

自由电子激光器中轴向磁场作用的实验研究

褚成 施瑞根 陆载通 庄国良 张立芬 胡煜 施津川

(中国科学院上海光机所)

提要: 从约束强流电子束及回旋共振增大激光器增益两方面考虑, 确定了喇曼自由电子激光器轴向引导磁场的工作参数, 并进行了实验测试。

Experimental study of effect of axial magnetic field in free-electron lasers

Chu Cheng, Shi Ruigen, Lu Zaitong, Zhuang Guoliang, Zhang Lifen, Hu Yu, Shi Jinchuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: Parameters of the axial guiding magnetic field in free electron laser based on stimulated Raman scattering are determined. Having measured the guiding field and the e-beam it confines, we carried out preliminary parametric study and obtained free-electron laser radiation in K_0 band.

一、引言

我们研制了一台基于受激喇曼散射的自由电子激光器^[1], 获得了 K_0 波段激光脉冲输出, 并进行了初步的参量研究。

本文讨论轴向引导磁场在约束强流电子束及磁共振增强激光增益这两方面的作用, 介绍强磁场测试结果及有关的激光器初步参量的研究成果。

二、轴向引导磁场主要参数的确定

考虑真空中的实心电子束(图1), 如果

没有轴向引导磁场 B_0 , 则由空间电荷电场引起的径向外斥力 eE_r 总是大于电子束自磁场 B_0 引起的箍缩力 $e\beta_z B_0$,

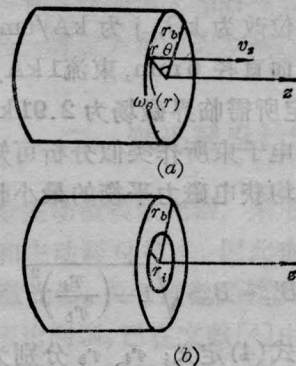


图1 实心(a)及空心(b)圆柱电子束及圆柱坐标示意图

收稿日期: 1985年10月24日。

$$e(E_r - \beta_z B_\theta) = \frac{\omega_p^2 r_b}{2\gamma_z^3} > 0 \quad (1)$$

其中 $\omega_p \equiv \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}$ 为等离子体频率, n 为空间电子密度, e 为电子电荷, m 为电子静止质量; r_b 为电子束半径; $\gamma_z \equiv 1/\sqrt{1-\beta_z^2}$, $\beta_z \equiv v_z/c$, v_z 为电子的轴向速度。

可见为获得准直的电子束必须施加轴向约束磁场 B_0 。在图 1 场合, 设电子密度 n 及电子轴向速度 v_z 是恒定值, 且 v_z 远大于圆速度 $\omega_c \cdot r$, 即 $\gamma_z \approx \gamma$, 则坐标 r 处电子受到的离心力 $\gamma \omega_c^2(r)$ 及静电库仑力 $1/2 \omega_p^2$ 将必须与轴向磁场约束力 $\omega_c \cdot \Omega$ (其中 $\Omega = eB_0/mc$) 及束自磁场约束力 $\frac{1}{2} \beta_z^2 \omega_p^2$ 平衡:

$$\gamma \omega_c^2(r) + \frac{1}{2} \omega_p^2 = \omega_c \Omega + \frac{1}{2} \beta_z^2 \omega_p^2 \quad (2)$$

由此易知各处电子回旋圆频率均相等:

$$\omega_c = \frac{\Omega}{2\gamma} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\omega_p^2}{\gamma \Omega^2}} \right) \quad (3)$$

显然, 为获得电磁力平衡的电子束 (即使 (3) 式有意义) 必须 $2\omega_p^2 < \gamma \Omega^2$, 亦即轴向磁场 B_0 必须大于临界值 B_{cr}

$$B_{cr} = \left(\frac{8\pi j m c}{e \beta_z \gamma} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中 B_{cr} 单位为 Gauss, j 为电子束流密度 (静电制电荷/cm²·s)。在我们的条件下 ($\gamma = 2$)

$$B_{cr} = 1.55 \sqrt{j} \quad (4')$$

其中 B_{cr} 单位改为 kG, j 为 kA/cm²。

设束截面直径 6 mm, 束流 1 kA, 由 (4') 易知, 束稳定所需临界磁场为 2.91 kG。

对空心电子束所作类似分析可知, 使束内各处电子均获电磁力平衡的最小临界磁场值 B'_{cr} 为

$$B'_{cr} = B_{cr} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r_i}{r_b} \right)^2} \quad (5)$$

式中 B_{cr} 由式 (4) 定义; r_i 、 r_b 分别为空心束内、外径。由 (5) 式不难看出, 当束变薄且贴近壁面时, 空心束的临界磁场将大为减小。

设 $\gamma = 2$, 束内、外径分别为 14、16 mm,

束流 1 kA, 由 (5) 易知束稳定所需临界磁场为 1.1 kG, 减小的原因除了 (5) 中的因子外还由于此时面积比实心束增大 1.67 倍, 束流密度相应减小。

激光增益 α 近似正比于电子横向速度 v_\perp 及因子 ψ , 其中

$$v_\perp = \Omega_w v_z / (\Omega - \gamma k_w v_z) \quad (6)$$

$$\psi = \{1 - \Omega \gamma_z^2 v_\perp^2 / [(v_z^2 + v_\perp^2) \Omega - \gamma k_w v_z^2]\}^{1/4} \quad (7)$$

式中 $\Omega_w \equiv eB_r/mc$, B_r 为波荡场强; $k_w = 2\pi/\lambda_w$, λ_w 为波荡场周期; 其它定义同前。

由 (6)、(7) 式可见, 当引导磁场接近回旋共振条件 ($\Omega_{cr} = \gamma k_w v_z$) 时, v_\perp 及 ψ 急剧上升, 激光器增益上升。这从图 2 可清楚地看到。然而图 2 也表明, 过份靠近回旋共振点时, 激光频率 f_{TE} 大幅度下降, 将不再能获得预期的毫米波段辐射。而且此时电子横向速度 β_\perp 过份增大造成电子束热的不稳定性, 导致

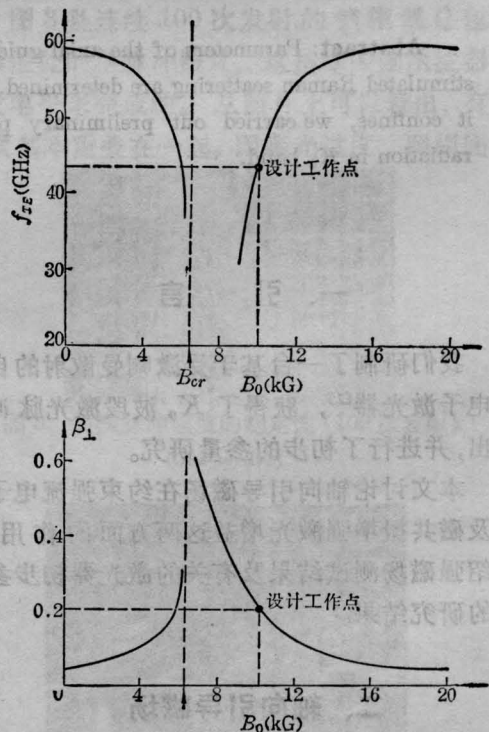


图 2 电子横向速度 β_\perp 及 TE_n 横向往激光耦合频率 f_{TE} 与引导磁场 B_0 的函数关系, 图中 B_{cr} 为回旋共振点

束的能散度急剧劣化, 将反过来使增益大幅度下降。为此, 选定设计工作点在 $B_0 = 10 \text{ kG}$ 处(图 2), 此时相应的激光波长为 6.91 mm (K_0 波段), 相应 $\beta_{\perp} = 0.211$ 。

由以上两方面综合考虑, 决定我们的引导磁场应在 $0 \sim 20 \text{ kG}$ 内可调。磁场轴向复盖范围应在 1 m 以上(复盖整个波荡场)。

三、测试及实验结果

对按上述要求绕制的线包(中国科学院合肥等离子体研究所绕制)进行了测试。用 $\phi 0.24 \text{ mm}$ 的漆包线绕制的测试小线圈平均直径 $\phi 5 \text{ mm}$, 共 50 匝。测得磁场微分信号 (dB_0/dt) 经由自制的 Miller 积分器积分后在示波器上显示。典型的波形如图 3 所示。可看出到达最大值的时间为 8 ms , 与按 RC 回路计算出的结果相等。沿轴向移动测得的结果如图 4 所示。可见不但在整个自由电子激光工作区域(从波荡场入口到波荡场出口)都有很平稳的引导磁场复盖(偏差 $< 5\%$),

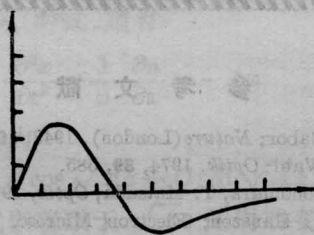


图 3 实测的引导磁场波形

(时间轴 5 ms/div , 纵轴 3.6 kG/div , 条件: 电容器充电 1500 V , 在引导磁场线包中点轴线上测得)

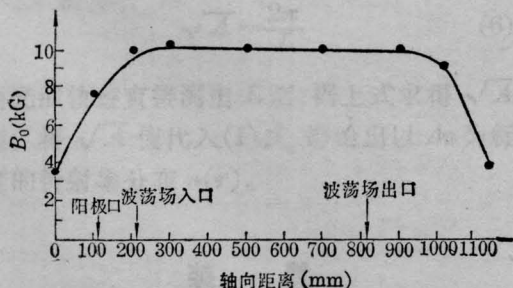


图 4 实测引导磁场沿轴向(Z 向)分布(电容器电压 1500 V , 在线包中轴线上测得)

而且在二极管内也有相当强的引导磁场复盖, 从而满足了磁场浸没型二极管的设计要求^[3]。

图 5 显示了引导磁场值 B_0 与冲击电流发生器中电容器上充电电压的关系。可看出实测值与 LCR 回路理论计算值 ($B_0 = 6.06 \cdot V_{\text{充电}}$) 符合得很好。

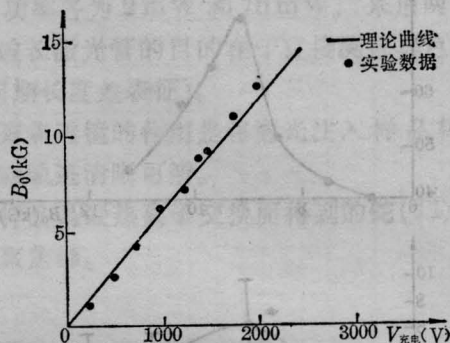


图 5 轴向引导磁场与电容器充电电压的关系(在引导磁场线包中点轴线上测得)

使用这只引导磁场线包, 获得了高度准直的电子束。典型的远场打靶像示于图 6。由图 6 可看出, 在 9 kG 的磁场约束下, 1 m 远处的电子束截面仍保持入口处尺寸 ($\phi 6 \text{ mm}$), 可以说基本上是二极管出口的 $1:1$ 映射, 仅在个别地方略微扩大了 0.1 mm 左右。



图 6 引导磁场 $B_0 = 9 \text{ kG}$ 时

实心电子束远场打靶像

(条件: 二极管出口内径 $\phi 6 \text{ mm}$; 靶距二极管出口处 1 m 远。照片比实物放大一倍)

这两种电子束在引导磁场配合波荡器的泵浦下, 均获得了自由电子激光输出(相干超辐射放大模式)^[2]。二组典型的实验结果示于图 7。图 7 清楚地表明了轴向引导磁场 B_0 对输出激光能量的巨大影响, 在 $B_0 = 9 \sim 10 \text{ kG}$ 范围(相应铁环波荡场强 $B_w \approx 500 \text{ G}$) 辐射能量较高, 这与图 2 所示设计工作点符合。在此范围, 由一系列高通滤波器测得的

激光波长约为 8 mm (K_0 波段)。这与图 2 给出的理论值 (频率约 44 GHz) 符合。图 7 的其他工作参数是: 电子束能量 0.5 MeV, 束流 1 kA, 电子束持续时间 60 ns, 空心电子束截面外径 $\phi 16$ mm, 内径 $\phi 14$ mm; 漂移管内径 $\phi 20$ mm, 铁环波荡器共 26 个周期, 其周期长 22.5 mm, 全长 585 mm; 辐射由增益为

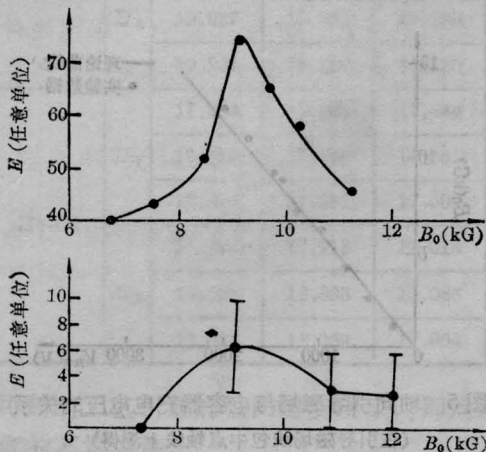


图 7 引导磁场 B_0 对激光输出能量 E 的影响
(条件: 上方, 空心电子束, 下方: 实心电子束;
采用铁环波荡器泵浦 (周期 22.5 mm))

13 dB 的喇叭输出, 由 H 面扇形喇叭接收, 经 3 m 长 K_0 波段标准波导管输入屏蔽房测试辐射脉冲的频谱及时谱; 由炭斗量热器测试激光能量。

将引导磁场置于最佳值 (9 kG) 处, 获得的较好结果的一组典型值为: 能量 13 mJ, 脉冲半高宽 25 ns, 平均功率 0.5 MW, 瞬时电子效率 0.1%, 波长约 8 mm (K_0 波段)。

引导磁场线圈是由中国科学院合肥等离子体研究所施嘉标、潘引年、王伟同志设计绕制的; 此外, 本工作是在王之江教授指导下进行的。作者对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 褚成等;《中国激光》, 1985, 12, No. 12, 767.
- [2] R. H. Jackson *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, **QE-19**, 346.
- [3] 褚成等;《中国激光》, 1985, 12, No. 6, 330.
- [4] S. H. Gold *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **52**, 1218.
- [5] S. H. Gold *et al.*; *Phys. Fluids*, 1984, **27**, 746.
- [6] J. A. Pasour *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**, 1728.

(上接第 26 页)

如果采用其他方法能够测出两条等厚线之间的厚度增量, 那么采用上述方法, 就可以测定物体的内电势。

2. 本实验中采用的 MgO 单晶, 其颗粒的线度约为 80.0 nm, 因此在这里讨论分辨率似乎没有意义。

参 考 文 献

- [1] D. Gabor; *Nature* (London), 1948, **161**, 777.
- [2] H. Wahl; *Optik*, 1974, **39**, 585.
- [3] A. Tonomura, T. Matsuda; *Optik*, 1979, **53**, 143.
- [4] K. J. Hanszen; *Electron Microsc. Proc. Eur. Congr. 7th*, 1980, Vol. 1, 140.
- [5] 外村彰;《应用物理》, 1984, **53**, No. 8, 664.
- [6] 陈建文;《光学学报》, 1985, **5**, No. 3, 229.