

УДК 621.373

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2007 г. В. Б. Воронков, И. В. Грехов, А. К. Козлов, С. В. Коротков, А. Л. Степанянц

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26
Поступила в редакцию 13.09.2006 г.*

Описан высокочастотный генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе сборки дрейфовых диодов с резким восстановлением. Приведена схема формирования прямого и обратного токов дрейфовых диодов с использованием параллельных транзисторных цепей. Приведены результаты испытаний генератора. На нагрузке 50 Ом получены импульсы напряжения с амплитудой 2.5 кВ и длительностью 2 нс при частоте повторения импульсов 300 кГц.

PACS: 84.30.Jc, 84.70.+p, 85.30.-z, 85.30.De

Одним из наиболее перспективных способов формирования высоковольтных импульсов напряжения наносекундного диапазона является использование дрейфовых диодов с резким восстановлением (д.д.р.в.) [1, 2] для обрыва тока в цепи с индуктивным накопителем энергии.

Конструктивно д.д.р.в. представляет собой кремниевый диод с глубоким диффузионным p^1-n -переходом. Наносекундный обрыв тока обеспечивается в результате создания определенных коммутационных условий. Сначала через д.д.р.в. необходимо пропустить короткий импульс прямого тока, позволяющий накопить в структуре прибора заряд электронов и дырок. После окончания прямого тока через д.д.р.в. коммутируется быстронарастающий импульс обратного тока, обеспечивающий освобождение базовых областей от накопленного заряда.

При протекании обратного тока в структуре д.д.р.в. формируются движущиеся навстречу друг другу фронты электронной и дырочной плазмы. При оптимальной (100–300 А/см²) плотности и малой (десятки наносекунд) длительности прямого и обратного тока они встречаются в плоскости p^1-n -перехода. После этого на p^1-n -переходе формируется область объемного заряда, расширяющаяся за счет перемещения основных носителей в противоположных направлениях. В результате сопротивление прибора резко возрастает и осуществляется переключение тока в параллельную цепь нагрузки. При этом на д.д.р.в. и на нагрузке формируется импульс напряжения, скорость нарастания которого определяется скоростью обрыва тока в д.д.р.в.

Д.д.р.в. могут соединяться последовательно в высоковольтные сборки. Процесс выключения д.д.р.в. в таких сборках происходит синхронно,

так как импульс тока, проходящий через всю сборку, вводит практически одинаковый заряд во все приборы.

Амплитуда и длительность формируемого на нагрузке импульса напряжения зависят от величины обратного тока в момент обрыва, от сопротивления нагрузки, а также от индуктивности разрядного контура. Форма импульса в значительной степени зависит также от диаметра и конструкции д.д.р.в. Так, например, укорочение длительности фронта импульса напряжения обеспечивается уменьшением диаметра (а с ним и емкости) д.д.р.в. Однако при этом возрастает сопротивление д.д.р.в., что приводит к росту потерь и к увеличению нагрева прибора. Рост потерь наблюдается также при увеличении удельного сопротивления материала д.д.р.в.

Схема рассматриваемого высокочастотного д.д.р.в.-генератора высоковольтных наносекундных импульсов приведена на рис. 1.

Основным элементом генератора является блок последовательно соединенных д.д.р.в. Формирование необходимых для функционирования д.д.р.в. импульсов прямого и обратного тока производится с помощью трехступенчатой транзисторной схемы.

Первая ступень, собранная на транзисторах $T_{1a}, T_{1б}$, служит для предварительного заряда двух одинаковых накопительных конденсаторов $C_{2a}, C_{2б}$ до напряжения, удвоенного по отношению к напряжению источника питания. Время заряда C_2 составляет ~500 нс.

Спустя ~1 мкс после выключения транзисторов $T_{1a}, T_{1б}$ осуществляется включение транзисторов $T_{2a}, T_{2б}$ второй ступени. В результате конденсаторы C_2 разряжаются до нуля, а шесть конденсаторов $C_{3(a-e)}$ ($C_2 = 3C_3$) быстро (~100 нс) заряжаются

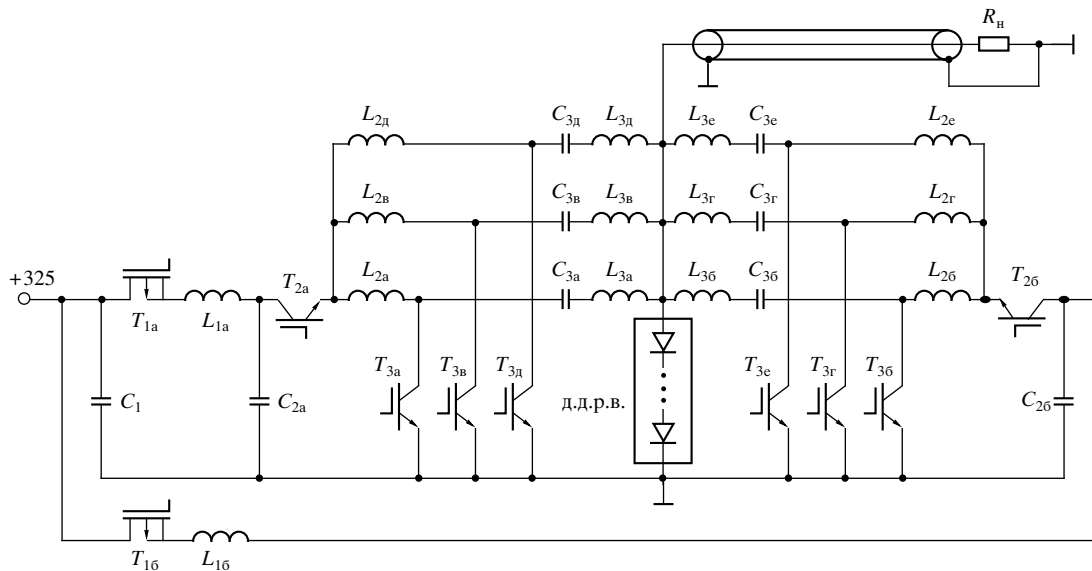


Рис. 1. Электрическая схема высокочастотного д.д.р.в.-генератора высоковольтных наносекундных импульсов. T_1 – 2SK1120, T_2, T_3 – IRG4PF50WD; $L_1 = 1800$ нГн, $L_2 = 6000$ нГн, $L_3 = 70$ нГн; $C_1 = 330$ нФ, $C_2 = 1.63$ нФ, $C_3 = 0.44$ нФ.

до напряжения, близкого к исходному напряжению заряда C_2 , по цепям, включающим индуктивности $L_{2(a-e)}$, $L_{3(a-e)}$ и блок д.д.р.в. Протекающий через д.д.р.в. в прямом направлении ток с амплитудой ~ 25 А обеспечивает накопление заряда в их структурах.

В момент окончания тока заряда конденсаторов $C_{3(a-e)}$ включаются шесть транзисторов $T_{3(a-e)}$, и конденсаторы C_3 начинают перезаряжаться через индуктивности L_3 и блок д.д.р.в. Ток через д.д.р.в. в обратном направлении нарастает до максимального значения 110 А за 20 нс. К этому моменту базовые области д.д.р.в. полностью освобождаются от накопленного ранее заряда, ток через д.д.р.в. обрывается и переключается в цепь нагрузки R_n , подключенной к блоку д.д.р.в. через высоковольтный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом.

На рис. 2 (сплошная линия) приведена осциллограмма выходного импульса напряжения на на-

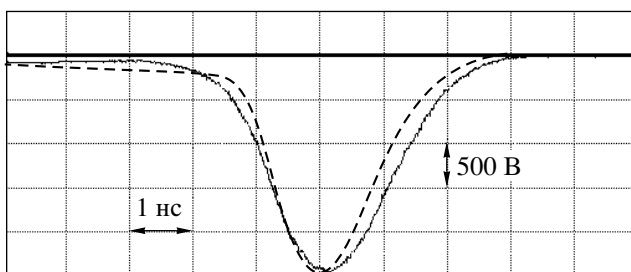


Рис. 2. Импульс напряжения на нагрузке: сплошная линия – осциллограмма, пунктирная – расчетная кривая.

грузке 50 Ом, полученная на частоте 300 кГц. Амплитуда импульса составляет ~ 2.5 кВ, а длительность (по уровню 0.5) около 2 нс. Участок сравнительно медленного нарастания напряжения соответствует увеличению активного сопротивления д.д.р.в. в процессе освобождения базовых областей от накопленного заряда.

Блок д.д.р.в. состоял из шести последовательно включенных диодов с диаметром полупроводниковой структуры 7 мм, изготовленных из кремния с удельным сопротивлением 5 Ом \cdot см.

Для охлаждения д.д.р.в. использовались обдуваемые вентилятором лепестковые радиаторы. Каждый радиатор имел 12 лепестков, расходящихся радиально от центральной круглой площадки, к которой припаивалась сборка из двух д.д.р.в. Радиаторы с припаянными д.д.р.в. были прижаты друг к другу. Для уменьшения индуктивности использовались обратные токопроводы, которые были пропущены между лепестками радиаторов. Температура радиаторов при длительной работе на максимальной частоте 300 кГц не превышала 70°C.

Для оптимизации параметров электрических цепей генератора использовалось компьютерное моделирование. Модель д.д.р.в. состояла из последовательно соединенных емкости и сопротивления, которые изменялись в зависимости от величины накопленного в структуре прибора заряда в соответствии с методикой, изложенной в работе [3]. На рис. 2 (пунктирная линия) приведена эпюра выходного импульса, полученная методом компьютерного моделирования после корректировки основных расчетных коэффициентов по результатам экспериментов. Форма импульса

близка к форме импульса на осциллограмме рис. 2 (сплошная линия).

Питание генератора осуществлялось от постоянного напряжения, которое могло изменяться в пределах 36–24 В. Уровни напряжения 325 В для питания силовых цепей и 18 В для питания цепей управления обеспечивались с помощью высокочастотных транзисторных преобразователей. Размеры генератора составляют $290 \times 150 \times 90$ мм.

Импульсы управления транзисторами T_1 – T_3 формировались в схеме управления, собранной на логических элементах серии 74, и усиливались с помощью мощных драйверов МІС4452СТ. На транзисторы T_1 , T_2 они передавались через кабельные импульсные трансформаторы с малой индуктивностью рассеивания, а на транзисторы T_3 – непосредственно. Быстрый (единицы наносекунд) за-

ряд входных емкостей транзисторов обеспечивал высокую скорость нарастания силового тока.

Представленная работа показывает возможности формирования высоковольтных наносекундных импульсов с высокой частотой повторения с помощью малогабаритных генераторов на основе д.д.р.в с питанием от низковольтного источника напряжения – переносного аккумулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 7. С. 435.
2. Grekhov I., Efanov V., Kardo-Sysoev A., Shenderey S. // Sol. St. El. 1985. V. 28. № 6. P. 597.
3. Кюрегян А.С. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 6. С. 57.