

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДИОДОВ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА В ОТСУТСТВИИ ОБРАТНОГО СМЕЩЕНИЯ

А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, И. С. Коровченко, В. А. Степкин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 01.07.2019 г.

Аннотация. В статье представлены результаты проведенного экспериментального исследования особенностей работы диода с накоплением заряда (ДНЗ) при работе в схемах генерации сверхкоротких импульсов. Объектом исследования являлись процессы переключения диодов в различных режимах работы. Показано, что разность потенциалов на выводах ДНЗ, появляющаяся на стадии экстракции заряда, связана с перераспределением носителей этого заряда в полупроводниковой структуре. Этому эффекту найдено практическое применение — предложена схема генератора сверхкоротких импульсов с однополярным питанием.

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

THE FEATURES OF THE STEP RECOVERY DIODES SWITCHING WITHOUT REVERSE BIAS SOURCE

A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, I. S. Korovchenko, V. A. Stepkin

Abstract. The step recovery diode switching process in different operating modes in the ultrashort pulse generator circuit was studied in the experimental research. It has been shown, that the difference of potentials at the step recovery diode terminals, which appears when charge extraction takes place, is associated with the charge carrier relocation in the semiconductor structure. The practical application has been found for this effect - the circuit of the ultrashort pulse generator with unipolar power supply has been proposed.

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

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие современной сверхширокополосной (СШП) радиоэлектроники обусловлено совершенствованием и обновлением технологий производства полупроводниковых приборов, на базе которых разрабатываются радиосистемы, использующие в качестве сигналов сверхкороткие импульсы (СКИ) субнаносекундной длительности [1]. Одной из ключевых частей таких систем является генератор СКИ, схема которого зачастую строится на основе диодов с накоплением заряда (ДНЗ) [2–4]. ДНЗ можно применять при разработке портативных СШП передатчиков с малыми напряжениями питания, что также способствует росту интереса к ним в последнее время.

Характеристики ДНЗ при работе в составе генератора зависят от режима его работы [1–8] и существенным образом влияют на параметры формируемых сверхкоротких импульсов. Большинство схемотехнических решений генераторов СКИ строится на использовании

индуктивных накопителей энергии [2–4]. Принцип их работы можно кратко описать следующим образом. На первой стадии работы генератора создаются условия, при которых ДНЗ смещается в прямом направлении, и происходит накопление заряда в его полупроводниковой структуре. На второй стадии — стадии экстракции заряда — эти условия меняются, смещая диод в обратном направлении. До тех пор, пока в его структуре присутствуют носители заряда, накопленного на первой стадии, диод находится в состоянии высокой обратной проводимости, и через него протекает обратный ток. Этот же обратный ток способствует накоплению энергии магнитного поля в индуктивности. Как только концентрация носителей накопленного заряда становится равной нулю, происходит резкое восстановление высокого обратного сопротивления диода. Таким образом, основной функцией ДНЗ является резкое размыкание цепи, благодаря чему происходит переключение тока в нагрузку и формирование сверхкороткого импульса за счет энергии индуктивного накопителя.

Необходимо отметить, что несмотря на большое количество исследований и опубликованных работ по анализу работы диодов с накоплением заряда в режиме переключения [1–8], в открытом доступе не удается найти информации о рассмотрении его работы в отсутствие источника напряжения, задающего обратное смещение. Важность такого рассмотрения вызвана тем, что возникающая вследствие наличия накопленного заряда разность потенциалов на выводах диода может быть использована на стадии экстракции заряда вместо дополнительного источника, что позволит упростить требования к питанию генератора и существенно уменьшить энергопотребление.

Таким образом, целью данной работы явилось экспериментальное исследование особенностей работы ДНЗ в режиме генерации СКИ при отсутствии источника напряжения, необходимого для смещения диода в обратном направлении. Основным объектом исследования были выбраны переходные характеристики диодов, которые представляют собой временные зависимости тока через диод, измеренные при изменении смещения с прямого на обратное. Они позволяют произвести оценку ключевых параметров ДНЗ при работе в импульсном режиме. Отдельное внимание уделено вопросам применимости полученных результатов при разработке схемотехнических решений формирователей СКИ, в особенности с низким потреблением энергии.

ДИОД С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА В РЕЖИМЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Известно, что существует несколько полупроводниковых диодных структур, обладающих свойством резкого восстановления высокого сопротивления при приложенном обратном смещении [1–3, 9]. Наиболее часто для простоты исследований указанного явления, все протекающие процессы рассматривают на примере $P^+ - I - N^+$ структуры (рисунок 1). Считается, что диод состоит из сильно легированных P^+ и N^+ областей, являющимися анодом и катодом устройства, а между ними находится слой (I) собственного или слабо легированного полупроводника. Область, ограниченную сильнолегированными полупроводниками принято называть активной областью. Физическая интерпретация процессов, протекающих в полупроводниковой структуре диода с накоплением заряда при его работе в режиме переключения неоднократно давалась различными исследователями [1–9], начиная, приблизительно, с 70-х годов прошлого столетия. Приведем лишь основные ее положения, необходимые для понимания исследуемых процессов.

Экспериментальные исследования особенностей работы ДНЗ в режиме переключения, как правило, производятся с помощью схемы, представленной на рисунке 2. Работа ДНЗ при таком включении описывается переходной характеристикой и включает две основные стадии (рисунок 3). Пусть первая стадия начинается в момент времени $t = 0$, заканчивается в момент $t = t_1$ и характеризуется наличием положительного тока I_d через диод вследствие наличия прямого смещения. При этом, можно выделить два основных процесса, одновременно про-

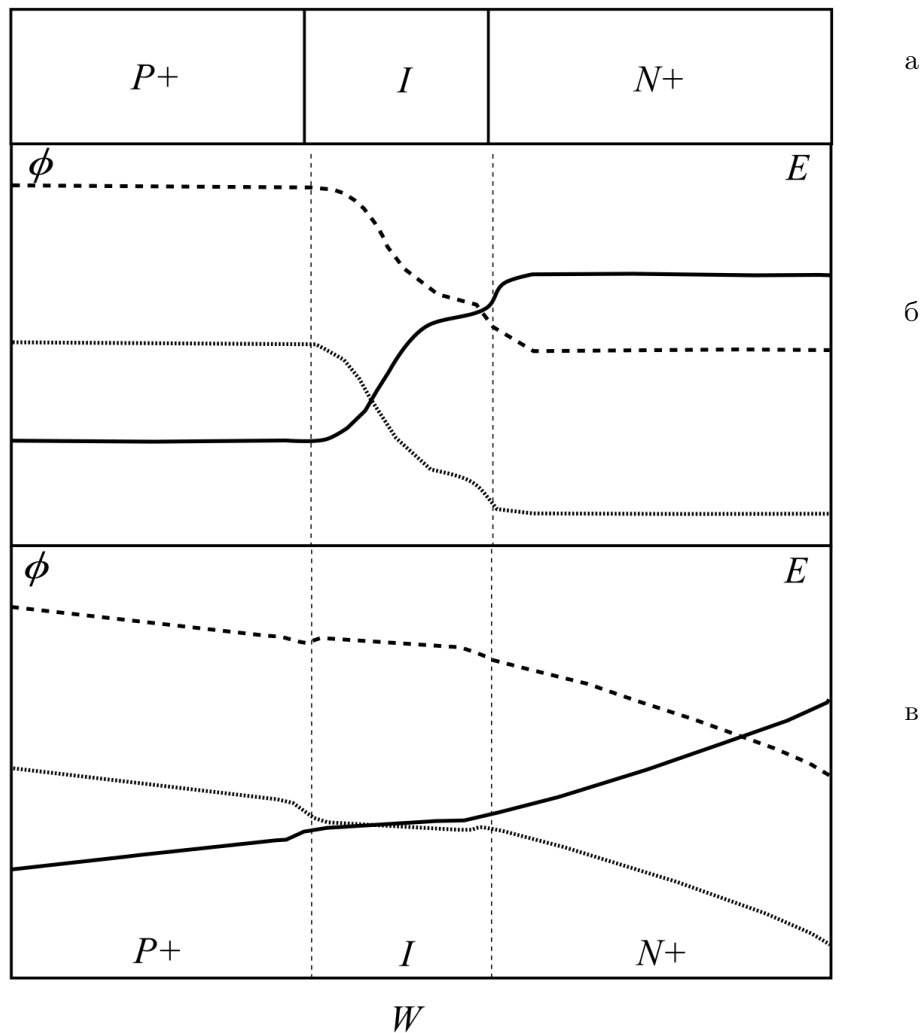


Рис. 1. Упрощенная структура ДНЗ (а), зонная диаграмма (пунктир – дно зоны проводимости, точки – потолок валентной зоны) и распределение электростатического потенциала (сплошная линия) в полупроводниковой структуре ДНЗ в состоянии термодинамического равновесия (б) и после инжекции носителей заряда в I-область (в).

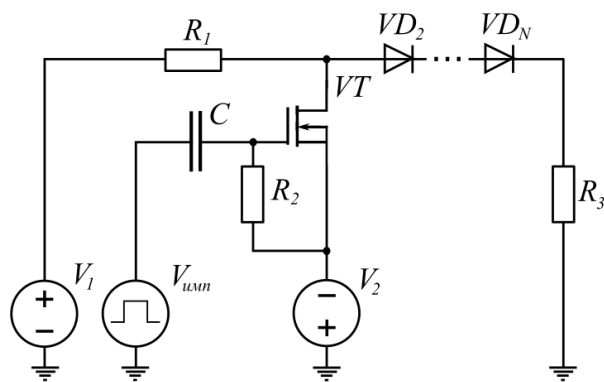


Рис. 2. Измерительная схема для экспериментального исследования переходных характеристик ДНЗ

текающих в полупроводниковой структуре ДНЗ: инжекцию носителей заряда из P^+ и N^+ областей в активную область диода и их рекомбинацию. Скорость инжекции носителей заряда зависит от приложенного к диоду напряжения, а скорость рекомбинации — от эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в активной области прибора [3, 9, 10]. В случае, если оба рассматриваемых процесса уравниваются друг друга, можно говорить о стационарности тока, протекающего через диод на этой стадии работы. В противном случае будет наблюдаться переходной процесс, сопровождающийся ростом или падением указанного тока.

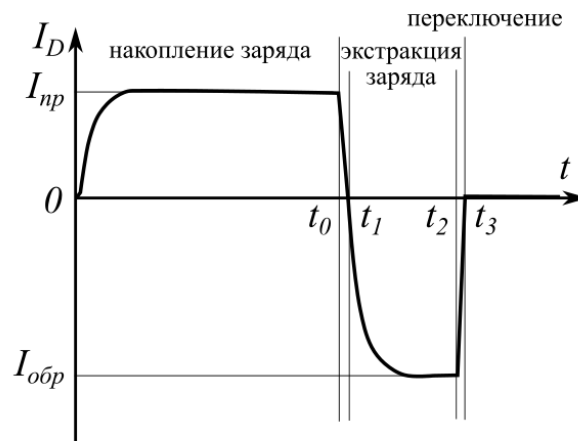


Рис. 3. Типичная временная диаграмма тока через ДНЗ (переходная характеристика), работающего в режиме переключения.

Вторая стадия работы ДНЗ в режиме переключения начинается в момент времени, когда полярность напряжения на выводах диода меняется на обратную. При этом, пока концентрация носителей накопленного ранее заряда не станет равна нулю, прибор находится в состоянии с высокой обратной проводимостью. После полного рассасывания заряда из активной области происходит резкое восстановление высокого обратного сопротивления диода. Длительность этого процесса зависит от технологических особенностей конкретного типа ДНЗ и, как правило, составляет от десятков до сотен пикосекунд.

Необходимо отметить, что рассмотренное выше описание работы устройства является идеализированным, так как не учитываются процессы переноса электронов и дырок из активной области в легированные. Однако даже такого упрощенного подхода оказывается достаточно для приблизительных оценок в большинстве задач, возникающих на практике.

Рассмотрим подробнее динамику носителей накопленного заряда в случае отсутствия обратного смещения, т. е. при $V_2 = 0$. Вследствие наличия объемных зарядов у границ переходов $P^+ - I$ и $I - N^+$, возникает электрическое поле, вызывающее искривление энергетических зон и появление потенциального барьера. Распределение электростатического потенциала ϕ , вдоль полупроводниковой структуры диода и энергетических уровней дна зоны проводимости и потолка зоны валентности представлены на рисунке 1–в. Очевидно, что находящиеся в активной области ДНЗ электроны будут возвращаться в N^+ область, а дырки — в P^+ , так как это энергетически более выгодно. В результате такого перераспределения носителей заряда на катоде диода образуется отрицательный потенциал, а на аноде положительный. В этом случае работу ДНЗ можно рассматривать по аналогии с поведением заряженной емкости. Если выводы диода изолировать, концентрация накопленного в нем заряда будет постепенно убывать за счет рекомбинации [10]. Однако если его подключить к нагрузке, то в результате экстракции электронов и дырок из активной области ДНЗ по образовавшейся цепи будет

протекать ток в направлении от катода к аноду. Как только весь накопленный заряд покинет I область, ток в цепи спадет до нуля, а диод восстановит высокое обратное сопротивление.

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе схема, изображенная на рисунке 2, была реализована практически на основе полевого транзистора RD15HVF1, а в качестве исследуемых были использованы отечественные диоды 2А609А. Выбор указанных приборов связан с их доступностью, широкой распространенностью и частым использованием в качестве элементной базы современных формирователей сверхкоротких импульсных сигналов. Запускающие импульсы, подаваемые на затвор транзистора VT , формировались генератором Agilent 81104А. Переходные характеристики фиксировались с помощью стробоскопического осциллографа DCA-X 86100D с полосой пропускания 20 ГГц, 50-тиомный вход которого подключался в качестве нагрузки R_3 .

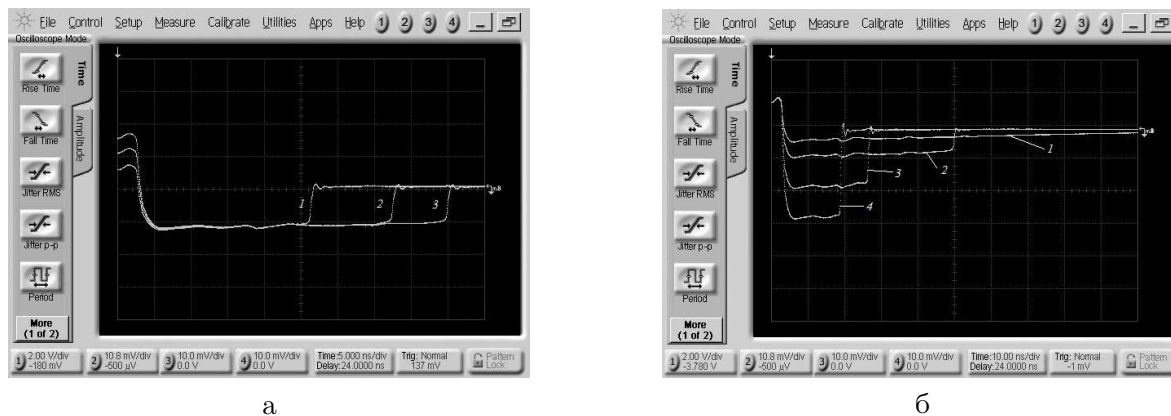


Рис. 4. Осциллограммы тока через ДНЗ при различных значениях V_1 (а) и V_2 (б).

На рисунке 4-а приведено семейство осциллограмм — переходных характеристик для различных значений напряжения V_1 (кривые 1, 2, 3 пронумерованы в соответствии с увеличением V_1) при фиксированном $V_2 = -10$ В. Видно, что увеличение тока на первой стадии работы ДНЗ приводит к затягиванию стадии экстракции из-за большей величины накопленного заряда. С другой стороны, увеличение напряжения источника V_2 приводит к росту обратного тока и уменьшению времени, затрачиваемого на вторую стадию работы диода, что можно видеть на рисунке 4-б (1. $V_2 = 0$; 2. $V_2 = -5$ В; 3. $V_2 = -10$ В; 4. $V_2 = -15$ В). Причем кривая 1 представляет собой переходную характеристику диода для случая, когда на него не подавалось обратное смещение, то есть $V_2 = 0$. Оказалось, что при таком включении после снятия прямого смещения также наблюдается протекание обратного тока. Этот ток, вероятно, связан с действием электрического поля объемных зарядов в сильнолегированных областях $P^+ - I - N^+$ структуры и приводит к экстракции накопленного заряда, уменьшение которого также происходит и за счет рекомбинации. Как видно из осциллограмм, разность потенциалов, возникающая на выводах ДНЗ в первый момент времени после снятия положительного смещения, со временем монотонно убывает, стремясь к нулю. Это связано с перераспределением электронов и дырок в структуре и постепенным уменьшением объемных зарядов в сильнолегированных областях. Максимум этой разности потенциалов для одного диода был измерен и составил $\varphi_{d_max} = 0,81$ В. Причем оказалось, что эта величина не зависит от значения прямого тока на первой стадии работы ДНЗ и практически одинакова для различных образцов диодов одной модели. С ростом прямого тока увеличивается лишь время, необходимое на экстракцию зарядов из активной области диода.

Исходя из предположения, что при последовательном соединении нескольких ДНЗ разно-

сти потенциалов φ_d на выводах каждого из них сложатся, в работе было проведено экспериментальное исследование процесса переключения от 2-х до 5-ти последовательно включенных диодов. Для этого на стадии высокой обратной проводимости между крайними выводами серии диодов измерялась разность потенциалов φ_d . На рисунке 5 приведены осциллограммы, изображающие временные зависимости величины φ_d для разного количества последовательно подключенных ДНЗ (номер кривой соответствует количеству диодов). Как видно из осциллограмм, величина разности потенциалов φ_{d_max} увеличивается пропорционально количеству ДНЗ.

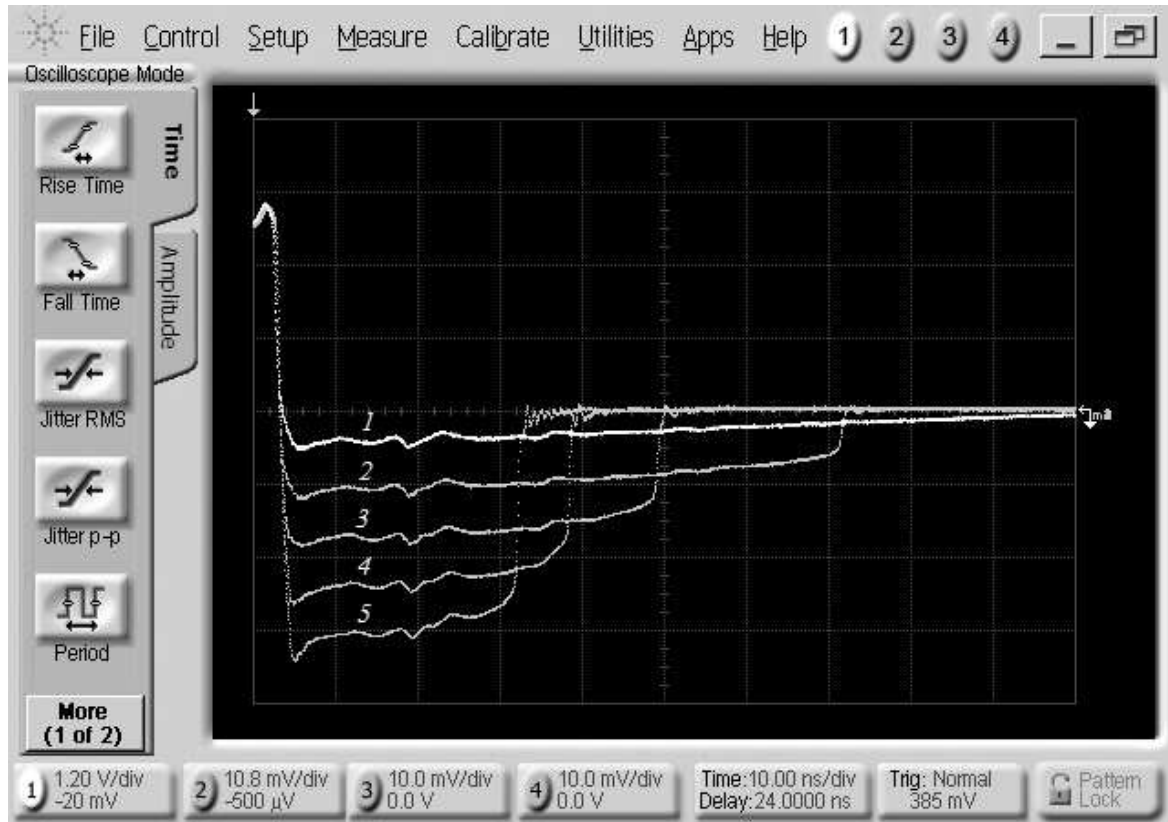


Рис. 5. Переходные характеристики при последовательном включении нескольких ДНЗ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДНЗ В ГЕНЕРАТОРАХ СКИ

Полученные результаты экспериментального исследования переключения нескольких последовательно соединенных диодов могут быть применены при разработке маломощных генераторов сверхкоротких импульсов. Примером может служить формирователь с однополярным питанием, схема которого представлена на рисунке 6. Особенностью этой схемы является отсутствие источника напряжения, необходимого для задания отрицательного смещения диодов. Это возможно благодаря описанному выше эффекту возникновения разности потенциалов на выводах ДНЗ при наличии в его полупроводниковой структуре накопленного заряда.

Работу предложенной схемы можно описать следующим образом. Пока транзистор VT закрыт, через диоды $VD_1 - VD_N$ протекает прямой ток, способствующий накоплению в них заряда. В момент подачи на затвор транзистора запускающего импульса, он открывается, замыкая на общий провод цепочку из диодов $VD_1 - VD_N$ и индуктивности L . При этом

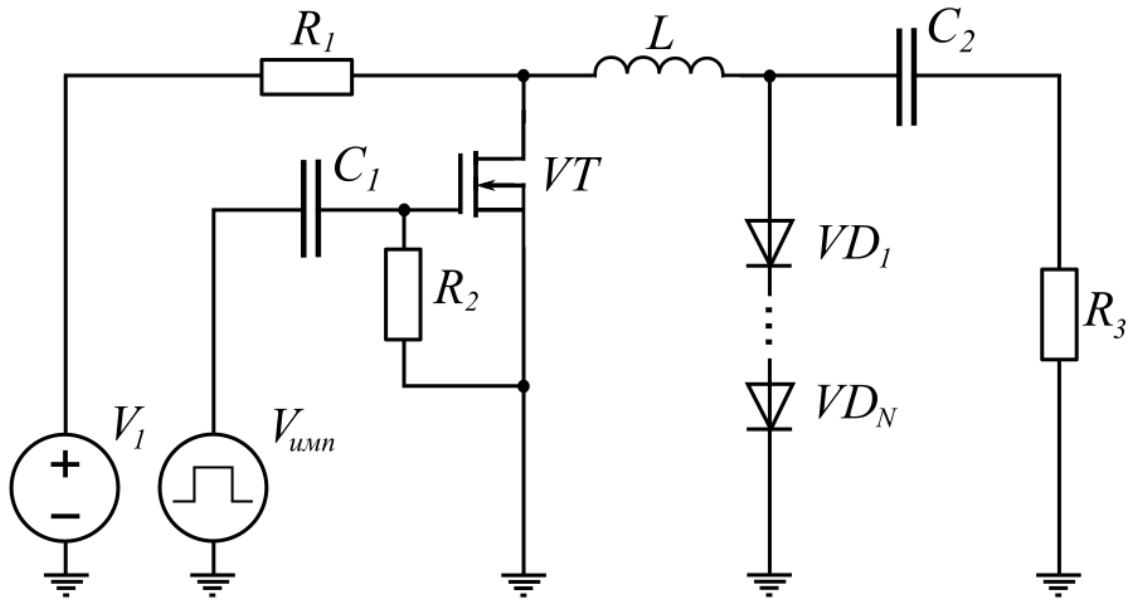


Рис. 6. Схема генератора СКИ с однополярным питанием и последовательным включением нескольких ДНЗ

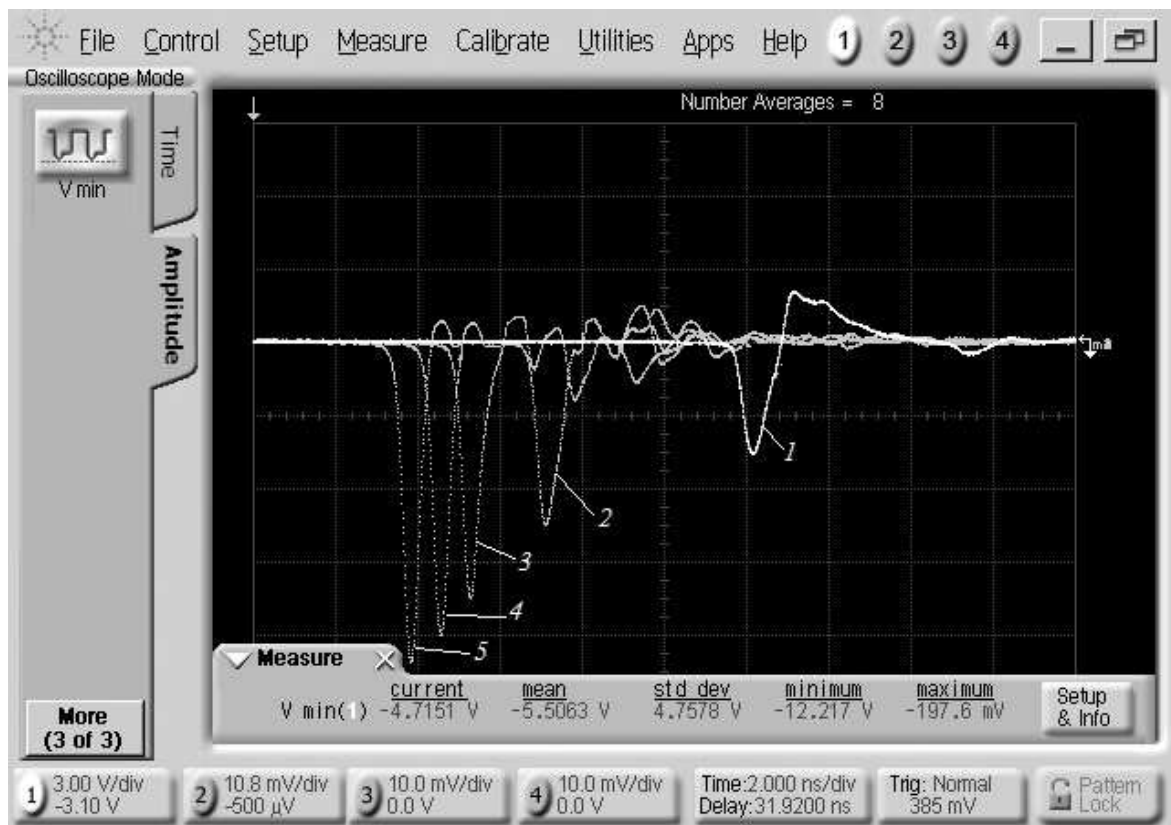


Рис. 7. Осциллограммы СКИ, формируемые генератором с однополярным питанием и последовательным включением нескольких ДНЗ

вследствие наличия обратного смещения, создаваемого разностью потенциалов на выводах ДНЗ, через индуктивность L протекает ток, накапливая в ней энергию магнитного поля. Спустя некоторое время завершение экстракции носителей заряда в диодах приводит к резкому восстановлению их высокого обратного сопротивления. В этот момент на нагрузке формируется сверхкороткий импульс за счет накопленной энергии в индуктивности.

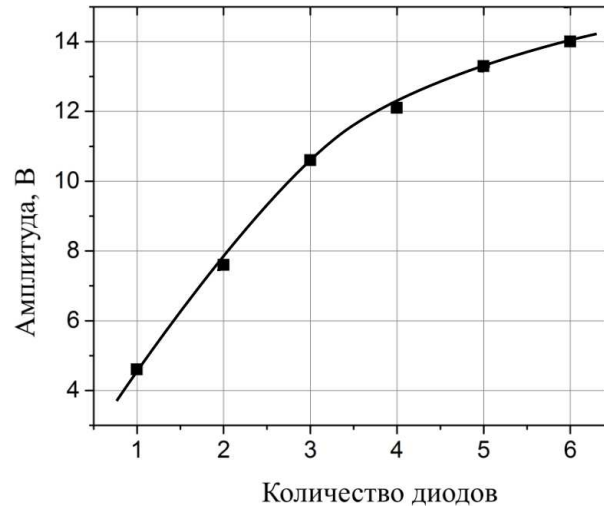


Рис. 8. Зависимость амплитуды СКИ от количества последовательно установленных в генератор диодов

На рисунке 7 приведены осциллограммы формируемых импульсов, а на рисунке 8 - зависимость их амплитуды от количества последовательно соединенных диодов (N). Увеличение количества ДНЗ приводит к росту амплитуды генерируемых СКИ. Однако этот рост постепенно замедляется и, начиная с определенного момента, дальнейшее увеличение количества диодов перестает давать существенный вклад. Так экспериментально определено, что при установке диодов 2А609А в схему генератора (рисунок 6), использовать более пяти нерационально. При этом амплитуда формируемых импульсов составила 13,3 В при длительности по полувысоте 450 пс.

ВЫВОДЫ

Характеристики генератора СКИ на основе диодов с накоплением заряда, определяются не только его схемотехническим решением. Особенности работы размыкателя тока также играют ключевую роль. Проведенное в работе экспериментальное исследование переключения ДНЗ генерации сверхкоротких импульсов показало, что наличие накопленного заряда за счет перераспределения носителей в полупроводниковой структуре диода приводит к возникновению разности потенциалов (φ_d) между его анодом и катодом. Учет этого особенно важен при разработке низковольтных формирователей импульсных сигналов, где она может существенно сказываться на работе устройства в целом. На основании проведенных исследований, получены зависимости величины напряжения на выводах диодов от их режимов работы и количества.

При проектировании портативных радиосистем одним из ключевых вопросов является организация питания для формирователя сигнала. Поэтому в работе предложена схема генератора, не требующая дополнительного источника напряжения, необходимого для подачи обратного смещения на диоды, что также приводит к снижению энергопотребления.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук (МД-6872.2018.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Белкин, В. С. Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе / В. С. Белкин, Г. И. Шульженко. — Новосибирск : Институт ядерной физики, 1991.
3. Носов, Ю. Р. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение / Ю. Р. Носов. — М. : Сов. Радио, 1966. — 157 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Spenke, E. Reverse recovery processes in silicon power rectifiers / H. Benda, E. Spenke // Proceedings of the IEEE. — 1967. — V. 55, № 8. — P. 1331–1354.
8. Экспериментальное исследование особенностей переключения диодов с накоплением заряда / А. М. Бобрешов и др. // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2016. — № 3. — С. 13–22.
9. Носов, Ю. Р. Полупроводниковые импульсные диоды / Ю. Р. Носов. — М. : Советское Радио, 1965. — 224 с.
10. Bemsy, G. Recombination in Semiconductors / G. Bemsy // Proceedings of the IRE. — 1958. — P. 990–1004.

REFERENCES

1. Grekhov I.V., Mesyats G.A. Semiconductor nanosecond time diodes for cutoff large currents. [Grexov I.V., Mesyats G.A. Poluprovodnikovye nanosekundnye diody dlya razmykaniya bol'shix tokov]. *Uspexi fizicheskix nauk — Physics-Uspexhi*, 2005, vol. 175, no. 7, pp. 735–744.
2. Belkin V.S., Shulzhenko G.I. Highpower nanosecond and picosecond pulse generators on a semiconductor element base. [Belkin V.S., Shulzhenko G.I. Formirovateli moshhnyx nanosekundnyx i pikosekundnyx impul'sov na poluprovodnikovoyj elementnoyj baze]. Novosibirsk, 1991.
3. Nosov U.R. Semiconductor step recovery diode and their applications. [Nosov Yu.R. Poluprovodnikovye diody s nakopleniem zaryada i ix primeneniye]. Moscow, 1966, 157 p.
4. Bobreshov A.M., Kitaev Y.I., Stepkin V.A., 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 radiotexnicheskie sistemy — Physics of wave processes and radio engineering systems*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 103.
5. Moll J.L., Krakauer S., Shen R. P-n junction charge storage diodes. Proceedings of IRE, 1962, vol. 50, no. 1, pp. 43–53.
6. Sameer P. Pendharkar, Malay Trivedi, Krishna Shenai Dynamics of Reverse Recovery of High-Power p-i-n Diodes. IEEE Transactions on electronic devices, 1996, vol. 43, no. 1.
7. Spenke E., Benda H. Reverse recovery processes in silicon power rectifiers. Proceedings of the IEEE, 1967, vol. 55, no. 8, pp. 1331–1354.
8. Bobreshov A.M. et. al. The experimental research of the switching features of step recovery

diodes. [Bobreshov A.M. i dr. Eksperimental'noe issledovanie osobennosteyj pereklyucheniya diodov s nakopleniem zaryada]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2016, no. 3, pp. 13–22.

9. Nosov Yu.R. Poluprovodnikovye impul'snye diody. [Nosov U.R. Semiconductor switching diodes]. Moscow, 1965, 224 p.

10. Bemsy G. Recombination in Semiconductors. Proceedings of the IRE, 1958, pp. 990–1004.

Бобрешов А. М., д. ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Bobreshov A. M., Doctor of physical and mathematical science, Professor, Head of Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Жабин А. С., к. т. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: zhabin@phys.vsu.ru

Zhabin A. S., Candidate of technical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: zhabin@phys.vsu.ru

Коровченко И. С., к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: korovchenko@phys.vsu.ru

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

Степкин В. А., к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: stepkin@phys.vsu.ru

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