

基于超辐射机理产生 X 波段高功率亚纳秒脉冲研究*

胡林林^{1,2;1)} 孟凡宝¹ 陈洪斌¹ 周传明³

1 (中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

2 (中国工程物理研究院研究生部 绵阳 621900)

3 (中国工程物理研究院科技委 绵阳 621900)

摘要 设计了一种基于超辐射机理的 X 波段相对论返波管结构, 利用全电磁 2.5 维粒子模拟程序对返波管中的超辐射机理进行了粒子模拟研究. 模拟表明: 在束压 430kV、束流 4kA、脉宽 3.1ns 的电子束驱动下, 实现了峰值功率 1.5GW、频率 10GHz、脉宽 500ps 的亚纳秒微波脉冲输出, 峰值功率转换效率达到 87.2%; 在超辐射机理作用下, 微波峰值功率与电子束脉宽在一定的范围内成平方关系.

关键词 超辐射 相对论返波管 亚纳秒 高功率微波 粒子模拟

1 引言

运动电子的辐射强度有 3 种类型. 当电子之间无耦合发生时, 其辐射的定标律为输出功率正比于电子数, 这种辐射称为自发辐射, 束功率对微波的转换效率很低. 通常, 高功率微波器件采用的是第二种辐射机理, 即由电子群聚引起的受激辐射, 其辐射定标律为输出功率正比于电子数的 $4/3$ 次方, 束波转换效率可达 30%. 理论和实验还发现, 存在着第三种辐射机理, 它是一种短电子脉冲产生的强相干辐射, 其辐射率定标为输出功率正比于电子数的平方. 同时, 由于电子束的强聚束作用, 进一步压缩了脉冲宽度, 束波功率转换效率可大于 100%. 这种辐射现象, 科学界称之为超辐射 (Superradiance). 利用超辐射机理能够极大地提高束波互作用的功率转换效率, 产生快上升前沿, 峰值功率接近甚至超过电子束功率水平的高功率脉冲, 为实现高功率纳秒及亚纳秒微波/毫米波提供了新的技术路线.

自 20 世纪 80 年代以来, 俄罗斯对超辐射进行了深入的理论和实验研究, 并观测到了不同受激辐射机理 (磁韧致辐射、回旋辐射、契伦科夫辐射) 的超辐射^[1-7]. 在所有的实验中以基于契伦科夫超辐射机理的相对论返波管器件产生的功率最高. 目前, 俄罗斯以纳秒/亚纳秒加速器 RADAN303 和 SINUS200 为平

台对基于契伦科夫超辐射机理的相对论返波管进行的实验研究中, Ka 波段得到微波功率 1.1GW, 功率转换效率 150%, X 波段得到微波功率 3GW, 功率转换效率达 180%^[6, 7].

国内尚未见有关高功率微波器件中超辐射机理研究的报道. 本文首先设计了一种 X 波段基于超辐射机理的返波管结构, 然后利用全电磁 2.5 维 PIC 软件 KARAT^[8] 对相对论返波管中的超辐射机理进行了粒子模拟研究.

2 结构设计

通常的相对论返波管采用的是连续或准连续的电子束, 其长度远大于波长, 在此情况下相干辐射与电子自群聚引起的受激过程有关. 对于短脉冲电子束, 其产生的电子群聚长度只有几个波长, 利用电子束自群聚和波相对于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, 即超辐射现象. 为实现这一机理必须扩展束波相互作用空间, 使得短群聚电子束不同部分能在整个束波相互作用空间内发生耦合^[6].

图 1 为所设计的短电子束脉冲驱动的 X 波段返波振荡器结构示意图. 其采用了略过模结构, 在慢波结构前设计有 Bragg 反射器, 整个慢波结构为加长型的 22 个周期正弦波纹波导, 由 3 段组成: 第一段采用深

2006-02-16 收稿

* 国家 863 计划项目资助

1) E-mail: hu_linlin2005@yahoo.com.cn

度逐渐增大的周期结构,束波耦合阻抗由小到大,其目的在于使电子束产生预群聚调制;中间一段均匀周期结构为高耦合阻抗区域,预群聚电子束相对于高频场的相位为减速相位,束波相互作用使得电子束交出大部分能量给高频场;第三段为深度逐渐变浅的周期结构,耦合阻抗逐渐减小,有利于微波能量的提取.整个慢波结构的平均半径为 2.0cm,周期为 1.55cm,最大波纹深度为 0.18cm.电子束内外半径分别为 1.65cm 和 1.75cm.

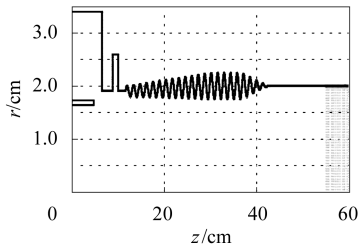


图 1 X 波段返波振荡器结构示意图

3 基于超辐射机理返波管特性分析

3.1 电子束及磁场设置

采用 2.5 维全电磁 PIC 粒子模拟软件 KARAT 对图 1 结构的返波管进行优化设计和粒子模拟. 磁场、二极管及慢波结构位置如图 2, 引导磁感应强度设计

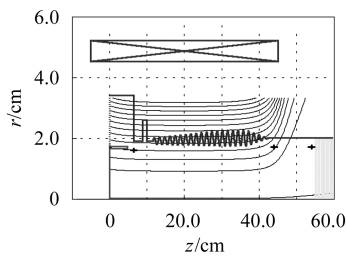


图 2 磁场、二极管和慢波结构位置结构图

为 3.0T, 磁场均匀区域长度约 30cm, 磁场位形如图 3. 图 4(a) 为模拟的二极管电压波形, 脉冲电压幅度 ~430kV, 脉宽 3.1ns, 脉冲前沿 0.85ns; 图 4(b) 为在 z=6.5cm 平面上积分得到的束流波形, 由图可知束流 ~4kA.

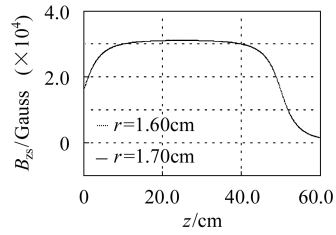


图 3 磁感应强度随 z 关系曲线

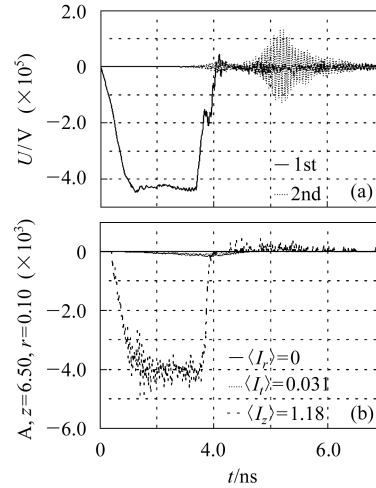


图 4 电子束的束压波形(a)和束流波形(b)

3.2 电子相空间分布及输出微波脉冲的特性分析

图 5 显示了模拟过程中电子束动量的相空间图演变情况. 电子束在 ~1.77ns 之前即开始起振, 随后电子调制不断加强, 并一直持续到电子脉冲结束和电子束被阳极吸收. 这时短电子脉冲在整个相互作用空间内最终形成的群聚束团周期为 13 个, 由于波相对于电子束的滑移将引起电子束内不同部分相互作用, 电子束产生集体相干辐射, 即超辐射, 后面将看到这种集体相干辐射产生的功率将数倍于普通受激辐射产生的功率. 图 6—图 8 分别显示了在 z=54cm 处的波印廷矢量积分随时间变化图、电场分量的径向分布图和频谱分布. 由图可知: 微波输出峰值功率约为 1.5GW, 工作频率为 10GHz, 脉宽约 500ps, 上升沿约 800ps, 峰值功率转换效率达到 87.2%. 由于 SWS 采用了过模结构, 输出模式为 TM₀₁ 不纯, 夹杂有少量的其他高次模式.

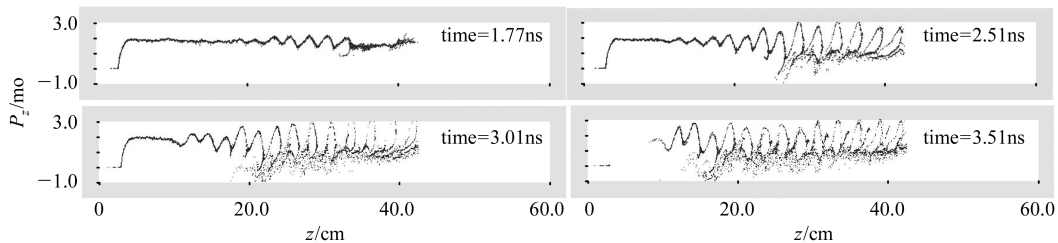


图 5 电子相空间的时间演变图

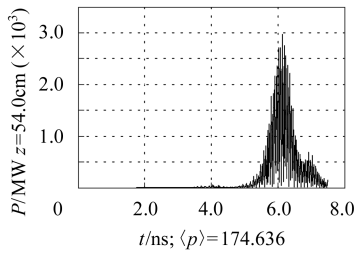


图6 输出微波脉冲波形

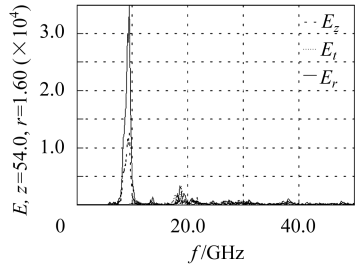


图7 输出微波频谱图

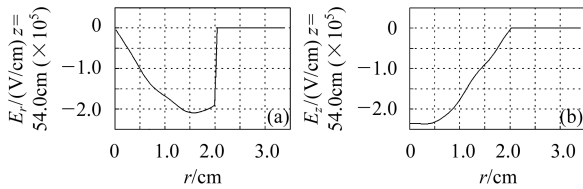


图8 电场分量 E_r (a) 和 E_z (b) 的径向分布图

3.3 引导磁场和阴极位置对输出微波的影响

图9表示在二极管电压430kV、束流4kA参数下,该器件输出峰值功率与引导磁场之间的关系.由图可知回旋吸收磁感应强度为1.0T,根据慢波结构参数和电子束参数理论计算得到结果为1.2T,两者比较一致.磁感应强度大于2.5T后,输出功率达到最大并不再变化.目前,利用脉冲磁场电源能够实现2—2.5T,超导系统能做到3T,可以满足设计的实验要求.同时,由图可知在过模($D/\lambda \sim 1.3$)条件下,高磁场下的输出功率是回旋共振区以下低磁场得到最大输出功率的2.5倍,而通常的非过模返波管,它们之间的功率倍数 >4 ^[2, 5, 7].因此,采用过模结构为在低磁场条件下实现高功率微波输出提供了条件.图10反映了电子束厚度不变的条件下,输出功率随电子束半径增大而增大,这是因为越靠近慢波结构,束波耦合越强的缘故.但是并不是电子束越靠近慢波结构效果越好,这是因为从实验角度讲,慢波结构比较长,阴极与慢波结构的机械加工同心度非常重要^[6, 7],否则当电子束靠近慢波结构下沿运行时会引起电子束打到慢波结构壁上,影响电子束的输运质量或造成电流短路而使功率下降;一方面实验对引导磁场的强度和位形的要求高,磁力线也要保证与阴极和慢波结构同心,并具有足够

长的强均匀磁场区域,才能保证较好的引导电子束与慢波结构作用.文献[6, 7]中介绍的俄罗斯进行的超辐射实验中,采用了25个周期的慢波结构,慢波结构与阴极的同心度公差小于0.05mm,引导磁场达6.5T.

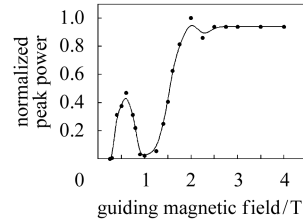


图9 峰值功率与轴向引导磁场场强的关系

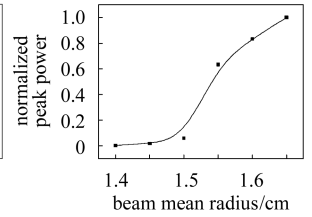


图10 输出功率与电子束平均半径的关系

3.4 电子束脉冲宽度对输出微波的影响

输出峰值功率与电子束脉宽之间的关系如图11所示.电子束的峰值电流一定,束压脉宽与束流脉宽一致,因此该图实际上反映了峰值功率对电子束总电荷之间的关系.图中虚线为在脉宽小于3.5ns范围内的二次拟合曲线,由此可见电子束脉宽约小于3.5ns时,峰值功率与总电子数成平方关系,表明器件中存在超辐射.当电子束脉宽超过3.5ns时,由超辐射机理产生的微波峰值功率达到饱和.图12表示脉宽为8ns电子脉冲作用时的输出功率图,波形前端具有一孤立的窄波峰,峰值功率约1.5GW,为超辐射机理所产生.超辐射产生的微波峰值过后功率降低,这时产生的辐射只是普通的契仑柯夫受激辐射,由图可见由超辐射产生的峰值功率为普通受激辐射产生输出功率的2—3倍.

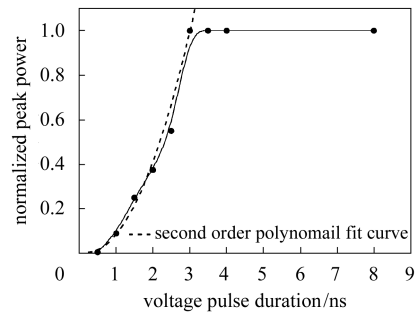


图11 输出峰值功率与加速电压脉冲宽度的关系

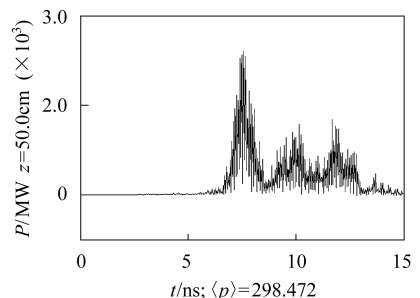


图12 8ns长脉冲下输出功率随时间的变化

4 结束语

利用相对论返波管中契仑柯夫超辐射机理, 在短脉冲电子束驱动下产生亚纳秒窄脉冲微波辐射, 具有高功率和高转换效率的优点, 可以实现高功率微波源的小型化, 是一个很有价值的研究方向. 本文设计

了一种 X 波段基于超辐射机理的相对论返波管结构, 粒子模拟表明该器件在束压 430kV、束流 4kA、脉宽 3.1ns 的电子参数下, 能实现峰值功率 1.5GW 的微波输出, 微波脉宽 500ps, 频率为 10GHz, 模式为 TM_{01} , 峰值功率转换效率达到 87.2%. 脉冲宽度与峰值功率的关系表明在小于 3.5ns 范围内, 峰值功率与电子总数成平方关系, 验证了该器件中的超辐射现象.

参考文献(References)

- 1 Ginzburg Naum S, Zotova Irina V, Novozhilova Yulia V et al. Generation of Powerful Ultrashort Microwave Pulses Based on Superradiance of Subnanosecond High-current Electron Bunches. In: High-Power Particle Beams. 1998
- 2 Ginzburg Naum S, Zotova Irina V, Novozhilova Yulia V et al. Physics Review, 1999, **E60**(3): 3297—3303
- 3 Vlasov Alexander N, Ilyin Anton S, Carmel Yuval. IEEE Trans. on Plasma Sci., 1998, **26**(3): 605—614
- 4 Yalandin Michael I, Shpak Valery G, Shunailov Sergei A et al. IEEE Trans. on Plasma Sci., 2000, **28**(5): 1615—1619
- 5 Klimov Alexei I, Korovin Sergei D, Rostov Vladislav V et al. IEEE Trans. on Plasma Sci., 2002, **30**(3): 1120—1124
- 6 Eltchnaniov Anton A, Korovin Sergei D, Rostov Vladislav V et al. Laser and Particle Beams, 2003, **21**: 187—196
- 7 Eltchnaniov Anton A, Korovin Sergei D, Mesyts Gennady A et al. IEEE Trans. on Plasma Sci., 2004, **32**(3): 1093—1099
- 8 Tarakanov Vladimir P. User's Manual for Code KARAT. Ver. 8. 17. Berkeley Research Associates Inc, 2004

Study of X-Band High-Power Sub-nanosecond Pulse Generation Based on Superradiance Mechanism^{*}

HU Lin-Lin^{1,2,1)} MENG Fan-Bao¹ CHEN Hong-Bin¹ ZHOU Chuan-Ming³

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

2 (Department of Graduate Student, CAEP, Mianyang 621900, China)

3 (Technological Committee, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract A novel backward wave oscillator based on the superradiance mechanism is designed in this paper. The superradiance mechanism in the relativistic backward oscillator was studied by the 2.5 dimensional particle simulation code KARAT. The simulation indicated that with the driving electron beam of voltage 430kV, current 4kA and pulse width 3.1ns, the device could generate sub-nanosecond microwave with peak power 1.5GW, operating frequency 10GHz, and pulse width 500ps. The peak power conversion ratio reached 87.2%. Under the superradiance mechanism, the peak power is proportional to the square of beam pulse width when the latter is less than 3.5 ns.

Key words superradiance, relativistic backward wave oscillator, sub-nanosecond, high power microwave, particle simulation

Received 16 February 2006

^{*} Supported by National High Technology Research and Development Program of China

1) E-mail: hu_linlin2005@yahoo.com.cn