

УДК 621.373.5

Б. В. Иванов, А. А. Смирнов, С. А. Шевченко
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет "ЛЭТИ"
 А. Ф. Кардо-Сысоев
 Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Формирование наносекундных импульсов напряжения дрейфовыми диодами с резким восстановлением

Представлены результаты экспериментального исследования переключения кремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) в структуре генератора наносекундных импульсов напряжения. Промоделирована работа ДДРВ в составе генератора импульсов напряжения с целью выбора оптимальных режимов работы дрейфового диода. Результаты численного расчета показали хорошее совпадение с экспериментом. Представлены зависимости потерь заряда от тока накачки, длительности накачки диода электронно-дырочной плазмой, а также от времени жизни неравновесных носителей заряда.

Дрейфовые диоды с резким восстановлением, наносекундные импульсы напряжения, скорость переключения, ток инжекции, время жизни неравновесных носителей заряда, пьедестал импульса

Наилучшим быстродействием обладают двух-электродные ключевые приборы вследствие отсутствия дополнительной емкости, присущей полупроводниковым приборам с управляющим электродом. Среди диодных коммутаторов особое место занимают дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ), использование которых в качестве быстродействующих ключей впервые было продемонстрировано сотрудниками Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН [1].

Механизм работы ДДРВ заключается в следующем. В первый момент времени через диодную структуру в прямом направлении протекает импульс тока I_+ длительностью t_+ , в результате чего вблизи эмиттерных областей накапливается электронно-дырочная плазма, обеспечивающая высокопроводящее состояние диода. На втором этапе через диод пропускают импульс обратного тока I_- длительностью t_- , что приводит к рассасыванию электронно-дырочной плазмы в базовой области. При выполнении условия

$$t_+ + t_- < \tau_{ж}, \quad (1)$$

где $\tau_{ж}$ – время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в базе диода, и оптимальном токе и заряде накачки диод переходит в запертое состояние. При параллельном соединении диода и нагрузки формируется выходной, быстро нарастающий импульс напряжения.

Известно [2], [3], что в выходном импульсе, сформированном ДДРВ, можно выделить два этапа. Первый этап представляет собой медленно нарастающую часть фронта (пьедестал), когда дифференциальное сопротивление диода мало и напряжение на нем практически не зависит от нагрузки. Второй этап – процесс быстрого восстановления, когда диод резко переходит в запертое состояние. Появление пьедестала вызвано потерей накопленного в процессе протекания прямого тока заряда, так как при формировании импульса с пьедесталом этап полного восстановления происходит раньше, чем наступает равенство зарядов, прошедших через диод при протекании прямого и обратного токов.

Целью настоящей статьи является исследование зависимости амплитуды и длительности пьедестала импульсов напряжения, формируемых кремниевыми ДДРВ, от времени накачки прямым током t_+ , плотности прямого тока j_+ и времени жизни неравновесных носителей заряда.

Экспериментальная часть. В качестве исследуемых ДДРВ использовались кремниевые диодные сборки, изготовленные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. Максимальное рабочее напряжение сборки из двух последовательно соединенных ДДРВ составляло 2400 В.

Для правильной работы ДДРВ в схеме генератора импульсов напряжения необходимо обеспечить протекание через диодную структуру тока

накачки оптимальной величины, которая определяется источником питания и первичным транзисторным ключом. Минимально необходимый ток накачки определяется исходя из напряжения U , формируемого диодом на нагрузке $R_H = 50 \text{ Ом}$:

$$I_{\text{нак}} = U/R_H = 2400/50 = 48 \text{ А.}$$

Ключ выполнен на быстродействующем MOSFET-транзисторе IXZ4DF12N100 с максимальным отдаваемым импульсным током 72 А (без учета КПД)¹. Потери в транзисторном ключе при его коммутации определяются как [4]

$$E_{\text{кж}} = \int U_{\text{ст}}(t) I_{\text{ст}}(t) dt, \quad (2)$$

где $U_{\text{ст}}$, $I_{\text{ст}}$ – напряжение на стоке и ток стока транзистора соответственно.

Знание КПД транзисторного ключа нужно для определения необходимого количества первичных ключей накачки ДДРВ. КПД определялось в схеме, обеспечивающей работу ключа от внешнего задающего генератора, формирующего запускающие импульсы напряжения. При помощи цифрового осциллографа снимались временные зависимости напряжения на стоке транзистора и на безындуктивном токовом шунте, после чего по формуле (2) производилась обработка данных. Определенная таким образом эффективность MOSFET-транзистора IXZ4DF12N100 составила около 60 %. С учетом полученного значения для накачки ДДРВ необходимо два транзисторных ключа.

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема с двумя включенными параллельно транзисторными ключами, в которой исследовались кремниевые ДДРВ. Принцип работы схемы заключается в следующем. При поступлении от

задающего генератора G_2 управляющего импульса длительностью $T_{\text{и}}$ открываются транзисторные ключи S_1 и S_2 , через диод начинает протекать прямой ток I_+ , накачивая его электронно-дырочной плазмой. По окончании импульса $T_{\text{и}}$ полярность на диоде меняется, однако еще некоторое время диод находится в проводящем состоянии и через него течет обратный ток I_- . Когда вся электронно-дырочная плазма будет выведена из базы диода обратным током, диод резко переходит в запертое состояние и ток, текущий через накопительные индуктивности L_3 и L_4 , перебрасывается в подключенную параллельно нагрузку.

Для уточнения режимов работы схемы и номиналов элементов проведено схемотехническое моделирование в пакете TCAD Synopsys².

На первом этапе проведен численный расчет схемы в отсутствие ДДРВ. Расчетная зависимость напряжения на стоке транзистора $U_{\text{ст}}(t)$ представлена на рис. 2 кривой 1. Кривой 2 на том же рисунке показана зависимость, построенная по результатам эксперимента. Зависимости демонстрируют хорошее совпадение результатов моделирования и эксперимента.

На втором этапе схема промоделирована с учетом физико-топологических параметров кремниевых ДДРВ. Результаты моделирования и эксперимента представлены на рис. 3: штриховая линия – расчетная зависимость $U_{\text{ст}}(t)$, сплошные линии – напряжение на ДДРВ, причем кривой 1 показана расчетная зависимость, а кривой 2 – зависимость, построенная по результатам эксперимента. Параметры формируемого схемой импульса следующие: длительность на полуширине

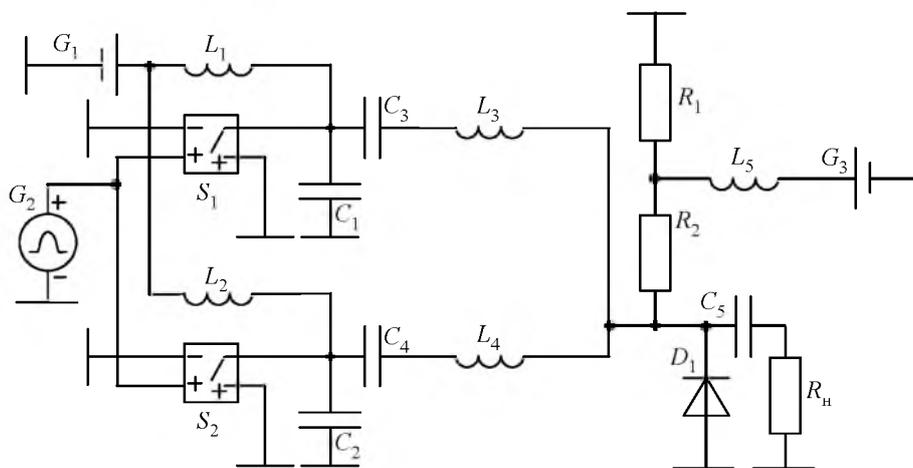


Рис. 1

¹ <http://ixapps.ixys.com/Datasheet/ixz4df12n100.pdf>

² http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/CapsuleModule/sentaurus_ds.pdf

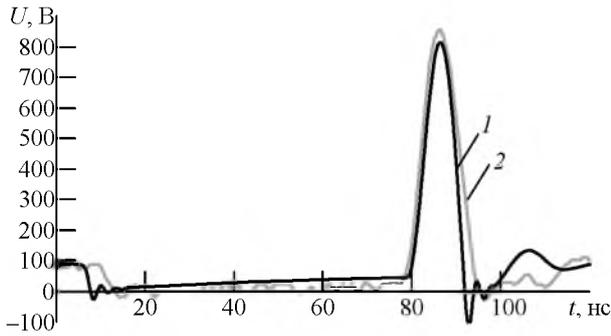


Рис. 2

2.4 нс, скорость нарастания переднего фронта по уровню 0.1...0.9 составляет 0.9 кВ/нс, амплитуда – 2180 В. Из рис. 3 следует, что коэффициент сжатия импульса (отношение длительности импульса на стоке транзистора на уровне полуширины к длительности импульса, сформированного ДДРВ) составляет около 5. Приведенные параметры близки к предельным для рассмотренного типа кремниевого ДДРВ.

Важной характеристикой ДДРВ-ключа является время жизни инжектированных ННЗ, которое должно удовлетворять условию (1), т. е. быть достаточно большим для создания с использованием накачки короткими импульсами узких пространственных распределений инжектированных в базу диода неравновесных носителей заряда. Поэтому выполнены измерения времени жизни ННЗ в ДДРВ-ключе по так называемому методу Госсика [5] (по спаду послеинжекционной ЭДС). На рис. 4 представлена осциллограмма напряжения на диоде во время его накачки прямым током и последующего отключения.

Скорость спада ЭДС на линейном участке осциллограммы напряжения обратно пропорциональна времени жизни инжектированных ННЗ:

$$\Delta U/\Delta t = (2kT/q)(1/\tau_{ж}), \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – элементарный заряд.

Рассчитанное на основании (3) время жизни ННЗ в ДДРВ составило 0.48 мкс.

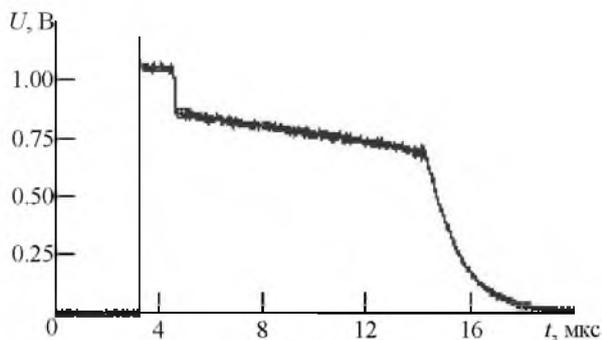


Рис. 4

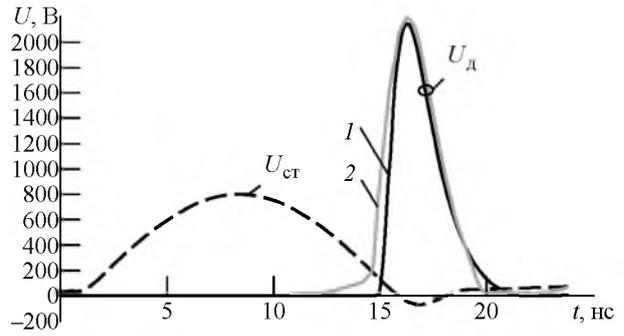


Рис. 3

Для определения зависимости уровня и длительности пьедестала импульса от условий накачки ДДРВ исследовались в структуре генератора импульсов напряжения, на вход которого подавался запускающий импульс длительностью 120...280 нс, оптимальный по результатам моделирования для данного типа ДДРВ. Плотность тока j_- через диоды варьировалась от оптимального значения для данного типа ДДРВ до удвоенного значения. Как известно [6], оптимальная величина j_- выбирается исходя из условия $j_- = I_-/S = qN_d v_s$, где S – площадь диода; N_d – концентрация доноров в базе диода; v_s – насыщенная скорость движения электронов в полупроводнике (для кремния $v_s = 10^7$ см/с).

На рис. 5 представлены осциллограммы выходных импульсов диода при разных временах прямой накачки t_+ . Для исключения влияния вносимого на этапе прямой накачки заряда Q_+ при увеличении времени накачки уменьшался прямой ток I_+ через диод изменением напряжения постоянного источника питания G_1 .

Из представленных на рис. 5 осциллограмм следует, что увеличение длительности накачивающего ДДРВ импульса t_+ от 120 до 280 нс (при фиксированной амплитуде импульса) ведет к возрастанию амплитуды пьедестала и его длительности. Указанная зависимость может быть объяснена увеличением потерь заряда вследствие рекомбинации ННЗ, инжектированных в базу диода на этапе пропускания прямого тока. Для проверки данного предположения был исследован при тех же самых условиях другой кремниевый ДДРВ, время жизни ННЗ которого, измеренное по спаду послеинжекционной ЭДС, составляло $\tau_{ж} = 2$ мкс. На рис. 6 показаны осциллограммы напряжения, снятые при разных временах накачки.

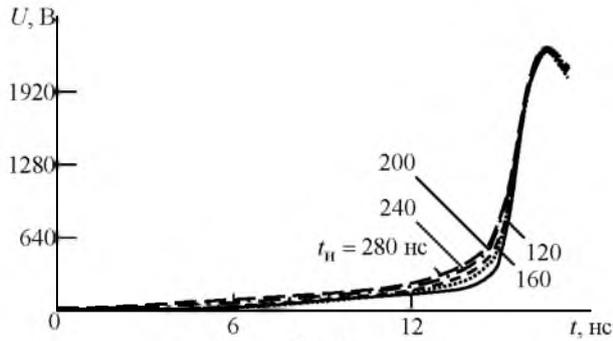


Рис. 5

Как видно из рис. 6, при увеличении t_+ от 120 до 210 нс амплитуда импульса возрастает от 1670 до 2190 В при практически неменяющемся пьедестале (медленно нарастающей части переднего фронта). Установленный факт свидетельствует о значительном влиянии на амплитудно-временные параметры пьедестала времени прямой накачки t_+ при соизмеримых значениях t_+ и времени жизни ННЗ в ДДРВ.

Исследование зависимости относительного напряжения пьедестала от вносимого на этапе протекания через ДДРВ прямого тока I_+ заряда Q_+ показало, что при превышении оптимального для конкретного типа ДДРВ значения плотности тока j_+ происходит "перекачка" диода, в результате чего амплитуда пьедестала возрастает. По-видимому, это связано с нарушением нестационарного пространственного распределения инжектированных носителей, в результате чего снижается скорость вывода электронно-дырочной плазмы на этапе протекания обратного тока j_- , приводящая к росту потерь заряда и к увеличению площади пьедестала.

По результатам проведенных экспериментальных исследований работы кремниевых ДДРВ в

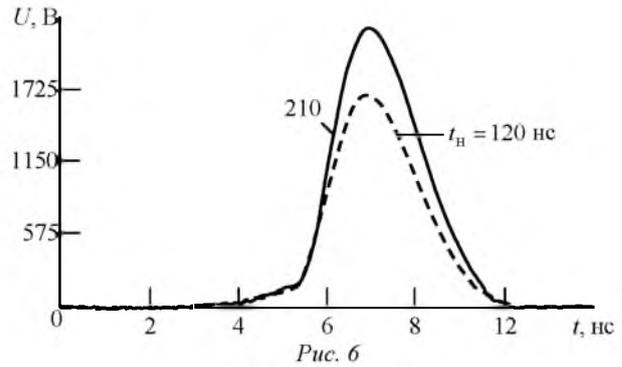


Рис. 6

составе генератора наносекундных импульсов напряжения установлено следующее:

- возникновение пьедестала (медленно нарастающей части переднего фронта) выходного импульса напряжения связано с потерей неравновесных носителей заряда, инжектированных в ДДРВ на этапе протекания прямого тока, которая зависит от длительности прямой накачки t_+ по отношению к времени жизни ННЗ;

- увеличение времени протекания прямого тока I_+ до значения, близкого к времени жизни неравновесных носителей заряда ($\tau_{ж}$), ведет к росту амплитуды и длительности пьедестала, что снижает КПД генератора, формирующего наносекундные импульсы напряжения;

- при $t_+ \ll \tau_{ж}$ увеличение плотности тока j_+ , протекающего через ДДРВ на этапе прямой накачки, свыше оптимального значения, определяемого площадью и уровнем легирования базы ДДРВ, приводит к возрастанию напряжения пьедестала, что, по-видимому, связано с нарушением оптимального создания узких (нестационарных) пространственных распределений инжектированных носителей в ДДРВ при его "перекачке" и вывода их из базы с насыщенной скоростью дрейфа на этапе высокой обратной проводимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах с дрейфовым механизмом восстановления напряжения / И. В. Грехов, В. М. Ефанов, А. Ф. Кардо-Сысоев, С. В. Шендерей // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9, № 7. С. 435-439.
2. Зиенко С. И. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения серийными полупроводниковыми диодами с дрейфовым механизмом восстановления напряжения // ПТЭ. 1984. № 4. С. 100-103.
3. Брылевский В. И., Грехов И. В., Ефанов В. М. Полупроводниковые формователи мощных кило-

1. вольтных наносекундных импульсов // ПТЭ. 1988. № 1. С. 106-110.
4. Merensky L. M., Kardo-Sysoev A. F., Shmilovitz D. Efficiency study of a 2.2 kV, 1 ns, 1 MHz pulsed power generator based on a drift-step-recovery diode // IEEE Trans. plasma science. 2013. Vol. PS-41, № 11. P. 3138-3142.
5. Gossick B. R. On the transient behavior of semiconductor rectifiers // J. appl. phys. 1955. Vol. 26. P. 1356-1365.
6. Мощный полупроводниковый генератор наносекундных импульсов / И. В. Грехов, В. М. Ефанов, А. Ф. Кардо-Сысоев, С. В. Шендерей // ПТЭ. 1986. № 1. С. 93-94.

B. V. Ivanov, A. A. Smirnov, S. A. Shevchenko
Saint Petersburg state electrotechnical university "LETI"
A. F. Kardo-Sysoev
Ioffe institute of RAS (Saint Petersburg)

Formation of nanosecond voltage pulse by drift diodes with sharp restoration

Results of an experimental study of switching of silicon drift diodes with sharp restoration (DDSR) in structure of the generator of voltage nanosecond impulses are presented. The working of DDSR in the voltage impulses generator is modeled for a choice of optimum operating modes of the drift diode. Results of numerical calculation showed good coincidence to experiment. Dependences of charge losses from rating current, diode rating duration by electron-hole plasma, and also from charge time of life no equilibrium carriers are presented.

Drift diodes with sharp restoration, voltage nanosecond pulses, switching speed, injection current, lifetime of no equilibrium charge carriers, the pulse pedestal

Статья поступила в редакцию 19 июня 2014 г.