

# 超热电子在非均匀磁场中的运动轨迹<sup>\*</sup>

苍宇<sup>1)</sup> 张杰<sup>1)</sup> 邱阳<sup>1)</sup> 张军<sup>1)</sup> 彭练矛<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080

<sup>2)</sup>中国科学院物理研究所电子显微镜实验室,北京 100080

(2001 年 8 月 8 日收到,2001 年 8 月 21 日收到修改稿)

在电子磁谱仪中实际的磁场强度分布是不均匀的,这就造成电子束在探测器上的位置和分布与均匀磁场假设下的结果的不同.根据实验测出的磁谱仪实际的磁场分布对磁谱仪中电子束的轨迹进行了研究.

关键词:电子磁谱仪

PACC:5250J,5225

## 1. 引言

在飞秒激光与固体靶相互作用的过程中,靶通过各种机理吸收激光能量,产生高温高密度的等离子体,其中一部分超热电子将会在激光与等离子体的相互作用过程中得到加速而出射,这些出射电子的能谱和空间分布等在一定程度上反映了等离子体的状态.电子磁谱仪由于可以对电子能量进行绝对测量,加之其能量分辨率不随能量变化,在低能区域仍能保持良好的分辨率,故被广泛地应用于电子能谱的测量.电子磁谱仪作为对激光等离子体相互作用物理进行研究的一个有力的诊断仪器已被多个实验室所采用<sup>[1-4]</sup>.与高能离子测量法及硬 X 射线测量法等间接方法相比具有直接、准确等优越性.但是,实际中的电子磁谱仪中的磁场分布都是非均匀的.本文对超热电子在非均匀磁场中的运动轨迹进行了研究.

## 2. 电子在均匀磁场中的运动

通常假设电子磁谱仪里的磁场为均匀磁场,电子在磁场强度为  $B$  的磁场里的运动方程为

$$d(m\mathbf{v})/dt = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

式中  $m$  为电子的质量,  $\mathbf{v}$  为电子的速度,  $e$  为电子的电量,  $m$  不随时间改变,因此(1)式可以变形为

$$d\mathbf{v}/dt = -(e\mathbf{v} \times \mathbf{B})/m. \quad (2)$$

可见,电子在平行于  $B$  的方向上速度保持不变,作匀速直线运动.垂直于  $B$  的方向上有  $m\mathbf{v}_\perp^2 = ev_\perp B_\rho$ ,电子作匀速圆周运动.所以,在只有磁场的情况下,电子速度的大小保持不变,即动能守恒.当电子速度很高的时候,即必须考虑相对论时,  $m = m_0\gamma$ ,其中  $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ ,而在只有磁场存在的情况下,  $\gamma$  不变,方程(1)中的  $m$  仍不随时间改变,所以运动方程仍为方程(2),只是多了一个  $\gamma$  系数.

$$d\mathbf{v}/dt = -(e\mathbf{v} \times \mathbf{B})\gamma m_0. \quad (3)$$

其解为

$$\dot{\mathbf{v}}_\parallel = 0,$$

$$\dot{\mathbf{v}}_\perp = -e\mathbf{v}_\perp \times \mathbf{B}/\gamma m_0.$$

垂直于  $B$  的  $xy$  平面上是以半径为  $\rho = rm_0 v_\perp / eB$ , 频率为  $\omega = v_\perp / \rho = eB / rm_0$  的圆周运动.电子动能  $E$  (keV) =  $mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 [\sqrt{(eB\rho/m_0c)^2 + 1} - 1]$  =  $511 \{ [34.4(B_\rho)^2 + 1]^{1/2} - 1 \}$ ,其中  $B$  的单位为 T,  $\rho$  的单位为 cm.取磁场  $B$  的方向为  $z$  方向,发散角为  $\theta$  的单能电子束如图 1 所示.均匀磁场( $B = 0.037\text{T}$ )内,相同能量,相同发散角  $\theta$  角,不同  $\alpha$  角的电子的空间轨迹图见图 2.

从图 2 我们清楚地看到,相同能量,相同发散角的电子会聚焦在相同的  $x$  位置.这个规律被称为聚焦原理.利用这个原理工作的磁谱仪被称为半圆聚焦谱仪.它最重要的优点是对不同能量的电子聚焦后的焦点位置处于同一平面( $xz$  平面)上,在此处安排记录系统就相当于一台多道电子谱仪.

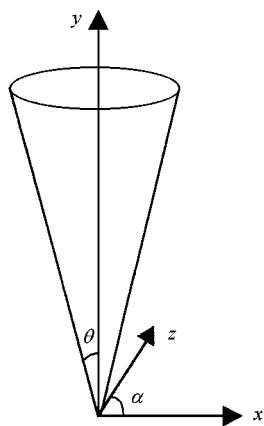


图 1 发散角为  $\theta$  的单能电子束示意图  $\alpha$  为电子在  $xz$  平面的速度分量与  $x$  轴的夹角,变化范围为  $0$  到  $2\pi$ .但由于  $\alpha$  在  $0-\pi$  的轨迹与  $\pi-2\pi$  的轨迹对于  $x$  轴对称,所以我们只讨论  $0-\pi$  区间,即研究位于  $xz$  平面第一象限的落点.同时我们定义  $\alpha$  从  $0-\pi/2$  为正入射,从  $\pi/2$  到  $\pi$  为负入射

由图 2 可见,  $\alpha = 3\pi/4$  落在与  $\alpha = \pi/4$  相同的  $x$

坐标处,但更大  $z$  的位置上.原因是前者落到  $xz$  平面所花的时间长,所以在  $v_z$  相同的情况下,在  $z$  方向位移得更大.

同时,由不同发散角  $\theta$  的电子束落点可见,以  $\theta_{\max}$  为最大发散角的实心电子束的落点位于  $x = 2\rho$  到  $x = 2\rho\cos\theta$  的范围内,  $\rho = \gamma m_0 v / eB$ ,其中右边界  $2\rho$  是以  $0^\circ$  发散角入射的电子的落点,左边界  $2\rho\cos\theta_{\max}$  是以最大发散角入射的电子束的落点.

### 3. 电子在非均匀磁场中的运动

由于入射电子必须从磁谱仪的边界入射,而边界的磁场是不均匀的.这种不均匀的磁场分布可以通过测量得到.以我们目前自行研制的  $10-500\text{keV}$  的电子磁谱仪<sup>[5]</sup>为例,其具体的强度分布的一部分见表 1(其中强度单位为 T).

这里我们假设磁场只沿  $y$  方向不均匀,取  $x = 0$  位置的磁场强度.

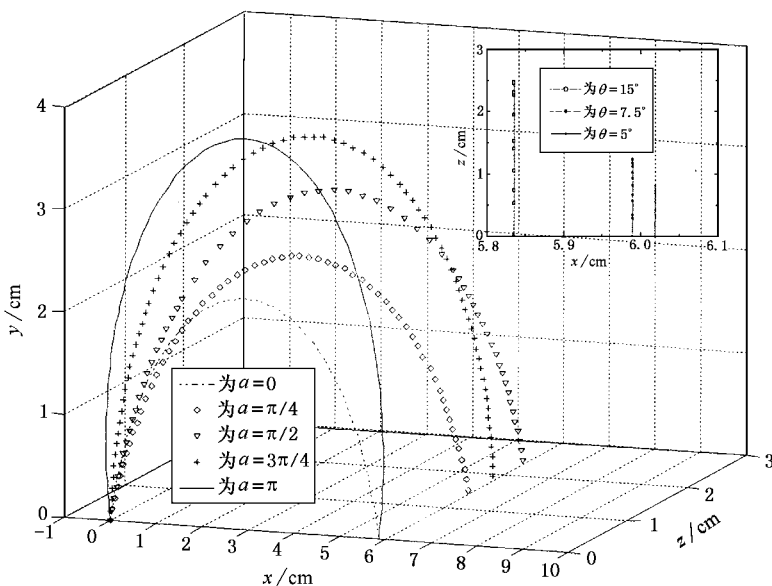


图 2 均匀磁场下  $\theta$  为  $15^\circ$ ,不同  $\alpha$  角的能量为  $100\text{keV}$  的电子空间轨迹以及不同  $\theta$  角的落点

表 1

$Y/\text{cm}$	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10
$B/\text{T}$	0.0025	0.0262	0.0348	0.0375	0.0375	0.0378	0.0378	0.0379	0.0379	0.0379

该磁场分布下,发散角为  $15^\circ$ ,不同  $\alpha$  角的能量为  $100\text{keV}$  的电子的空间轨道以及不同发散角时在  $xz$  平面的落点轨迹图见图 3.与图 2 对比发现,在非均匀磁场里,相同发散角的单能电子束不再满足聚焦原理.发散角为  $\theta$  的单能电子束在  $xz$  平面的落点

不再是一条垂直于  $x$  轴的线段,而是一个“椭圆形”,它的不对称性随发散角的增大而增大,并且反映出  $0 < \alpha < \pi/2$  区域的能量比  $\pi/2 < \alpha < \pi$  的能量更密集.所以如果在入射准直孔上设置一个光阑,挡住负方向入射的电子就可以大大的提高能量分辨率.我

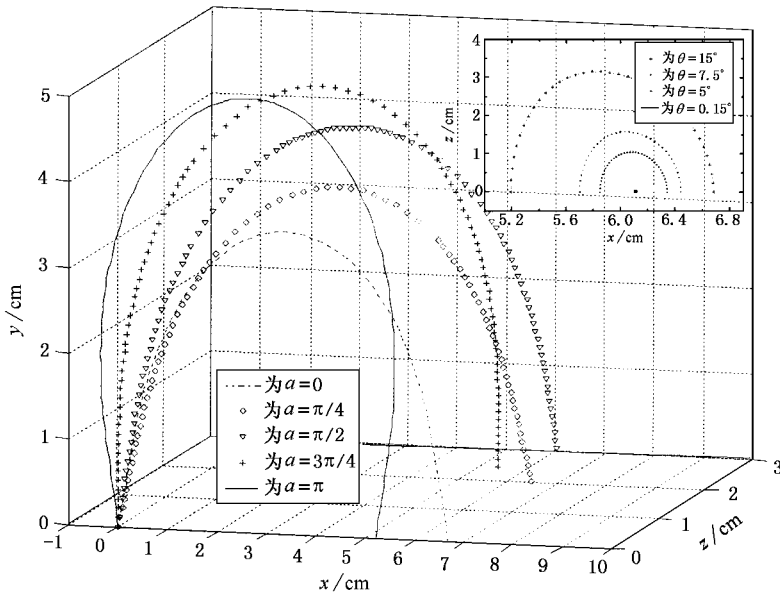


图 3 非均匀磁场下  $\theta$  为  $15^\circ$ , 不同  $\alpha$  角的能量为  $100\text{keV}$  的电子空间轨迹以及不同  $\theta$  角的落点

们还发现, 因为电子在该磁谱仪里运动所经的范围属递增的磁场, 正入射的电子会落在比负入射的电子更远的地方. 而在递减的磁场里, 正入射的电子会落在负入射的电子的左边, 只有均匀磁场时, 它们聚焦在同一个  $x$  的位置.

以  $15^\circ$  为最大发射角的实心单能电子束在  $xz$  平面的落点轨迹, 在  $xz$  平面的轨迹图不是一条条的聚焦线, 而是分布在以  $-\theta_{\text{max}}$  入射 (即  $\alpha = 180^\circ$ ) 的电子落点为左边界, 以  $+\theta_{\text{max}}$  (即  $\alpha = 0^\circ$ ) 入射的电子落点为右边界的范围内.

与均匀磁场时轨迹是以  $0^\circ$  入射的电子落点为右边界,  $+\theta_{\text{max}}$  入射的电子落点为左边界相比, 我们可以设想随着非均匀磁场逐渐趋于均匀磁场, 以  $+\theta_{\text{max}}$  入射的电子会逐渐逼近以  $0^\circ$  入射的电子, 这就使能量更加密集, 即大大提高了能量分辨率.

以  $100\text{keV}$  的电子为例, 以  $+15^\circ$  入射,  $y$  方向最高达到  $3.5156\text{cm}$ , 所以将  $y = 2\text{—}3\text{cm}$  之间的磁场改为  $0.375\text{T}$ , 结果发现确实提高了正入射电子的“聚焦”程度. 但是在以最大发射角正入射的电子与  $0^\circ$  发散角的电子重合之前, 小发散角的正入射电子早已跑到  $0^\circ$  电子的左边. 所以, 仍未实现完全的聚焦.

如果将上述两个方法结合, 我们既滤掉了以负方向入射的电子, 又使以正方向入射的电子与  $0^\circ$  入射的电子 (即沿  $y$  轴入射的电子) 最大地“聚焦”, 就可以得到非均匀磁场里很好的聚焦, 即很高的能量分辨率.

### 4. 实际实验设计

实际的磁谱仪设计由于考虑到靶室里的结构特点, 必须倾斜摆放准直孔, 即电子束的中心轴与  $y$  轴成一定夹角.

采用准直孔中轴位于  $xy$  平面, 与  $y$  轴分别成  $0^\circ, 7.5^\circ$  和  $15^\circ$  夹角, 电子束发散角都为  $1.02^\circ$ , 得到的  $xz$  平面的轨迹图见图 4.

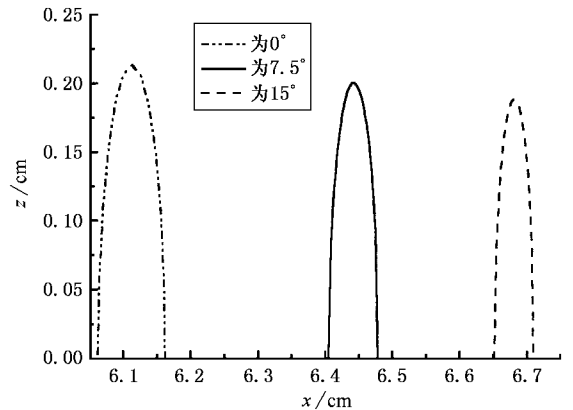


图 4 不同倾角相同发散角的单能电子束在  $xz$  平面的落点轨迹比较

由图 4 可见, 增大入射电子束中心轴与  $y$  轴的夹角, 能量分辨率会提高. 所以, 入射电子束的倾斜角要较大些. 我们采用倾斜角为  $15^\circ$ , 发散角为  $1.02^\circ$  的电子束.

实验中,我们将采用的电子束的能量范围为从 10 到 500keV.它们在聚焦平面上的落点分别由图 5 中的曲线所示.

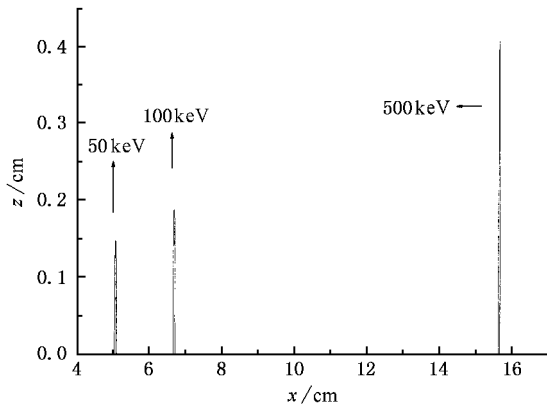


图 5 不同能量的电子在磁谱仪接收面的落点轨迹

## 5. 结 论

本文通过精确的计算模拟了电子在实际磁谱仪非均匀磁场下的运动轨迹,并对电子在均匀磁场与非均匀磁场中的运动轨迹进行了分析,得到了对提高非均匀磁场中电子运动能量分辨率有价值的结果,同时给出了我们实验中要测的能量范围为 10—500keV 的电子在我们设计的磁谱仪中的落点,为实验提供了很好的理论参考.

当然,与较成熟的均匀磁场模型相比,非均匀磁场模型还存在一些问题,如它无法给出能量分布的解析表达式,所以对能量分辨率也无法给出解析的求解公式,只能对特定能量进行特定分析.

- [ 1 ] Bastiani S, Risyse A *et al* 1997 *Phys. Rev. E* **56** 7179  
 [ 2 ] Malka G and Miquel J L 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 75  
 [ 3 ] Malka G, Lefebvre E and Miquel J L 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3314

- [ 4 ] Malka G, Fuchs J *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2053  
 [ 5 ] Chen L M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 592 ( in Chinese ) [ 陈黎明等 2000 物理学报 **49** 592 ]

## Study of the moving track of superhot electrons in an inhomogeneous magnetic field\*

Cang Yu<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)</sup> Qiu Yang<sup>1)</sup> Zhang Jun<sup>1)</sup> Peng Lian-Mao<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

<sup>2)</sup> *Laboratory of Electron Microscopy, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

( Received 8 August 2001; revised manuscript received 21 August 2001 )

### Abstract

The moving track of superhot electrons in an inhomogeneous magnetic field is studied in detail. It would be very useful for designing a magnetic spectrometer to study superhot electrons.

**Keywords** : electron magnetic spectrometer

**PACC** : 5250J, 5225

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 19825110 and 60078008 ) and by the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China ( Grant No. 863 - 416 ).