

扩展互作用谐振腔的模拟分析*

吴振华, 张开春, 刘盛纲

(电子科技大学 物理电子学院 太赫兹研究中心, 成都 610054)

摘要: 分析了扩展互作用谐振腔的工作原理、特点以及工作过程, 并利用 PIC 粒子模拟程序对其进行了数值模拟, 分析了阴极电压、电子注半径、谐振腔个数以及谐振腔周期长度对输出功率、频率及转换效率的影响。结果表明, 当阴极电压为 28.5 ~ 30.0 kV 时, 谐振腔能正常工作; 当电子注半径为 1.4 mm, 谐振腔个数为 4, 阴极电压为 29 kV 时输出功率和转换效率最大, 输出功率为 128 kW, 频率 12.9 GHz, 转换效率达 37.93%。输出频率随谐振腔周期长度的变小而增大。

关键词: 扩展互作用谐振腔; THz 波段; 同步; 电子束群聚

中图分类号: TB71.6 文献标识码: A

扩展互作用谐振腔(EIO)是乔多罗及威瑟尔-贝格在 20 世纪 50 年代提出的^[1], 这种器件在 70 年代得到很大的发展^[2,3]。扩展互作用腔是一种毫米波器件, 可产生 THz 波段的电磁波。虽然 EIO 是一种成熟器件, 但在 THz 的研究热潮之下^[2,4], 重新进行研究也是很有必要的, 而且加工技术的发展, 给 EIO 带来了新的生命。90 年代后期, 特别是 2000 年以后, 关于 EIO 的研究报道相对增加^[5,6]。本文讨论了 EIO 的工作原理, 并用 PIC 粒子模拟软件进行数值模拟, 得到功率、频率等参数。

1 EIO 简介

1.1 典型 EIO 结构

如图 1 所示, 典型的 EIO 器件是由多个谐振腔连成的, 整体构成一个慢波系统^[1]。

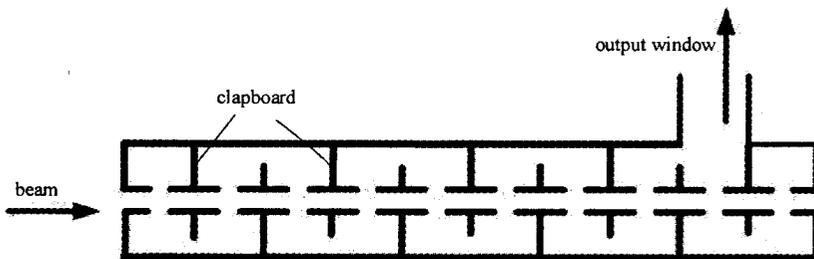


Fig. 1 Typical configuration of EIO

图 1 典型 EIO 结构

1.2 EIO 工作原理

EIO 是工作在返波段的器件^[3], 由自激产生微波, 其产生微波的频率与其尺寸密切相关。它需要有较高的 R_s/Q 值^[1,5], 其中 R_s 为腔体的耦合阻抗, 高的 R_s 代表强的耦合作用, Q 为腔体的有载品质因数, 表示腔体的储能, 所以高的 R_s/Q 代表着电子注和波在传播方向上有强的相互作用, 有助于提高效率 and 功率。

电子注沿中心通道向前直线运动, 当电子注经过缝隙时, 在谐振腔中激发一个频带很宽的磁场, 但只有当频率等于谐振腔的固有频率且电流达到起振电流时才能引起振荡, 而其它频率的磁场迅速衰减。电磁波在慢波结构内沿慢波线传播, 且电子注和电磁波纵向传播速度相等时 ($v_b = v_p$, v_b 为电子注速度, v_p 为电磁波纵向相速), 电子注在缝隙处受电磁波调制, 产生群聚, 同时周期性群聚电子团在缝隙处将能量转化为电场能, 从而达到输出电磁波的目的。

要指出的是电子注和磁场的“同步”并非指完全同步。电子注速度要略大于电磁波相速。如果两者完全相等, 那么群聚中心就始终在零场中变化, 群聚的电子群中有一半电子在加速场中运动, 另一半在减速场中运动,

* 收稿日期 2006-08-09; 修订日期 2007-01-04
基金项目 国家自然科学基金资助课题(60472013) 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20050614017)
作者简介 吴振华(1980—), 男, 博士生, 主要从事太赫兹器件的研究, wzh6696@163.com。

因此,虽然电子注已经群聚,但是电子注和高频场之间没有净能量交换。如果电子注速度比高频场的轴向传播速度稍大一些,群聚中心落入减速场中,大部分电子在减速场中运动,它们将把自身的能量转化为高频场能量,电子就有净能量转换给高频场,使高频场能量增强。由于电子注和高频场是同步前进的,且周期性相遇,在每个缝隙都有这种能量交换,高频场和电子注的相互作用使得电子注的群聚不断加强,同时加强了群聚电子注又不断地把能量转换给高频场,使得高频场能量不断地得到增强。

1.3 EIO 特点

EIO 特点:既有慢波线也有谐振腔,电场较强,电子与高频场同步前进,周期性地相互作用,电子将能量转化为高频场能量;工作频带窄,频率高,速度调制、电子群聚、群聚电子流激励高频场三个过程不可分割;自激振荡。由于 EIO 的工作频率与尺寸密切相关,所以当结构尺寸逐渐缩小,其频率也就随之增大。现在,微机电系统、光刻等加工水平已经达到了 μm 量级,在此基础上,利用 EIO 做太赫兹源,输出电磁波频率可达到 0.5 THz。

2 EIO 模拟

2.1 结构及参数

一个简单的 EIO 结构如图 2 所示,图中所示谐振腔个数为 4,电子通道半径为 1.8 mm,电子注半径为 1.4 mm,周期长度为 6.35 mm,电子注电压为 29 kV,电子注电流为 10 A。

2.2 模拟结果

利用 PIC 粒子模拟程序对 EIO 进行模拟,其结果如图 3 所示。模拟结果显示,稳定后的电子注出现群聚现象。

起振后,电子的速度调制变为密度调制,体现为电流大小的周期性变化,图 4 为观察到的电子注电流起振情况,图 4(b)为图 4(a)的局部放大效果,从中可以看出 EIO 在 10 ns 之后起振,20 ns 后稳定,电流呈正弦变化。图 5 为电流周期变化的频谱图,其频率为 12.9 GHz。图 6 为电子注的相空间图,由图可见,电子受到调制信号周期性变化。

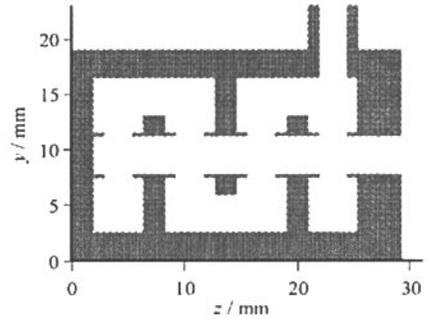


Fig. 2 Configuration of an EIO

图 2 EIO 结构示意图



Fig. 3 Bunching of electron beam

图 3 电子注群聚图

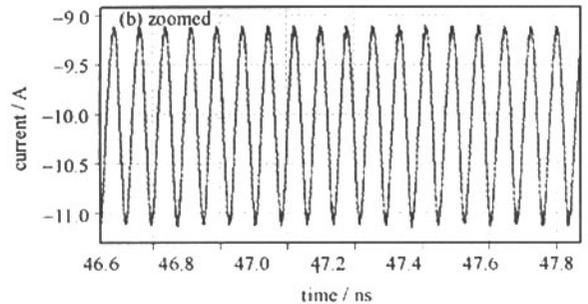
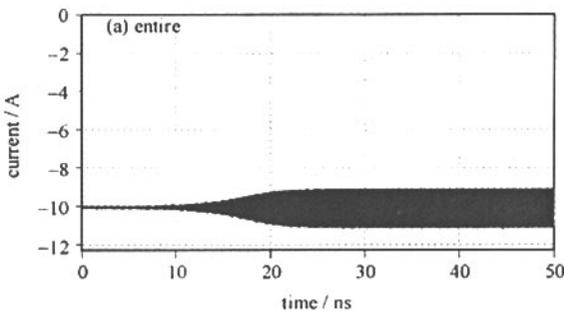


Fig. 4 Variation of the electron beam current

图 4 电流周期性变化

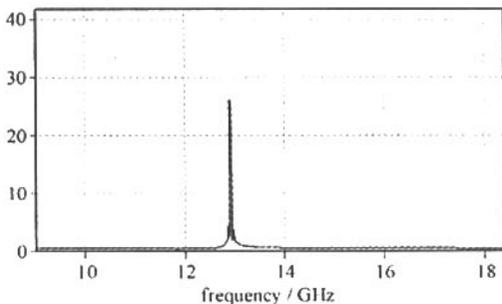


Fig. 5 Spectrum of period variety current

图 5 电流频率曲线

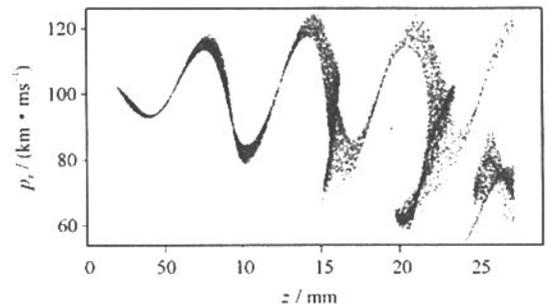


Fig. 6 Phase space of electron beam

图 6 电子注相空间图

输出窗输出的微波功率和频谱如图7所示,可以看到输出功率为128 kW,且十分稳定,其频谱与电流周期变化频谱一致,频率为12.9 GHz,其转换效率为37.93%^[7]。

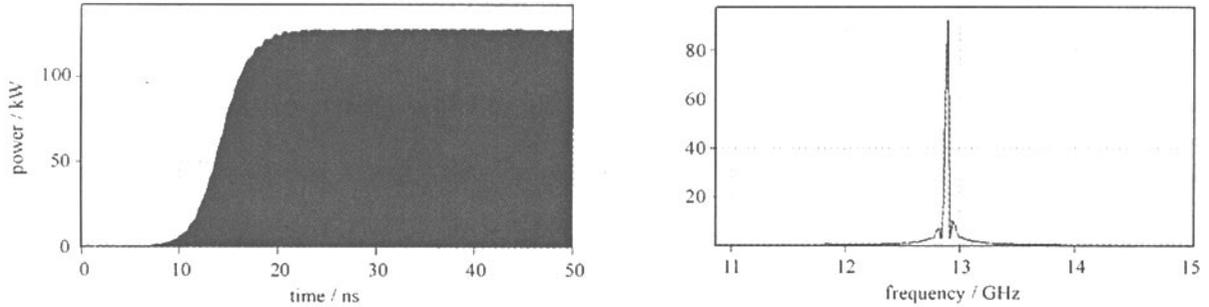


Fig. 7 Output power and spectrum of microwave

图7 输出功率及其频率图

2.3 影响输出波的参数

2.3.1 电子注半径对输出波的影响

在电流密度不变的条件下,改变电子注半径,一方面改变了电子注电流,另一方面改变了电子注同电子通道的距离,理论上,只增大电子注电流,输出功率随之增大,而电子注同电子通道的距离在某一值时,转换效率将达到最大,为37.93%。模拟结果表明:当电子注半径为1 mm时,电流为6.2 A,起振缓慢,虽然有微波输出,但是输出功率小(5 kW)且不稳定,这是因为电流较小,电子注与电子注通道相隔过远,对本征模式的激发强度不够,因而对其它频率的波抑制不够,所以产生功率不稳定的现象。当电子注半径为1.4 mm,电流为10 A,输出功率为128 kW,转换效率最高,为37.93%;当电子注半径为1.6 mm时,电流为15.5 A,输出功率较大,为159 kW,但是需要1 T的聚焦磁场,常规实验室条件下很难实现,不予考虑。

2.3.2 阴极电压对输出波的影响

电压与电子速度的关系为

$$\frac{v_b}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{V}{0.511 \times 10^6}\right)^2}} \quad (1)$$

式中 c 为光速, V 为阴极电压。器件中本征模微波的相速 v_p 是一定的,所以只有调节阴极电压,使 v_b 略大于 v_p 时才能激发出本征模式,得到较强的微波输出。模拟结果表明:阴极电压在28.5~30.0 kV时,EIO器件能正常工作,电压为29 kV时,输出功率128 kW,转换效率达到最大,为37.93%。

2.3.3 谐振腔个数和谐振腔周期长度对输出的影响。

改变谐振腔个数,模拟结果表明:谐振腔个数为3时,输出功率为50 kW;谐振腔个数为4时,输出功率为128 kW;谐振腔个数为5时,输出功率为102 kW;谐振腔个数为6时,输出功率为85 kW。结果表明,随谐振腔个数的改变,输出功率将发生改变,在谐振腔个数为4时,输出功率达到最大。只有2个谐振腔时,EIO不能起振,没有能量输出; ρ 个谐振腔时,输出不稳定。这是因为,谐振腔个数的多少直接关系到相互作用长度的长短,谐振腔个数少时,相互作用长度短,电子注没有足够的空间来产生群聚,相互作用长度过长时,群聚电子注产生过调制现象,只有当相互作用长度适中时,群聚电子注的能量转换效率才最大。改变谐振腔周期长度,输出波频率则随之变化,其变化规律为:周期变小,输出波频率升高,反之,则频率降低。在不改变周期长度的情况下,改变谐振腔间隙尺寸,则不影响输出波频率。

3 结论

本文对EIO器件进行了理论分析和数值模拟,并且讨论了阴极电压、电子注半径以及谐振腔个数、周期长度对输出波的影响。结果表明:当输入电压29 kV,电流10 A时,得到输出功率为128 kW,频率12.9 GHz,转换效率达到37.93%的微波。

参考文献:

[1] 刘盛纲. 微波电子学导论[M]. 成都:电子科技大学出版社,1983:651-656. (Liu S G. Introduction to microwave electronics. Chengdu:Universi-

ty of Electronic Science and Technology of China Press ,1983 651-656)

- [2] Day W R , Noland J A , Sandstrom L H , et al. A millimeter wave , space-charge focused , extened interaction oscillator[C]//International Electron Devices Meeting. 1964 , **10** :88.
- [3] Day W R. The Millimeter-wave extended interaction oscillator[J]. *Proc of IEEE* ,1966 , **54**(4) :539-543.
- [4] Chen L M , Guo H Z , Chen H Y , et al. An extended interaction oscillator based on a complex resonator structur[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science* ,20003 , **28**(3) 626-632.
- [5] McMillan R W , Trussell Jr C W , Bohlander R A , et al. An experimental 225 GHz pulsed coherent rada[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* ,1991 , **39**(3) 555-562.
- [6] Kantrowitz F , Tammarui I. Three-dimensional simulations of frequency-phase measurements of arbitrary coupled-cavity RF circuits[J]. *IEEE Trans Electron Devices* ,1988 , **35**(11) :2018-2026.
- [7] 欧阳勤. 折叠波导行波管及微加工技术[J]. 真空电子技术 ,2003 ,(6) 33-38.(Ou Y Q. Folded waveguide TWT and microfabrication technologies. *Vacuum Electronics* ,2003 ,(6) 33-38)

Simulation of extended interaction oscillator

WU Zhen-hua , ZHANG Kai-chun , LIU Sheng-gang

(School of Physical Electronics , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)

Abstract : The basic theories , the characteristics and the woking process of the extended interaction oscillator(EIO) were introduced. A type of EIO was simulated using PIC. The effect of the cathode voltage , the radius of the electron beam , the number and the period length of the resonant cavity on the output power , frequency and conversion efficiency were analyzed. The simulation results shown that when the working voltage is 28.5 ~ 30 kV , the resonant cavity starts to oscillate. When the input cathode voltage is 29 kV , the current is 10 A , and when the radius of electronic beam is 1.4 mm and the number of period is 4 , the output power is 128 kW , the frequency is 12.9 GHz , and the efficiency is up to 37.93% .

Key words : Extended interaction oscillator ; THz band ; Synchronization ; Beam bunching