

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера**

Р Г Б ОД

На правах рукописи

БЕЛКИН Вениамин Саадиевич

**ФОРМИРОВАТЕЛИ МОЩНЫХ
НАНОСЕКУНДНЫХ
И СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ**

01.04.01 – физика физического эксперимента, физика приборов,
автоматизация физических исследований

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

НОВОСИБИРСК—1994

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- | | |
|-------------------------------|--|
| Купер
Эдуард Адольфович | — доктор технических наук,
Институт ядерной физики
им.Г.И. Будкера СО РАН,
г.Новосибирск. |
| Вьюхин
Вячеслав Николаевич | — кандидат технических наук,
Институт автоматики
и электрометрии СО РАН,
г.Новосибирск. |

Ведущая организация: Физико-технический институт
им. А.И. Иоффе РАН,
г. Санкт-Петербург.

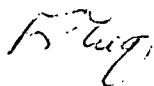
Защита диссертации состоится "16" 11 1994 г. в
"16" часов на заседании специализированного совета Д.002.24.02 при
Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерной
физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан "14" 10 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
академик



Б.В. Чириков

Актуальность темы. Применение высоковольтных нано и субнаносекундных импульсов достаточно обширно в настоящее время и постоянно расширяется вместе с развитием и удешевлением аппаратуры формирования импульсов. Некоторые примеры применения приведены ниже.

Лазеры - возбуждение ячеек Поккельса и т. п.

Экспериментальная физика - поджиг разрядников, формирование электронных и ионных пучков соответствующей длительности, время-пролетная масса и энерго спектрометрия.

Химия - оперативное измерение параметров электролитов.

Биология - импульсный электрофорез хромосом.

Акустолокация - оперативное бесконтактное измерение толщины металлов с высокой точностью.

Радиолокация - импульсная (широкополосная) локация, одно из преимуществ которой в малых габаритах и потреблении питания при большой импульсной мощности системы. Измерение параметров антенных систем во временной области с исключением влияния отражений от поверхности земли, зданий и т. п.

Геолокация - радиолокация земной породы, океана и т. д. для поиска подземных вод, пустот (например в археологии), металлов, направления угольных пластов, измерения толщины льда.

Радиоэлектроника - измерение помехоустойчивости аппаратуры, в том числе ЭВМ, импульсы развертки ЭОП.

Примеры применения можно продолжать и развивать, однако актуальность темы ясна из уже приведенных.

Требования к параметрам импульсов самые разнообразные, особенно в научном эксперименте, и они вместе с развитием радиоэлектроники растут в сторону новых возможностей, поэтому

выделим лишь некоторые. Для радарных установок длительность импульса определяет размерное разрешение объекта локации и ее требуемое типичное значение доли - единицы наносекунд, а требуемая мощность от единиц киловатт до нескольких мегаватт, что для стандартной 50 Ом нагрузки дает амплитуду импульса в сотни вольт - единицы киловольт.

Для георадаров глубина локации определяется скин-слоем лоцируемого объекта и зависит таким образом как от мощности так и от длительности импульса. Для импульсов с полушириной в несколько наносекунд и мощностью в сотни киловатт глубина локации грунта составляет до нескольких десятков метров с разрешающей способностью единицы - десятки сантиметров. Естественным является желание увеличить глубину локации при сохранении разрешающей способности, одним из ограничений является электропрочность антенно-фидерной системы. Амплитуды до 10 кВ выглядят еще вполне приемлемыми.

Амплитуды импульсов и их длительности для применения в лазерной технике и времяпролетных анализаторах лежат в том же диапазоне: единицы киловольт и доли - единицы наносекунд. Например, типичная требуемая амплитуда для питания ячеек Керра в лазерных установках для измерения электронной температуры плазмы методом томсоновского рассеяния составляет 20 кВ при длительности импульсов 10 - 30 нс. Поскольку ячейка Керра является малоемкостной нагрузкой, то при подводе импульса кабелем напряжение на нагрузке удваивается по сравнению с напряжением в кабеле и на выходе генератора. Таким образом, требуемая в этом случае амплитуда на выходе генератора 10 кВ.

Для активно развиваемой в настоящее время техники

короткоимпульсных ионных и электронных инжекторов и источников рентгеновского излучения диапазон необходимых амплитуд импульсов простирается до сотен киловольт.

История вопроса. Широко известны применяемые в качестве ключевых элементов для создания мощных наносекундных импульсов вакуумные и газоразрядные приборы. Их основными недостатками являются ограниченный срок службы, высокая стоимость, малая удельная (на единицу объема) коммутационная способность, что определяет большие габариты формирователей.

Развитие радиоэлектроники и схемотехники за последние пятнадцать лет позволило создавать формирователи импульсов амплитудами до десятков киловольт с длительностями в доли - единицы наносекунд на основе полупроводниковой элементной базы, обеспечившей относительно высокий КПД (десятки процентов), повторяемость результатов и низкую стоимость аппаратуры и сделало вакуумные и газоразрядные приборы по крайней мере в указанном диапазоне амплитуд и длительностей неконкурентно-способными.

В 1979г И.В.Грехов с сотрудниками из Ленинградского физико-технического Института им. Иоффе показали возможность формирования киловольтовых импульсов с фронтом менее 1нс полупроводниковыми диодами с задержкой лавинного пробоя (ДЗЛП). Для этого диод включается последовательно с нагрузкой, на него подается постоянное обратное напряжение, близкое к величине лавинного пробоя, и импульс также обратной полярности с крутизной нарастания сотни вольт за нс.

Лавинный пробой диода происходит с задержкой в доли - единицы нс, так что суммарное напряжение на диоде вырастает

примерно вдвое выше лавинного, затем диод отпирается с фронтом менее 1нс, причем остаточное напряжение на диоде может в определенных условиях быть существенно меньше лавинного. При увеличении крутизны входного импульса формирование ударной волны в диоде и соответственно формирование более короткого фронта на выходе происходит и без подачи обратного смещения на диод. При подборе диодов допускается их последовательное соединение. В работах Эменко С.И. из Смоленского филиала Московского энергетического института была показана возможность применения в качестве ДЗЛП промышленных диодов.

Достаточно давно известны диоды с накоплением заряда, некоторые типы диодов, не относящиеся к ним по номенклатуре, фактически являются достаточно высоковольтными ДНЗ и позволяют получать следующие типичные параметры импульсов: $U_{\text{вых}} \sim 50\text{В}$ при $t_{\phi} \sim 0.2\text{нс}$ для диода КА609 и $U_{\text{вых}} \sim 500 - 800\text{В}$ при $t_{\phi} = 0.5 - 1\text{нс}$ для КД204, КД212 (по данным автора).

В 1983г И.В.Грехов с сотрудниками продемонстрировали еще один способ получения мощных наносекундных импульсов в формирователях второго типа с помощью дрейфовых диодов с резким восстановлением запирающих свойств со структурой p^+-p-p^+ .

Если через ДДРВ пропустить импульс прямого тока I_+ , длительностью t_+ , а затем импульс обратного тока I_- , длительностью t_- , то при условии:

$$t_+ + t_- < t_{\text{ж}},$$

где $t_{\text{ж}}$ - время жизни неосновных носителей заряда, диод запирается при равенстве:

$$Q_+ = \int_0^{t_+} I_+ dt = \int_0^{t_-} I_- dt = Q_-$$

причем время запираания не превышает единиц наносекунд. Если амплитуда I_- больше амплитуды I_+ , то происходит разрыв ненулевого тока I_- , и при параллельном соединении диода и нагрузки - формирование выходного импульса.

Те же авторы впервые продемонстрировали формирователи коротких импульсов с ДДРВ, в которых используются индуктивные накопители в цепях прямого и обратного токов диода, а в качестве ключей этих токов - транзисторы. Это позволило получить КПД более 25% и частоту повторения до 100кГц. Они же впервые объединили схемы с ДДРВ и ДЗЛП. Зенко С.И. показал возможность работы в режиме ДДРВ широкой номенклатуры промышленных диодов.

К концу 80х, началу 90х лучшие разработки в серийном производстве нано- и субнаносекундных генераторов на основе лавинных приборов и полевых транзисторов имела английская фирма Kentech Instruments Ltd по данным ее рекламных проспектов. Параметры используемых ключей и схемотехника в открытых литературных источниках неизвестны. Максимальные параметры импульсов: амплитуда до 9 кВ при фронте 100 пс и частоте повторения 1 кГц. Отличительной особенностью разработок является малое время задержки между запуском и выходным импульсом: 10 - 30 нс и малая величина аппертурной неопределенности этого времени - джиттера: 10 - 20 пс. Относительный недостаток генераторов - малый КПД, за счет чего ограничена частота повторения, хотя в рекламных проспектах указано, что при задании конкретных параметров импульсов без их оперативной перестройки эффективность и частота повторения генераторов могут быть повышены.

Разработки автора, рассматриваемые в диссертации, связаны в

основном с формированием коротких импульсов, у которых фронт, спад и длительность на полувысоте одного порядка. Параметры импульсов по фронту и амплитуде близки к параметрам генераторов Kentech, превосходят их по КПД, поскольку при аналогичных выходных параметрах для наиболее мощных генераторов потребление наших разработок меньше в $10 + 20$ раз. В то же время представленные в диссертации формирователи имеют большее время задержки выходного импульса от запуска и, соответственно, несколько уступают по джиттеру.

В представленных разработках в качестве выходных формирователей используются серийные низкочастотные выпрямительные диоды и импульсные диоды микросекундного диапазона в режимах ДДРВ, ДНЗ и ДЗЛП. Проведенные исследования диодов позволили установить границы их применимости. Простая схемотехника формирователей и применение недорогих серийных элементов обуславливают простоту повторения, малые габариты и стоимость и делают их пригодными для широкого применения. Развитая система расчетов позволяет с достаточной для практики точностью по заданным параметрам импульса и нагрузки рассчитать реактивные элементы формирователей и выбрать подходящие диоды и компоненты первичного ключа.

Существенным отличием от известных ранее схем формирователей является использование насыщающихся индуктивностей в качестве ключей обратного тока ДДРВ, что резко упрощает схемотехнику формирователей, поскольку в формирователе остается только один первичный активный ключ. Разработки с применением насыщающихся индуктивностей позволили объединить выходные каскады формирователей и магнитные генераторы импульсов

и, тем самым, снизить при необходимости требования к коммутационной способности первичного ключа.

Работы по схемотехнике формирователей проводились в соавторстве с Г. И. Шульженко, исследование работы диодов - под руководством и при участии автора, создание расчетов и вывод предельных соотношений, разработка делителей тока и напряжения - автором диссертации.

Цель работы. Цель работы заключается в развитии новой схемотехники формирователей нано- и субнаносекундных импульсов на основе серийных диодов и насыщающихся индуктивностей, исследовании свойств диодов в режимах формирования таких импульсов, создании системы расчетов формирователей.

Научная новизна. Основными научными результатами работы являются следующие.

- Разработаны новые конфигурации схем для формирования коротких наносекундных и субнаносекундных высоковольтных импульсов на основе ДДРВ, ДЗЛП и насыщающихся индуктивностей, на которые получено три патента России.

- Предложено и проведено исследование поведения диодов в режиме ДДРВ, в результате которого впервые установлено существование ограничения на заряд накачки. Превышение граничного заряда приводит к появлению медленной части фронта выходного импульса при закрывании диодов и неодновременности закрывания разных экземпляров.

- Получены граничные соотношения для максимально возможной амплитуды выходных импульсов в схемах с максимальными КПД и расчетные формулы для элементов формирователей.

- Исследована возможность применения некоторых новых типов

серийных диодов в качестве ДЗЛП, возможность последовательного включения ДЗЛП в одну формирующую сборку. Показано, что превышение крутизны накачки сборки выше определенного уровня приводит к срабатыванию сборки как единого элемента без удлинения фронта импульса по сравнению с одним диодом.

Практическая ценность.

-Разработаны практические схемы формирователей с амплитудами 1 + 10 кВ с длительностью импульса от долей до единиц наносекунд, частотой повторения до десятков килогерц и КПД до 50%, работоспособные на любую нагрузку от холостого хода до короткого замыкания.

-Создана методика расчета и конструирования формирователей для заданой амплитуды и длительности импульса, исключающая подбор экземпляров диодов.

-Разработаны широкополосные делители напряжения на основе промышленных резисторов и развита конструкция широкополосных трансформаторов тока.

-В ИЯФ СО РАН формирователь с амплитудой 500 В и фронтом 1 нс применялся как генератор запусковых импульсов и для калибровки широкополосных трактов на установке "ВОДА 1-10". Формирователь с амплитудой 8 кВ и фронтом 0.1 нс использовался в импульсном рефлектометре для отработки методики измерения положения границы плазмы и измерения ее плотности.

-В настоящее время в лаб.7 ведется разработка варианта короткоимпульсного инжектора атомов с высокой частотой повторения, в котором формирователи с амплитудой 10 кВ, фронтом 3 нс и длительностью 10 нс применяются как источники питания плазменного эмиттера и вытягивающего напряжения. Рассматриваются

возможности применения формирователей для времяпролетного анализа параметров плазмы.

-На основе разработок и при участии автора созданы практические варианты генераторов, применявшиеся в качестве выходных каскадов передатчиков в пробных образцах новых геологических локаторов для измерения толщины льда, для съемки сечения и направления угольных пластов на глубину до 15 метров. Приборы отличаются простотой исполнения и надежностью в работе в различных реальных условиях.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Создание новых одноключевых конфигураций схем формирователей нано и субнаносекундных импульсов.

2. Результаты экспериментальных исследований промышленных диодов в качестве ДДРВ и ДЗЛП. Ограничение заряда для ДДРВ.

3. Расчеты элементов формирователей при условии получения максимального КПД и ограничения заряда.

4. Двухкаскадные формирователи.

5. Формирователи двуполярных наносекундных импульсов.

6. Широкополосные делители тока и напряжения.

7. Практические схемы формирователей нано и субнаносекундных импульсов с амплитудами импульсов до 10 кВ на согласованную 50 Ом нагрузку.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались на Международной конференции по нанотехнологии и наноэлектронике (Барнаул, 1992 г.), на семинарах в ИЯФ СО РАН и НИИПИ "КВАРЦ" (Нижний Новгород), опубликованы в статьях и препринте, защищены тремя патентами. Всего по теме диссертации опубликовано 11 работ.

Содержание диссертации. Объем диссертации 97 страниц, 45 рисунков, 45 ссылок на литературные источники. Диссертация содержит введение и пять глав. Введение посвящено обоснованию актуальности темы и истории вопроса. Приводится краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны новые конфигурации схем для формирования коротких наносекундных и субнаносекундных высоковольтных импульсов на основе ДДРВ, ДЗЛП и насыщающихся индуктивностей. Одна из них и ее временная диаграмма работы показаны на рис. 1 и 2. Схемы не содержат активных сопротивлений в мощных цепях накачки диодов и, как следствие, имеют высокий КПД. В качестве наиболее мощного ключа обратного тока ДДРВ используется насыщающаяся индуктивность, таким образом произведено объединение формирователей с ДДРВ и магнитных генераторов тока. В качестве первичных ключей прямого тока ДДРВ используются транзисторы и тиристоры. Произведено сравнение предложенных одноключевых схем с известными ранее двухключевыми. Описаны простые приемы для повышения качественных параметров импульсов: формирование равных фронта и спада, подавление повторных импульсов, подавление предвестника.

Во второй главе рассматриваются экспериментальное исследование поведения промышленных выпрямительных диодов в режиме ДДРВ, в результате которого впервые установлено существование ограничения на заряд накачки диода. Превышение граничного заряда приводит к появлению медленной части фронта выходного импульса - "предвестника" при закрывании диодов и неодновременности закрывания разных экземпляров.

В условиях ограничения заряда диоды одного типа могут

соединяться последовательно, образуя формирующую ячейку. Может быть полезным параллельное соединение диодов в ячейке для распределения заряда, превышающего граничный для одного экземпляра. Для некоторых типов ДНЗ, в отличие от ДДРВ, превышение критического заряда в первую очередь приводит к неодновременности срабатывания разных экземпляров, и только при дальнейшем повышении заряда накачки и к появлению предвестника.

Показано, что в режимах ДДРВ и ДЗЛП работоспособны большое количество типов диодов. Описаны результаты исследований мощных транзисторов и импульсных триггеров в качестве первичного ключа.

В третьей главе выведены расчетные соотношения для элементов формирователей для двух типов формируемых импульсов: оптимального с синусоидальным нарастанием и экспоненциальным спадом и гауссовского. В расчетах принималось формирование импульса без предвестника, т. е. с ограничением заряда. Предполагалось, что в цепи накачки диода отсутствуют активные сопротивления, т. е. формирователь обладает максимальным КПД.

Получены граничные соотношения для максимально возможной амплитуды выходных импульсов в формирователях с ДДРВ. Первое связано с энергетикой выходного импульса. Энергия, расходуемая на создание импульса, исходно всегда накоплена в каком-либо конденсаторе, заряд которого одновременно является зарядом, проходящим через ДДРВ в обратном направлении. Сказанное не зависит от типа применяемой схемы (одно- или двухключевой или других типов), вследствие чего дальнейшие выводы верны в общем.

Приравнивая накопленную в конденсаторе энергию к энергии полезной части импульса с фронтом t_{ϕ} на нагрузке R_H с учетом

КПД, при ограничении заряда накопительного конденсатора Q и в предположении, что напряжение на нем U_C составляет долю δ амплитуды выходного импульса U_H , получим:

$$U_H \leq a \delta R_H Q / t_\phi \text{ или } U_H \leq \sqrt{a R_H Q U_C / t_\phi},$$

где a - численный коэффициент, связанный с КПД и добротностью эквивалентного выходного контура, в который входят емкость диода, индуктивность накачки и сопротивление нагрузки. Приведенные выражения показывают, что для повышения U_H необходимо повышать U_C .

С другой стороны, представляя Q как интеграл обратного тока и учитывая, что его длительность t_- из-за ограниченного быстрогодействия ключей не может быть меньше некоторой, получим:

$$U_H \leq b R_H Q / t_-$$

Третье ограничение связано с рассмотрением конкретной схемы, а именно с применением в предлагаемых схемах насыщающейся индуктивности вместо ключа обратного тока и сводится к зависимости амплитуды импульса от начальной μ и конечной $\mu_{осм}$ (в состоянии насыщения) магнитной проницаемости магнитопровода, заряда накачки и длительности прямого тока:

$$U_H \leq c R_H Q \sqrt{\mu / \mu_{осм}} / t_+$$

Получены выражения для коммутлируемого тока и мощности первичного ключа и коэффициента уплотнения формирователя по мощности. Приведенные соотношения позволяют оценить возможность создания формирователя, выбрать подходящий тип диодов и рассчитать элементы схемы с достаточной для практики точностью.

Численные коэффициенты рассмотрены для двух случаев: формирования импульса с синусоидальным фронтом и экспоненциальным спадом на границе апериодического режима

эквивалентного выходного контура и формирование импульса с равными фронтом и спадом при максимально возможном КПД. Показано, что из-за связи Q и емкости диодов рассмотренные случаи строго соблюдаются лишь для отдельных точек U_H .

В четвертой главе рассмотрены двухкаскадные формирователи импульсов и формирователи двуполярных импульсов с формой близкой к одному периоду синусоиды, являющиеся развитием схемотехники формирователей.

Двухкаскадные формирователи позволяют преодолеть ограничения на амплитуду коротких импульсов, связанные с магнитными звеньями формирователей, и максимально использовать возможности диодов. функциональная схема формирователя и временная диаграмма работы показаны на рис. 3 и 4. В формирователе используются два ДДРВ, второй подключен к выходу, а сформированный на первом импульс используется для создания обратного тока второго диода. Первый диод выбирается с достаточно большим Q , позволяющим удовлетворить условия реализации насыщающейся индуктивности. Второй диод для формирования коротких (единицы наносекунд) импульсов должен иметь малую емкость κ , соответственно, малый Q , что в данном случае допустимо, поскольку его обратный ток создается высоковольтным и достаточно коротким импульсом первого каскада, в результате чего выполняются условия ограничения U_H .

Формирователи двуполярных импульсов наиболее адекватны для радарных систем. Рассмотрены два варианта формирования таких импульсов, один с дифференцированием RC-цепочкой первичного импульса с равными фронтом и спадом, второй с параллельным нагрузке короткозамкнутым шлейфом, длиной в половину

длительности первичного импульса, и отсечкой формирующей ячейки от нагрузки в конце первичного импульса еще одним ДДРВ, включенным между формирующей ячейкой и нагрузкой.

В пятой главе описаны практические схемы формирователей с амплитудами $1 + 10$ кВ с длительностью импульса от долей до единиц наносекунд, частотой повторения до десятков килогерц и КПД до 50%, работоспособные на любую нагрузку от холостого хода до короткого замыкания. Приведены разработки схем с высокой частотой повторения и низковольтным источником питания, в которых объединены функции первичного ключа и высоковольтного преобразователя напряжения. Показаны конструкции широкополосных делителей напряжения на основе промышленных резисторов и широкополосных трансформаторов тока. Даны примеры применения формирователей.

Основные параметры некоторых типов формирователей для 50 Ом нагрузки приведены в таблице.

Полярность	Двупол. импульс	монополярный полярность по требованию				
		1200	700	6000	2000	8000
Вых. напр. [В]	300	1200	700	6000	2000	8000
Фронт [нс]		2	1	2	0.2	< 0.15
Длительность на полувы- соте [нс]	3 - 6 *	2.5	2 - 4	3	0.2	0.5
Джиттер [нс]	<0.1		<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Задержка от запуска [нс]	250		120	250	250	1000
Частота пов- торения [кГц]	1 - 10	1 **	1 - 50	0.1 - 1	0.4 - 4	0.1 - 1
Питание [В]	+ 12	3.2 - 3.7	+12	+15	+12	+15
мак [Вт]	5	1	2	/	5	7
Габариты	120 × 60 × 30 мм ³			200 × 90 × 40 мм ³		

* - полная длительность импульса с формой, близкой к периоду.

** - автогенератор, для остальных разработок - внешний запуск.

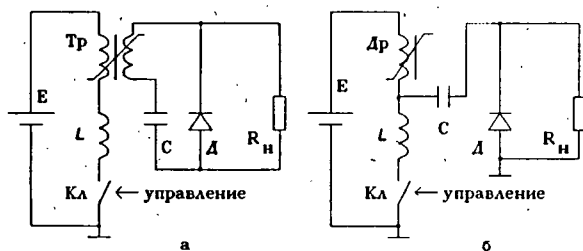


Рис. 1.
функциональная схема формирователя импульсов с полностью
управляемым ключом.

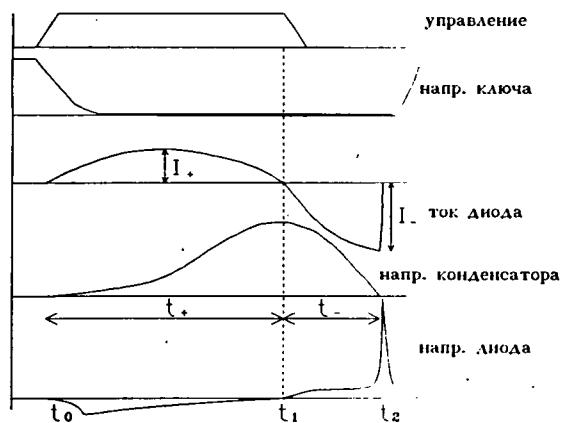


Рис. 2.
Временная диаграмма работы формирователя.

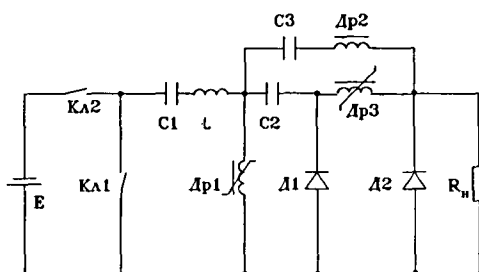


Рис. 3.
функциональная схема двухкаскадного формирователя.

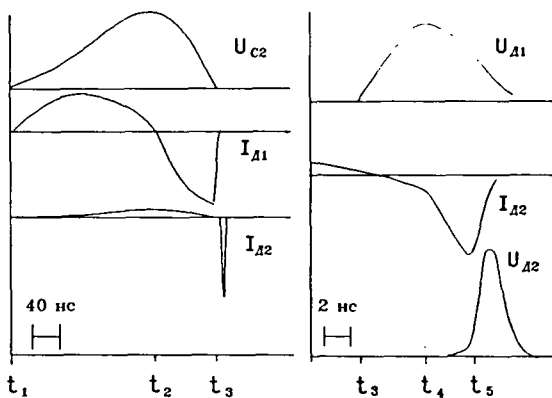


Рис. 4 .
Временная диаграмма работы двухкаскадного формирователя.
Положительными показаны прямые токи Д1 и Д2.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Пат. 1747088, Россия, МКИ Н 03 К 5/01. Формирователь наносекундных импульсов В.С. Белкин, Г.И. Шульженко. N 4817347/21; Заявл. 11.03.90.
2. Белкин В.С. Широкополосный делитель напряжения. ПТЭ, 1990, N5, с. 223.
3. Белкин В.С., Шульженко Г.И., Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе. Препринт 91-51, ИЯФ, Новосибирск, 1991. - 35с.
4. Белкин В.С., Марин О.Ю., Шульженко Г.И. Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов на серийных диодах. ПТЭ, 1992, N6, с. 120.
5. Пат. 2004064, Россия, МКИ Н 03 К 5/01. Формирователь наносекундных импульсов В.С. Белкин, Г.И. Шульженко. N 4942451/21; Заявл. 05.06.91.
6. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Формирователи высоковольтных пикосекундных импульсов. ПТЭ, 1992, N6, с. 125.
7. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Формирователь высоковольтных двуполярных наносекундных импульсов синусоидальной формы. Первая международная конференция "Нанотехнология, наноэлектроника и криоэлектроника. Тезисы докладов. Барнаул. 1992. с. 125-128.
8. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Формирователь наносекундных импульсов. Заявка на изобретение N 5022890/21. Заявл. 17.01.92. Положит. решение от 28.12.92.
9. Belkin V.S., Shulzchenko G.I. Forming of high voltage nanosecond and subnanosecond pulses using standart power rectifying diodes. RSI, 1994, 65(3), March, p. 751-753.

10. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Генератор высоковольтных двуполярных наносекундных импульсов синусоидальной формы. ПТЭ, 1994, №5, (в печати).
11. Белкин В.С., Шульженко Г.И. Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов с низковольтным питанием. ПТЭ, 1994, №5, (в печати).