

# Weibel 型不稳定性增益机理的相位条件 和宽频带慢波迴旋放大器\*

郭和忠 陈增圭

(中国科学院电子学研究所)

## (一) 引言

电子迴旋脉塞 (Gyrottron) 作为一类新型的快波器件,可在毫米、亚毫米波段有效地产生高功率相干辐射,标志着微波电子学的一大突破。

Gyrottron 与普通微波管在作用机理上有很大的区别。它采用光滑波导或过模谐振腔作为高频结构,取代了传统的慢波电路或谐振腔。Gyrottron 为快波型器件,而微波管一般为慢波型器件。不久前,有人提出利用慢波相互作用的变态迴旋脉塞器件即 Weibel 型器件<sup>[1]</sup>。Gyrottron 快波型器件的作用机理来自迴旋脉塞不稳定性,而 Weibel 型慢波器件的作用机理则来自 Weibel 型不稳定性。这种新型慢波迴旋放大器的带宽可高达 70%,在电子对抗系统等方面有着广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

文献[1、2]提出利用 Weibel 型不稳定性研制慢波迴旋放大器的可能性。文献[3]则对迴旋脉塞不稳定性和 Weibel 型不稳定性及其相应的角向群聚和轴向群聚机理进行了详细的讨论和比较。目前这种变态 Gyrottron 器件正在研制之中。本文从相干迴旋辐射的观点出发,讨论并得出了建立 Weibel 不稳定性增益机理所需要的电子注和波场间的相位条件,并与迴旋脉塞不稳定性增益机理的相位条件进行了比较。还提出用  $TE$  模周期慢波结构作为慢波迴旋放大器 (SWCA) 的高频电路的可能性。

## (二) 物理机理和相位条件

Weibel 型器件和 Gyrottron 的工作机理都是相干迴旋辐射。这两类器件均以高横向能量的电子作工作媒介,这些电子以平行于外磁场  $B_0 \hat{z}$  方向的速度  $v_z$  和垂直于外磁场方向的速度  $v_\perp$  作螺旋轨迹运动。当满足一定的谐振条件和相位条件时,这些电子将成为相干辐射源,辐射的相干性与电子在三维相位空间的群聚有关。但这两类器件中的电子群聚机理是完全不同的。在 Gyrottron 中,电子群聚来自电子迴旋频率和能量的相对论效应,即由高频电场力  $eE_\sim$  所引起;而在 Weibel 器件中,电子群聚是由高频磁场力即洛伦兹力  $e(v_\perp \times B_\sim)$  造成的。

文献[4、5]中得出了迴旋脉塞不稳定性增益机理的相位条件。这里我们讨论并得出 Weibel 型不稳定性增益机理的相位条件。

可从图 1 和图 2 中的粒子运动规律出发,来分析 Weibel 型不稳定性的物理机理。图

\* 1980年12月10日收到。

1、图 2 表示与磁场  $B_0 \hat{e}_z$  方向垂直的平面上电子运动轨迹的投影。电子围绕外加轴向磁场  $B_0 \hat{e}_z$  旋转并沿着  $z$  方向漂移行进。令电子轴向速度为  $v_z$ ，电子横向速度为  $v_\perp$ ，高频场以  $\exp[-i(\omega t - kz)]$  形式而变化。

根据受激迴旋辐射的谐振条件，在任何参考系中的电子迴旋辐射的本征频率必须等于外场的频率。令在实验室参考系中，波场角频率为  $\omega$ ，电子迴旋辐射的本征角频率为  $\Omega_D$ ，则有

$$\Omega_D = \frac{\omega_{ce}}{r} (1 - v_z/v_p)^{-1} = \omega \quad (1)$$

即

$$\omega = \frac{\omega_{ce}}{r} + kv_z = \Omega_D$$

式中， $\omega_{ce} = \eta B_0 = \frac{|e|}{m_0} B_0$  为电子非相对论迴旋角频率， $r$  为相对论因子， $k$  为纵向(或轴向)波数， $v_p$  为波场的相速。

若选择以  $v_z$  速度沿着  $z$  方向行进的运动参考系，则在运动参考系中，电子迴旋辐射的本征角频率为  $\frac{\omega_{ce}}{r}$ ；而波场的角频率  $\omega_D$  可由洛伦兹变换得到，即

$$\omega_D = \omega(1 - v_z/v_p) = \omega - kv_z \quad (3)$$

则由谐振条件得

$$\omega_D = \omega - kv_z = \frac{\omega_{ce}}{r} \quad (4)$$

即

$$\omega = \frac{\omega_{ce}}{r} + kv_z \quad (5)$$

由于方程(5)和方程(2)完全相同，可见受激迴旋辐射的谐振条件与参考系的选择无关。

方程(2)中的  $\Omega_D$  亦称为电子在三维相位空间中的有效迴旋角频率。

设初始时刻  $t = 0$  时，8 个取样电子在迴旋轨道投影上均匀分布，与高频场的瞬时关系如图 1 所示。图中的实线圆表示  $x$ - $y$  平面上无扰动的电子迴旋轨道，波沿  $+z$  方向传播， $\mathbf{E}_\sim$  和  $\mathbf{B}_\sim$  为高频电场和低频磁场。

由方程(2)可得电子有效迴旋角频率  $\Omega_D$  的时间变化率为

$$\frac{d\Omega_D}{dt} = k \frac{dv_z}{dt} + \omega_{ce} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{r} \right) \approx \frac{kF_z}{r_0 m_0} - \frac{\omega_{ce}}{r_0^2} \frac{dr}{dt} \quad (6)$$

式中， $\mathbf{F}_z = -\frac{|e|\hbar}{C} (\mathbf{v}_\perp \times \mathbf{B}_\sim)$  为高频磁场力即洛伦兹力， $r_0$  为初始时刻 ( $t = 0$ ) 的相对论因子。

又粒子能量的时间变化率为

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d}{dt} (r m_0 C^2) = -|e|\hbar (\mathbf{v}_\perp \cdot \mathbf{E}_\sim) \quad (7)$$

由此可得

$$d\Omega_D = -\frac{|e|k^2}{m_0 r_0 \omega} (\mathbf{v}_\perp \cdot \mathbf{E}_\sim) dt + \frac{|e|\omega_{ce}}{m_0 r_0^2 C^2} (\mathbf{v}_\perp \cdot \mathbf{E}_\sim) dt \quad (8)$$

方程(8)表示迴旋轨道上的运动电子在外场扰动下经时间间隔  $dt$  后其有效迴旋角频率的变化. 方程(8)右边第一项表示电子轴向群聚机理,实际上表征了由于高频磁力的作用所造成的电子在三维空间的相位群聚效应. 图1中取样电子1—5, 2—4, 8—6的横向速度  $\mathbf{v}_\perp$  方向相反,因此经时间间隔  $dt$  后,将在  $\Omega_D$  的相位空间产生一定的群聚效应. 当  $\omega = \frac{\omega_{ce}}{r_0} + kv_z$  时,电子和波场发生谐振作用,因此在若干个高频周期后即产生明显的电子群聚,群聚中心在左半平面的  $x$  轴附近,如图2(a)所示. 为了使电子注和波场间有净能量交换,要求大多数电子处于高频减速场中,即波场对大多数电子所做的功为负值 ( $-|e|\mathbf{v}_\perp \cdot \mathbf{E}_\sim < 0$ ),此时电子注损耗能量而波场的幅度不断增长,从而建立了不稳定性的增益机理. 要达到这一点,就必须使电子的有效迴旋频率稍大于波场频率,即

$$\frac{\omega_{ce}}{r_0} + kv_z \gtrsim \omega \quad (9)$$

满足式(9)的条件时,所有的电子在  $2\pi/\omega$  周期内走过的空间角向坐标大于  $2\pi$ ,造成对场有一个超前的相位值. 这样,经过若干整数个场周期后电子将群聚在下半平面的高频减速场中,如图2(b)所示. 从而不断地把能量转换给场,建立起 Weibel 型电磁不稳定性.

由于这种群聚是由洛伦兹力的作用而使电子的轴向速度  $v_z$  发生变化,进而造成在  $\Omega_D$  相位空间中的群聚效应,通常称为轴向群聚. 轴向群聚即 Weibel 型不稳定性的基本机理. 这里要强调指出的是,要建立 Weibel 型不稳定性的增益机理,电子注和波场之间必须满足方程(12)的相位条件. 这就是本文分析得出的一个重要结论.

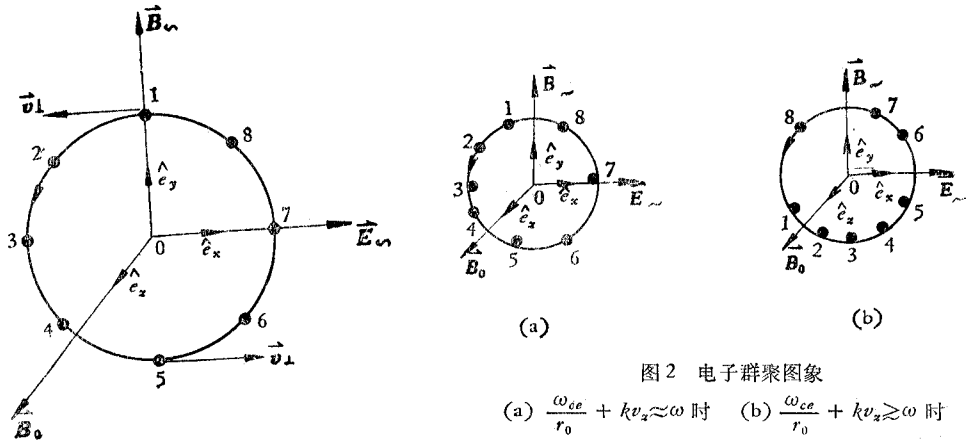


图1 取样电子在迴旋轨道投影上的初始分布  
Fig. 1 Initial distribution of sample electrons in the projection of an electron cyclotron orbit

图2 电子群聚图象  
Fig. 2 An electron bunching  
(a) for  $\left(\frac{\omega_{ce}}{r_0} + kv_z\right) \approx \omega$  (b) for  $\left(\frac{\omega_{ce}}{r_0} + kv_z\right) \gtrsim \omega$

方程(8)右边第二项表明了迴旋脉塞不稳定性的角向群聚机理,是由相对论因子的变化即  $dz$  所引起的,反映了电子迴旋频率与能量的相对论关系这一物理本质. 同上面类似的分析可以得出,要获得迴旋脉塞不稳定性的增益机理,电子注和波场之间必须满足的相

位条件是  $\omega \geq \frac{\omega_{ce}}{r_0} + kv_z$ , 即  $\omega \geq \frac{\omega_{ce}}{r_0}$  ( $\because$  在 Gyrotron 中通常  $k \rightarrow 0$ ), 表示电子注对场有一个滞后的相位值. 这一相位条件和许多文献指出的一致<sup>[4,5]</sup>. 由此可见, 在两种群聚机理及其相应的两类不同的电磁不稳定性中, 其增益机理所要求的电子注和波场间的相位条件恰好是相反的.

值得注意的是, 上述关于相位条件的讨论仅适合于前向波相互作用. 而反向波相互作用, 受激迴旋辐射的谐振条件变为

$$\omega = \frac{\omega_{ce}}{r_0} - kv_z \quad (10)$$

类似于前面的分析和讨论, 可得到反向波相互作用时的 Weibel 型不稳定性增益机理的相位条件为

$$\frac{\omega_{ce}}{r_0} - kv_z \geq \omega \quad (11)$$

### (三) 具有周期高频结构的慢波迴旋放大器

我们提出并初步分析用  $TE$  模周期高频结构作为慢波迴旋放大器的可能性. 这是一类新型的 SWCA, 不同于文献[2]提出的具有介质衬筒加载波导作为高频结构的 SWCA. 这类新型的 SWCA 主要由空心电子注和周期高频结构所组成. 整个高频相互作用区浸没

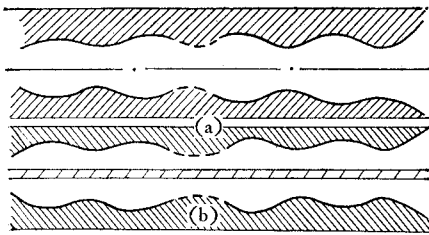


图 3 缓变截面开放腔链型周期慢波电路示意图

(a) 鼓形腔链结构 (b) 同轴腔链结构

Fig. 3 Schematic of a periodic slow-wave circuit with slow-varying section open resonant cavity chain

(a) A drum cavity structure

(b) A coaxial cavity structure

在一外加的轴向均匀磁场中. 我们设想用缓变截面开放式谐振腔链作为连续周期慢波电路, 如图 3 所示, (a) 为鼓形腔链结构, (b) 为同轴腔链结构. 这种周期慢波电路的色散特性可通过改变结构参数而加以调整. 当电子注的轴向速度在一个宽的频率范围内接近等于波场的群速时, 即可实现宽频带的相互作用.

需强调指出, 本文提出的开放腔链型的周期慢波电路和传统的微波管慢波电路是有区别的. 通常微波管中采用  $TH$  模(即  $E$  模)慢波电路, 而开放腔链结构属于  $TE$  模(即  $H$

模)慢波电路, 且其截面是缓慢变化的, 不存在突变的边界面.

与文献[2]提出的具有介质衬筒加载波导的 SWCA 相比, 这种新型的 SWCA 因无需介质填充而具有某些优点, 例如较高的功率容量和简单的工艺处理.

无论用哪种高频慢波电路, 研制慢波迴旋放大器时, 必须尽可能减小电子注的速度零散. 只有当电子注的轴向速度零散  $\Delta v_{z0}$  远远小于由高频洛伦兹力引起的电子轴向速度的调制幅度  $\Delta v_z$ , 即

$$\Delta v_{z0} \ll \Delta v_z \quad (12)$$

时, Weibel 型器件, 即 SWCA 才能有效地工作.

关于缓变截面开放式谐振腔链这类周期高频电路的详细分析将在其它文章中加以讨论。

#### (四) 结论

本文从受激迴旋辐射的谐振条件出发,通过对 Weibel 型器件物理机理的分析,得出了 Weibel 型不稳定性增益机理的相位条件,即  $\frac{\omega_{ce}}{r_0} + kv_z \gtrsim \omega$  (对前向波相互作用)和  $\frac{\omega_{ce}}{r_0} - kv_z \gtrsim \omega$  (对反向波相互作用)。这和迴旋脉塞不稳定性增益机理的相位条件是完全不同的。

本文提出用缓变截面开放式谐振腔链结构作为  $TE$  模慢波电路的可能性,这是一类新型的慢波迴旋放大器。

本项研究工作得到 M. Chodorow、V. Granatstein 教授、徐承和、张克潜、钱景仁副教授的有益的讨论,在此一并表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] F. J. Moncrief, *Microwaves*, March 1979, No. 3, p. 48.
- [ 2 ] P. Sprangle, K. R. Chu and R. Smith, *Conference Digest of the Fourth International Conference on Infrared and Millimeter Waves and Their Applications*, 1979, p. 93.
- [ 3 ] K. R. Chu and J. Hirshfield, *Phys. Fluids*, 21(1978), 461.
- [ 4 ] P. Sprangle and A. Drobot, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, MTT-25 (1977), 528.
- [ 5 ] K. Button, *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 1, Chap. 1, *Academic Press, New York*, 1979.

## THE PHASE CONDITION OF THE WEIBEL INSTABILITY GAIN MECHANISM AND A WIDE BAND SLOW WAVE CYCLOTRON AMPLIFIER

Guo He-zhong,    Chen Zeng-gui  
(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

Starting from the view point of the coherent cyclotron radiation, we work out the phase condition of the Weibel instability gain mechanism and make a comparison with the phase condition of the cyclotron maser gain mechanism. Moreover, we propose a conceived slow wave cyclotron amplifier (SWCA) with a periodic rf structure.