

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ, ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ДИАГНОСТИКА ОКНА ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ГИРОТРОНА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Ши Шаомин

Вывод энергии из мощного СВЧ прибора представляет собой серьезную проблему. В данной работе рассматриваются вопросы конструирования и диагностики плоского дискового окна для мощных гиротронов.

Три типа разрушения выходных окон. Экспериментально в мощных гиротронах наблюдаются разрушения выходных окон, обусловленные следующими тремя факторами.

1) Электронная бомбардировка. Электроны могут попасть на окно из электронного пучка из-за дефектов изготовления или неточной юстировки гиротрона. Вторичная электронная эмиссия с окна может значительно увеличить эффект этой бомбардировки. Электронная бомбардировка приводит к появлению в окне отверстий, хорошо видимых в микроскоп.

2) Локальный ВЧ пробой. Такие пробои могут возникнуть из-за рассогласования тракта или из-за плохого состояния поверхности волновода.

3) Термические напряжения, возникающие из-за неоднородности высокочастотного поля и, соответственно, диэлектрических потерь в окне, а также из-за различных коэффициентов теплового расширения диска и металлической обоймы окна.

Последние два фактора приводят к появлению трещин в окне.

Оптимальный выбор материала окна. В свете сказанного, материал для окна вывода энергии должен иметь малые высокочастотные потери, высокую теплопроводность, механическую прочность и достаточно высокую температуру плавления. Ниже показано, что из всех доступных материалов (монокристаллической окиси алюминия Al_2O_3 , керамик на основе Al_2O_3 и BeO , плавяного кварца SiO_2) наилучшим сочетанием указанных свойств обладает монокристаллическая окись алюминия - сапфир.

Сапфир плавится при температуре $2040^\circ C$ - гораздо более высокой, чем керамики или кварц. Сапфир имеет плотную структуру, что позволяет производить оптическую полировку. Полированная поверхность сапфира имеет меньший коэффициент вторичной эмиссии, чем любая

керамика. По коэффициенту теплопроводности он уступает только керамике на основе окиси бериллия.

При сравнении между собой различных материалов удобно пользоваться формулой для максимальной средней мощности P_T , пропускаемой дисковым окном на моде H_{11} [1]:

$$P_T = 8 \frac{KT_M \lambda}{Z_d \epsilon_0 \epsilon'' \omega} \quad (1)$$

где T_M - максимально допустимая температура окна, λ - коэффициент теплопроводности, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, K - параметр согласования, ϵ'' - постоянная потеря материала окна, ω - угловая частота, Z_d - волновое сопротивление.

Сравним, например, два одинаковых окна, изготовленных из керамики на основе окиси алюминия (94% Al_2O_3) и сапфира, работающих на частоте 10 ГГц. Для керамики и сапфира имеем соответственно [1 - 3]: $\lambda = 0,17$ Вт/(см °С), $\epsilon'' = 1 \cdot 10^{-3}$ и $\lambda = 0,46$ Вт/(см °С), $\epsilon'' = 2 \cdot 10^{-3}$. Согласно (1), пропускаемая сапфировым окном мощность превышает мощность, пропускаемую окном из керамики, в 13,5 раз.

Диагностика сапфирового окна. Следует учитывать, что сапфир представляет собой одноосный кристалл и ориентация его оптической оси влияет на параметры окна. Наилучшие параметры достигаются, когда ось кристалла совпадает с осью окна [4, 5]. При изготовлении окон целесообразно использовать те или иные методы диагностики сапфирового диска для выбора правильного направления оси кристалла. Наиболее удобен оптический метод, в котором используется поляризационный микроскоп. Если направление оси кристалла совпадает с направлением оси диска, то в интерференционном изображении будут видны две взаимно перпендикулярные черные линии. Этим же методом можно регистрировать механические напряжения в диске.

Сапфировое окно для гиротрона. Оптическая диагностика окон была использована в Институте радиотехники и электроники АН КНР при

создании сапфирового окна диаметром 25 мм для гиротрона с рабочей длиной волны 8 мм. Окно располагалось в волноводе диаметром 22 мм (рис. 1). Такая конструкция позволяет работать на моде H_{02} , избегая многомодового режима (более 90% мощности излучения гиротрона сосредоточено в моде H_{02}). На рис. 1 показан результат "холодного" измерения КСВ окна в зависимости от частоты. В рабочей области 32 - 37 ГГц КСВ не превышает 1,5, а на проектной частоте 35 ГГц КСВ менее 1,1 и потери не превышают 0,24 дБ.

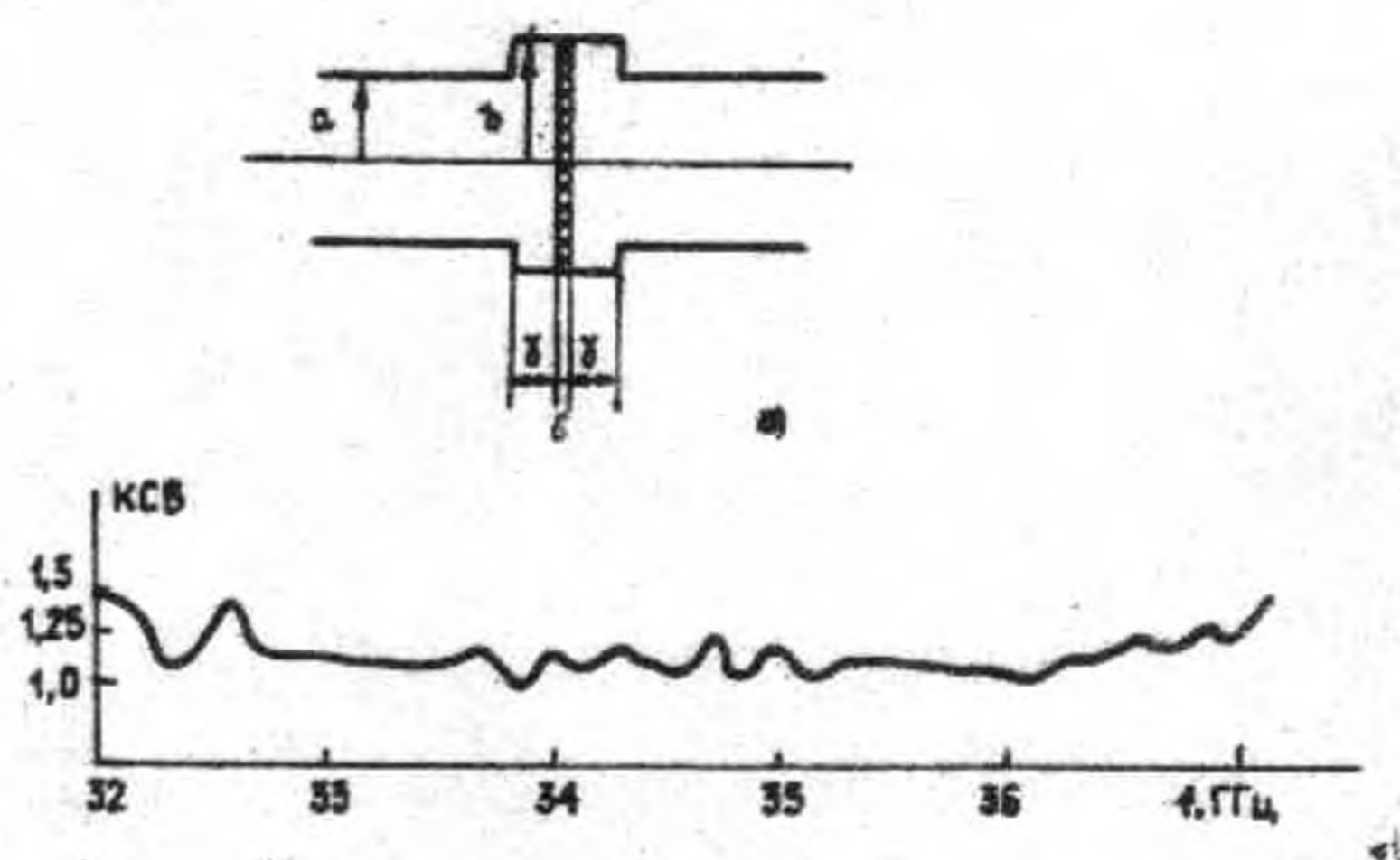


Рис.1. Сапфировое окно для гиротрона.
 а) разрез и внешний вид окна $a/b = 0,88$, $b = 12,5$ мм,
 $\delta = 1,42$ мм, $l = 4,1$ мм.

Описанная конструкция окна была использована в гиротроне. В 1983 - 1984 гг. получены следующие результаты: частоты $f = 36,7$ ГГц, мода H_{02} , номер гармоники $N = 2$, ускоряющее напряжение $U = 39$ кВ, ток пучка $I = 12$ А, выходная мощность $P = 31$ кВт, длительность импульса СВЧ $\tau = 20$ мс; $f = 36,45$ ГГц, мода H_{02} , $N = 2$, $U = 40$ кВ, $I = 10,4$ А, $P = 52$ кВт, $\tau = 20$ мс; $f = 20,2$ ГГц, мода H_{01} , $N = 1$, $U = 53$ кВ, $P = 80$ кВт, $\tau = 20$ мс. В августе 1983 г. этот гиротрон с сапфировым окном (мода H_{02} , $N = 2$, $P = 30$ кВт, $\tau = 20$ мс) был использован для нагрева плазмы в магнитной ловушке. Энергия электронов, измеренная по рентгеновскому излучению, составила 20 - 30 кэВ.

Автор выражает благодарность С.И. Молоковскому, М.И. Петелину, Пэн Цзюнь и Лу Инхуан за помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Design Handbook of Klystron. - Beijing: Defence Industry Press, 1979. P. 165.
2. Domingos K., Anderson R. An evaluation of Silicon on Sapphire Technology. - Washington, 1976. P. 14.

3. Liu Liubao. Brazing of Vacuum Devices and Metal Ceramic Sealing. - Beijing: Defence Industry Press, 1978. P. 8.
4. Shi Shaoming//J.Electronics. 1982. V. 4. N 6. P. 393.
5. Wahlstron E.E. Optical Crystallography. - New York: John and Son, 1979. P. 86.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук Китайской народной
республики

Поступила в редакцию
9 апреля 1991 г.

УДК 621.396.8

ВЛИЯНИЕ УГЛА РАССОГЛАСОВАНИЯ НА ФЛУКТУАЦИИ ЧАСТОТЫ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

О. Л. Сироткин

Исследованию источников и механизмов возникновения шумов в приборах М-типа посвящено достаточно большое число работ [1 - 5]. Значительно меньше уделено внимания практическим способам уменьшения их интенсивности [6]. В данном сообщении рассматривается влияние фазового рассогласования между наведенным током и напряжением на резонаторе на квазистатические флуктуации частоты, обусловленные случайным характером активной составляющей электронной проводимости пространства взаимодействия. Исследование проводится на основе эквивалентной схемы магнетрона [3, 7, 8] с учетом третьей гармоники напряжения на контуре.

Ограничиваясь рассмотрением возбуждения только одного вида колебаний, можно записать, как известно [7], следующее уравнение движения осциллятора:

$$\frac{d^2 u(t)}{dt^2} + u(t) = -Q_H^{-1} \frac{d}{dt} u(t) + Y_{ок}^{-1} \frac{d}{dt} i_H(t). \quad (1)$$

Здесь $u(t)$ - колебательное напряжение, развиваемое на волновом сопротивлении контура, $i_H(t)$ - наведенный ток, связанный главным образом с тангенциальным перемещением пространственного заряда, $Y_{ок}$ - волновая проводимость колебательной системы, Q_H - нагруженная добротность.

Зависимость $i_H = f(u)$, согласно [3, 8], задается неполным кубическим полиномом: $i_H = -g(1 - \beta_1 u^2)u$, где $\beta_1 = 1/3 \cdot E_s^{-2}$, E_s -

напряжение насыщения аппроксимированной характеристики тангенциальной составляющей наведенного тока, g - активная составляющая электронной проводимости пространства взаимодействия. Электронное смещение частоты магнетрона, следуя [7], учитывается запаздыванием наведенного тока от напряжения на резонаторе на некоторое безразмерное время τ . В случае медленных флуктуаций величины $g(t)$ имеем

$$i_H(t) = -g(t)[u(t - \tau) - \beta_1 u^3(t - \tau)]. \quad (2)$$

Решение уравнения (1), после подстановки в него соотношения (2), ищется методом разделения частот [9], что приводит во втором приближении к следующим укороченным уравнениям для фазы Φ и амплитуды a первой гармоники $u_1(t) = a(t)\cos\varphi(t) = a(t)\cos(t + \Phi(t))$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Phi(t) = & [0,5Y_{\text{ок}}^{-1}g(t) - 0,375Y_{\text{ок}}^{-1}\beta_1g(t)a^2(t)]\sin t + \\ & + \frac{9}{256} Y_{\text{ок}}^{-2}\beta_1^2g^2(t)a^4(t)\cos 4t; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} a(t) = & - [0,5Y_{\text{ок}}^{-1}g(t)a(t) - 0,375Y_{\text{ок}}^{-1}\beta_1g(t)a^3(t)]\cos t - \\ & - 0,5Q_H^{-1}a(t) + \frac{9}{256} Y_{\text{ок}}^{-2}\beta_1^2g^2(t)a^5(t)\sin 4t. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае квазистатической модуляции $g(t)$ и $a(t)$ из (4) находим

$$[0,5Y_{\text{ок}}^{-1}g - 0,375Y_{\text{ок}}^{-1}\beta_1ga^2]\cos t = -0,5Q_H^{-1} + \frac{9}{256} Y_{\text{ок}}^{-2}\beta_1^2g^2a^4\sin 4t$$

и для мгновенной частоты $\omega = \frac{d}{dt}\varphi(t) = 1 + \frac{d}{dt}\Phi(t)$, согласно (3), получаем

$$\omega = 1 - 0,5Q_H^{-1}\text{tg}t + \frac{9}{256} Y_{\text{ок}}^{-2}\beta_1^2g^2a^4(\sin 4t \text{tg}t + \cos 4t). \quad (5)$$

Очевидно, сдвиг по фазе между первой гармоникой тангенциальной составляющей наведенного тока и напряжением u связан с запаздыванием τ следующим образом: $\tau = \pi - \theta_3$, где θ_3 - угол рассогласования. Следовательно

$$\omega = 1 + 0,5Q_H^{-1}\text{tg}\theta_3 + \frac{9}{256} Y_{\text{ок}}^{-2}\beta_1^2g^2a^4(\sin 4\theta_3 \text{tg}\theta_3 + \cos 4\theta_3). \quad (6)$$