

强流相对论电子束 (REB) 电子能量 径向分布的测量方法

李享生 李传胪

(应用物理系)

摘要 本文介绍一种 REB 电子能量径向分布的测量方法。利用 REB 电子轰击阳极靶产生的“厚靶”韧致辐射的零角度测量, 确定束电子能量的径向分布, 从而判断 REB 的居中性 and 能量的均匀性。

关键词 电子束, 能量分散, 韧致辐射、居中性、均匀性

分类号 TL541

REB 广泛地应用于电子束等离子体加热、自由电子激光、高功率定向微波和集团粒子加速等领域。在这些应用中, 对电子束的质量有严格要求, 比如, 自由电子激光要求电子束的能散度不大于千分之五, 高功率定向微波要求电子束的能散度小于百分之三。因此, 实验测量电子束能量分布的均匀性就是关键之一。利用束电子轰击阳极靶产生的“厚靶”韧致辐射的零角度测量, 可以确定束电子能量的径向分布, 从而判断电子束的居中性 and 能量的均匀性。

实验测量是在 81-7M-01 加速器上进行的。加速器的运行参数是: 二极管电压 $V_D = 0.75 \sim 0.90 \text{ MV}$, 二极管电流 $I_D = 100 \sim 160 \text{ KA}$, 束流脉冲半高宽 $\tau_D = 70 \text{ ns}$ 。

各种准直条件下的实验测量结果证明, 本实验测量方法是可行的, 并且具有简便灵活的特点。我们实验测量的数据点的几何分辨为 5mm。数据测量误差小于 10%。

1 物理原理

从真空二极管阴极发射的电子, 在二极管加速电压作用下, 沿二极管轴向飞向阳极或注入真空漂移管。由于二极管的几何结构和空间电荷效应等因素, 束电子能量有一个径向分布

$$E_e = E_e(r) \quad (1)$$

式中 r 是距二极管中心轴的垂直距离。

(1) 韧致辐射

REB 打在阳极靶上, 高能电子和靶物质的原子核库仑场非弹性碰撞产生电磁辐射——韧致辐射。碰撞电子的能量 $E_e = T + \mu$, T 是电子的相对论动能, μ 是电子的静止能量。产生的光子的能量为 K 。宏观平均数密度为 n_e 的单能电子, 其碰撞密度为 n_i 的离子, 单位体积产生的辐射强度 $I(k)$ 可表示为^[1]:

$$I(k) dk = n_e n_i v_e k \sigma(k, E_e) dk \quad (2)$$

其中 v_e 是电子速度, $\sigma(k, E_e)$ 是反应截面。韧致辐射有一角分布, 当电子能量为相对论性时, 其截面

* 1990年12月28日收稿

的角分布可表示为^[1]：

$$\sigma(k, E_e, \theta) dk dE_e d\theta = \frac{A k d E_e d\theta}{[\theta^2 + \mu^2/E_e^2]^2} [\ln(1 + \frac{\theta^2 \mu^2}{E_e^2}) + C] \quad (3)$$

其中 θ 是韧致辐射光子相对于入射电子方向的发射角。A 和 C 是 K 和 $\frac{K}{E_e}$ 的函数，但对某一确定位置而言，作用于该位置上的电子能量是不变的，因而 A 和 C 可以看作只与 K 有关。

(2) $E_e(r)$ 的测量

当进行零角度韧致辐射测量时， $\theta=0$ ，从 (3) 式可以看出：

$$\sigma(K, E_e) = B(k) E_e^2 \quad (4)$$

其中 $B(K) = \frac{CA}{\mu^2}$ ，(2) 式可改写为

$$I(k) dk = n_e n_e v_e E_e^2 B(K) dk \quad (5)$$

对韧致辐射剂量而言，它是在电子束脉冲时间内的电子数的总和与靶相互作用的反映，同时，韧致辐射是连续谱。为此，对 (5) 式进行时间和光子能量积分，就可求得韧致辐射的剂量 $D(r)$ (Gy)：

$$D(r) = G \int \int I(K, r) dk dt = G n_e N_e(r) E_e^2(r) \int B(k) dk \quad (6)$$

其中 $N_e(r)$ 是打到 r 处靶上被测点单位面积上的 REB 的总电子数，G 是能量剂量转换因子。若能量单位 MeV，剂量单位 Gy，则 $G = 2.17 \times 10^{-10}$ 。以沿中心轴线运动的电子与靶相互作用产生的韧致辐射剂量为归一化量，则有

$$\frac{D(r)}{D(0)} = \frac{G n_e N_e(r) E_e^2(r) \int B(k) dk}{G n_e N_e(0) E_e^2(0) \int B(k) dk} = \frac{N_e(r) \cdot E_e^2(r)}{N_e(0) \cdot E_e^2(0)} \quad (7)$$

其中 $N_e(0)$ 是沿中心轴线打到靶单位面积上的总电子数， $E_e(0)$ 是沿中心轴线打到靶上的电子能量， $E_e(r)$ 是 r 处打到靶上被测点的电子能量， $D(0)$ 是中心轴靶的被测点的零角度韧致辐射剂量， $D(r)$ 是半径 r 处靶的被测点的零角度韧致辐射剂量。从 (7) 式可得：

$$\frac{E_e(r)}{E_e(0)} = \left[\frac{N_e(0)}{N_e(r)} \cdot \frac{D(r)}{D(0)} \right]^{1/2} \quad (7')$$

2 实验装置

实验装置几何结构示意图如图 1 所示，探头结构（不含阴极）如图 2 所示。装置中各组件情况：

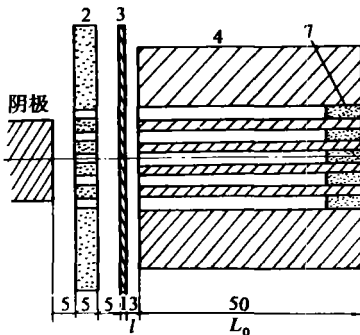


图 1 实验装置几何结构示意图

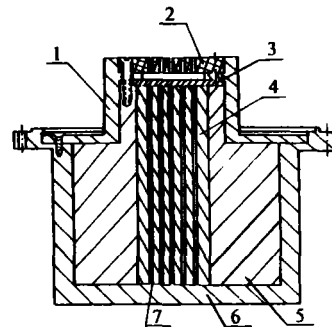


图 2 探头结构示意图

- 2——石墨准直器，3——阳极靶，
4——铅准直器，7——剂量元件

(1) 阴极。φ18~20mm 不锈钢实心柱状阴极。

(2) 石墨准直器。用来对电子束进行准直，采用高密度石墨，三种规格，即多孔准直，单孔准直和不加准直，其中多孔准直可以保证束电子正交入射到阳极靶上。石墨准直器厚 5mm。准直器的具体尺寸见图 3。

$$(3) \text{ 阳极靶。对于薄靶韧致辐射，其总截面为 } \sigma(\kappa, E) = \sigma_0 \frac{T + \mu F}{KT} \quad (8)$$

其中 $\sigma_0 = 0.58 \times 10^{-27} Z^2 (\text{cm}^2/\text{核})$ ， Z 为靶物质的原子序数， $F = F(K/T, E)$ 。“厚靶”韧致辐射强度由“薄靶”韧致辐射积分给出。可见，选用高 Z 物质做靶材料比较适宜。入射电子同靶物质相互作用还有一个重要的效应——电离和激发。辐射和电离的能量损失之间有如下近似关系：

$$\frac{(dE/dx)_{\text{辐射}}}{(dE/dx)_{\text{电离}}} = \frac{EZ}{1600m_0c^2} = \frac{EZ}{800} \quad (9)$$

其中 m_0 是电子的质量， c 是光速。两种效应能量损失相等的临界能量 E_c 为

$$E_c = \frac{800}{Z} (\text{MeV}) \quad (10)$$

表 1 给出不同物质的临界能量 E_c 。对于一定能量的电子，要选用利于产生韧致辐射

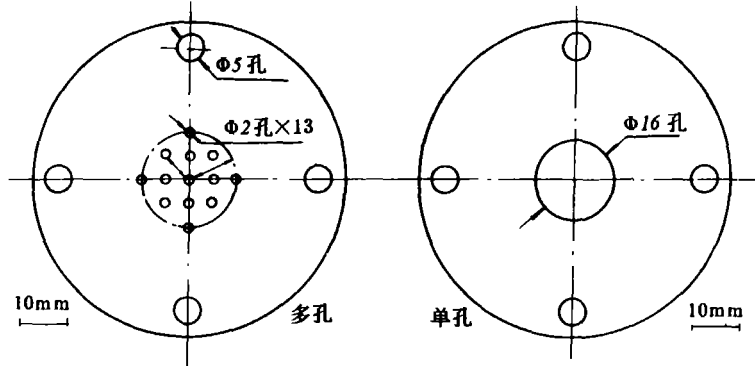


图 3 石墨准直器

的材料，即选用 E_c 小的材料，所以石墨(C)不适合。还要考虑靶材料对韧致辐射 x 射线的自吸收，故铅也不适合。我们选用铝和不锈钢(Fe)作为阳极靶材料。靶的厚度选为等于或稍大于电子在靶物质中的平均射程。对于 $T = 0.5 \sim 1.0 \text{ MeV}$ 的束电子，铝靶厚 0.548 g/cm^2 ，铁靶厚 0.613 g/cm^2 。

(4) 铅准直器。铅准直器是保证韧致辐射的零角度测量。其准直

孔的几何分布同多孔石墨准直器，所不同的是孔径是 $\phi 3 \text{ mm}$ ，长为 50 mm 。采用铅锡合金以提高机械硬度，铅的含量应保证在 70% 以上。准直孔的立体张角 $2.2 \times 10^{-3} \text{ Sr}$ 。

(5) 热释光测量元件。氯化铊镁铜磷热释光探测器， $\phi 4 \times 0.5$ 片剂和 $\phi 3 \times 8$ 粉剂，线性范围 $10^{-7} \text{ Gy} \sim 12 \text{ Gy}$ ，能量响应(对 $30 \text{ KeV} \sim 3 \text{ MeV}$ 的光子)小于 20%，均匀性小于 5%。

(6) 量程估算。一个电子正交入射的韧致辐射强度为 $\frac{dI}{d\Omega}(T, \theta)$ (T, θ)，由 Dance^[2]等实测的相应曲线中查找。热释光剂量元件接收的韧致辐射的总能量 E 为

$$E = \frac{dI}{d\Omega}(T, \theta) \cdot d\Omega \cdot n_e (\text{MeV}) \quad (11)$$

其中 $n_e = I_0 \cdot \tau_D \cdot S/e$ ， S 为铅准直孔的截面积。将 E (MeV) 换算成剂量 D (Gy)

$$D(\text{Gy}) = 2.17 \times 10^{-10} E(\text{MeV}) \quad (12)$$

3 数据处理与结果分析

3.1 $Ne(r)$ 的分布

对于 REB，一般考虑三种典型的电子密度分布：Kapchinskij-Vladimirskij 分布(几何空间的均匀分布)、Waterbag 分布(相空间的均匀分布或几何空间的抛物型分布)及高斯分布

$$(1) \text{KV 分布} \quad N_e(r) = \begin{cases} N_e(0) & 0 \leq r \leq R_c = 10\text{mm} \\ 0 & r > R_c \end{cases} \quad (13)$$

其中 R_c 为二极管阴极半径。但是，由于未加导引磁场，电子束是发散的^[3]， $N_e(r)$ 不满足 KV 分布。

(2) WB 分布

$$\text{一般应是抛物拱形分布，即} \quad N_e(r) = N_e(0) \left(1 - \frac{r^2}{R_c^2}\right) \quad (14)$$

当 $r = R_c$ 时， $N_e(R_c) = 0$ ，这同实验测量结果不符，因此 $N_e(r)$ 的分布也不满足 WB 分布。

(3) GS 分布

$$\text{高斯分布，也就是指数平方律分布：} \quad N_e(r) = N_e(0) e^{-r^2/R_c^2} \quad (15)$$

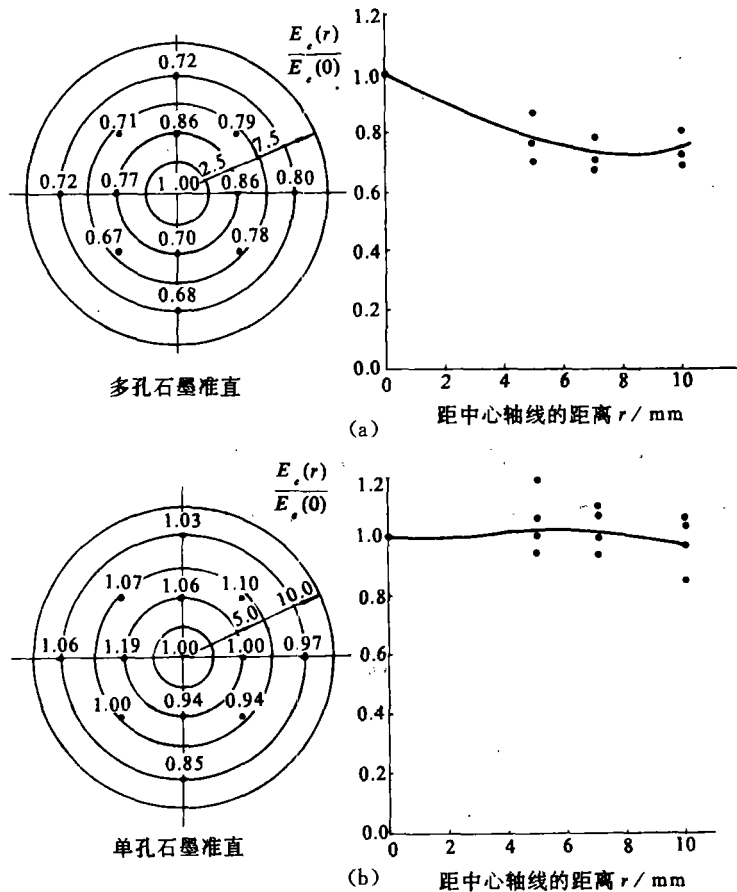
对于发散电子束，高斯分布是能较好地描述 $N_e(r)$ 的分布的。

对某一特定的阴阳极结构，也可以实验测出 $N_e(r)$ 的实际分布。H. A. Davis^[4] 曾对抛物面实心阴极，半径为 14cm 的半球面阳极，阴阳极间距为 5.5cm，电压 2.1MV，电流 40KA 的真空二极管实测到电流密度在束的 6cm 直径中心距内的 $N_e(r)$ 分布，均匀性好于 7%。

3.2 $E_e(r)$ 的分布

$$\text{若 } N_e(r) \text{ 为高斯分布，根据(7)式有} \quad \frac{E_e(r)}{E_e(0)} = \left[\frac{D(r)}{D(0)} \cdot e^{2r^2/R_c^2} \right]^{1/4} \quad (16)$$

各种石墨准直条件下的 $E_e(r)/E_e(0)$ 的分布见图 4。



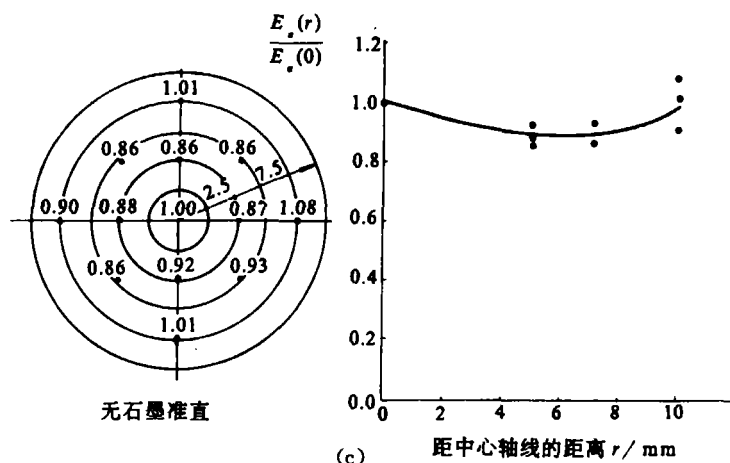


图4 三种石墨准直的 $E_e(r)/E_e(0)$ 的分布 $N(r)=N_e(0)e^{-r^2/R^2}$

从实测结果看,多孔石墨准直的 $E_e(r)/E_e(0)$ 分布明显反映出 REB 是发散的;单孔石墨准直的 $E_e(r)/E_e(0)$ 的分布,除两个奇异点外,在 $\pm 7\%$ 以内是均匀的;无石墨准直的 $E_e(r)/E_e(0)$ 的分布,其均匀性也好于 $\pm 10\%$ 。

参加实验工作的还有刘存华、谭启美、刘金亮、王勇等同志。

致 谢

作者感谢学部委员程开甲教授、乔登江研究员审阅初稿并提出宝贵意见,还感谢刘永贵教授、王阔副教授、张亚洲副教授参与有益的讨论。

参 考 文 献

- 1 Heinz Knoepfel. Hard x-Ray Diagnostics For Fusion Experiment. X14610, 1975, 430
- 2 Rester D H, Dance w E. Phys. Rev 1967, 161 (85)
- 3 张亚洲, 李传庐, 席小雨. 强流脉冲电子束的发射度和亮度的测量. 强激光与粒子束. 1991 (1)
- 4 Davis H A. J Appl Phys. 1982, 53 (11): 7179

A New Measurement Method for Radial Distribution of REB Electron Energy

Li Xiangsheng Li Chuanlu
(Department of Applied Physics)

Abstract

This paper provides a new measurement method for radial distribution of the REB electron energy. The zero angle measurement of the thick target bremsstrahlung produced by the REB bombarded anode target can be used to determine the electron energy radial distribution, and to judge the REB medial property and the energy even distribution.

Key words electron beams, energy dispersion, bremsstrahlung, medial property, even property