

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ В ТЕХНИКЕ СВЧ

*В. М. Коновалов, В. А. Тиманюк, В. М. Ткаченко,
В. Б. Тютюнник*

Харьков

Применение плазмы в технике СВЧ перспективно благодаря возможности изменения в широком диапазоне ее диэлектрических и резонансных свойств, проницаемости плазмы по отношению к электронным потокам и сильно выраженным нелинейным свойствам.

Основной трудностью при разработке плазменных СВЧ приборов является создание определенной конфигурации плазмы с достаточно высокой концентрацией. Использование для этих целей тлеющего разряда с полым катодом целесообразно по следующим причинам. С применением катода в форме замкнутой полости кинетическая энергия электронов, эмиттируемых катодом, эффективно используется для ионизации, а все ионы и возбужденные атомы, покидающие плазму, способствуют эмиссии электронов из катода. Это приводит к образованию в полости катода плазмы с высокой концентрацией [1]. Замкнутая конфигурация электродной системы в разряде с полым катодом позволяет совместить функции разрядных электродов и волноведущих поверхностей, что приводит, во-первых, к упрощению конструкции, во-вторых, к хорошему согласованию таких приборов с волноводными трактами.

Плазма разряда с полым катодом находит применение в СВЧ технике для управления фазой и амплитудой волны в волноводном тракте [2—3], управления поляризацией антенн [4] и др. В качестве электродов в таких приборах используются отрезки стандартных волноводов прямоугольного или кругового сечения, однако, как показано в работе [3], в цилиндрическом полой катоде при той же плотности разрядного тока достигается концентрация плазмы в 2—3 раза большая, чем в прямоугольном. Поэтому целесообразно катод изготавливать цилиндрическим, а в качестве анодов использовать переходы от круглого волновода к прямоугольному, как это показано на рис. 1.

Целью настоящей работы является выработка рекомендаций по выбору геометрических размеров и электрического режима, а также выяснение перспектив укорочения рабочей длины волны плазменных СВЧ приборов с цилиндрическим полым катодом.

Рассмотрим влияние поперечных размеров полого катода, одновременно являющегося волноводом, полностью заполненным плазмой. В этом случае постоянная распространения волны, если частота столкновений электронов много меньше частоты поля, равна

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2} - \frac{n}{n_{кр}}} \quad (1)$$

где λ — длина волны в свободном пространстве; λ_c — критическая [5], для данного волновода длина волны; n — концентрация плазмы в разряде и $n_{кр}$ — критическая для данной волны концентрация плазмы;

$$n_{кр} = 1,24 \cdot 10^{-8} \frac{c^2}{\lambda^2} \text{ см}^{-3}. \quad (2)$$

Из равенства (1) видно, что в волноводе отсечка сигнала (полная непрозрачность плазмы) достигается при концентрации не $n_{кр}$, как для свободного пространства, а при

$$n_{отс} = n_{кр} \left(1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2}\right). \quad (3)$$

Отсюда следует, что при работе в режиме ослабления или модуляции амплитуды СВЧ сигнала выгодно уменьшать λ_c , т. е. радиус полого катода.

При работе в режиме фазовращателя следует учитывать следующее обстоятельство. Максимальный сдвиг фазы $\Delta\varphi_m$ при изменении концентрации однородной плазмы от 0 до $n_{кр}$ в свободном пространстве составляет

$$\Delta\varphi_m = 2\pi \frac{l}{\lambda}. \quad (4)$$

В волноводе величина максимального сдвига фазы уменьшается:

$$\Delta\varphi_m = 2\pi \frac{l}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2}}. \quad (5)$$

$\frac{\lambda}{\lambda_c}$	0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\frac{n_{отс}}{n_{кр}}$	1	0,91	0,84	0,75	0,64	0,51	0,36	0,19
$\Delta\varphi_m$	2π	$1,90\pi$	$1,82\pi$	$1,74\pi$	$1,60\pi$	$1,42\pi$	$1,20\pi$	$0,86\pi$

В таблице приведены отношение концентрации плазмы, необходимой для отсечки сигнала $n_{отс}$, к критической концентрации $n_{кр}$ и максимальный сдвиг фазы на длине $l = \lambda$ при различных отношениях $\frac{\lambda}{\lambda_c}$, т. е. радиусах волновода.

Как видно из таблицы, с приближением λ к λ_c значительно уменьшается концентрация плазмы, необходимая для отсечки волны, но вместе с тем уменьшается и максимально возможный сдвиг фазы волны. Поэтому поперечные размеры полого катода следует выбирать в зависимости от требуемой полосы пропускания и функций, выполняемых прибором.

Вопрос о выборе длины катода осложняется тем, что плазма в полом катоде в зависимости от давления газа может быть существенно неоднородной по длине катодной полости, и как величину концентрации плазмы, так и ее распределение нельзя рассчитать теоретически.

Эксперимент, проведенный нами для медных полых катодов длиной 90; 180 и 270 мм, дал следующие результаты. На рис. 1 приведена зависимость плотности тока при отсечке СВЧ сигнала ($\lambda = 3,13$ см) от давления гелия для полых катодов диаметром 30 мм указанных выше длин. Как видно из рисунка, с увеличением длины катода плотность тока, необходимая для отсечки волны, уменьшается, причем разница проявляется больше при низких давлениях газа. В этом случае диффузионные потери электронов из полости катода через торцовые сечения возрастают. С ростом длины катода увеличивается объем полости, в то время как площадь сечения, через которое происходит уход электронов, не меняется. Это и приводит к росту концентрации плазмы при той же плотности разрядного тока. Уменьшение потерь электронов с увеличением длины катода приводит также к уменьшению напряжения горения разряда.

При малой концентрации плазмы ($n \ll n_{кр}$) сдвиг фазы в пренебрежении затуханием амплитуды волны можно выразить следующей формулой:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda n_{кр}} n l, \quad (6)$$

т. е. сдвиг фазы пропорционален произведению концентрации на длину пути волны в плазме. Так как увеличение длины катода приводит при той же плотности разрядного тока к росту концентрации плазмы, то в фазовращателях выгодно увеличивать длину катода. Для модуляции амплитуды СВЧ сигнала целесообразно длину катода выбирать небольшой, так как мощность, требующаяся для поддержания разряда, при этом уменьшается.

Для практического применения разряда с полым катодом также важно следующее. Оказалось, что концентрация плазмы, а следовательно, и сдвиг фазы при фиксированном токе разряда

сильно зависят от температуры катода. На рис. 2 приведены зависимости сдвига фазы от величины разрядного тока при трех значениях температуры катода. Видно, что с увеличением температуры катода ток, при котором достигается заданный сдвиг фазы, увеличивается. Так, для получения сдвига фазы 4π при температуре катода 20°C разрядный ток должен быть равен 100 ма , а при 160°C — 150 ма . Следует также отметить, что влияние температуры катода зависит от давления рабочего газа. В области давлений, близких к оптимальному для данной геометрии полого катода, оно минимально.

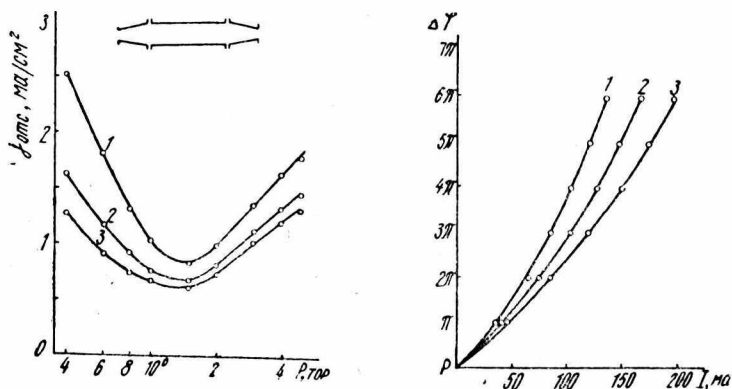


Рис. 1. Зависимость плотности тока при отсечке от давления гелия для катодов различной длины: 1 — 90 мм; 2 — 180 мм; 3 — 270 мм.

Рис. 2. Зависимость сдвига фазы от тока разряда для давления аргона $0,2\text{ тор}$ при различных температурах катода: 1 — 20°C ; 2 — 90°C ; 3 — 160°C .

Рассмотрим перспективы укорочения рабочей длины волны плазменных СВЧ приборов с газоразрядными полыми катодами. Для эффективной работы таких приборов необходимо изменять концентрацию плазмы от 0 до нескольких десятых долей критического значения $n_{кр}$. Как видно из формулы (2), $n_{кр}$ с уменьшением длины волны растет как $1/\lambda^2$. Повышение концентрации плазмы при фиксированном токе разряда возможно за счет охлаждения катода и применения в разряде газов с большим молекулярным весом [3]. Однако увеличение концентрации плазмы в тлеющем разряде с полым катодом ограничено возрастанием электрического поля на поверхности катода до величины, при которой начинается холодная эмиссия и разряд переходит в форму дуги. При этом трудно избежать перехода в термоэлектрон-

ную дугу с локализацией катодного пятна, что делает невозможным использование такого разряда в СВЧ технике.

Рассчитаем концентрацию плазмы, при которой следует ожидать перехода к дуговому разряду. Для этого вычислим поле на поверхности катода для случая, когда ширина темного катодного пространства d_k много меньше радиуса катода r_k . В этом случае эквипотенциальную поверхность плазмы можно считать параллельной поверхности катода и рассматривать поле в катодном пространстве как в плоской системе.

Поле в темном катодном пространстве определяется уравнением Пуассона

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (7)$$

Интегрирование при граничных условиях $x = d_k$, $E = 0$ и $x = 0$, $U = 0$ дает распределение поля

$$E = \frac{\rho}{\epsilon_0} (x - d_k) \quad (8)$$

и потенциала

$$U = \frac{\rho}{\epsilon_0} \left(x d_k - \frac{x^2}{2} \right). \quad (9)$$

Известно, что падение потенциала между катодом и границей отрицательного свечения — катодное падение потенциала U_k для разряда, в котором расстояние между катодом и анодом мало, практически равно напряжению между электродами U_a . Тогда, используя (9) при $x = d_k$, получим

$$U_a = \frac{\rho}{\epsilon_0} \frac{d_k^2}{2}, \quad (10)$$

откуда

$$d_k = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 U_a}{\rho}}. \quad (11)$$

Из уравнения (8) (при $x = 0$) поле на катоде E_k (по абсолютной величине) оказывается равным

$$E_k = \sqrt{\frac{2\rho U_a}{\epsilon_0}}. \quad (12)$$

Переход к дуговому разряду происходит в том случае, если поле на катоде достигает величины $E_{km} \approx 9 \cdot 10^5$ в/см [6]. Этой величиной поля определяется максимальное значение концентрации плазмы $n_m = \frac{\rho_m}{e}$, которого можно достичь в тлеющем разряде с полым катодом

$$n_m = \frac{\epsilon_0 E_{km}^2}{2eU_a}. \quad (13)$$

Если взять $U_a = 300$ в, то максимальная концентрация оказывается равной $7,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Такой концентрации достаточно для отсечки СВЧ сигнала с длиной волны $\lambda = 1,2$ мм. С учетом сделанных приближений можно считать, что плазменные СВЧ приборы с полыми катодами могут работать на длинах волн до 2 мм.

ВЫВОДЫ

Разряд с полым катодом может с успехом применяться в фазовращателях, аттенуаторах и модуляторах СВЧ диапазона вплоть до коротковолновой части миллиметрового диапазона. Размеры полых катодов необходимо выбирать в зависимости от функции, выполняемой прибором. Для понижения мощности, затрачиваемой на поддержание разряда, следует наполнять приборы тяжелыми инертными газами и охлаждать катод.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. G. Herqvist. RCA Rev., 19, 35, 1958.
2. А. М. Старик. «Радиотехника и электроника», 10, вып. 7, 1965.
3. В. М. Ткаченко, В. Б. Тютюнник. «Газоразрядные приборы», вып. 2 (18). Изд-во «Электроника», 1970.
4. Н. Н. Горобец, А. Ф. Ляховский, В. М. Ткаченко, В. Б. Тютюнник. Сб. «Радиотехника», вып. 18. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
5. М. Хилд, С. Уортон. Микроволновая диагностика плазмы. Атомиздат, 1968.
6. W. S. Boyle, F. E. Haworth. Phys. Rev., 101, 935, 1956.