

шение СВЧ излучения будет определяться средним по поверхности образца. Например, в случае, когда σ определено соотношением (1), а флуктуирует q , то зависимость Z от температуры будет зависеть от распределения q и не будет универсальной.

Уравнение (8), определяющее импеданс слоистого случайно неоднородного сверхпроводника, является точным. При произвольном уровне флуктуаций его решение может быть выполнено численными методами.

Автор весьма признателен В. Ф. Гантмахеру, Г. И. Левиеву, А. В. Полискому и М. Р. Трунину за многочисленные обсуждения затронутых в работе вопросов.

Список литературы

- [1] *Beyerman W. P., Alavi B., Gruner G.* // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 35. N 16. P. 8826—8828.
- [2] *Shridhar S., Shiffman C. A., Hamdeh H.* // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 36. N 4. P. 2301—2304.
- [3] *Wijeratne A. T., Dunifer G. L., Chen J. T., Wenger L. E.* // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 37. N 1. P. 615—618.
- [4] *Kennedy W., Shridhar S.* // Sol. St. Commun. 1988. Vol. 68. N 1. P. 71—75.
- [5] *Гантмахер В. Ф., Кулаков В. И., Левиев Г. И.* и др. // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. Вып. 4. С. 1444—1449.
- [6] *Kapitulnic A., Naito B., Char K.* et al. // Intern. J. Mod. Phys. B. 1987. Vol. 1. N 3, 4. P. 779—797.

Нижегородский университет

Поступило в Редакцию
5 мая 1991г.

04

Журнал технической физики, т. 62, в. 2, 1992

© 1992 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДОИСКРОВОГО РАЗРЯДНИКА СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В ЦЕПИ ЗАПУСКА

К. А. Клименко, А. В. Колесников, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, О. Б. Франц,
И. А. Шемякин

В последнее время интенсивно исследуется новый тип разрядников низкого давления с полыми электродами и холодным катодом. Их часто называют псевдоискровыми разрядниками [1—3]. Они позволяют коммутировать в частотном режиме токи порядка 10 кА при длительности фронта импульса примерно 10 нс [1, 2]. Одним из перспективных способов запуска является использование узла поджига со вспомогательным стационарным тлеющим разрядом [2]. При подаче пускового импульса электроны из плазмы вспомогательного разряда проникают в основной промежуток разрядника и инициируют пробой.

Результаты исследований, направленных на выявление механизма работы разрядника с таким способом запуска и

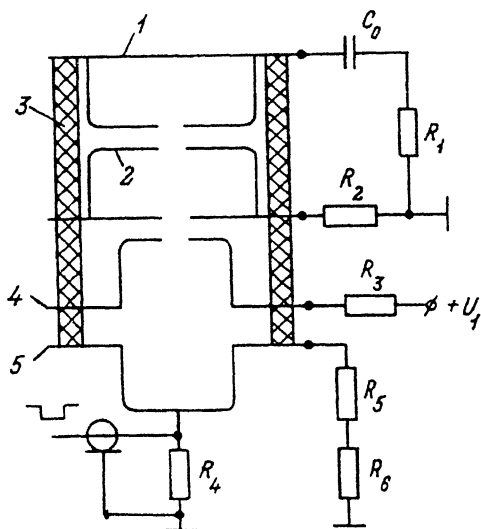


Рис. 1. Конструкция разрядника и схема регистрации.

на получение наносекундной стабильности срабатывания разрядника, представлены в настоящей работе.

Условно конструкция разрядника и схема регистрации показаны на рис. 1. Электроды основного промежутка 1 и 2 представляют собой полости из меди, соединенные между собой отверстием, расположенным на оси разрядника. Диаметр отверстий 4 мм, а межэлектродное расстояние 5 мм. Корпус разрядной камеры 3 изготовлен из керамики с внутренним диаметром 85 мм.

На анод 1 основного промежутка прикладывалось напряжение $U_0 = 5-20$ кВ от емкости $C_0 = 47$ нФ. Сопротивление нагрузки в цепи основного разряда $R_1 = 1.4$ Ом было несколько меньше волнового сопротивления $\rho = \sqrt{L/C} = 1.7$ Ом, режим тока был колебательным. Ток разряда регистрировался с низкоомного шунта R_2 . За счет подачи напряжения $U_1 = 1.5-5$ кВ между электродами 4 и 5 узла поджига зажигается стационарный тлеющий разряд, ток которого проходит через балластное сопротивление $R_3 = 850$ кОм и сопротивление $R_4 = 0.1-1$ кОм. Диаметр полостей электродов вспомогательного тлеющего разряда составлял 2 см, а расстояние от дна катодной полости 5 до дна анодной полости 4 было 2.5 см. При горении тлеющего разряда падением напряжения на сопротивлении R_4 можно пренебречь и, следовательно, к электроду 4 приложено напряжение горения U_r , которое примерно равно катодному падению потенциала в тлеющем разряде U_k . Максимальная энергия электронов, выходящих из отверстия в электроде 4, может достигать eU_k , и они не могут проникнуть в полость электрода 2, так как движутся в тормозящем поле.

При подаче пускового импульса U_n на сопротивление R_4 электрод 5 оказывается под отрицательным потенциалом относительно "земли", вследствие чего электроны из тлеющего разряда попадают в полость 2 и в основной зазор и иницируют пробой. Здесь мы не рассматриваем механизм зажигания разряда в основном промежутке. Этому будет посвящена отдельная работа, а частично механизм обсужден в [4, 5]. Отметим лишь, что увеличение плотности электронного тока в полости 2 должно способствовать уменьшению времени запаздывания срабатывания разрядника и уменьшению разброса срабатывания.

Обсудим далее режимы горения вспомогательного тлеющего разряда. В качестве рабочих газов в приборе применялся азот и воздух при давлениях $2-6 \cdot 10^{-2}$ Тор. Давление регулировалось за счет соотношения между скоростью откачки и натекания газа. Ток разряда изменялся путем изменения на-

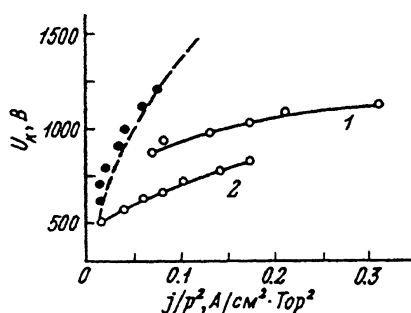


Рис. 2. Зависимость катодного падения потенциала от отношения плотности тока разряда с полыми электродами к квадрату давления газа в азоте при давлении $p = 4 \cdot 10^{-2}$ (1) и $6 \cdot 10^{-2}$ Тор (2).

пряжения источника питания U_1 . При давлении азота $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Тор вспомогательный тлеющий разряд зажигался при $U_1 = 1200$ В. Напряжение горения при этом составляло 930 В, а ток $i = 0.08$ мА. Увеличение U_1 приводило к скачкообразному уменьшению U_r до 870 В и росту тока до $i = 0.38$ мА, а затем вольт-амперная характеристика была растущей.

Известно, что в классическом аномальном тлеющем разряде катодное падение потенциала U_k связано с плотностью тока j и давлением газа законом подобия $U_k = f(j/p^2)$. Для азота данную экспериментальную зависимость можно аппроксимировать следующим выражением [6]:

$$j/p^2 = 1.42 \cdot 10^9 \cdot U_k^{2.5}, \quad (1)$$

где отношение j/p^2 получается в $A/cm^2 \cdot \text{Тор}^2$ при подстановке U_k в В.

На рис. 2 штриховой линией показана кривая 1, здесь же нанесены экспериментальные результаты для конструкции, представленной на рис. 1. Видно, что точки для разных давлений газа не ложатся на одну и ту же кривую, что обусловлено влиянием эффекта полного катода. Этот эффект проявляется, когда размер полости соизмерим или больше длины катодного слоя. В режиме глубоко аномального тлеющего разряда произведение давления на длину катодного слоя изменяется слабо и для азота $p l_k \approx 0.1$ Тор·см. Именно из соображений зажигания вспомогательного тлеющего разряда с полым катодом нами выбран диаметр катодной полости 2 см.

Для проверки вывода о наличии эффекта полого катода были сняты вольт-амперные характеристики в другой конструкции электродов. Анод 4 здесь был полым, а катод 5 представлял собой плоский диск диаметром 8 см. Расстояние между катодом и дном анодной полости составляло 8 см. В таких условиях соблюдается закон подобия и экспериментальные точки для давлений газа $p = 3 \cdot 10^{-2}$ и $4 \cdot 10^{-2}$ Тор ложатся на штриховую кривую (рис. 2).

Ток в цепи поджига влияет на напряжение статического пробоя разрядника. В конструкции, представленной на рис. 1, при токах до 2 мА и $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Тор напряжение статического пробоя было больше 20 кВ. Как показали опыты, наименьшее время запаздывания срабатывания разрядника t_3 относительно момента прихода пускового импульса на сопротивление R_4 соответствует режиму горения вспомогательного тлеющего разряда с полыми

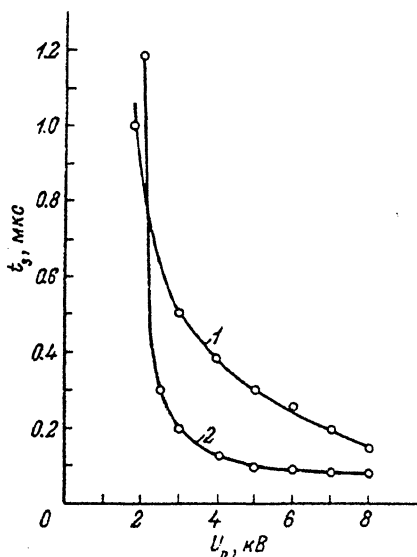


Рис. 3. Время запаздывания срабатывания разрядника в зависимости от напряжения поджига в азоте.

$p = 4 \cdot 10^{-2}$ Тор, $U_0 = 15$ кВ, ток вспомогательного разряда $i = 1.6$ мА.

электродами. Результаты по измерению времен запуска разрядника, приводимые ниже, относятся к этому режиму.

Пусковой импульс U_n на сопротивление $R_4 = 10^3$ Ом с длительностью фронта не хуже 30 нс подавался от генератора с внутренним сопротивлением 50 Ом. При подаче этого импульса на электроде 4 в начальные моменты времени устанавливалось напряжение

$$U = U_r - U \frac{C_1}{n C_1 + C_2}, \quad (2)$$

где C_1 — емкость между электродами 4 и 5, C_2 — емкость между электродами 2 и 4, U_r — напряжение горения тлеющего разряда до подачи пускового импульса.

В зависимости от соотношения емкостей C_1 и C_2 электроны могут как тормозиться в извлекающем промежутке между электродами 2 и 4 (при $U > 0$), так и ускоряться (при $U < 0$). Однако в любом случае электроны из тлеющего разряда будут проникать в полость 2, так как потенциал электрода 5 отрицателен относительно "земли". В конструкции разрядника емкости $C_1 = 9$ пФ, $C_2 = 40$

пФ, т. е. основная часть напряжения $U_{\text{п}}$ прикладывается к вспомогательному тлеющему разряду. Результаты измерений времен запаздывания срабатывания разрядника относительно момента прихода пускового импульса для этих условий показаны на рис. 3 (кривая 1).

Видно, что при увеличении амплитуды импульса поджига время запаздывания уменьшается. Для $U_{\text{п}} \geq 5$ кВ разброс срабатывания разрядника не хуже ± 5 нс. Время t_3 также зависит от тока вспомогательного разряда. Например, для $U_{\text{п}} = 5$ кВ уменьшение тока от 1.6 до 0.38 мА ведет к увеличению времени запаздывания от 300 до 500 нс. При напряжении U_1 , близком к напряжению зажигания тлеющего разряда, и токах около 0.1 мА время запаздывания возрастает и составляет 1—1.5 мкс.

Кривая 2 на рис. 3 показывает зависимость времени запаздывания от напряжения пускового импульса при искусственном перераспределении напряжения $U_{\text{п}}$ между емкостями C_1 и C_2 . Такое перераспределение достигалось за счет подключения параллельно промежутку между электродами 4 и 5 дополнительной емкости $C = 180$ пФ. Здесь основная часть напряжения $U_{\text{п}}$ прикладывалась к извлекающему промежутку. Видно, что время t_3 уменьшается, а также расширяется диапазон условий, в которых t_3 слабо зависит от амплитуды пускового импульса. Кроме того, время запаздывания практически не зависит от напряжения U_0 на аноде прибора при изменении U_0 в пределах 8—20 кВ и изменении $U_{\text{п}}$ от 4 до 8 кВ.

В заключение отметим, что описанные в работе эксперименты проведены при частоте следования импульсов до 20 Гц. Полученные режимы запуска, при которых анодное напряжение не влияет на время запаздывания и обеспечивается наносекундная стабильность времен t_3 , позволяют использовать разрядники для параллельной коммутации импульсных токов на общую нагрузку.

Авторы выражают признательность В. А. Лавриновичу и А. А. Демидову за изготовление разрядных камер в металлокерамическом исполнении.

Список литературы

- [1] Frank K., Christiansen J. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1989. Vol. 17. N 5. P. 748—753.
- [2] Kozlik C., Frank K., Almen O. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1989. Vol. 17. N 5. P. 758—761.
- [3] Riege H., Boggasch E. P. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1989. Vol. 17. N 5. P. 775—777.
- [4] Клименко К. А., Королев Ю. Д. // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по физике газового разряда. Кн. II. Омск, 1990. С. 43—44.
- [5] Коваль Н. Н., Королев Ю. Д., Пономарев В. Б. и др. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 6. С. 747—752.
- [6] Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 256 с.

Институт сильноточной электроники
Томск

Поступило в Редакцию
6 февраля 1991 г.

04
© 1992 г.

Журнал технической физики, т. 62, в. 2, 1992

ОТЫСКИВАНИЕ РАВНОВЕСНЫХ ФОРМ ТЭТА-ПИНЧЕЙ

Э. Л. Амромин

1. Задачи о фигурах равновесия идеально проводящей плазмы затрагивались в [1—3] и в других работах, причем отмечалась сложность отыскания этих фигур, связанная с нелинейностью граничных условий для напряженности магнитного поля H на их поверхности. Еще в [1] подчеркивалось формальное сходство таких