

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ КАСКАДНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЛАВИННЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

П. В. Молчанов, А. С. Лобко

*Институт ядерных проблем БГУ, ул. Бобруйская, 11, 220006 Минск, Беларусь
e-mail: molchanov@inp.bsu.by*

Применение транзисторов в лавинном режиме работы в конструкциях высоковольтных генераторов, разрабатываемых в рамках высоковольтной электроники, позволяет упрощать создание наносекундных импульсных генераторов и разрабатывать уникальные импульсные сверхширокополосные (СШП) устройства, работающие в периодическом режиме. В данной работе представлены результаты моделирования схем одно-, четырех- и восьмиканального включения каскадов лавинных транзисторов. В результате моделирования установлен и продемонстрирован физический эффект последовательного двойного лавинного пробоя транзистора, на который подается импульс управления – запуска. Наличие эффекта вторичного лавинного пробоя в цепочке последовательно соединенных транзисторов приводит к дополнительному обострению части фронта импульса на нагрузке при переключении всего каскада лавинных транзисторов. По схеме высоковольтного генератора Аркадьева-Маркса разработаны и испытаны компактные автономные генераторы наносекундных импульсов: амплитудой до 1150 В и фронтом нарастания амплитуды сигнала до 2.5 нс. Генераторы выполнены по схеме каскадного включения серийных транзисторов КТЗ107 в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения до 100 кГц.

Ключевые слова: СШП импульс; лавинный транзистор; генератор Аркадьева-Маркса; высокое напряжение; моделирование и экспериментальная проверка.

HIGH-VOLTAGE GENERATORS OF NANOSECOND PULSES BASED ON THE CASCADE INCLUDING OF AVALANCHE TRANSISTORS

P. V. Molchanov, A. S. Lobko

*Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (INP BSU),
Bobruyskaya st. 11, 220006 Minsk, Belarus
Corresponding author: P. V. Molchanov (e-mail: molchanov@inp.bsu.by)*

The applications of transistors in the avalanche mode in the designs of high-voltage generators developed within the framework of high-current electronics allows to simplify the development of nanosecond pulse generators and developing ultra-wideband devices operating in the periodic mode. This publication presents the results of modeling the circuits of single-, four- and eight-channel inclusion of avalanche transistor cascades. As a result of modeling, the physical effect of a sequential double avalanche breakdown of a transistor to which a control-start pulse applied is established and demonstrated. The presence of the effect of a secondary avalanche breakdown in a chain of series-connected transistors leads to an additional sharpening of a part of the pulse front on the load when switching the entire cascade of avalanche transistors. On the basis of high-voltage Marx generator circuit the compact generators of UWB pulses were developed and tested with an amplitude of up to 1150 V, a rise time of up to 2.5 ns and a repetition rate of up to 100 kHz.

Key words: Ultra-wideband pulse, Avalanche transistor, Marx generator, High voltage, Modeling and experimental validation.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхширокополосные (СШП, ultra-wide band - UWB) электромагнитные импульсы и сигналы в настоящее время используются в широком спектре приложений, включая различные радары и системы связи (см., например, [1]). Для этих применений передаваемые импульсные сигналы должны иметь большую мгновенную мощность, т.е. высокую пиковую амплитуду и, в то же время, ширина импульса и длительность переднего фронта должны обеспечивать сверхширокополосный спектр сигнала. Принципиальное существующее ограничение, приводящее к более медленному темпу наращивания выходной импульсной мощности подобных СШП устройств, заключается в существовании паразитных емкостных и индуктивных цепей и необходимости введения корректирующих согласующих и резонансных цепей, которые носят узкополосный характер.

Генераторы короткоимпульсных сигналов с высокой пиковой амплитудой являются ключевыми компонентами сверхширокополосных систем. Широкополосные импульсы генерируются с помощью самых разных технологий, например, с использованием кремниевых силовых полевых транзисторов, лавинных транзисторов, диодов с резким восстановлением, нелинейных линий передач и искровых разрядников. Весьма перспективным представляется использование для проектирования СШП генераторов электронных компонентов силовой электроники на основе нитрида галлия (GaN) [2].

ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ КАСКАДНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Лавинными называют транзисторы (avalanche transistors, далее ЛТ), использующие эффект лавинного умножения носителей в коллекторном переходе. Это позволяет в несколько раз увеличить рабочие напряжения и во много раз импульсные токи, что придает лавинным транзисторам новые свойства негатронов *S*- и *N*-типа. Достаточно часто импульсные генераторы разрабатываются на базе лавинных транзисторов по схеме последовательно-параллельного подключения генератора Аркадьева-Маркса (см. рис. 1), что способно обеспечить генерацию быстро нарастающих <1 нс высоковольтных $\sim$ кВ сильноточных импульсов >50 А на низкоимпедансную и, иногда, недостаточно согласованную нагрузку [3, 4]. Схема Аркадьева-Маркса обеспечивает преимущество последовательного включения лавинных транзисторов для увеличения переключаемого напряжения, а также приносит дополнительный эффект уменьшения времени переключения из-за увеличения тока, обусловленного перенапряжением. Время фронта/спада для последовательных цепей может быть несколько сотен пикосекунд, хотя они построены из лавинных транзисторов, имеющих время индивидуального переключения 1–2 нс. Лавинный транзистор с допустимой нагрузкой по току в 1 А можно использовать для коммутации больших токов ~ 50 А при напряжении в несколько сотен вольт в течение нескольких наносекунд. Большой ток протекает через транзистор только в течение короткого периода времени (<10 нс), поэтому этот режим включения является для него неразрушающим.

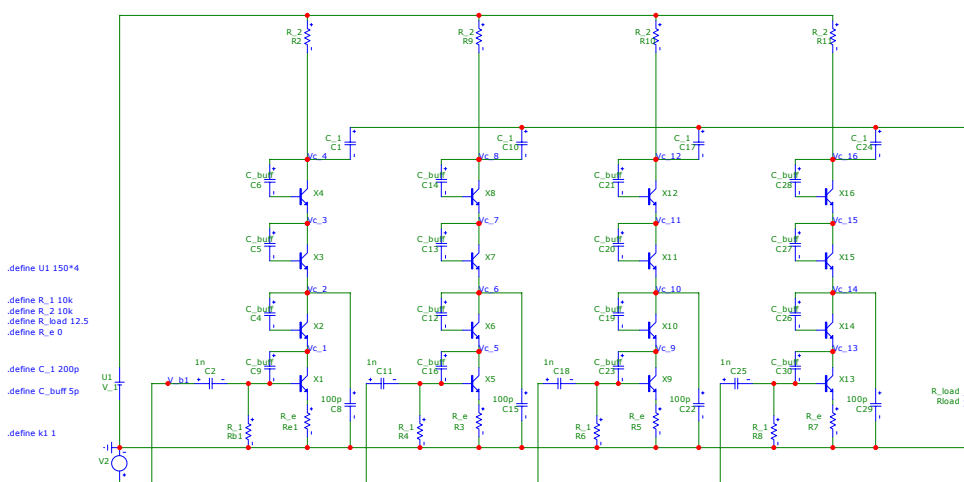


Рис. 1. Схема Аркадьева-Маркса последовательно-параллельного включения четырех каскадов лавинных транзисторов

В настоящее время ряд фирм (Zetex, KEYIN, Diotek и др.) выпускают серию высоковольтных кремниевых эпитаксиальных транзисторов (ЛТОООЗ), выполненных в сверхминиатюрном корпусе для плотного поверхностного монтажа на печатные платы и минимизации паразитных индуктивностей. Несмотря на уникально большие импульсные токи в лавинном режиме (до 60–100 А) и рабочие напряжения (150–320 В), средняя рассеиваемая мощность приборов составляет до 0,68 Вт [5].

Проектирование субнаносекундных генераторов выполнено нами в программе моделирования аналоговой и цифровой электроники Micro-Cap 12 [6]. Учитывая, что параметры импульсов, которые можно получить в таких схемах, сильно зависят от величины и характера (емкостной, резистивный) импеданса нагрузки, количества каскадов генератора и ряда других факторов, тщательное предварительное моделирование позволяет исследовать работоспособность схемы до ее экспериментальной реализации. Разработаны модели генераторов высоковольтных импульсов на основе последовательно-параллельного включения лавинных транзисторов, позволяющих получать наносекундные импульсы высокого напряжения для различных значений величины нагрузки.

На примерах моделирования двух схем одно- и четырехканального включения каскадов лавинных транзисторов получены сходные импульсы с длительностью фронта и амплитудой напряжения на нагрузках в 50.0 Ом и 12.5 Ом, амплитудой до 1 кВ на нагрузке в 5 Ом в восьмиканальной схеме включения каскадов ЛТ (см. рис. 2, б). На примерах моделирования исследовались режимы переключения при подаче на коллекторы транзисторов (обозначенные на рисунке 1 как VC_1 ... VC_4) напряжения питания уровня 150 В (график рисунка 2, а) и 300 В (график рисунка 2, б), известные как рабочие уровни напряжения в режиме лавинного пробоя.

В результате моделирования продемонстрирован физический эффект последовательного двойного лавинного пробоя транзистора [7], на который подается импульс управления – запуска (см. график рисунка 3, а – VC#1).

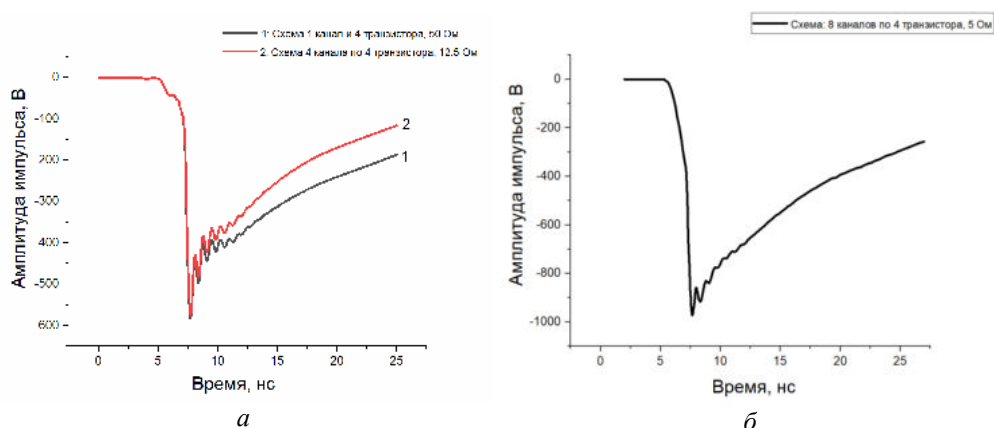


Рис. 2. Форма импульсов напряжения от количества каскадов включения, напряжения питания на коллекторах транзисторов и величины нагрузки

Наличие эффекта вторичного лавинного пробоя в цепочке последовательно соединенных транзисторов приводит к дополнительному обострению части фронта импульса на нагрузке при переключении всего каскада лавинных транзисторов (см. график рисунка 3, б – форма импульса напряжения на нагрузке). В целом, появление двойного лавинного пробоя в нашей модели является убедительным аргументом в пользу ее достоверности.

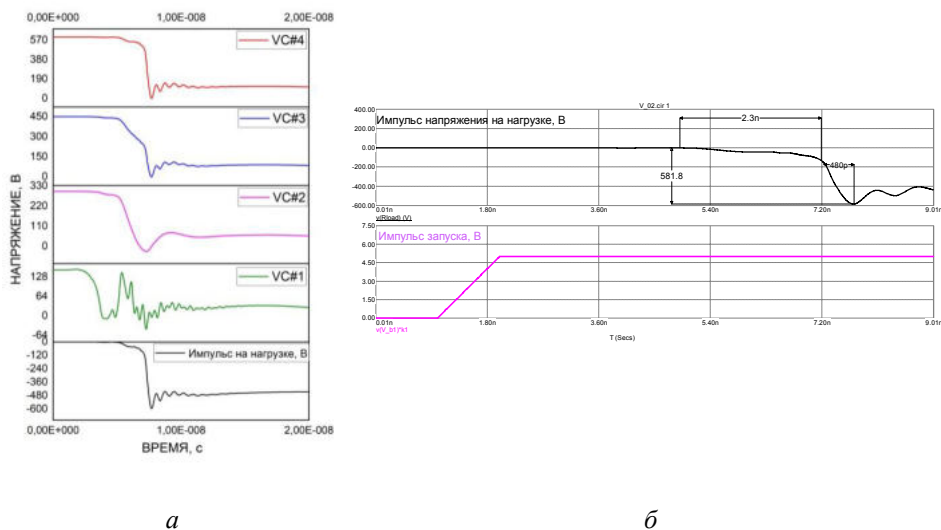


Рис. 3. Диаграмма переключения схемы последовательного включения цепочки из четырех ЛТ при подаваемом уровне напряжения питания 600 В (а); форма импульса на нагрузке при переключении (б)

По результатам выполненных исследований проведена разработка и создание компактных каскадных генераторов Аркадьева-Маркса с амплитудой выходного напряжения в 120 и 1150 В, обладающих характерным фронтом нарастания сигнала до 2.5 нс (см. рисунок 4).

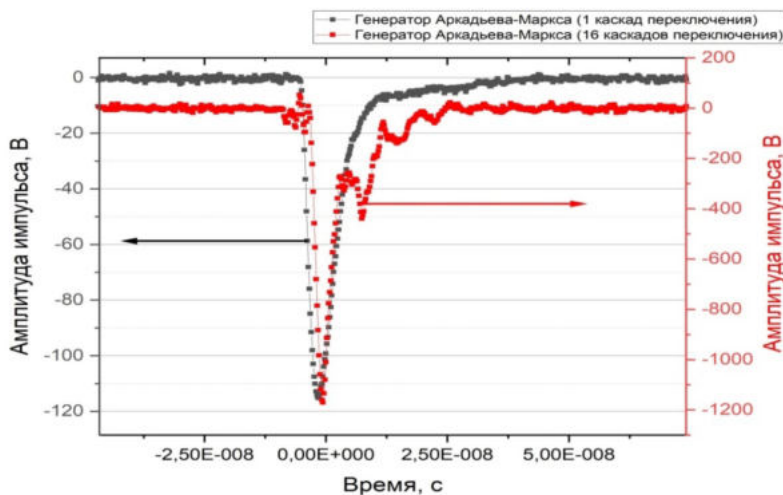


Рис. 4. Характерная форма сигналов разработанных генераторов при работе на нагрузку 50 Ом

Экспериментальная разработка генераторов выполнена на основе серийных, не специализированных транзисторов КТ3107 и FZT749. Проведенные тесты выявили характерную возможность работы в лавинном режиме транзисторов указанных типов. Разработанные высоковольтные генераторы запитываются аккумуляторным блоком питания с напряжением 12 В и позволяют работать в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения до 100 кГц. Оценка верхней предельной частоты спектра сигнала составляет 150 МГц, что позволяет считать сигнал СШП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе обсуждены результаты моделирования и экспериментальных исследований по использованию режима каскадного включения лавинных транзисторов для создания высоковольтных генераторов наносекундных импульсов. Для схем одно-, четырехканального включения каскадов лавинных транзисторов получены сходные выходные сигналы с длительностью фронта < 1 нс и амплитудой напряжения до 600 В на нагрузках в 50.0 Ом и 12.5 Ом, амплитудой до 1 кВ на нагрузке в 5 Ом в восьмиканальной схеме включения. В модели продемонстрирован физический эффект последовательного двойного лавинного пробоя транзистора, на базу которого подается импульс управления-запуска. Наличие эффекта вторичного лавинного пробоя в цепочке последовательно соединенных транзисторов приводит к дополнительному обострению части фронта выходного импульса на нагрузке при переключении всего каскада лавинных транзисторов. По итогам моделирования были изготовлены и испытаны компактные автономные генераторы СШП импульсов с амплитудой до 1150 В, фронтом нарастания сигнала до 2.5 нс и частотой повторения до 100 кГц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics / Ed. by F. Sabath, D.V. Giri, F. Rachidi, A. Kaelin, – Springer, – 2010. – 496 p.
2. Precise, sub-nanosecond and high-voltage switching enabled by gallium nitride electronics integrated into complex loads / J.W. Simonaitis [et al.] // Rev. Sci. Instrum. – 2021. – 92, 074704.
3. A.I. Bishop, Sub-nanosecond Pockels cell switching using avalanche transistors/ A.I. Bishop, P.F. Barker // Rev. Sci. Instrum. – 2006. – 77, 044701.
4. A Marx High-Voltage Pulse Source Based on the Series–Parallel Connections of Avalanche Transistors / H. Guan [et al.] // Proceeding of Recent Developments in Intelligent Computing, Communication and Devices, Springer. – 2019. – pp. 767–772.
5. Лавинные транзисторы вчера, сегодня и завтра / Владимир Дьяконов // Компоненты и технологии –2010.– 8, с. 49–58.
6. MICRO-CAP 12 Analog/Digital Simulator // http://www.spectrum-soft.com/download/mc12_brochure.pdf.
7. Switching mechanisms triggered by a collector voltage ramp in avalanche transistors with short-connected base and emitter / S. Vainshtein et al. // IEEE Trans. Electron Devices. – 2016. – 63(8), pp. 3044–3048.

ТОКИ УТЕЧКИ ЗАТВОРА *n*-КАНАЛЬНЫХ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ, ДОПОЛНИТЕЛЬНО ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ АЗОТА

В. Б. Оджаев¹, А. Н. Петлицкий², В. С. Просолович¹, Н. С. Ковальчук²,
Д. В. Шестовский², Ю. Н. Янковский¹

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Минск, Беларусь, e-mail: prosolovich@bsu.by

²⁾ ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. И.П. Казинца,
121А, 220108 Минск, Беларусь, e-mail: 1279489@mail.ru

Исследованы электрофизические характеристики силовых *n*-канальных МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. Ионная имплантация ионов азота производилась через защитный оксид толщиной 23 нм энергиями 25 и 40 кэВ дозами $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15}$ см⁻². Быстрый термический отжиг проводился при температурах 900 °С или 1000 °С длительностью 15 с. Установлено, что проведение азотирования подзатворного диэлектрика позволяет снизить как величину, так и уровень шумов тока утечки затвора при дозах имплантации $(1-2) \cdot 10^{13}$ см⁻². Значительное снижение токов утечки затвора обусловлено локализацией атомов азота в процессе быстрой термической обработки в области нестехиометрической части границы раздела Si/SiO₂ и последующей эффективной пассивацией поверхностных состояний. При повышении доз имплантации до $2,5 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{15}$ см⁻² наблюдается превышение обоих параметров по сравнению с контрольными образцами вследствие неполного отжига радиационных дефектов, сформированных дополнительной имплантацией ионов азота. Однако проведение трехступенчатого процесса (чередование ионной имплантации и быстрого термического отжига) с аналогичной суммарной дозой имплантации позволяет существенно снизить плотность пострadiaционных дефектов.

Ключевые слова: силовые МОП-транзисторы; ионная имплантация; токи утечки затвора; шумы токов утечки затвора.