

Б. М. КОВАЛЬЧУК, В. В. КРЕМНЕВ, Г. А. МЕСЯЦ

ЛАВИННЫЙ РАЗРЯД В ГАЗЕ И ГЕНЕРИРОВАНИЕ
НАНО- И СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ БОЛЬШОГО ТОКА

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 16 VII 1969)

Для получения импульса тока с амплитудой $i_a \approx 10^2$ а и более и длительностью 10^{-8} сек. и менее в качестве коммутаторов используют искровые разрядники (1). Если время коммутации разрядника $t_k \ll \sqrt{LC}$, то $i_a \approx U_0 \sqrt{C/L}$, а $t_k \approx 1/\sqrt{LC}$, где U_0 — зарядное напряжение, L — индуктивность контура, C — емкость конденсатора. Из-за образования тонкого канала в разряднике обычно величина L не менее $10^{-9} \div 10^{-8}$ гн (2, 3), причем $L \sim U_0$. Для уменьшения L обычно используют параллельное включение большого числа разрядников. Тем не менее получение $t_k < 10^{-8}$ сек. обычно встречает большие трудности. Для устранения индуктивности канала разряда и получения

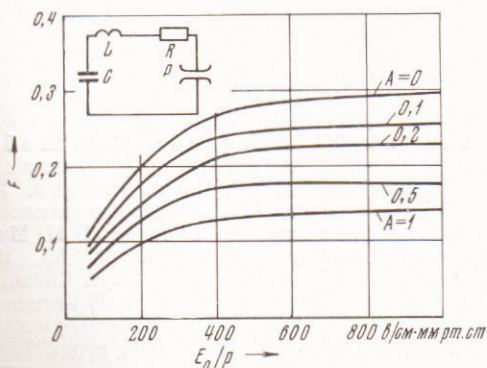


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость $I(E_0/\rho)$ при различных величинах $A = a_0 v_0 RC$ и $L = 0$

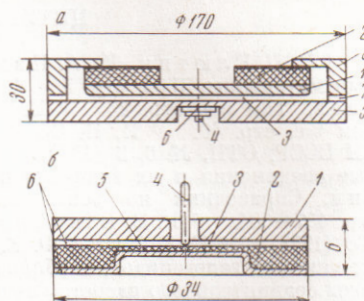


Рис. 2

Рис. 2. Конструкции генераторов тока.

а: 1 и 5 — электроды; 2 — конденсатор, $C = 6,2 \cdot 10^{-9}$ ф, $\epsilon_r = 700$; 3 — воздушный зазор, $\delta = 3$ мм, давление 110 мм рт. ст.; 4 — поджигающий электрод, импульс для поджига 2 кв. длительность 10 нсек; 6 — титановая керамика для иницирования разряда (?); 7 — шунт с сопротивлением, $6 \cdot 10^{-3}$ см; 8 — корпус.

б: 1 — электрод; 2 — конденсатор, $C = 1,5 \cdot 10^{-10}$ ф, $\epsilon_r = 80$; 3 — зазор, $\delta = 0,3$ мм, давление воздуха 760 мм рт. ст.; 4 — поджигающий электрод; 5 — диэлектрический слой из керамики на поверхности электрода; 6 — обкладки конденсатора

импульсов тока с t_k вплоть до 10^{-10} сек. предлагается использовать одновременное развитие большого числа электронных лавин в газовом промежутке. Если в какой-то момент у катода образовалось N_0 электронов, то каждый из них начинает образовывать электронную лавину (4).

Оценим величины i_a и t_k при разрядке емкости C на промежуток с лавинами (рис. 1). Если пренебречь величинами L и активным сопротивлением R , то зависимость тока i от времени t будет описываться системой уравнений

$$i = v \left(\frac{eN_0}{\delta} + C\delta \int_E^{E_0} \alpha dE \right), \quad E = E_0 - \frac{1}{C\delta} \int_0^t i dt, \quad (1)$$

где α — коэффициент ударной ионизации; v — скорость дрейфа электронов в лавине; δ — длина искрового промежутка; e — заряд электрона; E_0 и E — начальная и текущая напряженность поля в газовом промежутке. Из (1) следует, что

$$i_a = \alpha_0 v_0 U_0 C F(E_0/p), \quad (2)$$

где p — давление газа; α_0 и v_0 — величины α и v при $E = E_0$, а $F(E_0/p)$ определяется из системы (1) при $di/dt = 0$. Для воздуха зависимость $F(E_0/p)$ приведена на рис. 1. Учет активного сопротивления контура R ведет только к изменению функции $F(E_0/p)$. Если длительность импульса t_n определить из условия сохранения зарядов, то

$$t_n = U_0 C / i_a = [\alpha_0 v_0 F(E_0/p)]^{-1}. \quad (3)$$

Например, для генераторов импульсов на рис. 2б по формулам (2) и (3) получается $i_a = 4 \cdot 10^3$ а, $t_n \approx 1,5 \cdot 10^{-10}$ сек.

Величину N_0 необходимо выбрать такой, чтобы амплитудный ток $i = i_a$ достигался еще до того, как в каждой из лавин число электронов составит величину $N = N_{кр} \approx 10^8$ (5), при которой начинается образование стримера. При этом

$$N_0 \approx i_a \delta / e N_{кр} v_0. \quad (4)$$

Свободные электроны у катода получают за счет фотоэффекта на катоде или облучением прикатодной области быстрыми электронами, α -частицами и т. д.

Увеличение тока i_a и уменьшение длительности t_n возможно не беспредельно из-за геометрических размеров конденсатора. Если

$$[\alpha_0 v_0 F(E_0/p)]^{-1} \ll l \sqrt{\epsilon_r} / C_0$$

(C_0 — скорость света, ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора,

l — характерная длина пластин конденсатора, то предельно возможные i_a и t_n для конденсатора с круглыми пластинами с диаметром D при согласованной нагрузке определяется из соотношений

$$i_a \approx 0,5 \pi \epsilon_0 C_0 E_{кр} D \sqrt{\epsilon_r}, \quad t_n = D \sqrt{\epsilon_r} / 2 C_0, \quad (5)$$

где $E_{кр} = U_0 / d$ — напряженность поля в диэлектрике конденсатора, d — расстояние между пластинами. Например, для генератора, приведенного на рис. 2а, $t_n \approx 5 \cdot 10^{-9}$ сек, $i_a \approx 40 \cdot 10^3$ а.

Эксперименты показали, что для реализации лавинного разряда необходим импульсный заряд конденсатора C и перенапряжение на газовом промежутке (порядка двукратного и более). При снижении перенапряжения образуются отдельные каналы в промежутке и t_n увеличивается. Для устранения этого один или оба электрода покрываются слоем диэлектрика с собственной емкостью $C_d \gg C$. При этом образование одного или нескольких каналов не ведет к большой проводимости промежутка из-за малого тока смещения через диэлектрик. Эти каналы излучают фотоны, которые за счет фотоэффекта на катоде создают нужное число начальных электро-

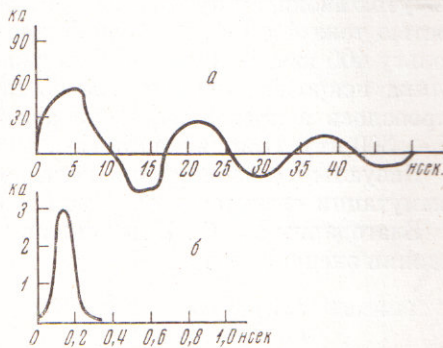


Рис. 3. Копии осциллограмм: а — тока в контуре генератора (рис. 2а) при $U_0 = 32$ кв; б — в генераторе (рис. 2б) при $U_0 = 4$ кв

нов. При этом для осуществления лавинного разряда необходимо иметь хотя бы один свободный электрон. При большом перенапряжении этот же эффект имеет место без диэлектрика на электродах из-за малой проводимости каналов⁽⁶⁾. Диэлектрический электрод позволяет, кроме того, устранить эрозию электродов и получить большую частоту следования импульсов.

На рис. 2 представлены эскизы двух генераторов импульсов. В одном из них параметры импульса тока ограничены (рис. 2а), а в другом не ограничены (рис. 2б) размерами конденсатора. На рис. 3 представлены типичные осциллограммы импульсов тока этих генераторов, колебания тока обусловлены многократным отражением импульса в конденсаторе. Осциллограмма рис. 3а снята с шунта генератора рис. 2а, а осциллограмма рис. 3б построена дифференцированием осциллограммы напряжения на конденсаторе 2, рис. 2б. Иницирующие электроны у катода создавались за счет ультрафиолетовой подсветки катода от разряда на поверхности керамики в анодной области⁽⁷⁾. Из осциллограмм следует, что величины $t_{н}$ и i_a на рис. 3а удовлетворительно совпадают с расчетными по формулам (5), а на рис. 3б — по (3) и (4).

Коммутация тока при помощи лавинного разряда осуществлялась также от пучка быстрых электронов. Конструкция генератора аналогична приведенной на рис. 2. Диэлектрик из промежутка убирался, а в качестве катода использовалась фольга из Al толщиной 50 мк, через которую в промежуток вводился пучок электронов с энергией 400 кэВ, током 100 а, плотностью тока 4 а/см², длительностью 20 нсек, и энергией на входе через фольгу 400 кэВ. Конденсатор заряжался до постоянного напряжения 50 кВ. Длина искрового промежутка составляла 0,8 см, а давление азота регулировалось в пределах 3 ÷ 15 атм. (статическое пробивное напряжение 75 ÷ 300 кВ). При давлении газа 15 атм. амплитуда тока составляла 12 кА.

Визуальные наблюдения показывают, что во всех случаях лавинной коммутации светится весь объем промежутка и нет отдельных каналов.

Благодарим Ю. Ф. Поталицына и А. С. Ельчанинова за помощь в проведении экспериментов.

Томский политехнический институт
им. С. М. Кирова

Поступило
9 VII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. А. Воробьев, Г. А. Месяц, Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов, 1963. ² С. И. Андреев, М. П. Ванюков, ЖТФ, 31, 8, 961 (1961). ³ R. Grünberg, Zs. Naturforsch., 20a, 202 (1965). ⁴ Г. Петер, Электронные лавины и разряд в газах, М., 1968. ⁵ G. A. Mesjatz, Y. J. Bichkoff, A. M. Iskoldski, Compt. Rend. 8 Conf. Int., Phenomenes in Ionized Gases, Vienna, 1967, p. 210; Г. А. Месяц, Ю. И. Бычков, А. М. Искольдский, ЖТФ, 38, 8 (1968); Г. А. Месяц, В. В. Кремнев и др., ЖТФ, 39, в. 1, 75 (1969). ⁶ Г. А. Месяц, А. М. Искольдский и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., 3, 77 (1968). ⁷ Б. М. Ковальчук, Приборы и техн. эксп., № 4, 116 (1968).