

迴旋自谐振脉塞的Bragg腔设计分析

彭光华 张世昌

(中国科学院电子学研究所,北京 100080)

摘要 迴旋自谐振脉塞是一种工作在毫米、亚毫米波段、兆瓦级以上功率的相干辐射器。本文叙述了迴旋自谐振脉塞的基本原理,着重给出谐振系统——Bragg腔的分析设计方法和计算结果。从皱纹波导理论出发,根据它的分布反射特性,推导出一个相关参数 S 。利用 S 参数结合实例可以较为简捷地设计、选择 Bragg 腔的工作模式。

关键词 迴旋自谐振脉塞; Bragg 腔; 耦合波; 分布反射

一、迴旋自谐振脉塞的工作原理和 Bragg 腔

毫米、亚毫米高功率微波对雷达、通信、RF 加速器、等离子体加热等方面的发展有重要的意义。但是,因为波长短,高频系统横向尺寸有限,功率容量的障碍参数 $A = P_{cw}/\lambda^2$ 不可能很大,包括迴旋脉塞在内的许多功率源受到限制。迴旋自谐振脉塞(CARM)近年来受到人们重视,虽然它的工作原理与迴旋脉塞(Gyrotrotron)同属负质量型不稳定机制,但在色散图(见图1)上它们工作在不同工作点,迴旋脉塞工作在B点——绝对不稳定性,迴旋自谐振脉塞工作在A点——对流不稳定性。虚线是光速线,说明A点的相速几乎接近光速。按CARM的快波同步相互作用设计的电磁系统,以 $v_p \approx c$ 传输(v_p ——为电磁波相速度)是实现迴旋自谐振的关键所在。

在A点满足图1 $\omega - K_{||}$ 曲线

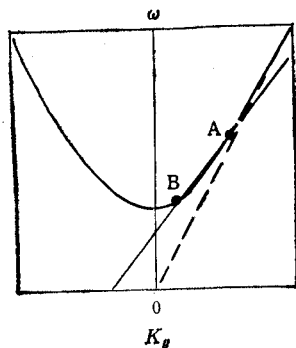


图1 $\omega - K_{||}$ 曲线

A——CARM 工作点 B——迴旋脉塞工作点

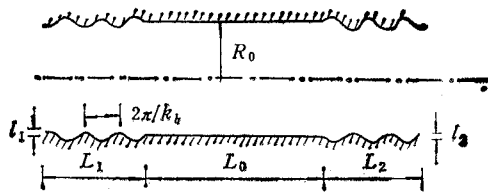


图2 Bragg 腔结构示意图

1992.05.15 收到,1993.01.08 定稿

彭光华 男,1967年生,硕士研究生,现从事电子物理的研究工作。

张世昌 男,1939年生,付研究员,现从事微波和电真空技术的研究工作。

$$\omega = \Omega_0/\gamma + K_{\parallel}V_{\parallel} \quad (1)$$

式中右边第一项是电子迴旋频率,第二项是多普勒上频移。在互作用过程中 γ (相对论因子)变化,必然引出 $\Delta\Omega_0/\gamma$ 和 $\Delta K_{\parallel}V_{\parallel}$ 变化。合成这两种变化并设一个参数 μ 叫同步参数,表示为

$$\mu = -\gamma \frac{d}{d\gamma} \frac{\omega - \Omega_0/\gamma - K_{\parallel}V_{\parallel}}{\omega} \Big|_{\gamma=\gamma_0} \quad (2)$$

当 $\beta_{ph} = V_{ph}/c \approx 1$ 时, $\mu = 0$ 就满足了同步条件,也就是随着 γ 的变化, $\Delta\Omega_0/\gamma$ 和 $K_{\parallel}\Delta V_{\parallel}$ 两者变化应满足一个相关关系,即(2)式近似等于零,则使两个变化相互弥补,这样不论互作用过程中 γ 变化如何,电子与波始终同步。

CARM 的主要设计之一是 Bragg 谐振腔设计,它与迴旋脉塞不同点是:(1) $K_{\parallel} \neq 0$,使得 $V_{ph} \approx c$ 。(2)腔体两端的反射不是依靠腔体直径的收缩形成集中反射,而是用扰动边界的皱纹波导调节扰动的深度和周期形成入射波与反射波的最大耦合形成谐振。结构如图 2 所示。

R. B. McCowan 等人^[1,2],在研制 Bragg 腔时他们的设计中是依靠皱纹波导的耦合系数 G 这条路线来设计的,这种方法的优点是:物理意义近似于耦合波导,比较明确。但是也有不足之处,耦合系数 G 以频率作自变量,而 CARM 是宽频带,频率变化范围很宽,有几十吉赫,因此同一模式的耦合系数随频率变化的计算量非常大。这尚不包括其他一些参变量如扰动深度、长度等的变化,这给模式选择带来一定的困难。在我们的方法中,选择工作模式时更关心的是腔两端皱纹波导中能有多大的反射率,才能在腔中形成稳定的谐振和起振。因此反射系数才是进一步需要考虑的因素。从这一思路出发,导出了一个选择工作模式反映分布反射的参数 S 。用它综合了耦合系数、皱纹波导长度和扰动深度等关系。用模式的宗量值取代频率,减少对频率的敏感程度,并在物理意义上作进一步的解释。本文还结合设计过程说明它的可靠性和可行性

二、参数 S 的导出

若假设皱纹波导壁的变化是弱正弦变化,即

$$l = l_0 \cos(k_b z + \varphi_0), \quad l_0 \ll R_0 \quad (3)$$

其中 l_0 是皱纹波导的扰动深度, $2\pi/k_b$ 是皱纹波导的扰动周期, φ_0 是皱纹波导的扰动初相位, R_0 是皱纹波导的平均半径。

在 Bragg 条件下, $2k_{\parallel} \approx k_b$, 入射波和反射波振幅随 z 轴缓慢变化的部分满足方程^[1,3]

$$\left. \begin{aligned} df^+/dz + i\Delta f^+ &= -iGf^- \\ df^-/dz - i\Delta f^- &= iGf^+ \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $\Delta = (2k_{\parallel} - k_b)/2$ 是 Bragg 腔的失谐率, $k_{\parallel} = [(\omega/c)^2 - (x'_{mn}/R_0)^2]^{1/2}$, G 是耦合系数。

TE 模

$$G = \frac{l_0}{2} \frac{x'_{m_n} - m^2 R_0^3 (\omega^2/c^2 + k_H^2)}{k_H R_0^3 (x'_{m_n} - m^2)} \quad (5)$$

TM 模

$$G = \frac{l_0 (\omega^2/c^2 + k_H^2)}{2k_H R_0} \quad (6)$$

式中 x'_{m_n} 为第一类第 m 阶 Bessel 函数导数的第 n 个根, m 为角向指数, ω 为角频率.

在满足边界条件 $f^+(0) = 1, f^-(L) = 0$ 时, 反射系数等于

$$R(\Delta) = |f^-(0)|^2 = |-iG \sinh \gamma L / (i\Delta \sinh \gamma L + \gamma \cosh \gamma L)|^2 \quad (7)$$

其中 $\gamma^2 = G^2 - \Delta^2$. (7) 式是 $|G| > |\Delta|$ 条件下的指数解, L 是皱纹波导的长.

在中心频率点 ($\Delta = 0$), $\gamma = G$, (7) 式可以写成

$$R = \tanh^2(GL) \quad (8)$$

由 (5), (6) 和 (8) 式可以看出, 反射系数 R 与频率、皱纹波导的长度和扰动深度以及工作模式等有关. 为了更加方便地表明以上各个参量之间的关系, 我们引入两个参数 p 和 q , 使得它们满足以下关系

$$l_0 = pR_0, \quad (p \ll 1), \quad L = qd$$

其中 $d = 2\pi/k_H$ 是皱纹波导的扰动周期. 这样, (8) 式可以写为

$$R = \tanh^2[pqR_0d(G/l_0)] \quad (9)$$

再令

$$S = R_0d(G/l_0) \quad (10)$$

则 (9) 式可写成

$$R = \tanh^2(pqS) \quad (11)$$

将 (5), (6) 式和色散关系 $k_H^2 = (\omega/c)^2 - (x'_{m_n}/R_0)^2$ 代入 (10) 式可得 S 的表达式为

TE 模

$$S = \frac{\pi}{2} \left(\beta_{ph}^2 - \frac{x'_{m_n} + m^2}{x'_{m_n} - m^2} \right) \quad (12)$$

TM 模

$$S = \pi(\beta_{ph}^2 + 1)/2 \quad (13)$$

式中 $\beta_{ph} = \omega/k_H c$

由 (11), (12) 和 (13) 式可见, 反射系数 R 与上面提到的各个参量之间的关系, 通过引入中间参量 S 后, 被更简明地表示出来了.

(11) 式中, p 和 q 分别是皱纹波导的扰动深度和长度有关的量. $pq = 1$ 时, $R = \tanh^2 S$, 由此可见, S 反映了在皱纹波导中的一个

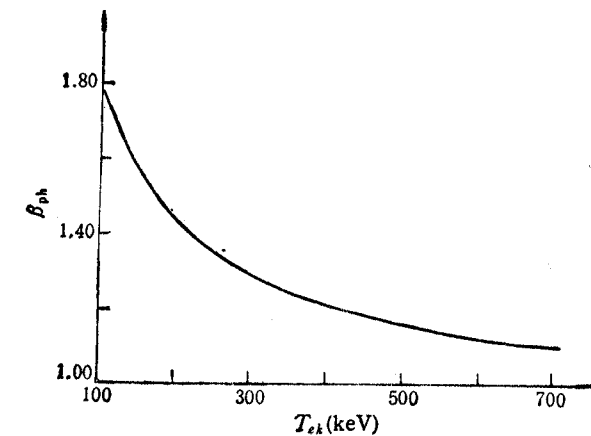


图3 $|\beta_{ph}^2 - 1| = \gamma^2$ 的 $\beta_{ph} - T_e k$ 曲线

有效单位纵截面上不同模式的电磁波被反射的程度, 这就是参量 S 的物理意义. 对于 TE 模, S 只与工作模式和相速度有关; 对于 TM 模, S 仅与相速度有关, 而与工作模式

无关。

由于在 CARM 中,需满足条件^[3]

$$\mu = |\beta_{ph}^2 - 1| \ll \gamma_0^{-2} \quad (14)$$

其中 γ_0 为电子在初始状态的相对论因子。

图 3 给出了(14)式取等号时 β_{ph} 与电子的动能 $T_{e,k}$ 之间的关系曲线。一般在 CARM 中,电子的动能高达 500keV 以上。这样满足(14)式的电子相速度允许变化的范围是非常小的,一般不超过 10%。因此同一模式的变化范围也相应地非常小,不超过 20%。而(5),(6)式中 G 值的变化有时是非常大的,甚至随频率会相差几个数量级。由此可见(11)式将 R 与 S 联系起来,便于直接满足条件(14)式,而且 S 值对同一模式有相对的稳定性。

三、参量 S 在选择工作模式时的应用

表 1 列出了几种常见模式的 $|S|$ 值,考虑到满足条件(14)式,取 $\beta_{ph} = 1.10$ 。

表 1 几种常见的 TE 模的 $|S|$ 值 ($\beta_{ph} = 1.10$)

模式	TE ₀₁	TE ₁₁	TE ₂₁	TE ₃₁	TE ₄₁	TE ₅₁	TE ₆₁
$ S $	0.33	0.99	2.04	2.94	3.65	4.40	5.26
模式	TE ₀₂	TE ₁₂	TE ₂₂	TE ₃₂	TE ₀₃	TE ₁₃	TE ₂₃
$ S $	0.33	0.22	0.02	0.18	0.33	0.29	0.20

几种常见的 TE 模的 $R-pq$ 关系的计算结果如图 4 所示,同样取 $\beta_{ph} = 1.10$ 。由图 4 可见,可以把 TE 模按 $|S|$ 值的大小分为 3 种情况:

(1) $|S| > 1$ 。如 TE _{m_1} ($m \geq 2$) 等模式。当反射系数 R 高达 99% 以上时, $pq < 2$ 。这说明皱纹波导的扰动深度可以做得较浅,扰动周期数可较少,从而提高主要竞争模式——迴旋模式的起振门槛电流。上述这些 TE _{m_1} 模式都适合于选作 Bragg 腔的工作模式。

(2) $|S| \approx 1$, 如 TE₁₁ 模等。当反射系数 R 达 98%~99% 时, $pq \approx 3$, 这些模式也可选作 Bragg

腔的工作模式,只是所受限制较(1)中的模式要多。例如皱纹波导的扰动深度不能做得很浅,否则势必要增加皱纹波导的长度。但这种模式也有其优点,因径向指数和角向指数

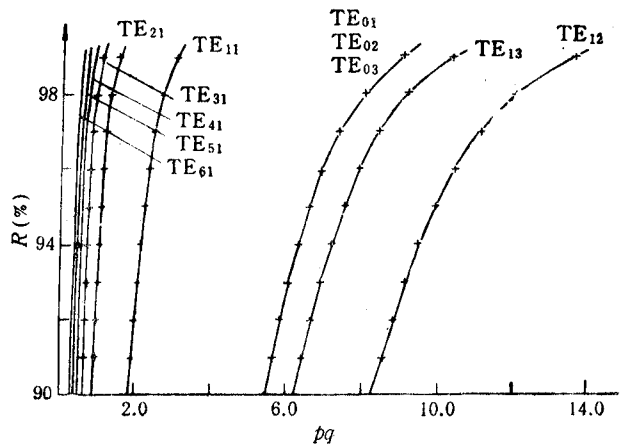


图 4 几种常见的 TE 模的 $R-pq$ 曲线

都小,竞争模式也可以较少。

(3) $|S| < 1$, 如 $TE_{0n}(n \geq 1)$ 等模式。这些模式要做到高反射系数非常困难,必须使得皱纹波导的扰动深度很深,皱纹波导做得很长。这样 Bragg 腔的带宽就非常窄,不易起振,而且极有可能引起迴旋模式(绝对不稳定模)的竞争。

我们在设计 Bragg 腔的过程中,根据实验条件等选择了 TE_{11} 模作为工作模式,其工作的中心频率为 35GHz。

表 2 给出了我们设计的 Bragg 腔与 R. B. McCowan 等人设计的 Bragg 腔有关参数的比较,后者选择 TE_{61} 模为工作模式,中心频率为 100GHz

表 2 两种 Bragg 腔的设计参数比较(表中符号参见图 1)

模式	$f(\text{GHz})$	β_{ph}	$ S $	$R_0(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	$l_1(\text{mm})$	p_1	$L_1(\text{mm})$	q_1
TE_{61}	100	1.12*	5.19	7.95	1.68	0.31	0.039	15	9
TE_{11}	35	1.08	1.05	6.65	4.63	0.64	0.096	83.3	18

模式	$p_1 q_1$	$R_1(\%)$	$l_2(\text{mm})$	p_2	$L_2(\text{mm})$	q_2	$p_2 q_2$	$R_2(\%)$	$T_{e,t}(\text{keV})$
TE_{61}	0.35	90	0.25	0.031	30	18	0.57	99	600
TE_{11}	1.73	90	0.55	0.083	138.9	30	2.48	98	600

* 原文中 $v_{ph} = 1.17c$ 是实验值,而非理论计算值。

四、讨 论

在应用参量 S 选择工作模式时,是从相速 β_{ph} 出发,计算出 $|S|$,并由此计算出其他的设计参数。从 Bragg 腔的效率、带宽、 Q 值和模式的起振门槛电流等来判断设计的合理性,反过来对参数进行修正。

由(13)式可知,对于所有 TM 模, $|S| > 1$ 。这一方面说明所有 TM 模都可考虑选作 Bragg 腔的工作模式,另一方面又说明在选定 TE 模作为工作模式时, TM 模有可能成为回旋自谐振的主要竞争模式。

参 考 文 献

- [1] K. V. McCowan et al., *Int. J. Electron.*, 65(1988)3, 463—475.
- [2] R. B. McCowan et al., *IEEE Trans. on ED*, ED-36(1989)9, 1968—1974.
- [3] V. I. Bratman, G. G. Denisov, N. S. Ginzburg, M. I. Petelin, *IEEE, J. of QE*, QE-19(1983)3, 282—296.

DESIGN OF BRAGG CAVITY IN CYCLOTRON AUTORESONANCE MASER

Peng Guanghua Zhang Shichang

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract The cyclotron autoresonance maser (CARM) has been developed which is a high power device operating at short wavelength. In this paper, the basic principle of CARM is described, and the design method and numerical calculation results for Bragg cavity are shown. Based on the distributed reflection performance of the corrugated waveguide, an important parameters S is found with application of coupled-wave theory. S parameter is used simply to design a Bragg cavity and to select one of the operation modes. Finally some discussions are made.

Key words Cyclotron autoresonance maser; Bragg cavity; Coupled-wave; Distributed reflection