

# 关于改型斜旋转轴对称准光腔 自由电子微波激射器的一个注记\*

刘濮鲲

(北京大学技术物理系、重离子物理研究所, 北京 100871)

杨中海 刘盛纲

(电子科技大学高能电子学研究所, 成都 610054)

**摘 要** 对作者先前在改型斜旋转轴对称准光腔(MAQCOR)自由电子微波激射器方面的工作作一补充, 说明改型斜旋转轴对称准光腔回旋微波激射器还有一个重要的优点, 即可以通过适当选择旋转角把电子注热发散对注-波互作用的不利影响降至最小。

**关键词** 新型准光腔, 自由电子微波激射器, 热发散。

## 1 引 言

人类在开拓电磁波谱的过程中, 从极低频到微波波段发展了从集中参数谐振器到分布参数的封闭式谐振腔。三十多年前, 为实现可见光的量子放大, Townes 和 Schawlow 又提出利用平面镜的法布里-珀罗干涉仪作为光频谐振腔来解决光波选模问题, 并取得很大成功。随后, 对各种类型的光学谐振腔在理论和实验上都作了大量研究工作。近年来, 为开拓从毫米波至远红外波段, 人们发展了一类高 Q 值开放式谐振腔, 包括波导型开放式谐振腔及准光学开放式谐振腔。其中, 准光学谐振腔因其谐振谱线的密度不随频率的提高而增加且在极高频率上可以得到足够高的品质因素而特别受到各国学者的重视。

准光腔与电子回旋微波激射器不稳定性相结合的准光电子回旋微波激射器是美国学者 Sprangle 等人<sup>[1]</sup>于 1980 年首先提出的, 现已成为实现兆瓦级高功率、高效率的毫米波、亚毫米波回旋管的重要研究方向。1984 年, 杨中海和刘盛纲教授提出的一种新型准光腔—斜旋转轴对称准光腔(AQCOR)以及斜旋转轴对称准光腔电子回旋微波激射器<sup>[2]</sup>以其独特的优点受到人们的重视<sup>[3~5]</sup>。不久前, 本文作者将斜旋转轴对称准光腔推广到任意旋转角的一般情况(AQCORAA), 进而又将二维法布里-珀罗腔轴与旋转轴的交点改在靠近出口处, 提出了改型斜旋转轴对称准光腔(MAQCOR), 并对采用任意角斜旋转轴对称准光腔和改型斜旋转轴对称准光腔的新型自由电子准光腔微波激射器进行了详细的研究, 获得了一系列重要的结

\* 国家自然科学基金与高等学校博士学科点专项科研基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 5 月 14 日; 收到修改稿日期: 1996 年 9 月 3 日

果<sup>[6~12]</sup>。尽管在作者已发表的论文中,对改型斜旋转轴对称准光腔自由电子微波激射器的特点已阐述得非常详尽,但还是漏掉了它的一个重要特点。本文将就此进行阐释,作为对前段时间在改型斜旋转轴对称准光腔自由电子微波激射器方面工作的一点补充和注记。

## 2 改型斜旋转轴对称准光腔的旋转角对抑制电子束热发散的作用

改型斜旋转轴对称准光腔的结构如图 1 所示。相互作用腔是由一对相交于 O 点的二维布里-珀罗腔以任意角度  $\xi$  绕 Z 轴旋转一周得到。在改型斜旋转轴对称准光腔微波激射器中,注-波相互作用的谐振换能条件为

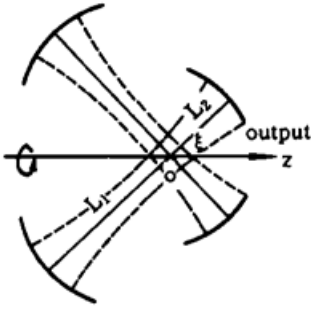


Fig. 1 Scheme of MAQCOR

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - n\omega \sim 0, \quad (1)$$

式中  $k_{\parallel} = k \cos \xi$ ,  $\omega = \omega_0/\gamma = eB_0/\gamma m_0$  为电子的相对论性回旋频率,  $\omega$  和  $k$  分别是波的圆频率和波数,  $n$  为回旋谐波数。若定义失谐参数  $\delta = \omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - n\omega$ , 则有

$$\delta = \omega - kv_{\parallel} \cos \xi - n\omega_0/\gamma. \quad (2)$$

上式通过相对论因子  $\gamma$  表示了失谐参数  $\delta$  与电子注能量之间的关系,正是这种关系在线性情况下引起了相位群聚和辐射放大。由(2)式可知,由于电子注分布中的初始速度发散  $\delta\beta_{\parallel}$  及  $\delta\beta_{\perp}$  (这里  $\beta = v/c$ ), 将导致失谐参数  $\delta$  的发散

$$\Delta\delta = \left[ \left( \frac{\partial \delta}{\partial \beta_{\parallel}} \right)^2 \Delta\beta_{\parallel}^2 + \left( \frac{\partial \delta}{\partial \beta_{\perp}} \right)^2 \Delta\beta_{\perp}^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

注意到  $\partial\gamma/\partial\beta = \gamma^3\beta_0$ , 便得

$$\Delta\delta = [(kc \cos \zeta - \gamma n\omega_0\beta_{\parallel 0})^2 \Delta\beta_{\parallel}^2 + (\gamma n\omega_0\beta_{\perp 0})^2 \Delta\beta_{\perp}^2]^{1/2}. \quad (4)$$

由上式不难看出,当  $kc \cos \zeta = \gamma n\omega_0\beta_{\parallel 0}$ , 即

$$\xi = \arccos(\gamma n\omega_0\beta_{\parallel 0}/kc) \quad (5)$$

时,对任何电子注热发散都将使得失谐参数  $\delta$  的初始发散最小

$$(\Delta\delta)_{\min} = \gamma n\omega_0\beta_{\perp 0}\Delta\beta_{\perp} \quad (6)$$

由于电子动量的初始离散引起了不同粒子之间失谐参数  $\delta$  的发散,从而加速了相空间中的相位混合过程,抑制了非线性相位群聚过程,并导致注-波相互作用效率的降低。因此,要求在相互作用长度  $L$  内各粒子之间应有小的相位混合,即  $(\Delta\delta)_{\min}L/c\beta_{\parallel} \ll \pi$ 。由(6)式可得

$$(\gamma n\omega_0\alpha L/c)\Delta\beta_{\perp} \ll \pi, \quad (7)$$

式中  $\alpha = \beta_{\perp 0}/\beta_{\parallel 0}$  为速度螺旋比。上式可写成电子注的相对能量离散  $\Delta\gamma/\gamma$  及相对速度螺旋比离散  $\Delta\alpha/\alpha$  的形式。注意到

$$\beta_{\perp}^2 = (1 - \gamma^{-2})/(1 + \alpha^{-2}), \quad (8)$$

(7)式便可写作

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{1}{\gamma_0^2\beta_{\parallel 0}^2} \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \ll \frac{1}{2n_c n \gamma_0^2 \beta_0^2 \beta_{\parallel 0}^2}, \quad (9)$$

式中  $n_c = \omega_0 L / 2\pi\gamma_0 c\beta_{\parallel 0}$  为在相互作用长度内电子的近似回旋次数。如果上述关系能够满足,则电子注在能量和速度螺旋比方面的有限离散将对相互作用有较小的影响。在强相对论情形,(9)式说明电子注的速度螺旋比离散比能量离散对相互作用的不利影响更大。由上式还可以看出,随着谐波数  $n$  的增加,对电子注热发散的要求变得更加严格。

必须指出的是, 只有在小信号情况下, 失谐参数  $\Delta\delta$  的发散才是导致相位混合的主要源泉。在非线性工作状况下, 电子被波势捕获, 并在相空间中以与常规回旋管中类似的方式进行同步振荡。这时, 各粒子之间的相位混合由影响捕获粒子同步周期的各参数决定, 效率的下降除失谐参数的发散外还包含了其它多种因素。

**结束语** 以上讨论说明了改型斜旋转轴对称准光腔回旋微波激射器可以通过适当选择旋转角把电子注热发散对注-波互作用的不利影响降至最小。这再次说明本文作者把斜旋转轴对称准光腔推广到任意旋转角的情况是具有重要意义的。采用改型斜旋转轴对称准光腔电子回旋微波激射器的优点可归结如下: 1) 改型斜旋转轴对称准光腔腔体的轴对称结构能很好地与环形电子注相配合, 适合于使用由磁控注入枪(MIG)产生的电子注, 且电子注的利用率高; 2) 除了旋转角非常小的情形, 电子注的传输不要求在镜面上开孔, 不会破坏腔体镜面的完整性; 3) 相互作用空间较大, 器件具有大的功率容量; 4) 功率输出结构简单, 整管结构紧凑; 5) 由于腔体场的结构复杂, 且腔体的壁损耗小, 因此有利于工作在高次谐波; 6) 在适当的参数下, 改型斜旋转轴对称准光腔微波激射器可工作在电子回旋谐振微波激射器(ECRM)或回旋自谐振微波激射器(CARM)状况; 7) 可以通过适当选择旋转角把电子注热发散对注-波互作用的不利影响降至最小; 8) 改型斜旋转轴对称准光腔中的场分布呈高斯型, 且在靠近出口处最大, 这使得改型斜旋转轴对称准光腔微波激射器能获得较高的相互作用效率。由此可见, 作者提出并研究的强相对论自由电子准光腔微波激射器的新方案有很大的应用潜力, 在发展高功率、高效率、短波长的相干辐射源方面具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] Sprangle P, Vomvoridis J, Manheimer W. M., Theory of the quasi-optical electron cyclotron maser. *Phys. Rev. A*, 1981, **23**(6): 3127~ 3138
- [2] Yang Zhonghai, Liu Shenggang, Gyrotron with quasioptical cavity of special configuration. *Int. J. Electron.*, 1984, **57**(6): 1003~ 1017
- [3] 陈增圭, 电子回旋脉塞研究的回顾与展望. 电子科学学刊, 1989, **11**(1): 58~ 67
- [4] Fliflet A. W., Hargreaves T. A., Manheimer W. M. *et al.*, Operating characteristic of a continuous-wave-relevant quasi-optical gyrotron with variable-separation. *Phys. Fluids (B)*, 1990, **2**(5): 1046~ 1056
- [5] Fliflet A. W., Hargreaves T. A., Manheimer W. M. *et al.*, Initial operation of a high-power quasi-optical gyrotron. *IEEE Trans. Plasma Science*, 1990, **18**(3): 306~ 312
- [6] Yang Zhonghai, Proposal for a novel high-power quasi-optical CARM oscillator. *Dig 16th Int. Conf. IR&MM Waves*, 1991, *Lausanne, Switzerland*: 419~ 420
- [7] Liu Pukun, Yang Zhonghai, Tang Changjian, Kinetic theory of a novel CARM oscillator with axisymmetrical quasi-optical cavity of oblique rotation at arbitrary angle. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1993, **14**(11): 2277~ 2287
- [8] Liu Pukun, Zhang Chunyu, Tang Changjian *et al.*, Novel open-resonator for a quasi-optical gyrotron. *Int. J. Electron.*, 1995, **78**(4): 759~ 770
- [9] 刘濮鲲, 杨中海, 钱尚介等, 一种新型强相对论自由电子准光脉塞的动力学理论. 中国科学(A 辑), 1995, **25**(11): 1191~ 1202
- [10] Liu Pukun, Yang Zhonghai, Qian Shangjie *et al.*, Kinetic theory of high-relativistic electron cyclotron maser with a novel quasi-optical cavity. *IEEE Trans. Plasma Science*, 1995, **23**(2): 156~ 162
- [11] 刘濮鲲, 杨中海, 钱尚介等, 新型强相对论准光电子回旋脉塞中的空间电荷效应. 中国科学技术协会

第二届青年学术年会论文集(基础科学分册),北京,中国科学技术出版社,1995,197~202

- [12] Liu Pukun, Yang Zhonghai, Liu Shenggang *et al.*, Two mechanisms in a relativistic electron cyclotron maser with a special quasioptical cavity. *Chin. Phys. Lett.*, 1995, **12**(10): 597~600

## Addendum to the Study of Free Electron Maser with Modified Axisymmetrical Quasioptical Cavity of Oblique Rotation

Liu Pukun

(*Institute of Heavy Ion Physics, Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Yang Zhonghai      Liu Shenggang

(*Institute of High Energy Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054*)

(Received 14 May 1996; revised 3 September 1996)

**Abstract** The authors previous work on free electron maser with modified axisymmetrical quasioptical cavity of oblique rotation (MAQCOR) is supplemented. The present result shows that the electron cyclotron maser with MAQCOR has an additional advantage, that is the deleterious effect of electron beam thermal spread on beam-wave interaction can be minimized by choosing the rotating angle appropriately.

**Key words** novel quasioptical cavity, free electron maser, thermal spread.

### 第三届薄膜物理及其应用国际会议在沪举行

由中国物理学会和上海物理学会联合主办得到国家自然科学基金委员会、国际理论物理中心等机构支持的第三届薄膜物理及其应用国际会议于1997年4月15日~17日在上海千鹤宾馆召开。

此次会议是继1991年召开的薄膜物理及其应用国际会议之后,每三年召开一次的第三届薄膜物理及其应用国际会议。来自阿尔及利亚、中国、法国、德国、印度尼西亚、意大利、日本、马来西亚、新西兰、葡萄牙、瑞士、英国、美国和香港等14个国家和地区的100余位专家学者参加了会议。

开幕式由组织委员会主席王永令研究员主持。国际顾问委员会主席谢希德院士亲莅会场致开幕词。在开幕式上致词的还有美国辛辛那提大学Buchanan教授、德国西门子的Wersing教授和上海物理学会名誉理事长、复旦大学周世勋教授。大会还宣读了中国物理学会秘书长杨国桢研究员代表中国物理学会致会议的书面贺词。中国科学院院士沈学础研究员、瑞士Satis真空工业公司的Lobsigor博士和法国科学院的Flory教授分别作了题为“半导体的单量子结构光谱”、“有机透镜眼镜镀膜的新进展”和“用作主、被动元件的介质膜的离子注入”的大会报告。

大会共选用了24篇邀请报告、78篇宣讲论文和42篇张贴论文。它们的议题涉及领域包括薄膜的结构、机理、研制,各类膜的电学、光学、磁学的线性与非线性性质及其性能测试、表面和界面特性以及薄膜的应用等。

从15日下午分三个会场进行报告讨论;16日晚上进行张贴文章的交流。16日下午,大会组织与会者游览市容,登上了亚洲最高的东方明珠电视塔,并参观了中、瑞合资上海明视镀膜公司和复旦大学表面物理国家实验室,引起了人们的极大兴趣。

会议期间S&T企业有限公司和美加科技公司还展览了两家公司的半导体生长工艺设备的产品样本,受到与会代表的关注。

会议于17日下午结束,与会代表希望这样的系列会议继续进行下去。

(黎风)