

低引导磁场下相对论亚纳秒电子束毫米波返波振荡器的粒子模拟*

张运俭^{1,2,1)} 陈洪斌² 孟凡宝² 范植开²

1(中国工程物理研究院研究生部 绵阳 621900)

2(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要 提出了一种 Ka 波段的相对论亚纳秒电子束毫米波慢波结构,在较低引导磁场情况下,运用粒子模拟(PIC)方法成功地模拟出器件中波束相互作用的非线性物理演化过程,得到了一种超辐射状态下的微波辐射,它的产生与波相对于电子束滑移引起的电子束内电子间相互作用有关,辐射微波的峰值功率与电子束总电荷的平方成正比.粒子模拟有利于对超辐射这种束波相互作用非线性物理现象的理解,并且对器件的设计有一定的参考价值.

关键词 超辐射 毫米波 粒子模拟

1 引言

90 年代初高功率微波技术的重要研究方向超宽带电磁脉冲产生技术获得了迅速发展,俄罗斯在发展高功率超宽带电磁脉冲的基础上,研制出纳秒、亚纳秒加速器,推动了相对论毫米波微波源的发展.并实验观察到纳秒、亚纳秒脉冲电子束产生超辐射. Smith-Purcell 实验首先观测到了群聚电子束长度小于波长的相干辐射,另一种传统的相干辐射广泛应用于微波电子学中,即连续或准连续的电子束其长度远长于波长的相干辐射,在此情况下,相干辐射以与电子群聚引起的受激过程有关.而对中间情况,如电子群聚长度为几个波长,传统上假定辐射仅与群聚电子内部的密度扰动(非相干部分)有关或群聚边缘的相干辐射.

最近几年,开始认识到电子束自群聚和波在电子脉冲的滑移可在整个电子群聚体积内发生强相干辐射.建立在早期相对论电子学原子跃迁的相似机理,这样的相干辐射被认为是超辐射^[1].亚纳秒电子束通过慢波周期结构与微波相互作用发射相干受

激辐射,辐射的峰值功率与电子束总电荷的平方成正比,电子束进行的是相干辐射,是一种超辐射.

2 返波振荡器的物理结构

设计的 Ka 波段相对论亚纳秒毫米波慢波结构的物理结构如图 1 所示,阴极内外直径分别为 11 mm

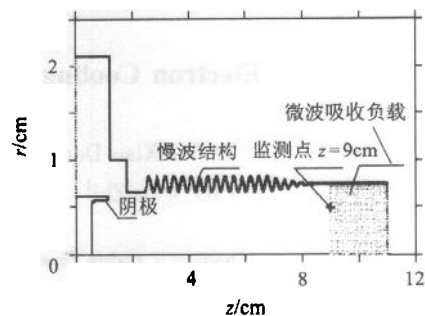


图 1 亚纳秒相对论返波振荡器的物理结构

和 12mm;阴极与阳极轴向距离设计为 6.7mm;慢波结构波导的半径 r 由两段按正弦规律变化的函数确定:

$$r_1 = a + r_{01} \sin(2\pi z/L),$$

$$r_2 = a + r_{02} \sin(2\pi z/L),$$

2002-11-18 收稿,2003-04-29 收修改稿

* 高功率微波技术主题基金资助

1) E-mail: gothrough1999@sina.com

式中 a 为漂移腔半径. 根据要求相对论返波振荡器工作频率在 Ka 波段及对器件的优化, 由 $f \approx c/2L$, 取 $L = 3\text{mm}$; $a = 7.3\text{mm}$; $r_{01} = 0.8\text{mm}$; $r_{02} = 0.8 \times \left(1 - \frac{z - 6.7}{8.4 - 6.7}\right)$.

3 相对论亚纳秒返波振荡器的粒子模拟

亚纳秒相对论毫米波慢波结构中的超辐射现象采用 PIC 程序进行粒子模拟. 对于较高的磁场由于电子的 Larmor 半径较小, 电子基本位于相同的半径, 保证了电子束与 TM_{01} 模式的相干性, 因此微波输出功率较高. 当磁场较小时, 电子的 Larmor 半径较大, 为与不同半径的电子受到结构波的作用力各不相同, 不能实现相干调制; 同时又与电子束集体的回旋运动会产生相对较高的纵向磁场, 这是电子束会与慢波结构中的 TE 模相互作用, 出现了多个模式之间的竞争, 主模 TM_{01} 与电子束的相互作用受到抑制或破坏, 所以微波功率下降. 经过多次模拟, 引导磁场选为 1.8T; 电压脉冲幅值为 400kV, 电压脉冲信号如图 2(a) 所示, 脉宽约为 0.9ns; 电流幅值为 2.1kA.

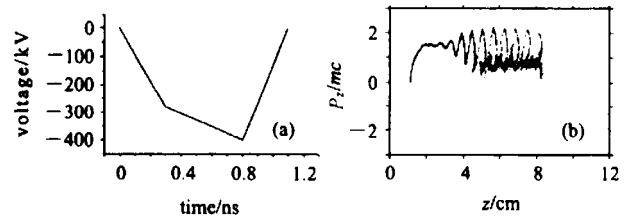


图 2

(a) 脉冲电压波形; (b) 在 $t = 1\text{ns}$ 时 $P_z - z$ 相空间图.

电子束在 0.55ns 左右开始群聚, 图 2 (b) 为电子束经过 1ns 后沿 z 方向的动量分布, 可以看出电子束已经受到很强烈的调制, 长度近似等于微波波长的电子束团在每通过慢波结构的一个周期时, 由于所有电子集中在一个微波波长里而被关联起来, 它将发出另一种相干辐射, 超辐射. 此后随着电子束脉宽的增加, 微波与电子束之间的脱离, 电子之间不能进行集体相干辐射, 辐射微波只是普通的受激辐射, 微波输出功率随之减小, 这一现象在图 5(c) 中可以看出.

图 3(a) 显示了在 $z = 9\text{cm}$ 处的径向电场分量, 可以看出亚纳秒相对论慢波结构工作于 TM_{01} 模式; 在图 3(b) 中可以看出微波中心频率为 38GHz; 在

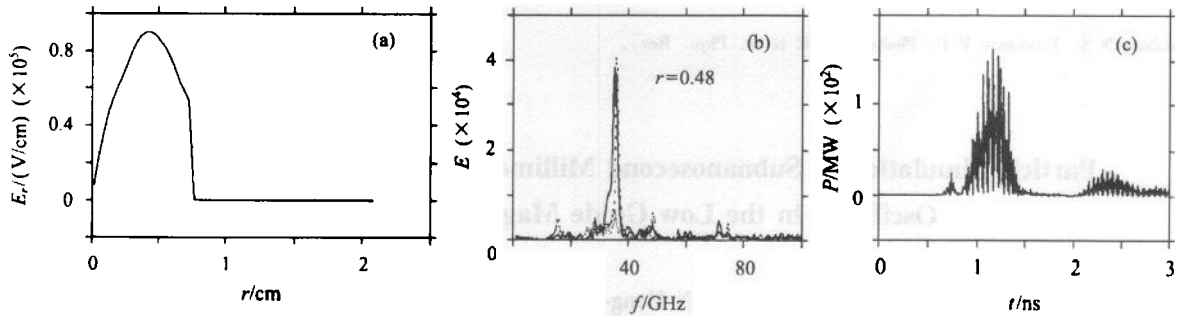


图 3

(a) 在 $z = 9\text{cm}$ 处电场径向分量随半径的变化; (b) 输出截面处微波讯号的频谱; (c) 在 $z = 9\text{cm}$ 处坡印亭矢量积分随时间的变化.

$z = 9\text{cm}$ 处进行功率流积分得到器件辐射微波功率的时间分布曲线如图 3(c) 所示, 微波脉宽约为 400ps, 峰值功率达到 100MW, 峰值功率效率为 12%, 能量效率约为 5%. 输出功率与电压信号脉宽的关系如图 4(a) 所示.

由于峰值电流基本为一常数, 电子束脉宽与电压脉宽一致, 所以输出峰值功率与总电子数成一定的比例关系, 显然由图中曲线可以看出当电压脉宽接于 1ns 之前时输出功率与电压脉宽成二次方关系, 由图 4(b) 可以看出输出峰值功率与返波振荡器中的总粒子数的平方几乎成直线关系, 此时辐射微波为超辐射机理所产生. 当电压脉宽超过 1ns 时,

超辐射现象不存在, 只是普通的微波辐射. 图 5(a) 显示了引导磁场与峰值功率之间的关系, 在 1.8T 附

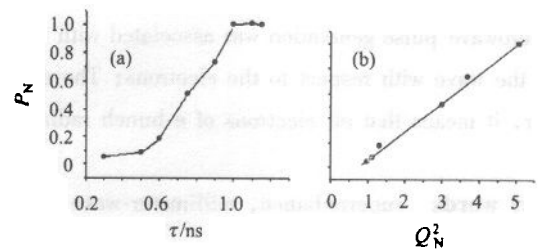


图 4

(a) 归一化输出峰值功率 P_N 与电压脉冲宽度 τ 的关系; (b) 归一化输出峰值功率 P_N 与归一化总粒子数平方 Q_N^2 的关系.

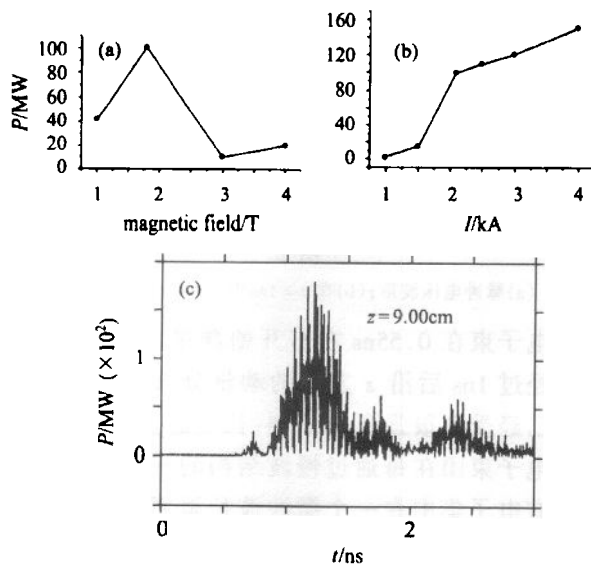


图 5

- (a) 峰值功率 P 与引导磁场之间的关系;
 (b) 峰值功率 P 与电流 I 之间的关系;
 (c) 3ns 电子束脉冲在输出截面处坡印亭矢量随时间的变化。

近有最大辐射功率,而在 3T 附近存在以极小值,功率下降是由于电子束的回旋共振吸收电磁波的能量效应,对于束能 400keV 的电子束,其发生回旋共振吸收的引导磁场强度的理论值约为 3.2T,这和粒子模拟的结果比较相吻合。图 5(b)为峰值功率与电子束电流之间的关系。

4 结论

本文在文献[1]的基础上给出了另外一个相对论亚纳秒毫米波慢波结构的物理模型,粒子模拟结果使引导磁场降到 1.8T,使现有实验技术对完成亚纳秒毫米波器件的实验成为可能。粒子模拟结果为微波峰值功率为 100MW,中心频率为 38GHz,微波模式为 TM_{01} 模式。

感谢北京应用物理与计算数学研究所姜幼明研究员在此问题上的讨论。

参考文献 (Reference)

1999, E60:3297-3304

- 1 Ginzburg N S, Tarakanov V P, Phelps A D R et al. Phys. Rev.,

Particle Simulation of Subnanosecond Millimeter Relativistic Backward Wave Oscillator in the Low Guide Magnetic Field Region *

ZHANG Yun-Jian^{1,2,1)} CHEN Hong-Bin² MENG Fan-Bao² FAN Zhi-Kai²

1(Graduate School of CAEP, Mianyang 621900, China)

2(Institute of Applied Electronics of CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract Particle simulation results of coherent stimulated radiation from subnanosecond electron bunches moving through a periodic waveguide and interacting with a backward propagating TM_{01} wave are presented. The longitudinal guiding magnetic field is 1.8T, the peak power as high as 100 MW for the 300ps pulses at 38GHz. The mechanism of microwave pulse generation was associated with the mutual influence of different parts of the electron pulse due to slippage of the wave with respect to the electrons; The dependence of peak power on the square of the total charge is almost linear, it means that all electrons of e-bunch radiate coherently. This can be interpreted as superradiance.

Key words superradiance, millimeter-wave, particle simulation

Received 18 November 2002, Revised 29 April 2003

* Supported by the Fund of High Power Microwave Technology

1)E-mail: gothrough 1999@sina.com