

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДИОДОВ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА*

А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, И. С. Коровченко,
В. А. Степкин, Г. К. Усков

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 02.08.2016 г.

Аннотация. В работе проведено экспериментальное исследование особенностей работы диода с накоплением заряда при генерации сверхкоротких импульсов. Исследование проводилось для различных режимов работы диодов. Показано, что накопление заряда в его активной области обуславливает появление разности потенциалов между анодом и катодом на стадии высокой обратной проводимости. Также представлены результаты исследования работы нескольких последовательно включенных ДНЗ. Результаты работы могут быть использованы при разработке генераторов сверхкоротких импульсных сигналов на базе диодов с накоплением заряда.

Ключевые слова: диод с накоплением заряда, сверхширокополосные сигналы, суб-наносекундный импульс, генератор сверхкоротких импульсов.

THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SWITCHING FEATURES OF STEP RECOVERY DIODES

A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, I. S. Korovchenko, V. A. Stepkin, G. K. Uskov

Abstract. The experimental research of the step recovery diodes' (srd) features during ultra-short pulses generation was conducted. The research was made for different diodes' modes. It was shown, that the charge storage in the active region causes the appearance of the difference of potentials between anode and cathode while the high reverse conduction phase. Also in this paper, the results of using the several diodes in the serial connection instead of the single one were submitted. The results of the research can be used for ultra-short pulses generator based on srd development.

Keywords: step recovery diode, ultra-wide band signals, sub-nanosecond pulses, ultra-short pulse generator.

ВВЕДЕНИЕ

Диоды с накоплением заряда (ДНЗ) широко используются в качестве полупроводниковых размыкателей тока в формирователях сверхкоротких импульсных сигналов, длительность которых составляет менее 1 нс. В последнее время интерес к ДНЗ заметно вырос в связи с возможностью их применения в портативных СШП генераторах с напряжениями питания, не

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых — докторов наук (МД-7902.2016.9).

© Бобрешов А. М., Жабин А. С., Коровченко И. С., Степкин В. А., Усков Г. К., 2016

превышающих десятка вольт. Основные параметры сверхкоротких импульсов (СКИ) определяются не только схемотехническим решением формирователя, но и режимом работы диода в его составе [17].

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование особенностей работы ДНЗ в режиме переключения. В работе экспериментально показано, что на стадии высокой обратной проводимости на выводах диода возникает разница потенциалов (φ_d), вызванная перераспределением носителей заряда в полупроводниковой структуре. Учет этого особенно важен при разработке низковольтных формирователей импульсных сигналов, где она может существенно сказываться на работе устройства в целом.

ПРОЦЕСС ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДИОДА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА

В формирователях СКИ диод с накоплением заряда выполняет функцию размыкателя тока [8]. Обрыв тока в цепи диода происходит при переключении ДНЗ из проводящего состояния в состояние с высоким обратным сопротивлением. Длительность этого процесса зависит от конструктивных особенностей диода с накоплением заряда и может составлять от десятков пикосекунд до десятков наносекунд [8]. Как правило, полупроводниковую структуру диода с накоплением заряда принято рассматривать как P^+IN^+ структуру, в которой I область (активная область) собственного типа проводимости находится между сильнолегированными областями P^+ и N^+ типа. Для уменьшения времени переключения ДНЗ протяженность I -области уменьшают до нескольких микрометров [3]. Разница в концентрациях примесей на границах областей P^+IN^+ структуры приводит к возникновению диффузионных токов. Основные носители заряда из легированных областей проникают в высокоомную область, оставляя нескомпенсированные ионы примеси. Таким образом, у границы перехода P^+I образуется отрицательный объемный заряд, а у границы перехода IN^+ - положительный. Эти объемные заряды создают электростатическое поле, направленное от катода к аноду. Если к диоду приложить внешнее поле, противоположное по направлению и большее по величине, чем поле, созданное объемными зарядами, то ДНЗ окажется смещенным в прямом направлении. При этом будет иметь место инжекция основных носителей заряда из легированных областей в I область. Рост концентрации дырок и электронов в I области ограничивается утечкой носителей заряда в легированные области и их рекомбинацией. Спустя некоторое время процессы инжекции, утечки и рекомбинации скомпенсируют друг друга, и наступит состояние динамического равновесия, при котором распределение концентрации носителей заряда в полупроводниковой структуре диода не меняется со временем. При изменении смещения ДНЗ на противоположное через него потечет обратный ток, приводя к экстракции накопленного заряда из активной области. Диод при этом находится в состоянии с высокой проводимостью. Его переключение начинается в момент времени, когда концентрация носителей заряда на одной из границ областей станет равной нулю. В течение времени переключения оставшиеся электроны и дырки покидают I область. Обратное сопротивление диода при этом стремительно возрастает [9, 10].

Рассмотрим подробнее динамику зарядов, составляющих накопленную плазму, в случае отсутствия обратного смещения. Электрическое поле, созданное объемными зарядами у границ переходов P^+I и IN^+ , вызывает искривление энергетических зон и возникновение потенциального барьера. В работе был проведен анализ процессов в структуре ДНЗ с помощью системы моделирования технологических процессов и полупроводниковых приборов компании Silvaco. Протяженности областей P^+ , I , N^+ были взяты равными 10, 7 и 8 микрометров, при концентрациях донорных и акцепторных примесей легированных областей - 10^{19} см⁻³. Распределение электростатического потенциала ϕ , вдоль полупроводниковой структуры диода представлено на рисунке 1. Здесь также представлены энергетические уровни дна зоны проводимости и потолка зоны валентности. Как видно из рисунка, электронам, находящимся

в активной области ДНЗ, энергетически выгодно вернуться в N^+ область, а дыркам - в P^+ . В результате такого перераспределения носителей заряда на катоде диода образуется отрицательный потенциал, а на аноде положительный. ДНЗ при этом будет вести себя подобно заряженной емкости. Если рассматривать диод как изолированную систему, то концентрация накопленного в нем заряда будет постепенно убывать за счет рекомбинации [9]. Однако если последовательно с диодом включить нагрузку, то в образовавшейся цепи в результате экстракции электронов и дырок из активной области ДНЗ будет протекать ток в направлении от катода к аноду. Обрыв тока произойдет, когда весь накопленный заряд покинет I область, и диод переключится в состояние с высоким обратным сопротивлением.

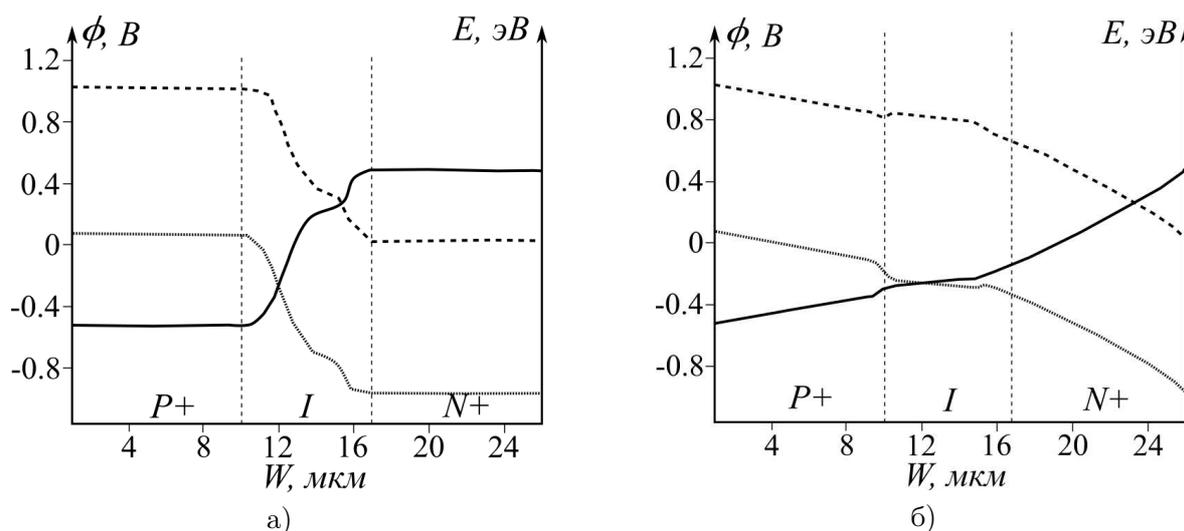


Рис. 1. Зонная диаграмма (дно зоны проводимости — пунктир, потолок валентной зоны — точки) и распределение электростатического потенциала (сплошная линия) в полупроводниковой структуре ДНЗ в состоянии термодинамического равновесия (а) и после накачки I области электронно-дырочной плазмой (б).

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования описанных выше процессов был проведен анализ экспериментально полученных переходных характеристик диода с накоплением заряда. Измерение этих характеристик производилось с помощью схемы, представленной на рисунке 2. В данной работе проводились исследования особенностей переключения отечественных диодов с накоплением заряда 2А609Б и 1Д524Б. Выбор приборов связан с их частым применением в качестве элементной базы современных формирователей сверхкоротких импульсных сигналов в системах связи и радиолокации. При закрытом состоянии транзистора VT диод VD_1 оказывался смещенным в прямом направлении, и через него протекал прямой ток от источника напряжения V_1 , величина которого ограничивалась резистором R_1 . В данной работе напряжение источника питания V_1 варьировалось в диапазоне от 1В до 7В с шагом 0,5В. Напряжение смещения ДНЗ менялось на отрицательное при открывании транзистора VT запускающим сигналом с генератора импульсов Agilent 81104А. Величина обратного тока через диод задавалась напряжением источника питания V_2 . Для измерения переходных характеристик исследуемых диодов в отсутствие обратного смещения, исток транзистора VT был соединен с общим проводом. Поскольку сопротивление ключа в открытом состоянии значительно меньше сопротивления нагрузки, потенциал анода отличался от общего потенциала на пренебрежимо малую величину. Таким образом, измеряемое напряжение на нагрузке совпадало

с разностью потенциалов на выводах ДНЗ, обусловленной накопленным зарядом и ранее обозначенной как φ_d . Ток через ДНЗ при прямом и обратном смещении регистрировались на нагрузке R_3 стробоскопическим осциллографом DCA-X86100D с полосой пропускания 20 ГГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В случае, когда на диод не подавалось обратное смещение, величина накопленного заряда убывала за счет рекомбинационных взаимодействий и электрического поля, созданного объемными зарядами в легированных областях P^+IN^+ структуры. Полученная экспериментально зависимость $\varphi_d(t)$ в отсутствии обратного смещения, представлена на рисунке 3. До момента времени $t_1 = 9$ нс диод был смещен в прямом направлении и находился в состоянии динамического равновесия. После замыкания ключа VT через диод протекал обратный ток. Величина φ_d при этом монотонно убывала, после чего диод переключался в закрытое состояние. Возникновение разности потенциалов на выводах диода после замыкания ключа связано с перераспределением носителей заряда, составляющих накопленную плазму в I области, вследствие наличия барьеров в полупроводниковой структуре диода. Дырки из активной области диода двигались в направлении анода, а электроны - в направлении катода, создавая при этом неравновесные объемные заряды в легированных областях.

Для анализа экспериментальных данных была введена величина U_d , соответствующая максимальному по модулю значению разности потенциалов на выводах ДНЗ в состоянии высокой обратной проводимости. Как видно из рисунка 3 величина U_d , не зависит от прямого тока. С ростом прямого тока растет накопленный заряд в I области, что влияет на длительность процесса его экстракции и определяет момент времени, в который происходит переключение ДНЗ. В работе также произведено исследование зависимости U_d от приложенного обратного смещения. Для этого задавались следующие значения напряжения источника питания V_2 : 0В, -5В, -10В и -15В. Полученная зависимость представлена на рисунке 4. Видно, что с ростом обратного смещения V_2 , значение U_d уменьшалось. Для диодов 2А609В изменение величины U_d было незначительное и составило менее 10%. Однако разность потенциалов на выводах диода 1Д524Б уменьшилась на 47% при увеличении отрицательного напряжения источника питания V_2 от 0В до -15В. Разница в зависимостях U_d от величины обратного напряжения для разных моделей ДНЗ, вероятно, обусловлена различиями в конструкциях приборов. Увеличение отрицательного напряжения V_2 , способствует более равномерному распределению неосновных носителей заряда у границ областей [11, 13]. Так как разность потенциалов φ_d обусловлена объемными зарядами в легированных областях, то с уменьшением градиента их концентрации будет происходить убывание величины U_d . Кроме того, для разных моделей ДНЗ с ростом напряженности внешнего поля количество носителей заряда, которые успеют покинуть активную область за время переключения прямого смещения на обратное смещение, также может отличаться.

Экспериментальное исследование процесса переключения нескольких последовательно включенных ДНЗ производилось также по схеме, изображенной на рисунке 2. При этом на стадии высокой обратной проводимости между крайними выводами серии диодов измерялась разность потенциалов φ_{ds} . На рисунке 5 приведены зависимости значения величины U_{ds} , соответствующей максимальному по модулю значению φ_{ds} на стадии высокой обратной проводимости ДНЗ, от количества используемых диодов. Как видно из графиков, величина разности потенциалов увеличивалась пропорционально количеству ДНЗ.

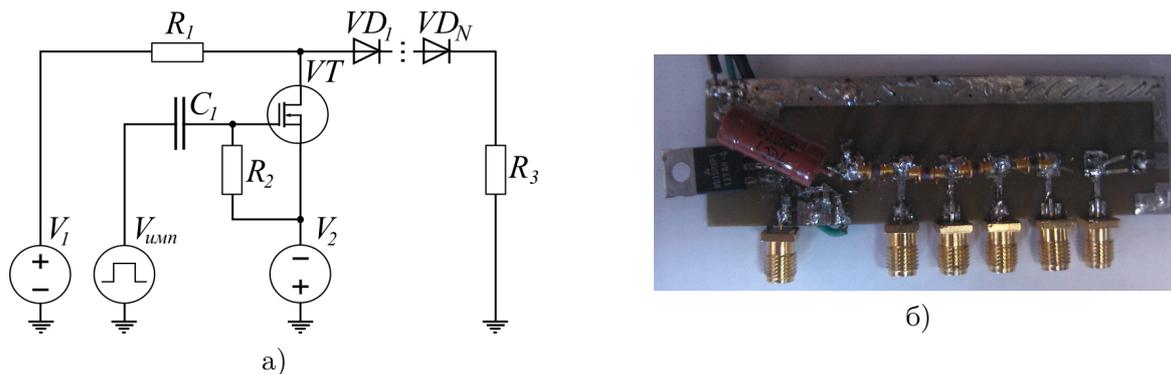


Рис. 2. Схема (а) и фотография платы (б) устройства для измерения переходных характеристик ДНЗ.

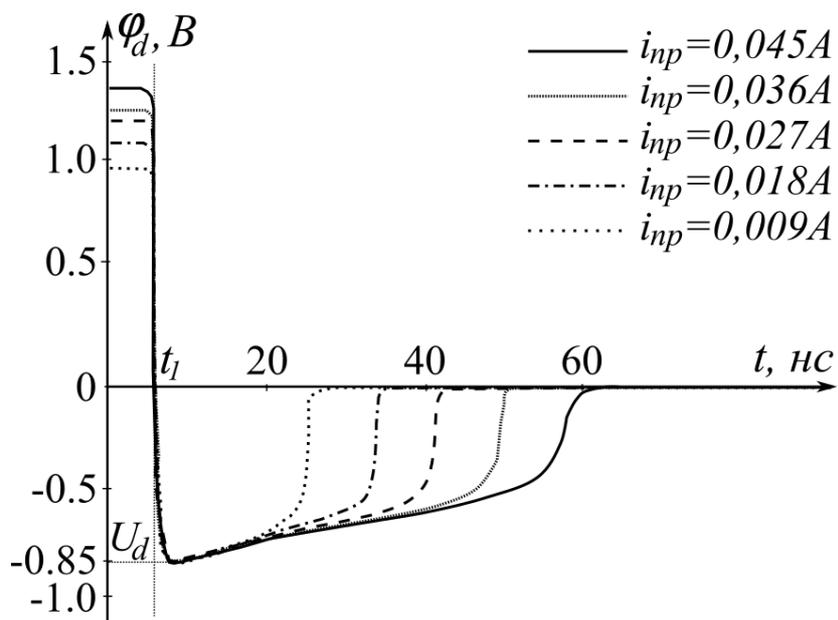


Рис. 3. Разность потенциалов между выводами ДНЗ.

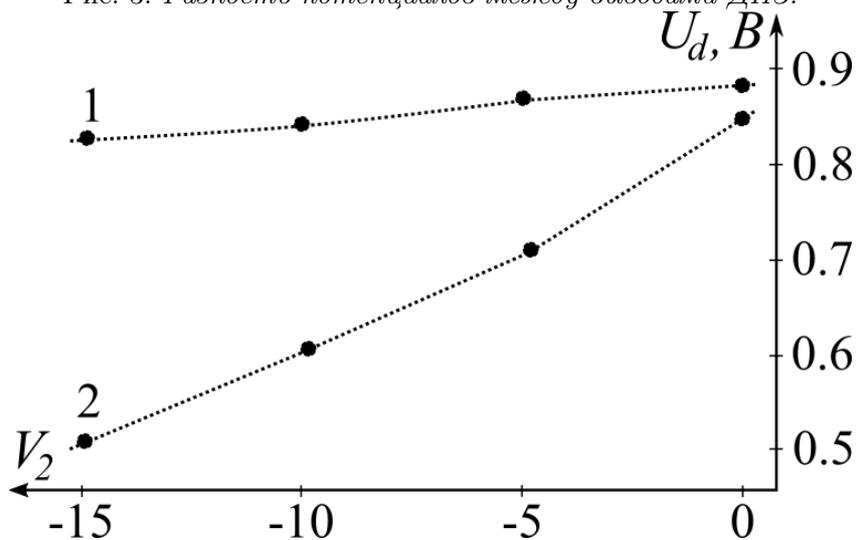


Рис. 4. Зависимость величины U_d от напряжения источника питания V_2 : 1 – 2А609Б, 2 – 1Д524Б

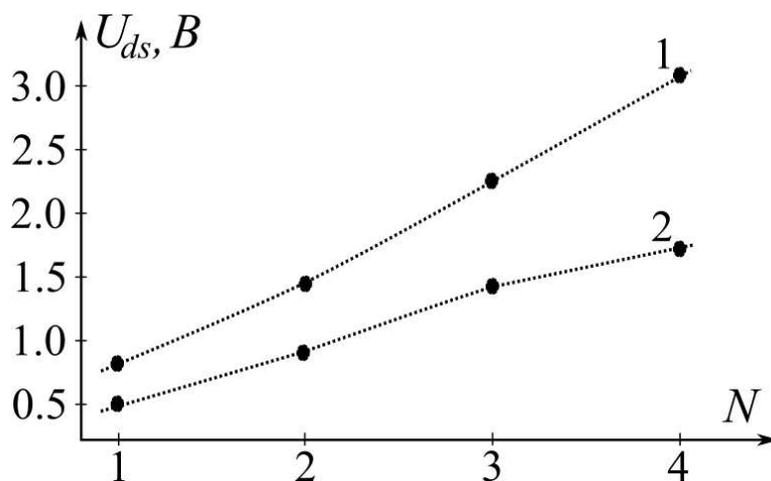


Рис. 5. Зависимость величины U_{ds} при напряжении источника питания $V_2 = -15$ от количества последовательно соединенных диодов:
1 - 2А609Б, 2 - 1Д524Б.

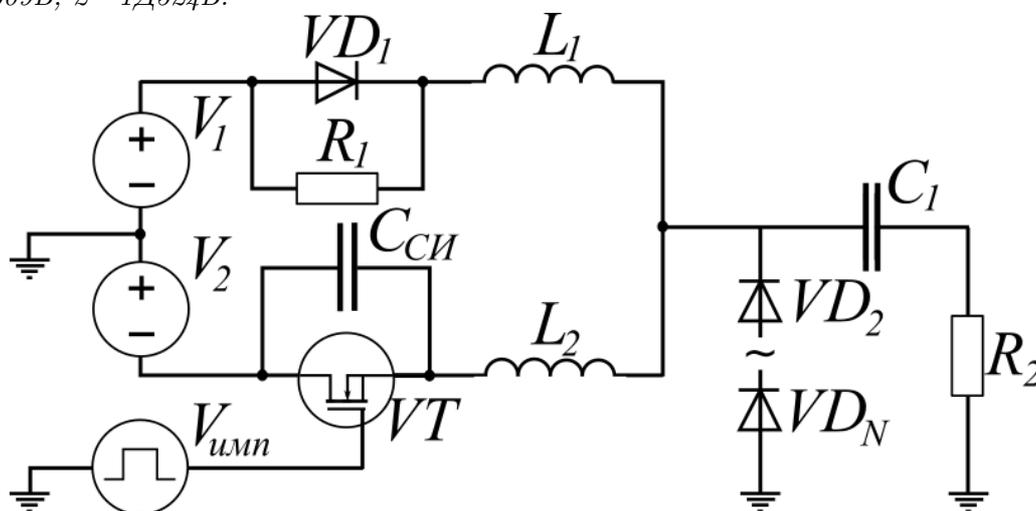


Рис. 6. Схема генератора СКИ на основе ДНЗ.

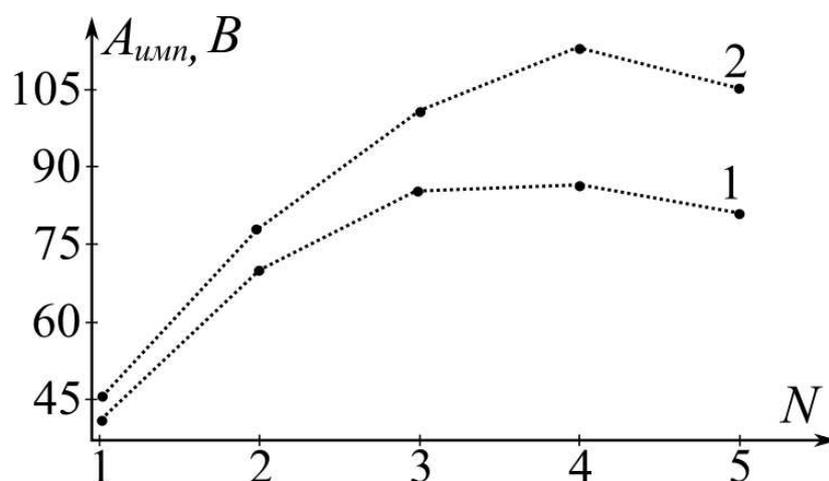


Рис. 7. Зависимость амплитуды СКИ от количества последовательно установленных в генератор диодов 1Д524Б(1), 2А609Б(2).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ДНЗ В ГЕНЕРАТОРАХ СКИ

Наблюдаемый в экспериментальном исследовании эффект возникновения разности потенциалов во время экстракции накопленного заряда в ДНЗ может иметь практическое применение. Известно, что амплитуда формируемого импульсного сигнала определяется параметрами схемы генератора и режимом работы размыкателя тока [7]. Указанная амплитуда тем больше, чем больше величина обратного тока через ДНЗ, который переключается в нагрузку [6], [7], [12]. Исследуемые в работе особенности переключения ДНЗ могут быть использованы для увеличения обратных токов за счет последовательного включения нескольких диодов.

Для проведения экспериментального исследования использовалась схема, представленная на рисунке 6 [12]. С открытием транзистора VT , через диод VD_2 начинал протекать прямой ток. При этом происходило накопление заряда внутри полупроводниковой структуры ДНЗ и энергии магнитного поля в индуктивностях L_1 и L_2 . Номинал индуктивностей и напряжения питания выбирались исходя из выполнения неравенства $L_2/L_1 < V_2/V_1$. Закрытие транзистора VT вызывало перезарядку емкости $C_{СИ}$. Ток через диод при этом менял свое направление, и концентрация заряда, накопленного в активной области диода, в течение некоторого времени уменьшалась до нуля, вследствие чего происходило размыкание тока в цепи. При этом на нагрузке R_2 формировался сверхкороткий импульс напряжения за счет передачи энергии магнитного поля, накопленной в элементах L_1 и L_2 .

На рисунке 7 приведена зависимость амплитуды формируемого сверхкороткого импульса на выходе генератора от количества N последовательно соединенных диодов. Из графика видно, что увеличение количества ДНЗ до некоторого значения приводило к росту амплитуды формируемого сигнала. Дальнейшее увеличение количества диодов сопровождалось убыванием амплитуды. Для обоих типов исследуемых диодов максимальное значение амплитуды достигалось включением последовательно четырех ДНЗ. Результирующее сопротивление цепи, определяемое суммой активных сопротивлений последовательно включенных диодов, возрастает кратно их количеству. Это сопротивление ограничивает обратный ток, что и приводит к снижению значений амплитуды на выходе генератора при увеличении числа включенных в цепь диодов. В связи с тем, что величина U_d у диодов 2А609Б больше, чем у 1Д524Б, выигрыш в амплитуде при последовательном соединении нескольких ДНЗ для этих диодов проявился в большей степени.

ВЫВОДЫ

Параметры импульсного сигнала, формируемого генератором на основе диодов с накоплением заряда, определяются не только его схемотехническим решением, но и особенностями работы размыкателя тока. Проведенное экспериментальное исследование процесса переключения ДНЗ при генерации СКИ показало, что при обратном смещении наличие накопленного заряда в полупроводниковой структуре диода приводит к возникновению разности потенциалов между анодом и катодом диода. Экспериментально получены зависимости величины напряжения на выводах диодов от их режимов работы и количества. На основании проведенных исследований, в работе предложено последовательное включение нескольких ДНЗ в схеме генератора СКИ для увеличения амплитуды формируемого импульсного сигнала. Так же для конкретной схемы генератора определено число диодов, которое позволяет формировать СКИ наибольшей амплитуды.

Помимо этого, при проектировании портативных радиосистем одним из ключевых вопросов является организация питания для формирователя сигнала. Для СШП генераторов на основе диодов с накоплением, как правило, требуются источники напряжения как отри-

пательной, так и положительной полярности. Применяя описанный выше эффект, можно отказаться от использования источника отрицательного напряжения питания. Кроме того, преимуществом такого подхода является возможность снижения амплитуды колебаний, связанных с возбуждением транзисторного ключа, и переходных процессов в реактивных элементах схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов, Ю. Р. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение / Ю. Р. Носов. — М. : Сов. Радио, 1966. — 157 с.
2. Moll, J.L. P-n junction charge storage diodes / J.L. Moll, S. Krakauer, R. Shen // Proceedings of IRE. 1962. — V. 50, № 1. — P. 43–53.
3. Moll, J.L. Physical Modeling of the Step Recovery Diode for Pulse and Harmonic Generation Circuits / J.L. Moll, S.A. Hamilton // Proceedings of IEEE. — V. 37. — P. 1250–1259.
4. Кюрегян, А. С. Теория дрейфовых диодов с резким восстановлением / А. С. Кюрегян // Журнал технической физики. — 2004. — Т. 74. — С. 57–64.
5. Sameer P. Pendharkar Dynamics of Reverse Recovery of High-Power p-i-n Diodes / Sameer P. Pendharkar, Malay Trivedi, Krishna Shenai. // IEEE Transactions on electronic devices. — 1996. — V. 43, № 1.
6. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов / А. М. Бобрешов, В. А. Степкин, Ю. И. Китаев, Г. К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2011. — Т. 14, № 3. — С. 103.
7. Расчет генератор субнаносекундных импульсов на основе диодов с накоплением заряда / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Радиотехника. — 2016. — № 2. — С. 101–107.
8. Грехов, И. В. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов / И. В. Грехов, Г. А. Месяц // Успехи физических наук. — 2005. — Т. 175, № 7. — С. 735–744.
9. Spenke, E. Reverse recovery processes in silicon power rectifiers / H. Benda, E. Spenke // Proceedings of the IEEE. — 1967. — V. 55, № 8. — P. 1331–1354.
10. Spenke, E. The voltage step at switching of alloyed pin rectifiers / K. Schuster, E. Spenke // Solid-state Electronics. — 1965. — V. 8. — P. 881–882.
11. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 392 с.
12. Усков, Г. К. Физика диодов с накоплением заряда при генерации сверхкоротких импульсов / Г. К. Усков // Теория и техника радиосвязи. — 2012. — № 4. — С. 100–105.
13. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. — М. : Энергия, 1973. — 655 с.

REFERENCES

1. Nosov U.R. Semiconductor step recovery diode and their applications. [Nosov Yu.R. Poluprovodnikovyye diody s nakopleniem zaryada i ix primeneniye]. Moscow: Soviet radio, 1966, 157 p.
2. Moll J.L., Krakauer S., Shen R. P-n junction charge storage diodes. Proceedings of IRE., 1962, vol. 50, no. 1, pp. 43–53.
3. Moll J.L., Hamilton S.A. Physical Modeling of the Step Recovery Diode for Pulse and Harmonic Generation Circuits. Proceedings of IEEE, vol. 37, pp. 1250–1259.
4. Kyuregyan A.S. Theory of the drift step recovery diodes. [Kyuregyan, A. S. Teoriya drejfovyykh diodov s rezkim vosstanovleniem]. *Zhurnal texnicheskoj fiziki — Journal of technical physics*, 2004, vol. 74, pp. 57–64.
5. Sameer P. Pendharkar, Malay Trivedi, Krishna Shenai. Pendharkar Dynamics of Reverse Recovery of High-Power p-i-n Diodes. IEEE Transactions on electronic devices, 1996, vol. 43,

но. 1.

6. Bobreshov A.M., Stepkin V.A., Kitaev U.I., Uskov G.K. Ultra-short pulse generation. [Bobreshov A.M., Stepkin V.A., Kitaev Yu.I., Uskov G.K. Generaciya sverxkorotkix impul'snyx signalov]. *Fizika volnovyx processov i radiotekhnicheskie sistemy — Physics of wave processes*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 103–108.

7. Bobreshov A.M., Zhabin A.S., Stepkin V.A., Uskov G.K. Analysis of subnanosecond pulse generator based on step recovery diode. [Bobreshov A.M., Zhabin A.S., Stepkin V.A., Uskov G.K. Raschet generator subnanosekundnyx impul'sov na osnove diodov s nakopleniem zaryada]. *Radiotekhnika — Radiotekhnika*, 2016, no. 2. pp. 101–107.

8. Grekhov I.V., Mesyats G.A. Semiconductor nanosecond time diodes for cutoff large currents. [Grekhov I.V., Mesyats G.A. Poluprovodnikovye nanosekundnye diody dlya razmykaniya bol'shix tokov]. *Uspehi fizicheskix nauk — Physics-Uspekhi*, 2005, vol. 175, no. 7, pp. 735–744.

9. Spenke E., Spenke E. Reverse recovery processes in silicon power rectifiers. *Proceedings of the IEEE*, 1967, vol. 55, no. 8, pp. 1331–1354.

10. Spenke E., Spenke E. The voltage step at switching of alloyed pin rectifiers. *Solid-state Electronics*, 1965, vol. 8, pp. 881–882.

11. Shalimova K.V. Physics of semiconductors. [Shalimova K.V. Fizika poluprovodnikov /]. Moscow: Energy, 1973, 655 p.

12. Uskov G.K. Physics of diodes with charge accumulation in the generation of ultrashort pulses. [Uskov G.K. Fizika diodov s nakopleniem zaryada pri generacii sverxkorotkix impul'sov]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi — Theory and technique of radio communication*, 2012, no. 4, pp. 100–105.

13. Zi S. Physics of semiconductor devices. [Zi S. Fizika poluprovodnikovyx priborov]. Moscow, 1973, 655 p.

Бобрешов А. М., д. ф.-м. н., профессор, декан физического факультета, зав. кафедрой электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(910)479-79-45

Bobreshov A.M., Doctor of physical and mathematical science, Professor, Dean of physics faculty, Head of Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(910)479-79-45

Жабин А. С., ассистент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: zhabin@phys.vsu.ru
Тел.: +7(951)875-68-04

Zhabin A. S., Assistant, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: zhabin@phys.vsu.ru
Tel.: +7(951)875-68-04

Коровченко И. С., к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru
Тел.: +7(904)212-13-07

Korovchenko I. S., Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru
Tel.: +7(904)212-13-07

*Степкин В. А., к. ф.-м. н., доцент кафедры
электроники Воронежского госуниверсите-
та, Воронеж, Россия
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru
Тел.: +7(920)469-45-30*

*Stepkin V. A., Candidate of physical and
mathematical sciences, Associate Professor,
Department of Electronics, Voronezh State
University, Voronezh, Russia
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru
Tel.: +7(920)469-45-30*

*Усков Г. К., д. ф.-м. н., доцент кафедры
электроники Воронежского госуниверсите-
та, Воронеж, Россия
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Тел.: +7(952)953-82-94*

*Uskov G. K., Doctor of physical and
mathematical sciences, Associate Professor,
Department of Electronics, Voronezh State
University, Voronezh, Russia
E-mail: uskov@phys.vsu.ru
Tel.: +7(952)953-82-94*