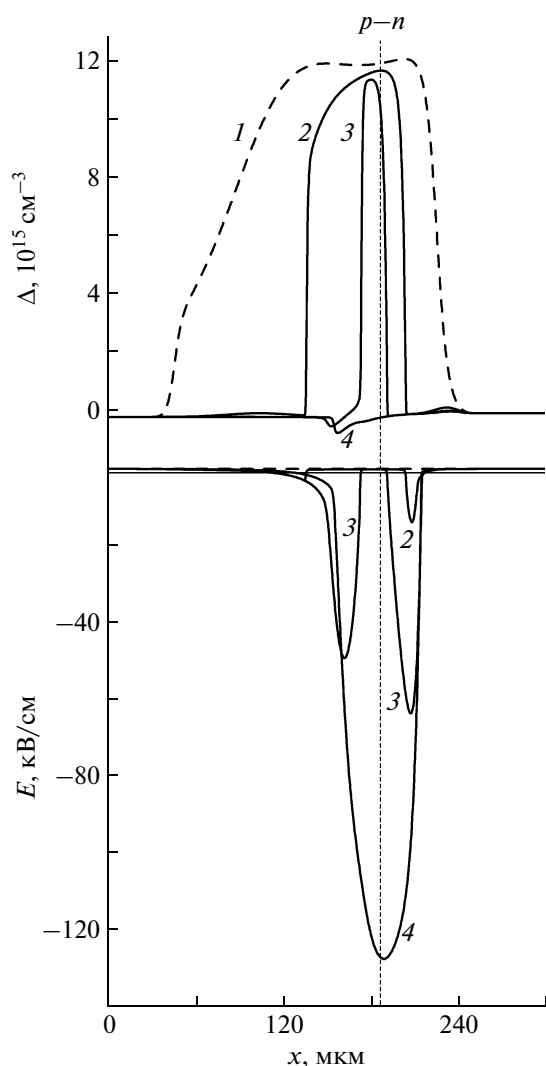


Рис. 5. Пространственные распределения концентрации избыточной плазмы и электрического поля в структуре SOS в моменты времени 1–4, соответствующие точкам на рис. 4.

образом, к моменту начала обрыва тока прерывателем из конденсатора накачки C_2-C_3 выводится около 40% накопленного заряда, что согласуется с экспериментом.

На стадии обратной накачки и обрыва тока можно выделить три основных этапа. На первом этапе до момента времени 2 на рис. 4 избыточная плазма из структуры выводится в основном током диффузии, возникающим вследствие увеличения крутизны фронтов распределения плазмы. Влияние дрейфового тока мало, поэтому малы величины электрического поля в структуре и напряжения на прерывателе.

К моменту времени 2 (рис. 4) за границами плазмы сначала в p -, а затем и в n -области структуры происходит формирование областей сильного поля. Далее границы плазмы смещаются к

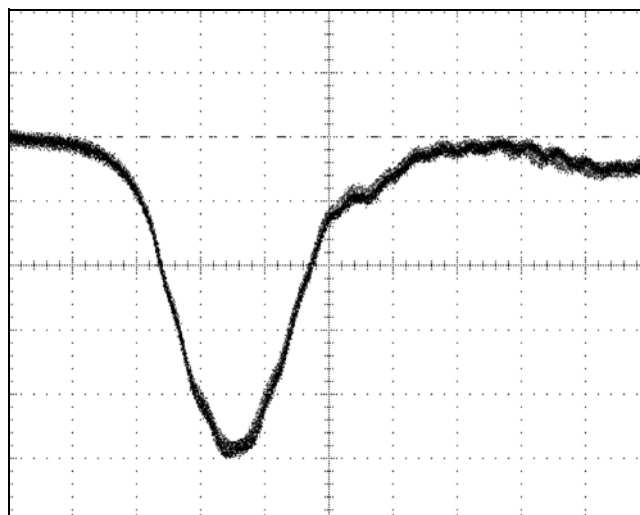


Рис. 6. Осциллограмма тока через водяную нагрузку при $F = 1$ кГц (наложено 437 импульсов). Амплитуда тока – 5.5 кА, сопротивление нагрузки – 9.5 Ом, энергия импульса – 8.8 Дж, масштаб по горизонтали 20 нс/деление.

$p-n$ -переходу, при этом происходит расширение областей сильного поля и рост электрического поля в них. Эта стадия соответствует режиму SOS-эффекта [1].

К моменту времени, когда обратный ток уменьшился примерно в 2 раза (момент времени между точками 3 и 4 на рис. 4), избыточная плазма полностью выводится из структуры. Дальнейший спад тока и рост напряжения обусловлены выносом основных носителей, а механизм отключения тока соответствует режиму работы дрейфового диода с резким восстановлением (д.д.р.в., [2]).

Переход механизма отключения тока от режима SOS к д.д.р.в. на расчетной кривой обратного тока (рис. 4) выражается увеличением крутизны спада тока на заключительном участке стадии обрыва. Однако на экспериментальной осциллограмме (кривая 1 на рис. 3) такого перехода не наблюдается, а стадия спада тока по уровню 0.1–0.9 от амплитуды наоборот имеет наибольшую крутизну на начальном участке отключения. Различие может быть связано с влиянием паразитных параметров контура обратной накачки и прерывателя тока, которые в модели не учитывались.

3.3. Частотный режим и к.п.д. генератора

Испытания генератора на водяную нагрузку в постоянном режиме работы проводились при $F = 1$ кГц, время непрерывной работы в циклах составляло от 30 мин до 2 ч. На рис. 6 приведена характерная осциллограмма тока через водяную нагрузку при $F = 1$ кГц, демонстрирующая стабильность формы выходного импульса (наложе-

Передача энергии по элементам генератора (для C_0 – отбираемая энергия, для остальных элементов – входная)

Элемент схемы	C_0	C_1	C_2-C_3	R_H
Энергия, Дж	13.9–14.0	13.0–13.5	10.5–11.0	8.5–9.0
К.п.д. процесса		~0.95	~0.81	~0.81
Полный к.п.д.			0.60–0.64	

но 437 импульсов). Перегрева элементов генератора и изменения выходных параметров не наблюдалось.

Были проведены оценки потерь энергии при ее передаче по элементам генератора (см. таблицу). Энергия в конденсаторных блоках C_1 и C_2-C_3 оценивалась по осциллограммам тока и напряжения, а отбираемая энергия из C_0 – по спаду напряжения на C_0 за один импульс при отключенном выпрямителе D_1-D_6 . Отбираемая энергия из C_0 не превышала 14 Дж. Высокий к.п.д. заряда конденсатора C_1 (~0.95) обусловлен двумя факторами: малыми потерями энергии в сердечнике трансформатора Tr (перепад индукции не более 1.8 Тл) и, главным образом, работой схемы рекуперации энергии. При отключении схемы рекуперации к.п.д. процесса заряда C_1 снижается до ~0.9, а полный к.п.д. схемы становится менее 0.6.

При работе генератора на водяную нагрузку с частотой $F = 1$ кГц полная потребляемая мощность измерялась счетчиком электроэнергии и составила 14.5 кВт (14.5 Дж в пересчете на один импульс). Это значение хорошо согласуется с величиной энергии, извлекаемой из конденсаторов C_0 (14 Дж). Разница в 0.5 Дж (500 Вт) обусловлена тем, что счетчик учитывает также потери в подводящем кабеле и выпрямителе и энергопотребление всех вспомогательных систем (насосы, вентиляторы и схемы подмагничивания сердечников). При максимальной выходной мощности 8.8–9.0 кВт полный к.п.д. генератора составил 0.60–0.62.

Генератор прошел испытания в компании AquaPure Technologies Ltd. (Израиль), где он работал в составе плазмохимического реактора по очистке воды с помощью стримерного коронного разряда. Частота следования импульсов составляла 800 Гц, время работы – по 5–6 ч в день. Общее количество импульсов за время испытаний составило более 10^9 .

Работа выполнена при финансовой поддержке компании AquaPure Technologies Ltd. (Израиль) и РФФИ (проект 10-08-00312-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рукин С.Н. // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5.
2. Грехов И.В., Месяц Г.А. // УФН. 2005. Т. 175. № 7. С. 735.
3. Васильев П.В., Любутин С.К., Пономарев А.В. и др. // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 7. С. 985.
4. Rukin S.N., Alichkin E.A., Bushlyakov A.I. et al. // Proc. of the 15th International Symposium on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 21–26 September 2008. P. 284.
5. Визирь В.А., Иванов С.В., Манылов В.И. и др. // ПТЭ. 2007. № 2. С. 84.
6. Макеев В.А., Гусельников В.И., Степанов А.В. и др. // ПТЭ. 2006. № 4. С. 88.
7. Рукин С.Н., Цыранов С.Н. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 1. С. 43.