

На правах рукописи

Боль Юрген

Исследование коммутирующих устройств на основе искровых промежутков с предельно высокой частотой коммутации и возможностей их применения

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете

Научный руководитель: д.т.н., профессор Титков В.В.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор В.Л.Чечурин
к.т.н. Г.Д.Кадзов

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова

Защита состоится " ____ " _____ 2003 г. в " ____ " часов в ауд.325

На заседании диссертационного совета К 212.229.03 в Санкт-Петербургском Государственном политехническом университете по адресу:
195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

Отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электромеханический факультет. Диссертационный совет К 212.229.03

Автореферат разослан " ____ " _____ 2003

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н., доц.

Гумерова Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема тестирования радиоэлектронных и цифровых устройств на устойчивость при внешних электромагнитных воздействиях связана с разработкой соответствующей испытательной техники. Одним из видов таких воздействий является электромагнитные импульсы с высокой до нескольких десятков килогерц частотой повторения. Особенностью такого воздействия на микросхемы является постепенное накопление повреждений, при достижениями которыми критических масштабов происходит выход микросхемы из строя. Необходимым требованием к техническим устройствам генерирования повторяющихся импульсов высокого напряжения является высокая надежность в условиях длительной работы. Несмотря на большие возможности современных полупроводниковых элементов для создания устройств генерации импульсов с высокой частотой повторения их сравнительно высокая стоимость, а также определенные ограничения по надежности в условиях длительной работы по генерации импульсов напряжения с амплитудой несколько киловольт и частотой повторения несколько сот мегагерц, дают основания для поиска альтернативных систем коммутации испытательных установок. Таким образом актуальность темы работы определяется следующей из практики необходимостью разработки дешевых и надежных коммутаторов, работающих в условиях предельно высокой частотой повторения импульсов. Традиционные искровые промежутки с малым расстоянием между электродами дают принципиальную возможность коммутации с высокой частотой повторения импульсов. Однако до настоящей работы в научно-технической литературе отсутствовали данные о поведении искровых промежутков в условиях предельно высоких частот коммутации и о возможностях управления параметрами такого коммутатора (амплитуда напряжения, частота повторения импульсов).

Цель работы. Получение экспериментальных и расчетных данных о возможностях искровых промежутков для работы в коммутирующих устройствах с предельно высокой частотой повторения импульсов. Получаемые в процессе такого исследования данные являются основой для разработки современных устройств тестирования различных электронных микросхем и при решении других задач электромагнитной совместимости.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Получены экспериментальные данные о работе искрового промежутка с малым расстоянием между электродами (около 200 мкм) в условиях высокой частоты повторения импульсов (до 100 кГц) и амплитудой импульса 1-2 кВ.
- Выполнены электрические и оптические измерения параметров процесса коммутации в искровом промежутке с высокой частотой повторения импульсов
- Исследовано явление модальности процесса в высокочастотной коммутации в искровом промежутке, при котором в одном процесс может генерироваться две импульсные моды, отличающиеся амплитудой и длительностью импульса. Определены внешние условия возникновения и дана попытка теоретического объяснения данного явления.
- Расчетными и экспериментальными методами определена область параметров устройства и системы его питания, при которых достигаются наилучшие характеристики (в частности мощность).

Практическая значимость работы заключается в том, что

- На основе результатов, полученных в ее рамках, разработаны современные надежные и сравнительно дешевые устройства тестирования телекоммуникационных, цифровых и других мини- и микрополупроводниковых устройств и схем.
- Разработаны конкретные технические требования и рекомендации, касающиеся выбора параметров искровых промежутков и системы питания устройств для генерации высокочастотных импульсов с помощью систем искровых промежутков
- Исследованные в работе системы высокочастотной коммутации на основе искровых промежутков является основой для разработки других устройств применяемых в экспериментальных работах области электромагнитной совместимости.

Достоверность результатов диссертации подтверждается:

- Применением современной измерительной аппаратуры и хорошей воспроизводимостью результатов экспериментов
- Непротиворечивостью полученных экспериментальных и расчетных результатов результатам других работ

- Успешным применением результатов диссертации в практической сфере

Личный вклад автора. Результаты работы были достигнуты как самостоятельно (создание экспериментальных установок и исследования с их помощью процессов высокочастотной коммутации в искровых промежутках) так и в соавторстве (разработка расчетных моделей и физическая интерпретация результатов)

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на трех международных и одной Российской конференции.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ

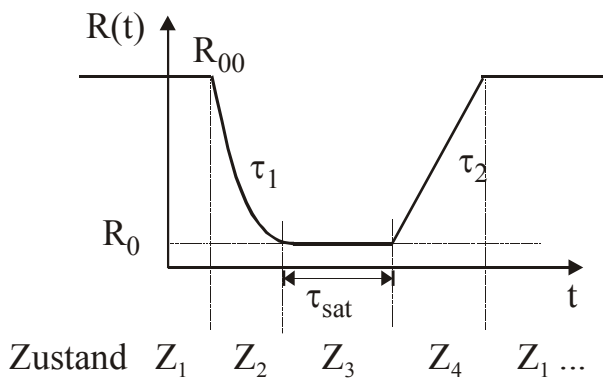
Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (58 наименований) приложений (9 стр.) Диссертация выполнена на 139 стр. машинописного текста, содержит 55 рисунков и 26 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении (раздел 1) дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель исследования, научная новизна и практическая ценность работы.

Во второй главе (разделе) проведен обзор литературных данных о методах и устройствах применяемых для создания устройств генерации высоковольтных импульсов с высокой до ста килогерц частотой следования. Рассмотрены различные ключевые элементы, традиционно используемые в высоковольтной импульсной технике - вакуумные, газоразрядные коммутаторы и полупроводниковые приборы. Проанализированы известные схемы генераторов импульсов высокого напряжения. Сопоставление различных методов получения повторяющихся импульсов высокого напряжения и цели работы, учет факторов надежности и стоимости разрабатываемых устройств генерации высокочастотных импульсов высокого напряжения позволил выделить для специального исследования искровые промежутки с малыми межэлектродными расстояниями (100-400 мкм) и сформулировать основные задачи работы:

- компьютерная симуляция с помощью упрощенной модели искрового промежутка и определение физических ограничений и параметров, определяющих получение максимально высокой частоты повторения импульсов
- экспериментальные исследования макроскопического и микроскопического поведения искрового промежутка в режиме коммутации с высокой частотой повторения и физических характеристик процесса коммутации
- сравнение результатов натуральных экспериментов и моделирования, определение области оптимальных параметров искровых промежутков и системы электропитания, обеспечивающие наилучшие характеристики устройств с предельно высокой частотой следования импульсов



Состояния:

$$Z_1: R(t) = R_{00} = const.$$

$$Z_2: R(t) = R_{00} e^{-\frac{t}{\tau_1}}.$$

$$Z_3: R(t) = R_0 = const.$$

$$Z_4: R(t) = R_0 + \frac{t}{\tau_2} (R_{00} - R_0)$$

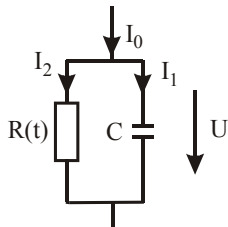
Рис.1 Изменение сопротивления искрового промежутка во времени

Третья глава представляет собой основную теоретическую часть работы. Математическая модель работы искрового промежутка в режиме генерации импульсов напряжения с частотой повторения с характерным периодом 1-5 мкс основана на представлениях, что в условиях относительно малых токов питающей системы (1-5 мА) газовый разряд в промежутке в основном имеет лавинную форму и описывается в рамках теории Таунсенда. При этом простейшая математическая модель искрового промежутка строится на основе анализа переходных процессов в цепи (рис.1), в которой разрядный резистор является функцией времени $R(t)$, определяемой процессами образования электронной лавины и ее продвижения в промежутке, нейтрализации на аноде и электрон-ионной рекомбинации. Отмеченные физические механизмы позволили построить качествен-

ную модель поведения сопротивления газоразрядного промежутка, которое аппроксимируется следующей зависимостью (рис.1), где стадия Z_1 характеризуется наивысшим значением сопротивления, соответствующего отсутствию разрядных явлений в промежутке, стадия Z_2 начинается с момента когда, когда напряжение на промежутке достигает критического значения - напряжения зажигания U_{ign} . На стадии Z_2 происходит лавинообразное размножение электронов в искровом промежутке и сопротивление экспоненциально убывает до значения R_0 , которое оценивается минимальной величиной, следующей из теории Вайцеля-Ромпе, использованной для ограниченной величины разрядного тока (несколько миллиампер). При этом оценка для R_0 составляет несколько килоом. После стадии насыщения проводимости (Z_3) сопротивление искрового промежутка нарастает линейно (стадия Z_4) до достижения первоначального состояния. Экспоненциальное во уменьшение сопротивления промежутка на стадии Z_1 объясняется в данной главе в рамках лавинной теории Таунсенда в предположении постоянной средней скорости продвижения лавины. Линейный рост сопротивления на конечной стадии процесса следует из стандартного уравнения рекомбинации

$$\frac{dN}{dt} = -rN \cdot N^+,$$

где N - число электронов, N^+ - число ионов, r - коэффициент рекомбинации, согласно которому число носителей заряда и, соответственно, проводимость убывают обратно пропорционально времени. Дифференциальные уравнения, описывающие переходный процесс в схеме замещения искрового промежутка (рис.2) имеют вид



$$\frac{dI_1}{dt} + I_1 \cdot \left(\frac{1}{R_{00}C} e^{t/\tau_1} - \frac{1}{\tau_1} \right) - \frac{I_0}{\tau_1} = 0, \quad 0 < t < \tau_1 \ln \frac{R_{00}}{R_0}$$

$$\frac{dI_1}{dt} + I_1 \cdot \left(\frac{\tau_2}{R_{00}C} + 1 \right) \frac{1}{t} - \frac{I_0}{t} = 0, \quad \tau_1 \ln \frac{R_{00}}{R_0} < t,$$

Рис.2 Схема замещения искрового промежутка

где τ_1 и τ_2 соответственно длительность стадии формирования и исчезновения проводящего состояния искрового промежутка. Типичные результаты чис-

ленного моделирования переходных процессов в искровом промежутке при постоянном токе питания приведены на рис. 3. По результатам численных исследований, выполненных в данной главе для типичных условий натуральных экспериментов ($C=26$ пФ, $I_0=1$ мА, $R_0=20$ кОм) установлено, что

- длительность стадии зажигания разряда (τ_1) оказывает влияние на частоту повторения импульсов при $\tau_1 > 10$ нс. При этом увеличению τ_1 соответствует уменьшение частоты повторения импульсов.

- при малых временах зажигания разряда ($\tau_1=10$ нс) частота повторения импульсов обратно пропорциональна напряжению зажигания и емкости цепи

- крутизна фронта импульса напряжения и частота повторения импульсов пропорциональны силе тока источника питания I_0 .

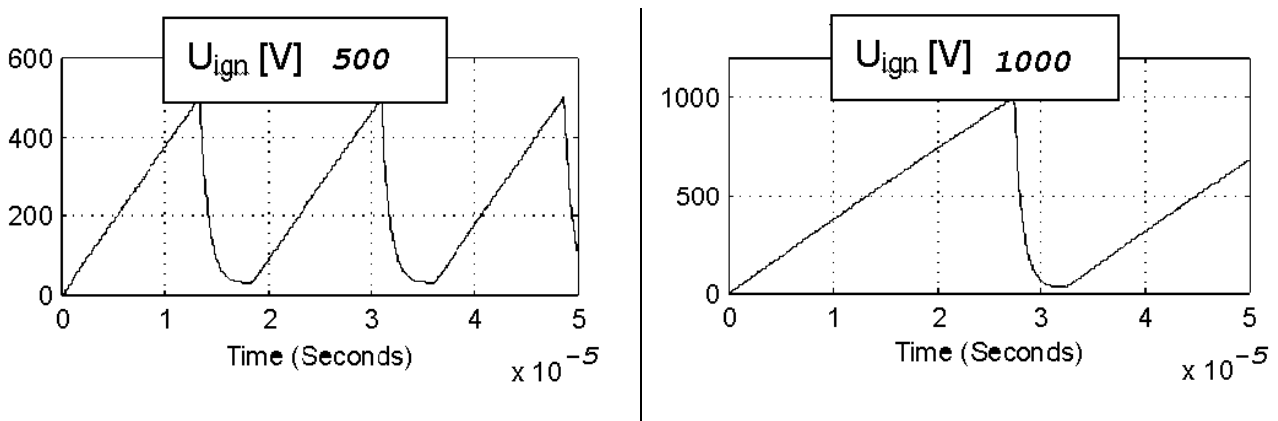


Рис.3 Расчетные зависимости от времени напряжения на искровом промежутке при различных значениях напряжения зажигания разряда U_{ign}

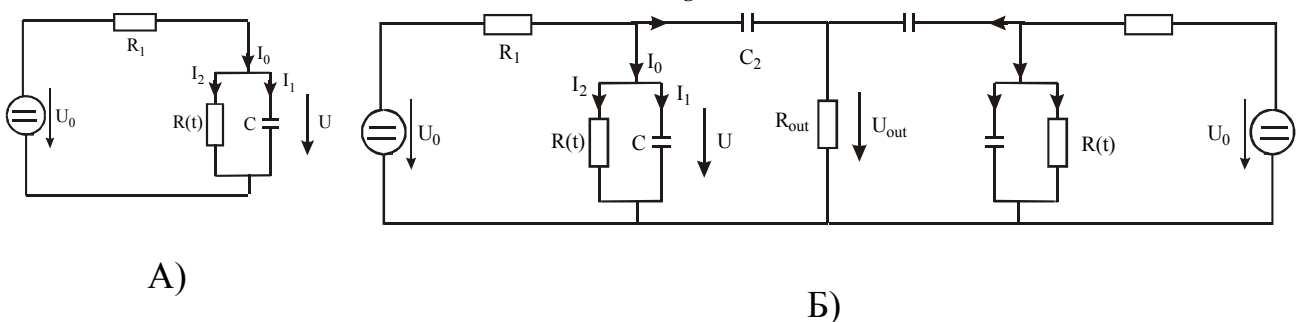


Рис.4

А) Схема питания искрового промежутка источником напряжения с токоограничивающим резистором

Б) Каскадное включение искровых промежутков

Далее в главе исследованы режимы генерации импульсов с помощью искровых промежутков в схемах с питанием от источника напряжения с ограничивающим ток разряда резистором и в каскадной схеме включения искровых промежутков (рис.4). В результате исследований этих схем в частности показано, что использование емкостной связи каскадов и нагрузки позволяет избежать их взаимного влияния на процесс генерации повторяющихся импульсов.

По результатам главы 2 получены данные о влиянии параметров схем генераторов повторяющихся импульсов на эффективность установки $\eta = (P_{in} - P_{R1}) / P_{in}$, где P_{in} - полная мощность источника, P_{R1} - мощность рассеиваемая зарядным резистором R_1 (рис.4А). При этом для $C=35-50$ пФ и $R1=100$ кОм - 1МОм значение коэффициента эффективности близко к 0.2. Значительно большее влияние оказывает величина зарядного резистора на частоту повторения импульсов, в частности в исследованном диапазоне изменения $R1$ частота повторения импульсов изменяется в пределах 27-440 кГц.

Четвертая глава описывает проведение и результаты экспериментальных исследований по генерации импульсов с высокой частотой повторения с помощью искровых промежутков. Экспериментальная установка состоит из искрового промежутка, стальные электроды которого длиной 5 см, диаметром 0.5-1 мм и искровым зазором 100-400 мкм установлены в керамическом корпусе (рис.5) Короткий коаксиальный кабель открытым концом присоединен к электродам и используется в качестве емкостной нагрузки (18 пФ). При этом полная емкость составляет 26 пФ. Исключительно малое межэлектродное расстояние

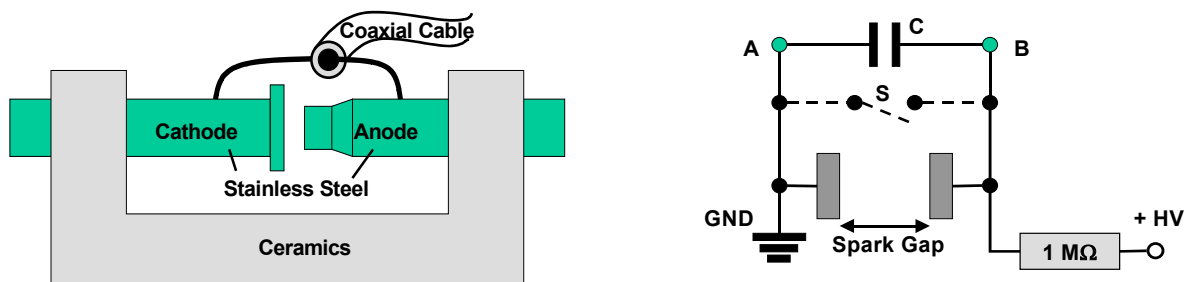


Рис.5 Геометрическая структура и схема электрической цепи экспериментальной установки. Обеспечивает конфигурацию разрядного промежутка типа плоскость-плоскость. Установка оборудована запоминающим осциллографом Tektronix P601 5, 75MHz и источником напряжения, Model HCN 140–20000 с диапазоном регулировки напряжения 0-20 кВ и тока 0-6 мА. Для измерения тока в цепи разряда использовался пояс Роговского, а также стандартный индукционный

датчик *FUL 26K6(30)*. Для измерения напряжения на искровом промежутке осциллограф использовался в автоколебательном режиме развертки.

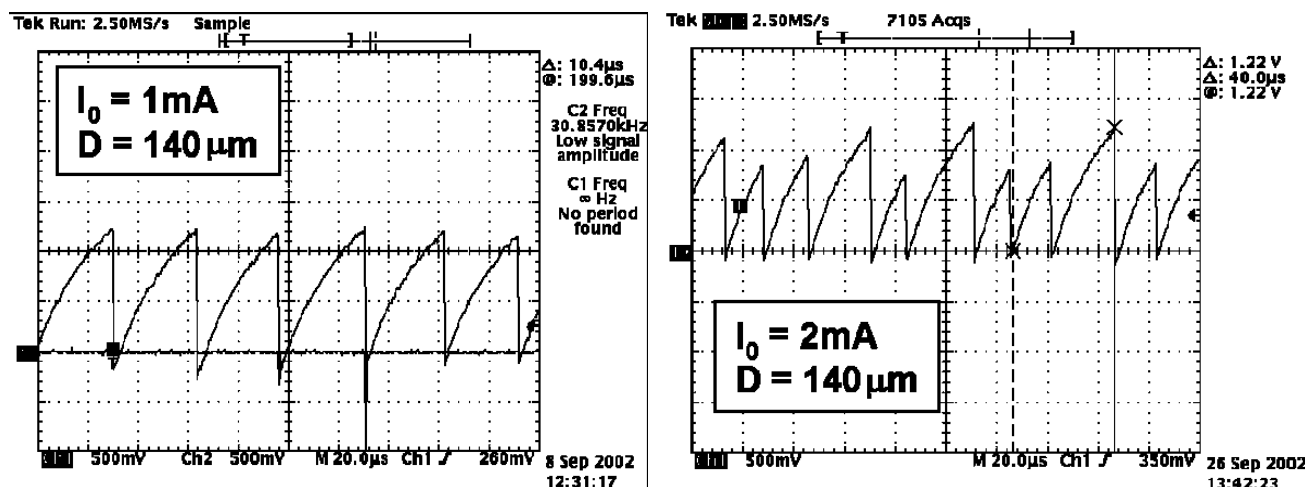


Рис.6 Типичные осциллограммы повторяющихся импульсов напряжения, получаемых с помощью искрового промежутка с малым межэлектродным расстоянием D

В результате экспериментальных исследований установлено наличие двух типов генерируемых последовательностей импульсов. Быстрая мода характеризуется более низкой величиной потенциала зажигания разряда, более короткими, но имеющими большую частоту повторения импульсами. Медленная мода отличается более высокими значениями амплитуды генерируемого импульса и меньшей частотой их следования. При этом ток потребления в "быстром" режиме выше чем в "медленном". Два описанных типа импульса могут присутствовать одновременно, когда они перемежаются, как на рис.6 справа. Для объяснения физической картины данного явления могут быть использованы различные предположения, например локальное повышение температуры в отдельных точках катода после нескольких импульсов, что приводит к снижению потенциала зажигания разряда вследствие более высокой интенсивности эмиссионных процессов на этих участках поверхности катода. Также использовано предположение о неполной рекомбинации объемного заряда в межэлектродном промежутке, что приводит к более низкому значению потенциала зажигания разряда и генерации быстрой моды. В частности явление перемежающихся мод можно описать с помощью зависящего от времени снижения потенциала зажигания

$$\Delta U = \Delta U_{\max} \exp(-k_2 Q_{\max} t'),$$

где ΔU_{\max} - определяется из соотношения $\Delta U_{\max} = k_1 \int_0^{\tau_1 + \tau_{sat}} i(t) dt = k_1 Q_{\max}$,

где i - разрядный ток, Q_{\max} - максимальная величина объемного заряда в промежутке, k_1, k_2 - эмпирические параметры. Для значений констант $k_1 = 10^{10}$ В/Кл и $k_2 = 3 \cdot 10^{12}$ 1/Кл с были получены численные результаты, удовлетворительно описывающие явление перемежающихся мод.

Экспериментальные зависимости частоты повторения импульсов, полученные для межэлектродных промежутков различной длины представлены

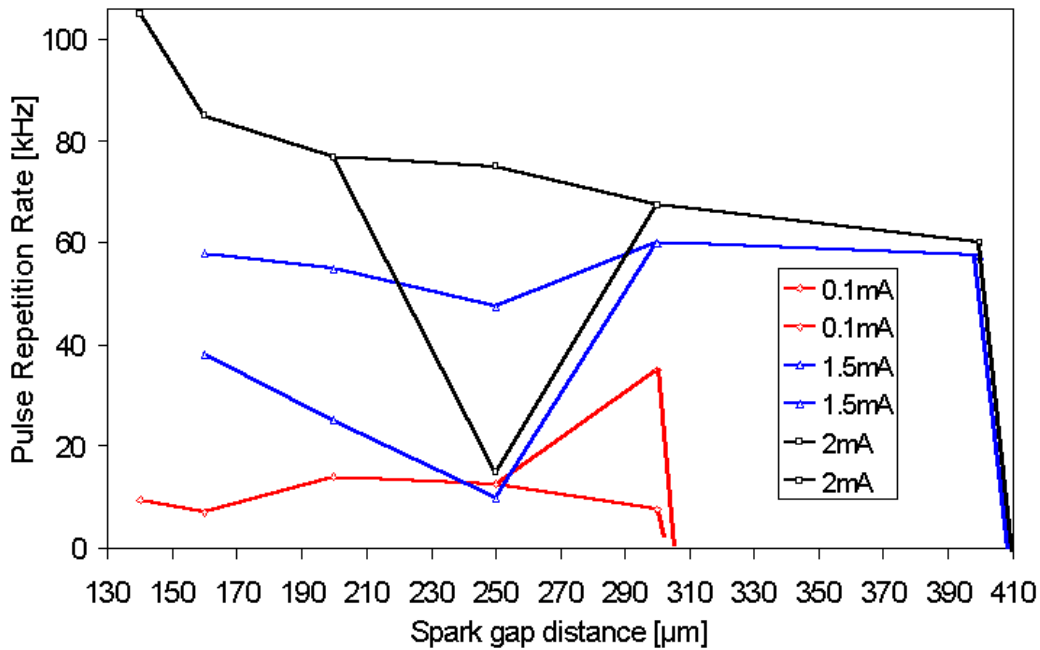


Рис.7 Зависимость частоты повторения импульсов от межэлектродного расстояния при различных токах питания.

кривыми рис.7, из которого видно наличие бимодальных режимов, определяющихся сочетанием величины питающего тока и межэлектродного расстояния в интервале 200-300 мкм.

Для подробного изучения индивидуальных характеристик генерируемого импульса были выполнены специальные измерения его характеристик (микроскопический тест). Исследовались следующие характеристики: скорость нарастания тока (убывания напряжения) на фронте импульса; зависимость среднего напряжения пробоя от среднего тока питания; время восстановления проводя-

щего состояния в промежутке после генерации импульса; технические ограничения возможностей устройств получения импульсов с высокой частотой повторения. В рамках этих исследований выполнены осциллографические измерения электрических характеристик индивидуального импульса, а также оптическая регистрация излучения разрядной плазмы с помощью фотоэлектронного умножителя PMT. Кроме этого для микроскопического теста использован осциллограф Tektronix TDS 684, 1GHz и источник напряжения HCN 140–20 000. Схема эксперимента представлена рис.8 . Типичные осциллограммы тока и напряжения искрового промежутка ("быстрый" режим) приведены на рис. 9.

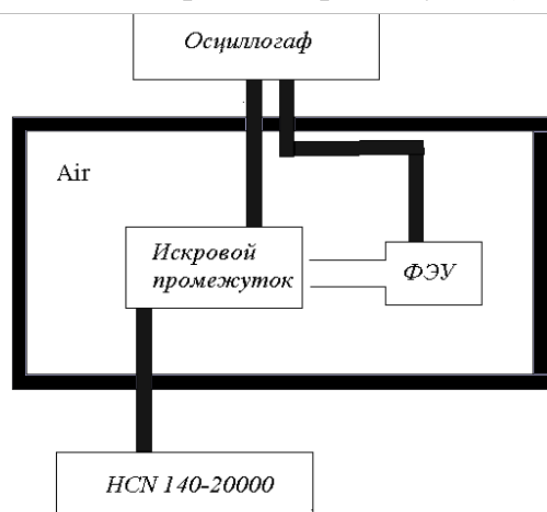


Рис.8 Структурная схема экспериментальной установки для "микроскопических" исследований

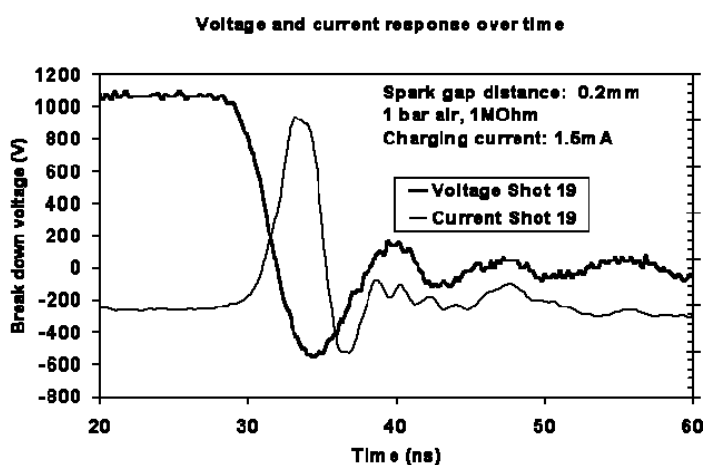


Рис.9 Типичные осциллограммы тока и напряжения для единичного импульса

Результаты микроскопического теста показали, что существует область оптимальных параметров устройства генерации импульсов с помощью искрового промежутка с малым межэлектродным расстоянием, в которой достигается наибольший ток, при высокой скорости его нарастания при напряжении зажигания разряда 1500-2000 В. При токе питания свыше 1.5 мА генерируется единичная мода, соответствующая быстрому режиму. Величина тока питания является наилучшим управляющим параметром для настройки формы и частоты повторения импульсов. Однако чрезмерное увеличение питающего тока может привести к образованию постоянного дугового разряда искровом промежутке и прекращению генерации.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований показал что

- генератор импульсов высокого напряжения с высокой частотой повторения, достигающей 140 кГц может быть создан на основе простого искрового промежутка в условиях естественных внешних условий. При этом настройкой параметров цепи питания устройства можно создать условия долговременной непрерывной стабильной работы такого генератора. Это позволяет очень простым путем создавать технические устройства, использующие повторяющиеся импульсы. Однако данный метод генерации не позволяет вести прецизионный контроль за параметрами отдельного импульса в тех случаях, когда это необходимо.
- В перспективе частота повторения импульсов может быть доведена до 500 кГц, что позволяет в качестве нагрузки генератора использовать широкополосную антенну, однако мощность устройства, основанного на единичном искровом промежутке исследованного типа недостаточна.

В пятой главе диссертации выполнено сравнение экспериментальных и расчетных результатов и их окончательная интерпретация. Рассмотрены условия генерации наиболее интересной для практике "быстрой" моды повторения импульсов. В частности обработка экспериментальных результатов позволила получить зависимости частоты повторения от ток питания системы в сравнении с результатами численного моделирования (рис.10). Сопоставление результатов численного и натурного эксперимента позволило заключить, что

- время формирования разряда и время восстановления электрической прочности в промежутке намного меньше, чем собственно время разряда емкости цепи
- при моделировании исследованных искровых промежутков последние могут рассматриваться как идеальный ключ
- частота повторения импульсов определяется только питающим током, емкостью системы и напряжением пробоя промежутка
- уменьшение емкости системы позволяет получать импульсы с более высокой частотой повторения, вследствие возрастания разрядного тока
- Однако такое возрастание ограничено образованием дуги короткого замыкания в искровом промежутке

- Эффект дуальности генерируемых импульсов с высокой частотой повторения лишь отчасти может быть объяснен в рамках отдельных физических моделей, рассмотренными в диссертации (неполная рекомбинация, термоэлектронная эмиссия из активных точек на поверхности электрода, эффект бомбардировки катода ионами). Можно предположить о комплексном влиянии указанных факторов при формировании бимодального режима генерации

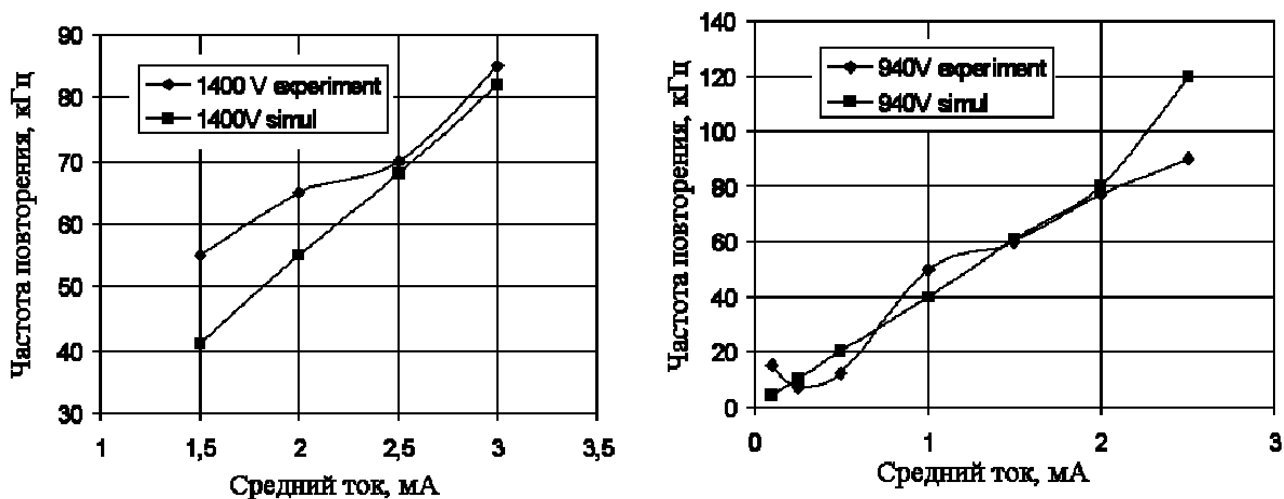


Рис. 10 Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей частоты повторения импульсов от питающего тока для напряжения зажигания разряда 1400 В (слева) и 940 В.

В заключении (разделы 6 и 7) изложены основные результаты работы:

Одним из основных результатов работы является экспериментальное обоснование возможности применения искровых промежутков с малым межэлектродным расстоянием для генерации высоковольтных импульсов напряжения с амплитудой порядка 1 кВ с высокой частотой повторения, превосходящей 10 кГц при питании от источника постоянного тока.

Исследования единичного искрового промежутка показали возможность создания устройства генерации импульсов с частотой повторения до 140 кГц, управляемый величиной питающего тока, и амплитудой, контролируемой длиной межэлектродного промежутка в интервале 100-400 мкм

Генерируемые импульсы могут принадлежать к одной из двух возможных, при определенных условиях перемежающихся, мод. Быстрая мода отличается более высокой частотой повторения и меньшей амплитудой импульса на-

пряжения. Средняя мощность генерируемая в импульсах быстрой моды выше чем в случае медленной моды.

Режим генерации зависит от длительности процесса, возрастание длительности процесса генерации, приводит к нагреву катода, переходу к быстрой моде с меньшей амплитудой зажигания разряда и при более длительном процессе генерации (несколько десятков минут) может завершиться дугой постоянного тока, замыкающей промежутки. Установлена характерная длина искрового промежутка, превышение которой приводит к образованию дуги - 400 мкм

Установлены параметры оптимального режима генерации импульсов с помощью искровых промежутков

Ток питания	1.5мА	(+/- 0.5 мА)
Расстояние между электродами:	250 мкм	(+/- 100 мкм)
Достигаемая частота повторения:	60 кГц	(+/- 20 кГц)
Максимальный коэффициент полезного действия 24%.		

Математическая модель процесса генерации импульсов с высокой частотой повторения в устройстве с искровым промежутком, основанная на электротехнических уравнениях с переменными параметрами позволила найти наиболее эффективные параметры управления амплитудой и частотой повторения импульсов - ток питания устройства, размер межэлектродного промежутка и разрядная емкость.

Увеличение частоты повторения импульсов в условиях реальной нагрузки устройства (излучающей антенны) может быть достигнута путем каскадного включения нескольких искровых промежутков с использованием емкостной развязки. При этом несинхронная работа нескольких параллельных искровых промежутков позволяет увеличить частоту повторения импульсов и электрическую мощность выделяемую в нагрузке.

Основным практическим аспектом результатов работы является экспериментальное и расчетное обоснование разработок относительно дешевых генераторов высоковольтных импульсов с высокой частотой повторения импульсов высокого напряжения, которые представляют реальную альтернативу генераторам, использующим полупроводниковые устройства. При этом легко настраиваемые параметры генерации в устройствах с искровыми промежутками позволяют использовать в качестве нагрузки широкополосную излучающую антенну.

Таким образом, результаты исследований процессов в устройствах с короткими искровыми промежутками являются основой для разработок устройств тестирования различных электронных устройств в рамках решения прикладных проблем электромагнитной совместимости.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. J.Bohl, T.Ehlen; Interference of Smart Defence Systems caused by HPM- and UWB-Irradiation; EUROEM2000, Edinburgh, June 2000
2. J.Bohl, T.Ehlen, F.Sonnemann; Calculation of Signal Interference to Electronic Systems caused by Electromagnetic Irradiation; IEEE Symposium, Magdeburg, Mai 2000
3. Боль Ю., Элен Т., Титков В.В. Влияние параметров испытательных электромагнитных импульсов с высокой частотой повторения на поведение полупроводниковых цепей и техника генерирования таких импульсов// Сборник докладов седьмой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости (ЭМС-2002), Санкт-Петербург, 2002, с. 319-324
4. Боль Ю., Титков В.В. Особенности применения искровых разрядных промежутков для генерации импульсов высокого напряжения с высокой частотой повторения// в кн. Теоретическая и экспериментальная оценка состояния высоковольтного оборудования энергосистем, РАН, Кольский научный центр Апатиты, 2002, с.69-74
5. Боль Ю., Титков В.В. Применение искровых разрядных промежутков для генерации импульсов высокого напряжения с высокой частотой повторения// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского Государственного технического университета №1 2003, с.70-73