

# 砷化镓表面自旋极化光电子发射\* \*\*

周清 赵守珍 李育民 方兰 张黎明

(南开大学电子科学系, 天津)

**摘要** 本文详细地介绍了在圆偏振光作用下, NEA GaAs 表面发射自旋极化光电子的原理, 及 NEA GaAs 表面的制备和装置. 介绍了表面 Cs-O 激活的方法. 在用此法激活的 NEA GaAs(100) 表面上可得到灵敏度为  $8\mu\text{A}/\text{mW}$ , 极化度约用 35% 以上的光电子束. 发现清洁的 GaAs 表面覆盖以 50%—60%Cs 单原子层时, 光电子的发射出现第一个极大值, 同时发现稳定的发射取决于铯吸附量.

**关键词** NEA 光电发射; 自旋极化电子源; 圆偏振光

## 一、前言

1974年 Garwin 和 Pierce 等人从理论上提出如果用圆偏振光照射负电子亲和势 GaAs-Cs-O 表面, 会产生自旋极化的光电子束, 自旋极化度可达 50%<sup>[1]</sup>. 后来, Pierce 用圆偏振光照射 GaAs-Cs-O 的(110)面时, 得到了自旋极化的光电子束<sup>[2]</sup>. 通过 Mott 散射系统测量, 发现不但电子束的自旋极化方向严格地依赖于光的旋转方向, 而且光电子的极化度明显地依赖于光子能量. 当光子的能量在 GaAs 的  $\Gamma$  点阈值附近时 (即 1.6eV), 得到了极化度  $P = 40\%$  的光电子束. 光子能量达到了 3eV 和 3.2eV 时, 分别得到  $P = 8\%$  和  $P = -8\%$ . 1980 年 Pierce 又从 NEA GaAs 的(100)面得到自旋极化的光电束源, 极化度高达 40%, 束流达到  $20\mu\text{A}/\text{mW}$ <sup>[3]</sup>.

到目前为止, 已发现的极化电子束源不下十种, 但从品质因素来看, 都不如 GaAs 源好. 所以 GaAs 源受到人们的极大重视. 在不断提高它的品质因素的同时, 还积极开发它的用途. 现在它已用于磁性表面的结构分析, 即所谓极化低能电子衍射 (SPLEED) 系统<sup>[4]</sup>; 在高能物理领域作为极化电子源, 用于检验电磁作用中宇称不守恒原理和探索基本粒子的秘密; 在生物物理方面用于探索氨基酸旋向性的起源; 在分子物理中用于研究分子结构等.

## 二、NEA GaAs 光电发射自旋极化电子的基本原理

NEA GaAs 光阴极在自然光作用下发射的是非极化的(自然的)电子束, 这时 GaAs 价带电子的跃迁几率与电子的自旋态是无关的. 但在圆偏振光激发下, 跃迁几率与电子

\* 1987年9月29日收到, 1989年7月18日修改定稿

\*\* 国家自然科学基金会资助项目

的自旋态密切相关。为了说明这一点，先对 GaAs 的能带结构进行分析。从实验测量和理论计算知道，GaAs 正常的能带结构在  $\Gamma$  点 ( $K = 0$ ) 价带 P 态电子能级由于自旋-轨道耦合作用，分裂成两个简并的  $P_{3/2}$  和  $P_{1/2}$  能级，它们的能量差为 0.34eV。能级  $P_{3/2}$  包含有四重简并态 (见图 1)。图中不同的自旋态以不同的  $m_j$  值来表示。

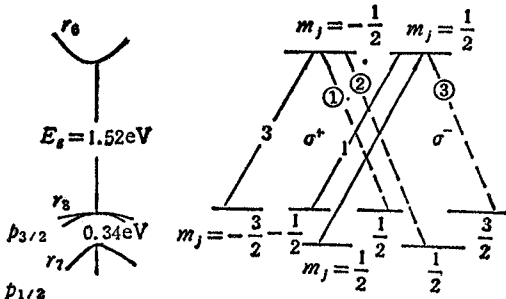


图 1 自旋-轨道耦合作用 GaAs P 态电子能级的分裂及  $\sigma^\pm$  光作用下不同自旋态电子跃迁路线

当入射光子的能量接近于 GaAs 的阈值时 ( $\hbar\omega = 1.52\text{eV}$ )，价带电子吸收了光子将在  $\Gamma$  点直接跃迁。从角动量守恒的原理考虑，电子跃迁的路线必须遵守下列选择定则：

- $\Delta m_j = 1$  对于右旋圆偏振光 ( $\sigma^+$ )
- $\Delta m_j = -1$  对于左旋圆偏振光 ( $\sigma^-$ )

根据这个选择定则，对于  $\sigma^+$  光激发，GaAs 价带电子可能的跃迁只能是 1、2、3，图 1 中以实线表示；而对  $\sigma^-$  光激发可能的跃迁只能是 (1)、(2)、(3)，图 1 中以虚线表示。这种跃迁由终态决定光电子的自旋态。利用下式可以计算在  $\sigma^+$  作用下自旋向下和自旋向上的跃迁几率比为：

$$R = \frac{\langle \phi_{f_1} | H_{int} | \phi_{i_1} \rangle}{\langle \phi_{f_2} | H_{int} | \phi_{i_2} \rangle} = \frac{\left| \left\langle \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right| X + iY \left| \frac{3}{2}, -\frac{3}{2} \right\rangle \right|^2}{\left| \left\langle \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right| X + iY \left| \frac{3}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \right|^2} = 3$$

式中，算符 ( $X + iY$ ) 表示右旋圆偏振光。上式结果表明， $\sigma^+$  光激发，当光子的能量在 GaAs 阈值附近时，GaAs-Cs-O 表面发射自旋向下的电子是向上的电子数目的三倍。因而，根据极化矢量的定义，极化矢量  $P$  为：

$$P = \frac{n_{\downarrow} - n_{\uparrow}}{n_{\downarrow} + n_{\uparrow}} = -50\%$$

$n_{\downarrow}$  和  $n_{\uparrow}$  分别表示自旋向下和向上的电子数目。必须指出，上式理论值仅当光子能量在阈值附近时才是正确的。因为随着光子能量的增加 (比如增大到 1.86eV)， $P_{3/2}$  能级上的电子也会发生跃迁，此时，始态  $\left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$  向终态  $\left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle$  的跃迁发射的电子自旋是向上的，这些电子将与  $P_{3/2}$  能级上发射的电子混合，使总发射电子的极化度下降。从以上讨论可以看出，圆偏振光旋转方向的改变，将使极化矢量发生 180 度翻转。利用这种方法，可以得到反向极化电子束源而不改变电子束的任何性质，这是此种电子束源的一个突出的优点。

### 三、实验装置

#### 1. 真空系统

真空系统和表面处理装置如图 2 所示，系统的真空度可达  $5 \times 10^{-10}$  mmHg 以上。真

空室为  $\phi 200 \times 500\text{mm}$  卧式圆筒, 筒上安装着五维样品架、离子枪、铯源及观察窗等。真空室内在样品架上装有 GaAs 样品及用于能谱分析的 LEED-Auger 系统。

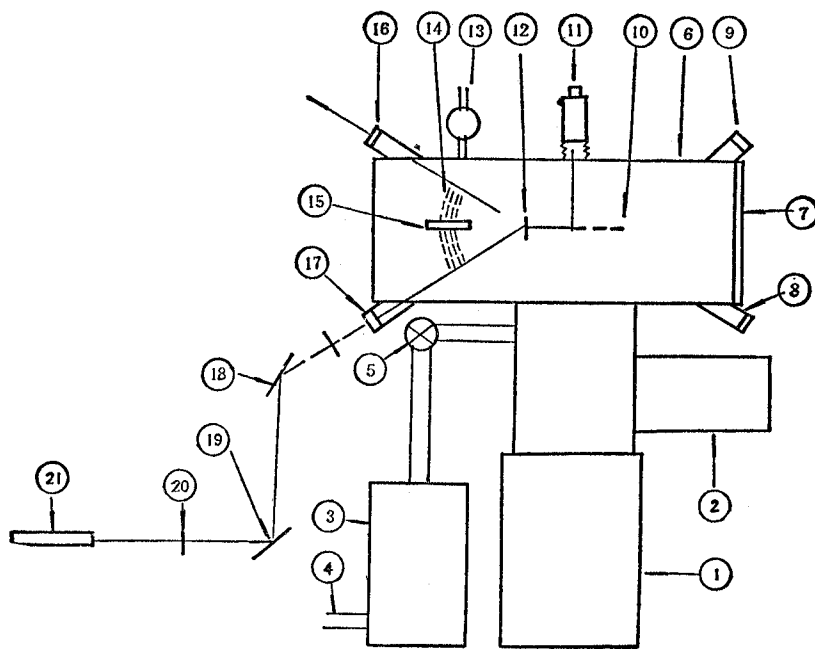


图2 NEA GaAs 极化光电子束产生装置图

(1) 溅射离子泵 (2) 钛升华泵 (3) 涡轮分子泵 (4) 涡轮分子泵出口 (5) 超高真空阀  
(6) 超高真空室 (7) 观察窗 ( $\phi 200\text{mm}$ ) (8) 四极质谱计 (9) 离子枪 (10) GaAs 样品旋转位置 (11) 样品台 (12) GaAs 样品 (13) 氧气输入口 (14) LEED-Auger 系统 (15) 同轴长漂移管电子枪 (16) 光束出口 (17) 激光束入射口 (18) 反射镜 (19) 反射镜 (20)  $1/4$  波长片 (21) 线偏振 He-Ne 激光器

## 2. 圆偏振光源

圆偏振光源由波长为  $0.6328\mu\text{m}$ 、功率为  $2\text{mW}$  的线偏振 He-Ne 激光器和  $\lambda/4$  波片组成。用  $\lambda/4$  波片是为了获得圆偏振光。 $\lambda/4$  片的平面与激光束垂直, 并用一个步进马达来控制它的旋转, 使光电子束极化矢量发生翻转。当  $\lambda/4$  片旋转时, 入射的线偏振光与波片光轴之间的夹角  $\theta$  随之发生变化, 出射光的性质也随之而改变。用这种方法, 只要改变  $\lambda/4$  片旋转角度就能使光电子束的极化矢量发生转向。入射激光束的线偏振度为  $99.9\%$ , 用此装置能得到  $99.3\%$  圆偏振度的光源。圆偏振光进入窗口前的光强为  $1.02\text{mW}$ , 窗口透过率为  $83\%$ 。

## 3. LEED-Auger 系统

LEED-Auger 系统是由四个半径分别为  $59$ 、 $61$ 、 $63$  和  $65\text{mm}$  的球面栅网和同轴长漂移管电子枪组成(见图 3)。系统的接收极半径为  $68\text{mm}$ 。它除了做接收俄歇电子用外, 还兼做低能衍射仪的萤光屏。因而, 要求它具有良好的导电性能, 又具有显示功能, 在制作上采用了特殊的制作方法。

同轴长漂移管电子枪的性能要求高, 它既要满足单色性的要求, 又要产生一高平行度

的电子束(非平行角 $<1^\circ$ ),长漂移管的设计见文献[5]和[6].

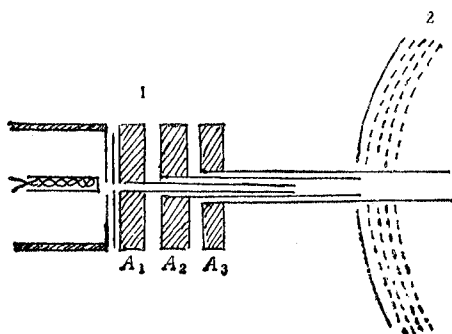


图3 LEED-Auger 系统

1. 表示长漂移管电子枪, 2. 四极栅分析器

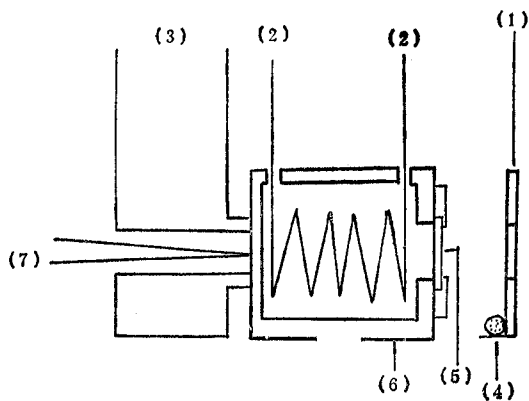


图4 热清洗及激活样品装置剖视图

(1) 收集极 (2) 加热丝 (3) 样品台 (4) 铯源  
(5) GaAs (6) 铜盒 (7) W-5Re/W-20Re 热偶

### 四、NEA GaAs 表面自旋极化光电子发射

负亲和势 GaAs 表面的获得和激活是激光发射自旋极化光电子束的关键.制备 GaAs 的负电子亲和势表面,第一步是获得 GaAs 的清洁表面,第二步是铯-氧交迭激活.

#### 1. GaAs 清洁表面的获得

使用 p 型 GaAs 样品,掺杂浓度为  $3.65 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ,表面积为  $5 \times 5 \text{mm}^2$ ,发射表面为(100)面.样品先进行严格的化学清洗,然后立即放入真空系统.化学处理后的样品表面还残留有碳和硫的污染.为了清除碳和硫,首先使用  $\text{Ar}^+$  离子轰击,  $\text{Ar}^+$  离子的能量为  $500 \text{eV}$ ,束流强度为  $3 \mu\text{A}$ .然后采用热剥离清洗技术,其装置如图4所示.将 GaAs 样品在加热的情况下进行剥离,剥离前后的 Auger 分析示于图5,在剥离后, S 和 C 峰都已消失.

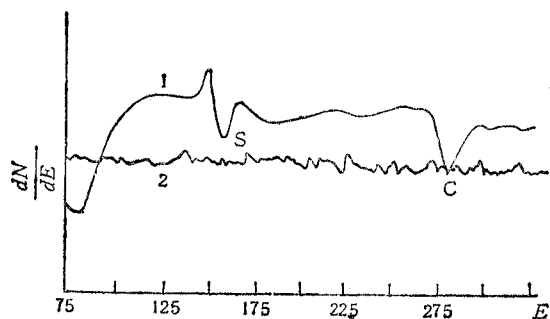


图5 表面在热剥离前后的Auger分析(1 剥离前, 2 剥离后)

#### 2. 铯-氧交迭激活

激活是在  $100^\circ\text{C}$  下进行的.激活中使用线状铯源,它被放在收集极上(见图4).通电流时,铯源就开始工作.当电流升到  $3.5 \text{A}$  时,就有足够量的铯原子从铯管中逸出,并覆盖于 GaAs 表面.打开氦氛激光器,并使圆偏振光照射在 GaAs 表面上.仔细观察一下光电子强度  $I_p$  与复盖时间  $t$  (等恒于铯量)之间的关系是有趣的.图6所记录的就是这样一条关系曲线.蒸铯开始一段时间(约 360 秒),没有光电子发射,以后逐渐加强

(AB 段),从 B 点开始发射量增加很快,并达到饱和的状态.从 M 点开始增加铯的复盖量,

带来的只是光电子发射量的减少。

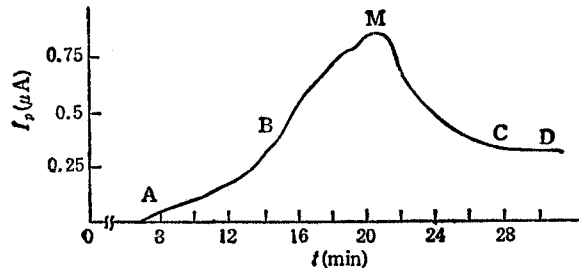


图 6 清洁的 GaAs 表面铯复盖光电子强度  $I_p$  与铯量(复盖时间  $t$ ) 的关系

采用铯-氧交迭激活,形成负亲和势表面,使表面的发射能力得到很大提高.当表面的发射量趋于饱和时,立即停铯,给系统通氧,其压强为  $2 \times 10^{-8}$  mmHg.此时,光电流也随之下降,当其降为原来的  $1/3$  时,立即停氧加铯,使发射量达到新的峰值.这样操作重复十多次,才能达到稳定的最大值,表 1 是一次实验的数据.

表 I 交迭激活发射最大值表

次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
最大光 电流 ( $\mu$ A)	0.86		2.1		2.5		2.9		3.2		3.3		3.4		3.4
		1.7		2.4		2.6		3.1		3.2		3.4		3.4	

从表中可以看出,交迭激活的峰值是逐步提高的,开始峰值上升较快,后面的较缓,最后趋于稳定值.

## 五、结果与讨论

(1) NEA GaAs 表面在圆偏振光(能量  $1.95\text{eV}$ )作用下发射自旋极化的光电子的产额取决于负亲和势表面的制备.在 Cs-O 复盖之前,需要一个清洁的 GaAs 表面.除了严格的化学清洗外,再用离子轰击热剥离技术是个可行的办法.对 GaAs(100) 面热剥离温度为  $660^\circ\text{C}$ .

(2) 制备的 NEA GaAs(100) 面在 He-Ne 激光的作用下,出现有效的光电发射,其光电子产额与铯的覆盖度有关,并存在着一个复盖度的最佳值.从图 6 可以得到最佳的复盖度约为  $0.5-0.6$  铯单原子层.

在实验中还发现,在 GaAs 表面过量铯覆盖之后,立即停铯,表面发射量逐渐回升,并几乎达到原来极大值之后,才逐渐下降(见图 7).这种现象是由于 GaAs 表面铯吸附的不稳定性造成的.在一个较大的缺少铯元素的系统中,样品表面的铯原子会脱附出来,使表面铯覆盖量处在适中的状态,光电子流回升,并达到极值,过此之后,就逐渐减小了.可见对这种发射体来说,要得到稳定的光发射,就得使铯原子稳定地吸附在 GaAs 表面,这就需要一个稳定的蒸铯源.至于铯脱附的机理还有待于更进一步研究.

(3) 在研究中使用的是圆偏振 He-Ne 激光束,实验测定其光电发射的灵敏度为

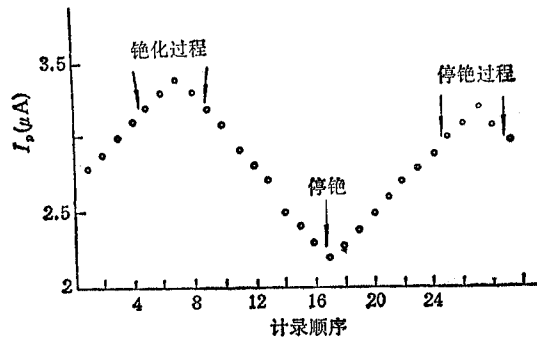


图7 加铯和停铯所引起的光电发射变化图。横坐标表示记录顺序，纵坐标表示光电子强度。

$8\mu\text{A}/\text{mW}$ ，由于该系统没有 Mott 探测装置，没有对极化电子束的极化度进行测量。但根据文献[3]、[7]所给的数据，此法所得的极化度仅依赖于所使用光子的能量。这里使用的光子能量为  $1.95\text{eV}$ ，估计极化电子束的极化度约为 35%。

本项研究得到陶兆民研究员、吴全德教授的指导和支持，得到中国科学院沈阳科仪厂和北京科仪厂的支持，协助加工设备，为研究工作创造了条件，在此一并给予衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] E. Garwin, D. T. Pierce et al., *Phys. Acta*, **47**(1974), 343.
- [2] D. T. Pierce, Felix Meier, *Phys. Rev.*, **B13**(1976) 12, 5484—5500.
- [3] D. T. Pierce et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **51**(1980) 4, 478—499.
- [4] J. Kessler, *Polarized Electrons*, Berlin, Springer, 1976.
- [5] 周清等, “真空科学与技术”, **7**(1987), 404—406.
- [6] 周清等, “真空科学与技术”, **8**(1988), 59—62.
- [7] B. Reihl et al., *Phys. Rev.*, **B19**(1979), 6358—6366.

## THE SPIN POLARIZED EFFECT OF PHOTOELECTRONS EMITTED FROM GaAs SURFACE

Zhou Qing Zhao Shouzhen Li Yuming Fang Lan Zhang Liming

(Nankai University, Tianjin)

**Abstract** The principle of the spin polarized effect of photoelectrons emitted from NEA GaAs surface which is irradiated by circularly polarized light is described in detail. The preparation of NEA GaAs surface and apparatus used also are mentioned. A photoelectron beam with sensitivity of  $8\mu\text{A}/\text{mW}$  and polarization of above 35% is obtained on the NEA GaAs (100) surface in the activation with caesium and oxygen. It is found that the first maximum emission occurs as the GaAs surface is caesiated in a monolayer of 50% to 60% and unstable emission is caused by desorption of caesium.

**Key words** NEA photoemission; Spin polarization electron source; Circularly polarized light