

...РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 818 262** (13) **C1**

(51) МПК
G01R 29/02 (2006.01)
G01R 31/333 (2006.01)
(52) СПК
G01R 29/02 (2024.01)
G01R 31/333 (2024.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 27.04.2024)
Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 13.12.2024 по 12.12.2025. При
уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 13.12.2025 по 12.06.2026
размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: **2023132769**, 12.12.2023(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.12.2023Дата регистрации:
26.04.2024Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **12.12.2023**(45) Опубликовано: **26.04.2024** Бюл. № **12**

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 1054904 A1, 15.11.1983. SU
1406531 A1, 30.06.1988. SU 1256242 A1,
07.09.1986. JP 8007712 A, 12.01.1996.
**ИВАНОВ С.Н. и др., Исследование времени
формирования самостоятельного
субнаносекундного разряда в газах
высокого и сверхвысокого давления,
Физика плазмы, 2018, т. 44, N 3, 323 - 332.
IVANOV S.N., Investigation of the switching**

**characteristics of high-pressure subnanosecond
gas dischargers with the purpose of a sharp
increasing of the breakdown voltages and the
switching speed, Plasma Sources Sci.
Technol., 2022, Vol. 31.**

Адрес для переписки:
**620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена,
106, ФГБУН ИЭФ УрО РАН, Чайковский
Станислав Анатольевич**

(72) Автор(ы):

**Иванов Степан Несторович (RU),
Лисенков Василий Викторович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

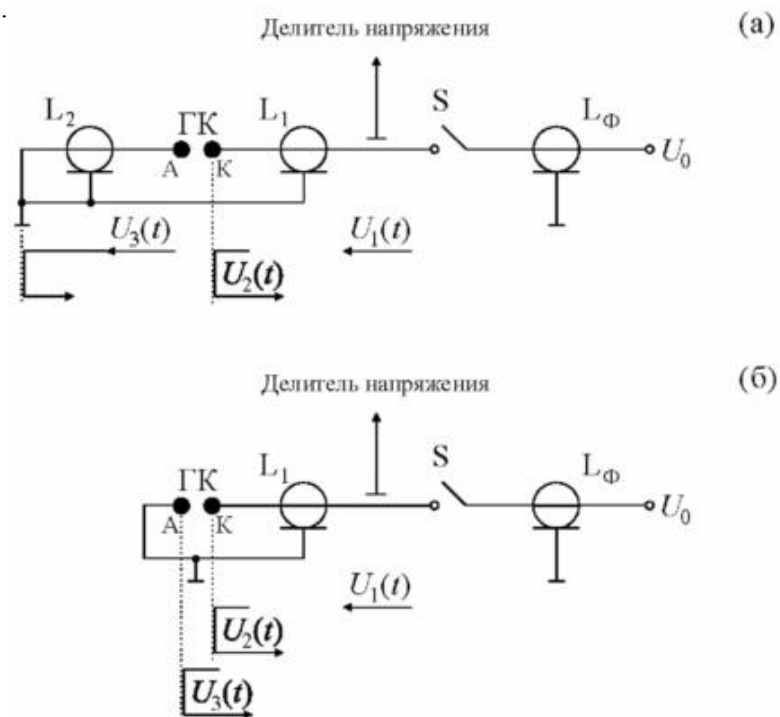
**Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт
электрофизики Уральского отделения
Российской академии наук (RU)**

(54) Способ измерения энергетических характеристик двухэлектродных газовых коммутаторов пикосекундного диапазона методом рефлектометрии

(57) Реферат:

Изобретение относится к области пикосекундной импульсной техники и предназначено для измерения энергетических характеристик двухэлектродных газовых коммутаторов (ГК) пикосекундного диапазона методом рефлектометрии. Сущность: измеряют волну напряжения отраженной от ГК в режиме отсутствия пробоя разрядного промежутка ГК (в режиме холостого хода) и волну напряжения

отраженной от ГК в режиме пробоя разрядного промежутка ГК с потерянной за счет паразитной индуктивности измерительного тракта нижней частью заднего фронта. Восстанавливают потерянную при измерениях нижнюю часть заднего фронта волны напряжения, отраженной от ГК в режиме пробоя разрядного промежутка ГК. Для этого в момент времени, в который напряжение на разрядном промежутке ГК в случае его пробоя падает до уровня, когда характерное время ионизации плазмы разрядного промежутка становится на порядок больше, чем длительность прикладываемого к разрядному промежутку ГК импульса напряжения, меняющееся во времени сопротивление разрядного промежутка заменяют постоянным фиксированным сопротивлением. Для обеспечения гладкости решения вводят переходную функцию сопротивления. С использованием полученной зависимости сопротивления плазмы, формирующейся в разрядном газовом промежутке ГК при его пробое, от времени восстанавливают потерянный при измерениях методом рефлектометрии нижний участок заднего фронта на осциллограмме импульса напряжения отраженной от ГК при его пробое. С использованием измеренной волны напряжения, отраженной от ГК в режиме отсутствия пробоя разрядного промежутка ГК и измеренной и далее восстановленной волны напряжения отраженной от ГК в режиме пробоя разрядного промежутка ГК рассчитывают осциллограмму импульса тока коммутируемого ГК и энергетические характеристики ГК. Технический результат: повышение точности получения осциллограммы тока разряда в ГК и измерения энергетических характеристик ГК. 4 ил.



Фиг. 1

Изобретение относится к области пикосекундной импульсной техники и предназначено для измерения энергетических характеристик (потери коммутируемой энергии в разряднике, которые идут на световое излучение и нагрев рабочего газа; мгновенной выделяемой мощности) двухэлектродных газовых коммутаторов пикосекундного диапазона методом рефлектометрии. Пикосекундные газовые коммутаторы (ГК) широко используются в импульсной электрофизической аппаратуре: генераторы пикосекундных электронных пучков, пикосекундные рентгеновские источники, генерирование мощных пикосекундных микроволновых импульсов, источники сверхширокополосного радиочастотного излучения, и т.д. [1], и знание реальной коммутируемой ими мощности, поступающей в итоге в нагрузку, весьма актуально.

Двухэлектродный ГК включает в себя электроды (катод К и анод А, Фиг. 1) и

межэлектродное расстояние (разрядный газовый промежуток) заполненное рабочим газом. Следует отметить, что двухэлектродные ГК пикосекундного диапазона обычно выполняются в виде разрыва центрального электрода коаксиального передающего тракта с газовым наполнением [2-9]. При этом известно [9], что большое разнообразие различных электрических цепей, в которых работает ГК, может быть в общем случае сведено к одному из двух типов включения ГК в зарядно-разрядный контур, показанных на Фиг. 1 а и 1 б. На Фиг. 1 конец нагрузочной линии L_2 (Фиг. 1а) и анод разрядного газового промежутка ГК (Фиг. 1б) заземлены. Вместо заземления к концу нагрузочной линии L_2 и аноду разрядного газового промежутка ГК может быть подключена полезная нагрузка.

Принцип работы ГК: формирующая линия L_ϕ генератора наносекундных импульсов (ГНИ) заряжается до напряжения U_0 . Когда ключ S на выходе генератора замыкается, импульс напряжения $U_1(t)$ с длительностью фронта до нескольких наносекунд и амплитудой $U_0/2$ распространяется по согласованной по волновому сопротивлению с выходным сопротивлением ГНИ передающей коаксиальной линии L_1 в сторону ГК. Условия в ГК выбраны так, чтобы обеспечить время переключения в пикосекундном временном диапазоне. В зависимости от функции ГК, этот ГК переключает линию L_1 к нагрузочной коаксиальной линии L_2 (см. Фиг. 1а) или на землю (см. Фиг. 1б). На предпробойной стадии амплитуда импульса $U_1(t)$ удваивается на катоде ГК. Если пробой (коммутация) разрядного газового промежутка ГК не происходит (режим холостого хода), то напряжение на ГК будет соответствовать пунктирной линии $U_{xx}(t)$ и достигнет в итоге напряжения зарядки ГНИ U_0 (см. Фиг. 2). В случае пробоя (коммутации) разрядного газового промежутка ГК, напряжение на ГК в стадии запаздывания пробоя и стадии коммутации будет соответствовать осциллограмме $U(t)$ (Фиг. 2). При этом максимальное напряжение ($U_{пр}$) на осциллограмме $U(t)$ является напряжением пробоя (или коммутации) разрядного газового промежутка ГК в импульсном режиме. При пробое разрядного газового промежутка ГК, отраженная от него на предпробойной стадии волна напряжения $U_2(t)$ с амплитудой $U_{пр}/2$ распространяется обратно в сторону ГНИ. После пробоя разрядного газового промежутка ГК через него начинает распространяться волна напряжения $U_3(t)$, которая поступает в нагрузочную коаксиальную линию L_2 (Фиг. 1а) или в нагрузку, подключенную непосредственно к аноду ГК А (Фиг. 1б). В частном случае, изображенном на Фиг. 1б, где анод разрядного газового промежутка ГК заземлен, волна напряжения $U_3(t)$ отразится от анода, и будет распространяться обратно в сторону ГНИ. Волна напряжения $U_3(t)$ передает в нагрузку ту мощность, что прошла через ГК в процессе коммутации.

Для исследования коммутационных характеристик ГК обычно применяют метод рефлектометрии [2, 3, 5-7, 9]. Суть метода состоит в том, что при помощи емкостного делителя (Фиг.1), встроенного в коаксиальный тракт между ГНИ и ГК, и осциллографа позволяющего регистрировать однократные импульсные сигналы (осциллографа реального времени), измеряют волны напряжения $U_2(t)$ отраженные от ГК в режимах отсутствия пробоя (режим холостого хода) и в случае пробоя. При измерениях делитель напряжения располагают на расстоянии от разрядного газового промежутка ГК, достаточном чтобы обеспечить временную развязку прикладываемого $U_1(t)$ к разрядному промежутку и отраженного от него $U_2(t)$ импульсов напряжения. В результате делитель напряжения регистрирует только половинное напряжение на разрядном газовом промежутке ГК. Поэтому за $U_{xx}(t)$ и $U(t)$ при измерениях методом рефлектометрии принимают $2 \times U_2(t)$, где $U_2(t)$ регистрируется в режимах холостого хода и пробоя, соответственно. Ток $i(t)$ коммутируемый ГК при измерениях методом рефлектометрии рассчитывают по формуле $i(t) = (U_{xx}(t) - U(t))/z$, где z - эквивалентное сопротивление коаксиальных линий L_ϕ , L_1 и L_2 [3, 6, 9]. Если волновые сопротивления линий L_ϕ , L_1 и L_2 одинаковы и равны ρ (то есть коаксиальный тракт согласован по волновому сопротивлению), то для условий Фиг. 1(а) $z = 2\rho$ и для условий Фиг. 1(б) $z = \rho$ [9]. Зная временные зависимости напряжения на разрядном промежутке $U(t)$ и тока

разряда $i(t)$ рассчитывают энергетические характеристики ГК - потери коммутируемой энергии в разряднике, которые идут на световое излучение и нагрев рабочего газа; мгновенную выделяемую мощность.

Следует отметить, что напрямую, без применения метода рефлектометрии, измерить в эксперименте ток $i(t)$ достаточно сложно. Дело в том, что при измерении высоковольтных импульсных сигналов емкостные делители напряжения встраивают в участок коаксиального тракта, заполненный трансформаторным маслом. В этом случае обеспечивается высокая электрическая прочность зазора между центральным электродом коаксиального тракта и емкостным делителем. Если встраивать делитель напряжения в участок коаксиального тракта, заполненный газом, существует очень высокая вероятность вывести из строя (сжечь) применяемый для измерений осциллограф [7]. Стоимость осциллографов реального времени предназначенных для измерения одиночных пикосекундных импульсов напряжения в настоящее время превышает сто тысяч долларов США. Для измерения тока $i(t)$ в цепи, изображенной на Фиг. 1а, в нагрузочной коаксиальной линии L_2 должна быть дополнительно предусмотрена секция, заполненная трансформаторным маслом. В этой маслонеполненной секции можно разместить емкостной делитель напряжения и измерять ток в цепи как $i(t) = U_3(t)/\rho_{L2}$, где ρ_{L2} - волновое сопротивление коаксиальной линии L_2 (в случае если коаксиальный тракт согласован по волновому сопротивлению $\rho_{L2} = \rho$). Это значительно усложняет конструкцию линии L_2 , т.к. необходимо предусмотреть проходной изолятор, разделяющий секции коаксиальной линии L_2 заполненные газом и маслом, дополнительно предусмотреть согласующий по волновому сопротивлению секции заполненные газом и маслом участок коаксиального тракта, что увеличивает стоимость, и габариты электрофизического прибора в котором применен ГК. Такое усложнение прибора редко применяется на практике. В цепи, изображенной на Фиг. 1б, в принципе невозможно разместить емкостной делитель напряжения между ГК и землей (нагрузкой). И в этом случае метод рефлектометрии остается единственным методом для измерения коммутационных характеристик ГК. Поэтому метод расчета тока $i(t)$, описанный выше, очень широко применяется в экспериментах [3, 6, 9].

Однако указанная методика измерения напряжений и последующего расчета коммутируемого тока имеет существенный недостаток, приводящий к значительным ошибкам измерения в пикосекундном диапазоне времен. Емкостной делитель напряжения и измерительная цепь (аттенюаторы напряжения, измерительные кабели и т.д.) имеют паразитную индуктивность. В результате не удается корректно измерять производную изменения тока di/dt в пикосекундных процессах, длительность которых меньше или соизмерима со временем переходных процессов в измерительной цепи. В результате на заднем фронте импульсов $U_{xx}(t)$ и $U(t)$ регистрируется выброс напряжения противоположной полярности относительно прикладываемого к ГК напряжения (Фиг. 3а и 3б, кривые 1 и 2). То есть при измерениях теряется значительная часть заднего фронта импульса, который в реальности должен плавно стремиться к нулевой линии без выброса напряжения противоположной полярности (см. Фиг. 2). Аналогичные выбросы напряжения противоположной полярности наблюдаются и в других экспериментах по пробою в газах в пикосекундном диапазоне (например, рис. 3 в [2], рис. 3 в [3], рис. 3 в [5], рис. 3 в [6], рис. 2 и 5 в [7], рис. 6 в [8]). Ранее, при измерении длинных фронтов напряжения (десятки наносекунд - микросекунды), эта проблема не была критичной и задний фронт импульса $U(t)$ корректно регистрировался. В итоге для расчета импульса тока $i(t)$ (кривая 4 на Фиг. 3а и 3б) в пикосекундном диапазоне берут только часть осциллограммы импульса напряжения $U(t)$ (полуволну напряжения $U(t)$ по знаку совпадающую с волной напряжения $U_{xx}(t)$). Та часть осциллограммы импульса напряжения $U(t)$, где меняется полярность напряжения [3, 6], заменяется при расчетах нулевым сигналом. Результатом такого расчета является осциллограмма импульса тока $i(t)$ с завышенной амплитудой. Таким образом, способ - прототип не в состоянии обеспечить корректный расчет тока на завершающей стадии падения напряжения на ГК при измерениях в пикосекундном диапазоне времен. Что приводит к измерению

энергетических характеристик ГК со значительной ошибкой.

Задачей предложенного изобретения является устранение указанного недостатка и разработка способа восстановления заднего фронта на измеренной в эксперименте методом рефлектометрии осциллограмме импульса напряжения $U(t)$, последующий корректный расчет импульса тока разряда $i(t)$, и в итоге корректное измерение энергетических характеристик ГК.

Для аппроксимации потерянного при измерениях завершающего участка на заднем фронте осциллограммы импульса напряжения $U(t)$ (далее для удобства обозначим эту осциллограмму как $U_n(t)$) в предложенном изобретении предлагается проанализировать динамику изменения частоты ионизации рабочего газа в ГК в ходе спада напряжения. Известно, что частота ионизации сильно зависит от напряженности электрического поля при фиксированном давлении [10]. При падении напряжения на ГК до определенного уровня (лежит в пределах примерно $0.2 \div 0.3$ от $U_{пр}$ и рассчитывается индивидуально для каждой осциллограммы $U_n(t)$) характерное время ионизации $\tau_i = 1/v_i$, где v_i - частота ионизации, становится на порядок больше длительности прикладываемого к разрядному промежутку импульса напряжения. С этого момента времени (обозначим его как t_1) концентрацию электронов в плазме развивающегося в ГК разряда можно считать квазипостоянной и, следовательно, сопротивление газоразрядной плазмы в дальнейшем можно так же считать неизменным (обозначим его как R_p). Таким образом, при падении напряжения на разрядном промежутке ниже уровня $U_n(t_1)$, разрядный промежуток можно условно заменить постоянным резистором.

При восстановлении заднего фронта измеренной методом рефлектометрии осциллограммы $U_n(t)$, для обеспечения гладкости решения (непрерывности первой производной) при $t \geq t_2$ предлагается ввести переходную функцию сопротивления в виде:

$$R(t) = (R_1 - R_p) \times \exp(-(t - t_2)/(2 \times (t_1 - t_2))) + R_p$$

где: t_1 - момент времени, когда характерное время ионизации становится на порядок больше длительности импульса напряжения. При этом сопротивление плазмы становится равным R_p ;

t_2 - момент времени, когда напряжение на спадающем участке измеренной методом рефлектометрии осциллограммы $U_n(t_2)$ становится равным $1.5 \times U_n(t_1)$, а сопротивление плазмы в этот момент равно R_1 ;

Сопротивления R_1 и R_p вычисляются как частное $U_n(t)/i_1(t)$, где $i_1(t)$ вычисляются по описанной выше методике прототипу (Фиг. 3а и 3б, кривая 4) как $i_1(t) = (U_{xx}(t) - U_n(t))/z$. Для выбора момента времени t_1 использовали расчетную зависимость частоты ионизации азота, как функции приведенной напряженности электрического поля, которая получена моделированием методом Монте-Карло для гибридной модели газового разряда, представленной в [11].

Таким образом, при $t \geq t_2$ разрядный промежуток можно заменить переменным резистором сопротивлением $R(t)$, которое при $t \geq t_1$ будет стремиться к постоянному значению равному R_p .

Зная зависимость сопротивления плазмы, формирующейся в разрядном газовом промежутке ГК, от времени можно восстановить потерянный при измерениях методом рефлектометрии нижний участок заднего фронта на осциллограмме импульса напряжения $U(t)$ (далее для удобства обозначим эту осциллограмму как $U_B(t)$):

$$U_n(t) = U_n(t) \quad \text{при } t < t_2$$

$$U_n(t) = U_{xx}(t) \frac{R(t)}{R(t) + z} \quad \text{при } t \geq t_2$$

Техническим результатом изобретения является измеренная методом рефлектометрии осциллограмма напряжения $U(t)$ (для удобства обозначенная нами ранее как $U_B(t)$) с восстановленным по предложенной методике задним фронтом (кривая 3 на Фиг. 3а и 3б); соответственно, более точно рассчитанная осциллограмма

тока разряда в ГК $i_2(t) = (U_{xx}(t) - U_B(t))/z$ (кривая 5 на Фиг. 3а и 3б); и более точное измерение энергетических характеристик ГК.

В качестве демонстрации применения заявляемого изобретения приводится измерение энергетических характеристик ГК, встроенного в коаксиальный тракт с волновым сопротивлением 50 Ом и выполненного в виде разрыва центрального электрода. Эквивалентная схема разрядного контура в этом случае соответствует Фиг. 1а. Конструкция электродов ГК обеспечивала конфигурацию в разрядном промежутке достаточно однородного электрического поля. Длина разрядного газового промежутка ГК равнялась 0.5 мм; давление рабочего газа (азот) 5 атм (Фиг. 3а) и 40 атм (Фиг. 3б). Для определения энергетических характеристик ГК воспользуемся измеренными методом рефлектометрии осциллограммами, изображенными на Фиг. 3, и подробно описанными выше.

Энергетические потери в ГК (это потери энергии на световое излучение и нагрев газа) определяют следующим образом:

$$w_1 = \int_0^{t_m} U_n(t) \frac{U_{xx}(t) - U_n(t)}{z} dt = \int_0^{t_m} U_n(t) i_1(t) dt$$

$$w_2 = \int_0^{t_m} U_n(t) \frac{U_{xx}(t) - U_n(t)}{z} dt = \int_0^{t_m} U_n(t) i_2(t) dt$$

где: w_1 - энергетические потери в ГК, полученные по способу - прототипу настоящего изобретения (заниженные);

w_2 - энергетические потери в ГК, полученные по методике, предложенной в настоящем изобретении;

$i_1(t)$ - восстановленная по методике прототипу представленного изобретения осциллограмма тока разряда.

$i_2(t)$ - восстановленная по предлагаемой в изобретении методике осциллограмма тока разряда.

$U_n(t)$ - измеренная методом рефлектометрии и не откорректированная осциллограмма напряжения на разрядном промежутке на предпробойной стадии и стадии пробоя (при расчете $i(t)$ учитывались только отрицательные полуволны напряжения, поскольку положительный выброс напряжения обусловлен отличной от нуля индуктивностью измерительной цепи. Та часть осциллограммы импульса напряжения $U_n(t)$, где меняется полярность напряжения, заменялась при расчетах нулевым сигналом.);

$U_B(t)$ - откорректированная осциллограмма напряжения на разрядном промежутке на предпробойной стадии и стадии пробоя;

$z = 100$ Ом, так как в нашем случае схема включения ГК соответствует изображенной на Фиг. 1а.

t_{00}, t_{01} - время когда обращаются в ноль осциллограммы $U_{xx}(t)$ и $U_n(t)$, соответственно, т.е. $U_{xx}(t_{00})=0, U_n(t_{01})=0$.

Результаты определения энергетических характеристик сведены в таблицу 1.

Таблица 1			
Давление, атм	w_1 , Дж	w_2 , Дж	Сопротивление плазмы R_p , Ом
5	3.2×10^{-3}	7.1×10^{-3}	5.6
40	6.1×10^{-3}	1.4×10^{-2}	28.0

На графике (Фиг. 4) показана зависимость мгновенной мощности, затрачиваемой на нагрев газа и световое излучение, от времени. Кривая 1 - азот 5 атм, кривая 2 - азот 40 атм.

Полученные результаты показывают, что энергетические потери в ГК, полученные по методике, предложенной в изобретении, оказались существенно (более чем в два раза) выше, чем энергетические потери в ГК, полученные по методике прототипу. Использование изобретения позволит адекватно определить реальные энергетические характеристики ГК пикосекундного диапазона, широко используемых в различной импульсной электрофизической аппаратуре - генераторы пикосекундных электронных

пучков, пикосекундные рентгеновские источники, генерирование мощных пикосекундных микроволновых импульсов, источники сверхширокополосного радиочастотного излучения, и т.д. Более того, меняя конфигурацию катода и анода, длину разрядного промежутка ГК, тип и давление рабочего газа, и используя предложенную в изобретении методику измерения энергетических характеристик ГК, можно экспериментально подобрать параметры ГК обеспечивающие минимальные потери передаваемой в нагрузку энергии в конкретном электрофизическом приборе.

Следует отметить, что предложенный в изобретении способ измерения энергетических характеристик ГК пикосекундного диапазона методом рефлектометрии можно использовать в случае включения ГК в разрядный контур по схеме, показанной на Фиг. 1а. В том случае, если используется схема включения ГК показанная на Фиг. 1б, использовать предложенный в изобретении способ можно только в случае подключения к аноду ГК полезной нагрузки, согласованной по волновому сопротивлению с коаксиальным трактом, в который встроено ГК. При использовании схемы включения Фиг. 1б, когда анод ГК заземлен, в разрядном промежутке ГК одновременно распространяются две встречных волны напряжения $U_2(t)$ и $U_3(t)$. В этом случае предложенный в изобретении способ нуждается в модификации учитывающей этот факт, однако возможность замены разрядного газового промежутка ГК постоянным сопротивлением остается актуальной.

Фигуры, поясняющие описание изобретения:

Фиг. 1. Эквивалентная схема разрядного контура. L_{Φ} - формирующая линия ГНИ; S - ключ; L_1 - передающая 50-Омная коаксиальная линия; L_2 - нагрузочная 50-Омная коаксиальная линия заполненная газом; ГК - газовый коммутатор (разрядный газовый промежуток, выполненный в виде разрыва центрального электрода коаксиальной линии); А - анод; К - катод; U_0 - напряжение зарядки ГНИ; $U_1(t)$ - падающая на разрядный промежуток ГК волна напряжения; $U_2(t)$ - волна напряжения отраженная от разрядного промежутка ГК на стадиях запаздывания пробоя и пробоя; $U_3(t)$ - волна напряжения возникающая в цепи после пробоя разрядного промежутка ГК (Фиг. 1а: $U_3(t)$ распространяется в нагрузочной линии L_2 и далее отражается от короткозамкнутого конца линии L_2 обратно в сторону ГНИ; Фиг. 1б: отражается от анода разрядного газового промежутка ГК обратно в сторону ГНИ). На этой фигуре показаны схемы, когда конец нагрузочной линии L_2 (Фиг. 1а) и анод разрядного газового промежутка ГК (Фиг. 1б) заземлены. Вместо заземления к ним может быть подключена полезная нагрузка.

Фиг. 2. Напряжение на разрядном газовом промежутке ГК. $U_{xx}(t)$ - напряжение на разрядном газовом промежутке ГК в случае отсутствия пробоя (режим холостого хода); $U(t)$ - напряжение на разрядном газовом промежутке ГК на стадиях запаздывания пробоя и пробоя; U_0 - напряжение зарядки генератора наносекундных импульсов; $U_{пр}$ - напряжение пробоя (или коммутации) в импульсном режиме; t_3 - время запаздывания пробоя в режиме импульсного пробоя; $t_{комм}$ - время коммутации (обычно за $t_{комм}$ принимают временной промежуток в течении которого напряжение на разрядном газовом промежутке падает от уровня $0.9 \times U_{пр}$ до уровня $0.1 \times U_{пр}$).

Фиг. 3. Измеренные методом рефлектометрии осциллограммы напряжения и тока на ГК (длина разрядного газового промежутка ГК $d = 0.5$ мм; однородное распределение электрического поля в разрядном газовом промежутке; рабочий газ - азот, давление 5 атм (Фиг. 3а) и 40 атм (Фиг. 3б)).

Кривая 1 - напряжение на разрядном газовом промежутке ГК в режиме холостого хода $U_{xx}(t)$.

Кривая 2 - напряжение на разрядном газовом промежутке ГК на предпробойной стадии и стадии пробоя $U(t)$. Далее для удобства обозначим эту осциллограмму как $U_{п}(t)$. Осциллограммы (кривые 1 и 2) измерены методом рефлектометрии с помощью осциллографа Tektronix TDS 6604 (полоса пропускания 6 GHz, время установления переходной характеристики 70 пс).

Кривая 3 - восстановленная по предлагаемой в изобретении методике осциллограмма напряжения на разрядном газовом промежутке ГК на предпробойной

стадии и стадии пробоя $U(t)$. Далее для удобства обозначим эту осциллограмму как $U_B(t)$.

Кривая 4 - восстановленная по прототипу представленного изобретения осциллограмма тока разряда $i_1(t)$. Ток $i_1(t)$ рассчитывался по формуле $i_1(t) = (U_{xx}(t) - U_H(t))/z$, где $z = 100$ Ом - эквивалентное сопротивление разрядного контура. В расчете учитывалась только отрицательная полуволна напряжения осциллограммы $U_H(t)$, поскольку положительный выброс напряжения обусловлен отличной от нуля индуктивностью делителя напряжения. Та часть осциллограммы импульса напряжения $U_H(t)$, где меняется полярность напряжения, заменялся при расчетах нулевым сигналом.

Кривая 5 - восстановленная по предлагаемой в изобретении методике осциллограмма тока разряда $i_2(t)$. Ток $i_2(t)$ рассчитывался по формуле $i_2(t) = (U_{xx}(t) - U_B(t))/z$, где $z = 100$ Ом - эквивалентное сопротивление разрядного контура.

Фиг. 4. Зависимость мгновенной мощности, затрачиваемой на нагрев газа и световое излучение, от времени. Кривая 1 - азот 5 атм, кривая 2 - азот 40 атм.

Список цитируемой литературы:

1. Месяц Г.А., Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. - М.: Наука, 2004. - 704 с.
2. Иванов С.Н. Исследование времени формирования самостоятельного субнаносекундного разряда в газах высокого и сверхвысокого давления / С.Н. Иванов, В.В. Лисенков // Физика плазмы. - 2018 - Т. 44, № 3. - С. 323 - 332.
3. Ivanov S.N. Investigation of the Prebreakdown Stage of the Self-Sustained Subnanosecond Discharge in High Pressure Nitrogen / S.N. Ivanov, V.V. Lisenkov // Journal of Applied Physics. - 2018. - Vol. 124. - art. no 103304.
4. Иванов С.Н. Электронно-оптические исследования начальной фазы субнаносекундного импульсного электрического пробоя газовых промежутков / С.Н. Иванов, В.В. Лисенков, В.Г. Шпак // ЖТФ. - 2008. - Т. 78, № 9. - С. 62 - 68.
5. Иванов С.Н. Генерация убегающих электронов вблизи микронеоднородностей на поверхности катода в субнаносекундных самостоятельных разрядах в широком диапазоне высоких давлений / С.Н. Иванов, В.В. Лисенков // Физика плазмы. - 2023. - Т. 49, № 11. - С. 1222 - 1236.
6. Ivanov S.N. Investigation of the switching characteristics of high-pressure subnanosecond gas dischargers with the purpose of a sharp increasing of the breakdown voltages and the switching speed / S.N. Ivanov // Plasma Sources Sci. Technol. - 2022. - Vol. 31. - Art. no 055001.
7. Пикосекундные пучки убегающих электронов в воздухе / Г.А. Месяц, М.И. Яландин, А.Г. Реутова, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов // Физика плазмы. - 2012. - Т. 38, № 1. - С. 34 - 51.
8. Месяц А.Г. Пикосекундная электроника больших мощностей / А.Г. Месяц, М.И. Яландин // УФН. - 2005. - Т. 175, № 3. - С. 225 - 146.
9. Korolev Y.D. High-Voltage Spark Gap in a Regime of Subnanosecond Switching / Y.D. Korolev, N.M. Bykov // IEEE Transactions on Plasma Science. - 2012. - Vol. 40, № 10. - P. 2443 - 2448.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. - Изд. 2-е, доп. и перераб. - М.: Наука, 1992. - 536 с.
11. Lisenkov V.V. Application of a hybrid model for the numerical study of the generation of runaway electrons and the formation of high-pressure gas discharge / V.V. Lisenkov, Y.I. Mamontov // Journal of Physics: Conf. Series. - 2018. - Vol. 1141. - Art. no 012051.

Формула изобретения

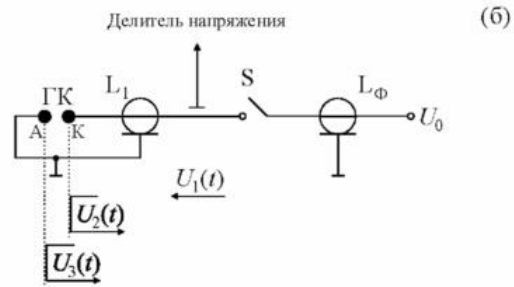
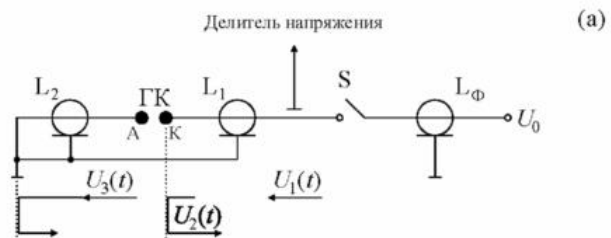
Способ измерения энергетических характеристик двухэлектродных газовых коммутаторов (ГК) пикосекундного диапазона методом рефлектометрии, включающий в себя измерение волны напряжения $U_{xx}(t)$ отраженной от ГК в режиме холостого хода при отсутствии пробоя разрядного промежутка ГК, измерение волны напряжения $U(t)$, отраженной от ГК в режиме пробоя разрядного промежутка ГК,

расчет импульса тока $i(t)$, коммутируемого ГК, по формуле $i(t) = (U_{xx}(t) - U(t))/z$, где z – эквивалентное сопротивление коаксиальных линий коаксиального тракта, в который встроены ГК в виде разрыва центрального электрода тракта, определение энергетических потерь в ГК по формуле

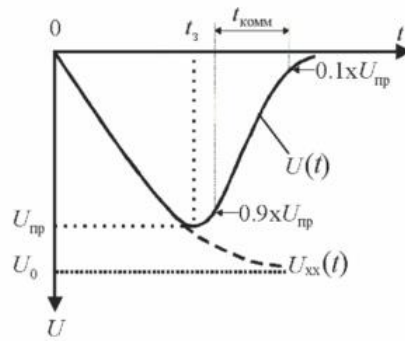
$$w_2 = \int_0^{t_0} U(t) \frac{U_{xx}(t) - U(t)}{z} dt = \int_0^{t_0} U(t) i(t) dt, \text{ где } t_0$$

– время, когда обращается в ноль осциллограмма $U_{xx}(t)$, т.е. $U_{xx}(t_0)=0$, отличающийся восстановлением потерянной при измерениях в пикосекундном диапазоне нижней части заднего фронта волны напряжения $U(t)$, состоящем в том, что в момент времени t_1 , в который напряжение на разрядном промежутке ГК $U(t)$ падает до уровня, когда характерное время ионизации $\tau_i = 1/\nu_i$, где ν_i – частота ионизации, плазмы разрядного промежутка становится на порядок больше, чем длительность прикладываемого к разрядному промежутку ГК импульса напряжения, меняющееся во времени сопротивление разрядного промежутка заменяют постоянным фиксированным сопротивлением плазмы $R_p = U(t_1)/i(t_1)$, при этом для обеспечения гладкости решения при $t \geq t_2$ вводят переходную функцию сопротивления в виде: $R(t) = (R_1 - R_p) \times \exp(-(t - t_2)/(2 \times (t_1 - t_2))) + R_p$, где: t_1 – момент времени, когда характерное время ионизации становится на порядок больше длительности импульса напряжения и сопротивление плазмы становится равным R_p ; t_2 – момент времени, когда напряжение $U(t_2)$ на заднем фронте измеренной методом рефлектометрии осциллограммы $U(t)$ становится равным $1.5 \times U(t_1)$, а сопротивление плазмы в этот момент равно R_1 , с использованием полученной зависимости сопротивления плазмы от времени восстанавливают потерянный при измерениях методом рефлектометрии нижний участок заднего фронта на осциллограмме импульса напряжения $U(t)$: $U(t) = U_n(t) = U_{xx}(t)$ при $t < t_2$, $U(t) = U_n(t) = U_{xx}(t) \frac{R(t)}{R(t) + z}$ при $t \geq t_2$, где $U_n(t)$ – измеренная

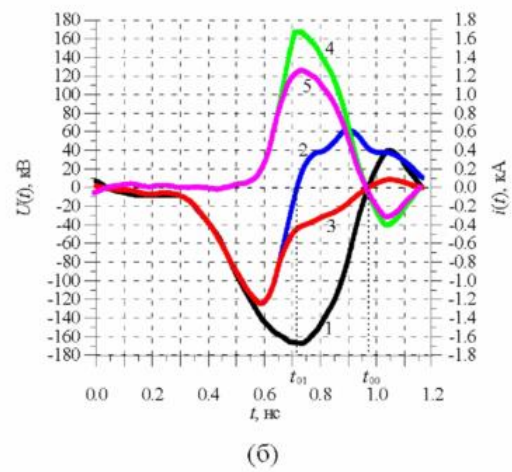
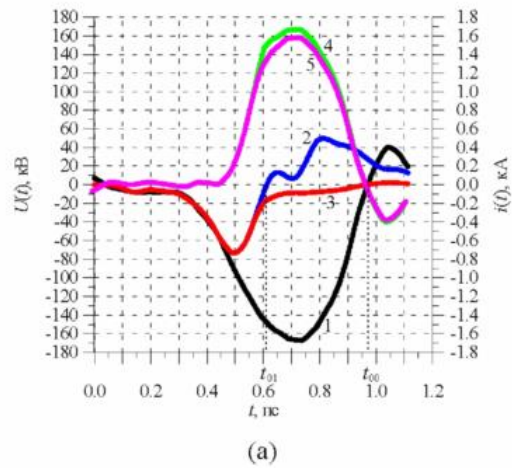
методом рефлектометрии и не откорректированная осциллограмма напряжения на разрядном промежутке на предпробойной стадии и стадии пробоя $U(t)$, $U_b(t)$ – измеренная методом рефлектометрии и откорректированная осциллограмма напряжения на разрядном промежутке на предпробойной стадии и стадии пробоя $U(t)$.



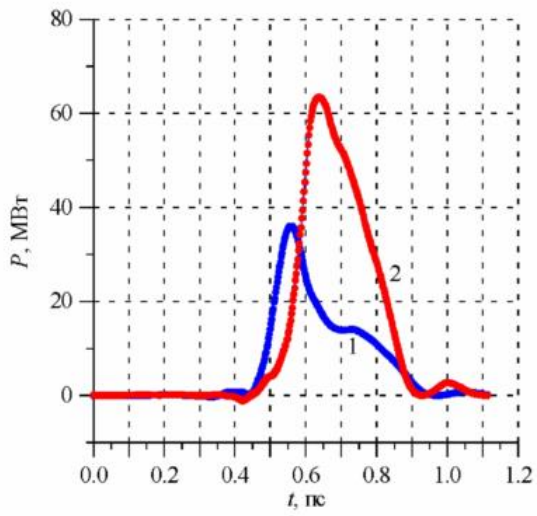
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4