

# 超高真空条件下 NEA III - V 族半导体 光电阴极的工艺与性能的研究\*

王力鸣 张小秋 李晋闽 侯洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所 陕西西安 710068)

1991 年 3 月 4 日收到

## INVESTIGATION OF THE ACTIVATION TECHNIQUE AND THE CHARACTERISTICS OF NEA III - V SEMICONDUCTOR PHOTOCATHODES

Wang Liming, Zhang Xiaoqiu, Li Jinmin, Hou Xun

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Academia Sinica)

### Abstract

We report our investigation into the technique of the activation of NEA III - V semiconductor photocathodes and their photoemission characteristics. Firstly, the UHV system used is explained and the pressure is lower than  $8 \times 10^{-8}$  Pa. Then, the activation procedures are given. The sensitivity of  $550 \mu\text{A}/\text{lm}$  of a GaAs(Cs, O) photocathode is obtained. The InGaAsP cathode ( $E_g = 1.25 \mu\text{m}$ ) results in a quantum efficiency of 0.4% at a wavelength of  $1.06 \mu\text{m}$ . Three-photon photoemission effect of the GaAs(Cs, O) photocathode, under the irradiation of  $2.06 \mu\text{m}$  wavelength, ns pulse duration Er, Tm, Ho: YLF laser, is investigated. The data measured at liquid nitrogen temperature fits into the data at room temperature demonstrate that the thermal emission maybe negligible comparing to the three-photon photoemission.

Key words: UHV system, GaAsP(Cs, O) photocathode,  $1.25 \mu\text{m}$  InGaAsP(Cs, O) photocathode, Three-photon photoemission.

### 摘 要

介绍对 GaAs 及  $1.25 \mu\text{m}$  InGaAsP III - V 族半导体光电阴极的激活工艺及其性能的初步研究结果。全部采用国产超高真空系统,真空度优于  $8 \times 10^{-8}$  Pa。在真空系统中激活的 GaAs(Cs, O)光电阴极的积分灵敏度约为  $550 \mu\text{A}/\text{lm}$ , InGaAsP(Cs, O)光电阴极在  $1.06 \mu\text{m}$  处的量子效率为 0.4%。用  $2.06 \mu\text{m}$  波长(禁带宽度  $E_g = 1.25 \mu\text{m}$ )、ns 量级脉宽的 Er, Tm, Ho: YLF 激光作激发源在 GaAs(Cs, O)光电阴极中实现了三光子光电发射。在液氮温度下测得的数据与室温下测得的数据相吻合,证明热发射相对于三光子光电发射可以忽略。

关键词:超高真空系统 GaAs(Cs, O)光电阴极  $1.25 \mu\text{m}$  InGaAsP(Cs, O)光电阴极 三光子光电发射

## 1 引言

负电子亲和势(NEA) III - V 族光电阴极以其优越的特性已经并正在军事、技术和科学研究中得到应用<sup>[1]</sup>。以 NEA GaAs 光电阴极为标志的第三代象增强器已经商品化<sup>[2]</sup>。尽管如此,阴极中包含的一些物理过程的机理仍未完全搞清楚,因此,对于 NEA 光电阴极特性的研究,一直

\* 本课题为国家自然科学基金资助项目

在不断进行着<sup>[3]</sup>。

我们设计了一套超高真空系统,并在其中对 GaAs(Cs,O)和  $1.25\mu\text{m}$  InGaAsP(Cs,O)光电阴极的光电发射特性进行了研究,还对 GaAs(Cs,O)光电阴极中的多光子光电发射特性进行了研究。本文报导这套超高真空系统的情况,在此系统中对 GaAs(Cs,O)光电阴极、 $1.25\mu\text{m}$  InGaAsP(Cs,O)光电阴极进行激活的情况,原位测试的结果,以及在 GaAs(Cs,O)光电阴极中的三光子光电发射的部分研究结果。

## 2 超高真空系统

为了在 III-V 族半导体单晶表面沉积 Cs、O 原子层,使表面能带弯曲而形成负电子亲和势的表面状态,晶片表面必须达到“原子级洁净”,其先决条件是要有  $10^{-8}\text{Pa}$  以上的超高真空环境。为达到这样的超高真空环境,采用国内定型生产的真空泵,设计、加工、调试了一套超高真空系统,其结构如图 1 所示。系统采用中科院科仪厂生产的 450L/s 涡轮分子泵机组作为预抽级,用上海真空泵厂生产的 300L/s 的溅射离子泵作为主泵,用中科院科仪厂生产的 50L/s 溅射离子泵作为终级泵,最终 B-A 规测得的真空度达  $8\times 10^{-8}\text{Pa}$ 。由于真空室的最高真空度最终是由 50L/s 的小泵的作用而达到,而测量用 B-A 规在真空室与 300L/s 大泵管路的支路上(见图 1),因而真空室内的实际真空度比测量到的真空度高。在此真空度条件下,得到了激活良好的 III-V 族半导体光电阴极表面,并对阴极的发射特性进行了研究。

另外,基于实验要求,在系统中加入一 U 型管,可以从大气向管内注冷却水、液氮等,以冷却阴极。

## 3 GaAs 光电阴极的激活及测量结果

### 3.1 装置情况

真空室内的装置配置情况如图 2 所示。样品经过适当的化学清洗后,马上装入真空室中。样品背面用 In 熔粘在 Mo 片上以使之与 Mo 片有良好的电接触和热接触。热清洁是通过在 Mo 片后的热子通电后产生的热辐射实现的。温度测量由紧压在样品表面的铂铑热电偶实现,其配置情况如图 3 所示。实验中使用情况表明:由于系统的热惯性小,对样品升降温都较迅速。铯

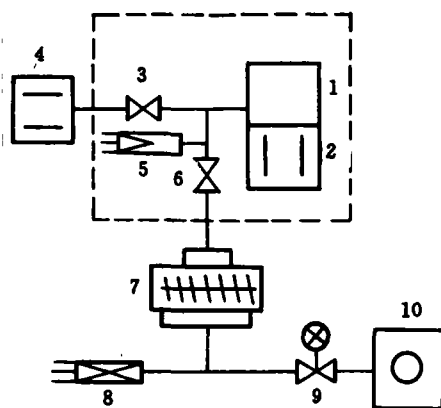


图 1 超高真空系统装置示意图

- 1——真空室; 2——离子泵(50L/s);  
3——超高阀; 4——离子泵(300L/s);  
5——B-A 规管; 6——超高阀;  
7——涡轮分子泵; 8——热偶规管;  
9——带放气电磁阀; 10——机械泵

Fig. 1 Scheme of the UHV system.

- 1——Vacuum chamber; 2——Sputter ion pump(50L/s);  
3——UHV valve; 4——Sputter ion pump(300L/s);  
5——B-A gauge; 6——UHV valve;  
7——Turbo-molecule pump; 8——Thermal couple gauge;  
9——Electromagnetic valve; 10——Mechanic pump

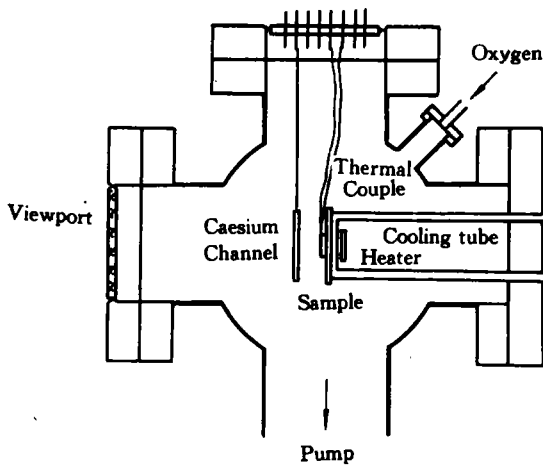


图2 真空室内装置

Fig. 2 The inner of the vacuum chamber

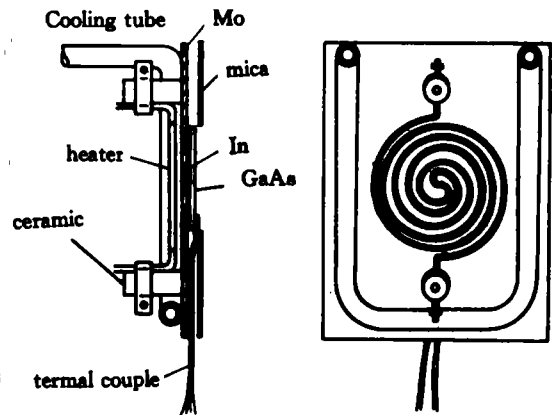


图3 样品、热电偶及热子等的配置

Fig. 3 The configuration of the support of the sample, heater etc

源由Ni管内装入铬酸铯和锆铝粉的混合物制成,当通电加热Ni管到约900℃时,纯铯原子从Ni管中游离出来并进入真空。氧源为直径约3.5mm、壁厚约0.27mm,长约150mm的银管用可伐、玻璃封接而成。当绕在其上的电热丝通电加热至600~700℃时,会有纯氧渗入。调节加热温度可以在一定范围内改变渗氧量。冷却管用于冷却阴极。使用的铯源是分子源,为充分利用这些游离铯,使用时把长约45mm的铯管弯曲成马蹄型,正对着阴极表面距阴极面约15mm。但这样存在的问题是,铯管对阴极片加热,如果不冷却,会使阴极片温度升到100℃以上,铯原子不易被阴极吸附。在激活中不断用伸入系统的U型管用水冷却阴极,以利于Cs在样品上的沉积。实验中发现,这种冷却对灵敏度的提高是十分有效的。在测量多光子光电发射效应时,为抑制热发射,用液氧将阴极冷却到约77K。

装好样品后,启动300L/s溅射离子泵,并烘烤系统375℃约72h,降温后对铯源、氧源及加热热子等充分去气。通常对铯源通电加热到刚出铯温度约1h;氧源加热到工作温度约4h;热子把样品加热到略低于清洁温度,保持6~8h。去气后再经约10h,系统的真空度通常可达 $1.3 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-8} \text{Pa}$  (B-A规测量数)范围,就可以对阴极进行激活了。

### 3.2 激活过程和结果

采用的GaAs样品为我所MOCVD装置外延生长的重P型掺杂GaAs外延片,掺杂浓度约 $7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,外延层厚度约3.5μm,少数载流子扩散长度约3μm,激活面为(100)方向。样品装入系统之前,用 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ 为5:1:1的混合液对样品进行几秒钟的清洗,以去掉表面的氧化层和污染物,然后用大量去离子水清洗,清洗后立刻把样品装入系统。激活前,先对表面进行清洁,用热子将阴极加热到580℃约1min,待温度接近室温时,开始进铯,同时监测光电流。当光电流达到最大值时停止进铯,然后暴露于氧,当光电流达到新的峰值时再进铯,如此反复,直到灵敏度最大值不再上升为止。

激活的GaAs光阴极的白光积分灵敏度约550μA/lm。由于阴极不能封离系统,GaAs光阴极的灵敏度的绝对标定带来了一定困难。对于白光积分灵敏度的测量,用已知积分灵敏度的多碱阴极在同样条件下比较其光电流大小而得到GaAs阴极的积分灵敏度。当然,由于两种阴极的光谱曲线不同,以及使用的激活灯和标准钨丝灯的光谱曲线不同等,都会给灵敏度的测量带来误差。

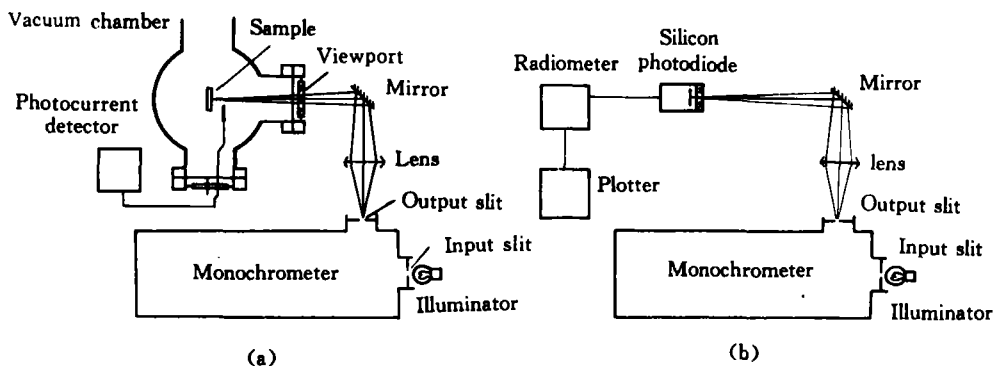


图 4(a) 反射式 GaAs 阴极光谱响应曲线的原位测量  
Fig. 4(a) The scheme of the in-situ measurement of spectral sensitivity of the reflective mode GaAs photocathode.

图 4(b) 照射到 GaAs 阴极上单色光的强度测定示意图  
Fig. 4(b) The scheme of the measurement of the intensity of the monochromatic light irradiated on the photocathode surface.

在原位测量了阴极的光谱响应曲线,测量装置情况如图 4(a) 所示。钨丝灯经过单色仪分光后从出射狭缝射出,经过透镜聚束后由全反镜反射到阴极面上,光电流由检流计检测,测量时记录光电流与入射光波长之间的函数关系。由于钨丝灯的光谱分布以及光学系统的光谱特性等都是未知的,因而还需对照射到阴极表面位置的单色光强——光谱分布曲线进行测量,测量装置如图 4(b) 所示。图中硅光二极管探头的位置与图 4(a) 中的阴极位置重合。光电流经过对光强度光谱分布曲线计算,以及经过对探头的光谱响应校正以后,得到激活后的 GaAs 光电阴极的光谱灵敏度响应曲线,如图 5 所示。图中还给出了通常标准的 NEA GaAs 光电阴极和一组 NEA GaInAs 光电阴极的光谱响应曲线,以便与我们的结果相比较。可以看到,我们激活的 GaAs 阴极与标准的 NEA GaAs 阴极的光谱响应曲线相比较,其一是前者灵敏度低;其二是前者随着波长增加,光谱灵敏度减小,而不象后者直到截止波长处仍有很高的光谱灵敏度。前者的光谱特性与窄带 GaInAs 的光谱响应曲线颇为类似。但无论如何,我们激活的 GaAs 光电阴极的长波阈已达到  $925\mu\text{m}$ ,可以认为是负电子亲和势光电阴极。

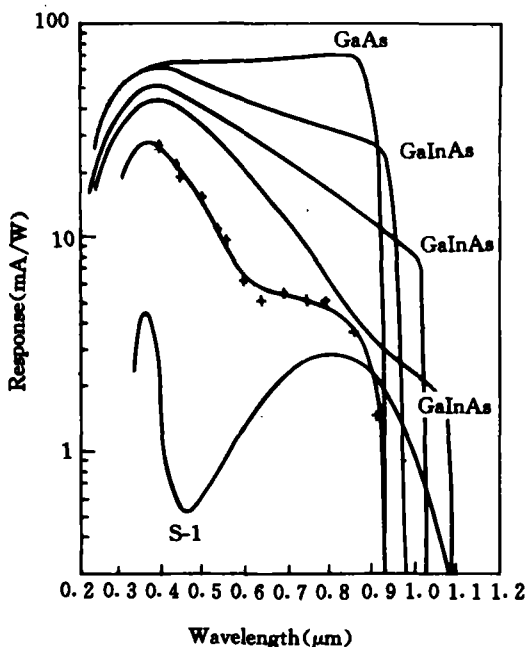


图 5 几种 III-V 族半导体光电阴极的光谱响应曲线  
“+”为 GaAs 阴极的实测值,其余引自文献<sup>(4)</sup>

Fig. 5 Spectral sensitivity of several III-V semiconductor photocathodes<sup>(4)</sup>. The curve with “+” is the one prepared by us

#### 4 1.25 $\mu\text{m}$ InGaAsP 光电阴极的激活及结果

在带隙为 0.99eV 的 InGaAsP 液相外延片上进行了激活实验。据我们所知这一结果是国内首次实现了在 0.5~1.25 $\mu\text{m}$  波段范围内具有光电响应的半导体光电阴极。InGaAsP 晶片是在 InP 基底上液相外延而成,外延层厚度约 2.5 $\mu\text{m}$ ,重 P 型掺杂  $8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。片子装入系统前,用 HCl:H<sub>2</sub>O 为 1:5 的溶液清洗约 5min。激活前用热子将阴极片加热到 480℃ 约 10min,这一热清洁温度和时间,是事先在 Auger 谱仪中做模拟实验和质谱分析得到的<sup>[6]</sup>。同样,待温度接近室温时,开始进行铯氧激活,激活程序与 GaAs 阴极的激活类似。激活后测得的阴极光谱响应曲线如图 6 所示。从图中可以看到,在很大的光谱范围内,量子效率比  $S_1$  阴极大一个量级,在 1.06 $\mu\text{m}$  处,量子效率为 0.4%,其光谱响应的截止波长为 1.25 $\mu\text{m}$ 。

### 5 GaAs(Cs,O)光电阴极中三光子光电发射

在该系统中激活的 GaAs(Cs,O)光电阴极上原位研究了其三光子光电发射特性。这些结果有些已经陆续在国内外学术刊物和会议报道<sup>[6~8]</sup>,这里简略地介绍这一方面的实验结果。

用于研究阴极中多光子光电发射效应的激发光源为一台调 Q Er,Tm,HO:YLF 激光器,输出光波长为 2.06 $\mu\text{m}$  ( $h\nu = 0.602 \text{eV}$ ),光脉冲脉宽约 80 ns,其峰值功率大于 1 MW。在此波长的脉冲激光激励下,GaAs(Cs,O)阴极中处于价带的电子只有同时吸收三个光子,才有足够的能量从价带跃迁到导带。若阴极表面的有效电子亲和势小于 0.376eV,那么电子就有可能迁移到表面处,并且脱离表面束缚而进入真空(如图 7 所示)。三光子光电发射的主要特征之一是光电发射电流密度  $J_3$  正比于入射光强  $I$  的三次方,即

$$J_3 = \gamma_3 I^3$$

其中  $\gamma_3$  为三光子光电发射系数,它和光电阴极的性质、激发光波长等有密切关系<sup>[8]</sup>。图 8

给出了在光电灵敏度约为 550 $\mu\text{A}/\text{lm}$  的 GaAs(Cs,O)光电阴极上的测量结果。显然,在双对数坐标系中,光电流密度作为入射光强度的函数在近三个量级的变化范围内显出了良好的线性,且斜率为 +3。为了证明观察到的光电发射为三光子光电发射而非热发射,把阴极用液氮冷却到约 77K 的温度,测量其与  $I$  之间的关系,将测得的点也在图 8 中标出。可见,在液氮温度下电流密度  $J$  与入射光强  $I$  仍保持 +3 的斜率,并且与室温下测得的数据在测量误差范围内是相互吻合的。这充分证明了至少在我们测量的光强范围内,热发射小到足以能忽略的地步,而在整个范围内,三光子光电发射占主导地位。

### 6 结论

在超高真空条件下,对 GaAs(Cs,O)光电阴极和窄带 InGaAsP 四元合金 III-V 族半导体光

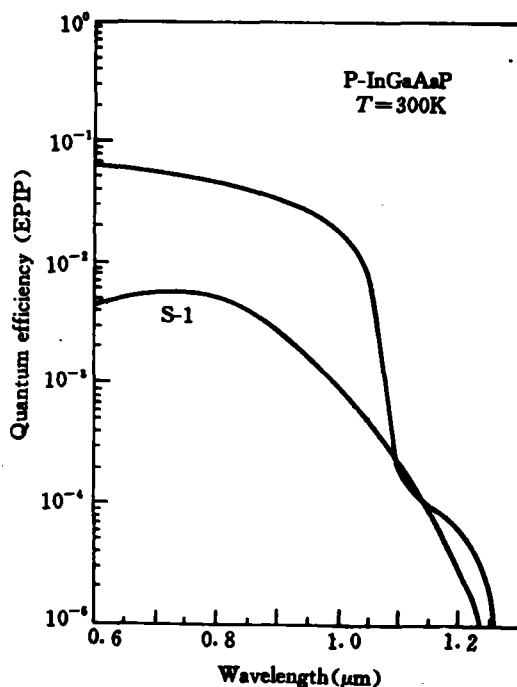


图 6 1.25 $\mu\text{m}$  InGaAsP(Cs,O)光电阴极和  $S_1$  阴极的光谱响应曲线

Fig. 6 The spectral sensitivity of 1.25 $\mu\text{m}$  InGaAsP(Cs,O) photocathode and  $S_1$  photocathode

电阴极的激活工艺和性能进行了一系列研究。对阴极原位测量的结果表明:激活的 GaAs (Cs, O) 光电阴极的积分灵敏率约  $550\mu\text{A}/\text{lm}$ ; 尽管光谱响应曲线在长度波段有一定的下降, 但其截止频率仍在  $925\mu\text{m}$  外,  $1.25\mu\text{m}$  InGaAsP 在整个  $0.5\sim 1.25\mu\text{m}$  的波段范围内均有较高的量子产额, 在  $1.06\mu\text{m}$  处的量子效率为  $0.4\%$ , 高于  $S_1$  阴极; 在 GaAs (Cs, O) 光电阴极上观察到预期的三光子光电发射, 这项研究有助于对阴极特性的更深入理解, 也为阴极的红外响应的扩展谋求一种新的途径。

感谢北京大学无线电电子学系吴全德教授、吴锦雷副教授、石自光高级工程师的有益地讨论和建议。高洪楷副研究员、龚平同志为实验提供了

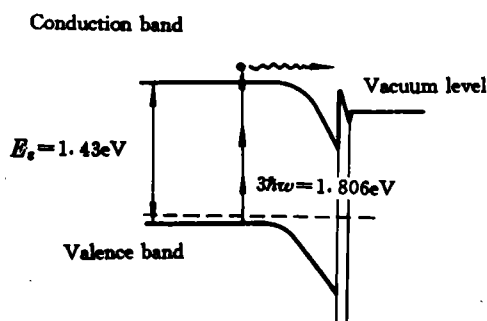


图7 NEA GaAs 光电阴极的能带结构和三光子发射

Fig. 7 The band structure of a NEA GaAs photocathode and three-photon photoemission process

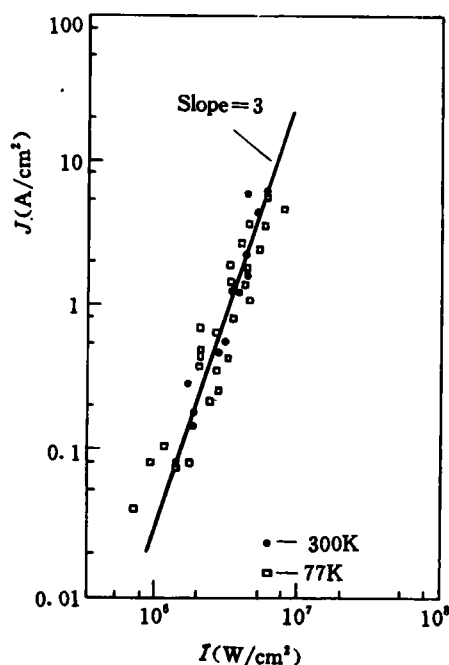


图8 GaAs(Cs, O)光电阴极上发射的光电流密度  $J$  与入射  $2.06\mu\text{m}$  红外激光功率  $I$  的关系

Fig. 8 The current density  $J$  emitted from a GaAs(Cs, O) photocathode vs the intensity  $I$  of irradiation  $2.06\mu\text{m}$  laser

MOCVD 外延生长的 GaAs 晶片; 程昭同志在测量过程中给予了大力合作; 杨斌洲副研究员、赵卫同志在激光系统的建立过程中做了大量工作, 在此一并表示衷心地感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Becl RL. Negative Electron Affinity Devices. Oxford; Clarendon Press, 1973.
- 2 Keys RJ. Optical and Infrared Detectors. Berlin, Heidelberg, New York; Springer-Verlag, 1977.
- 3 Dennis PNJ. Photodetectors. New York and London; Plenum Press, 1986.
- 4 夜视技术文集, 1988, 2: 67.
- 5 李晋闽, 郭里辉, 王力鸣等. 高速摄影和光子学, 1991, 20(3): 262.
- 6 Wang Liming, Hou Xun, Cheng Zhao. Proc SPIE, 1991, 1358: 86
- 7 Wang Liming, Hou Xun, Cheng Zhao. Proc SPIE, 1991, 1412: 12
- 8 王力鸣, 侯洵. 光学学报, 1992, 12(2): 168.

(上接418页)

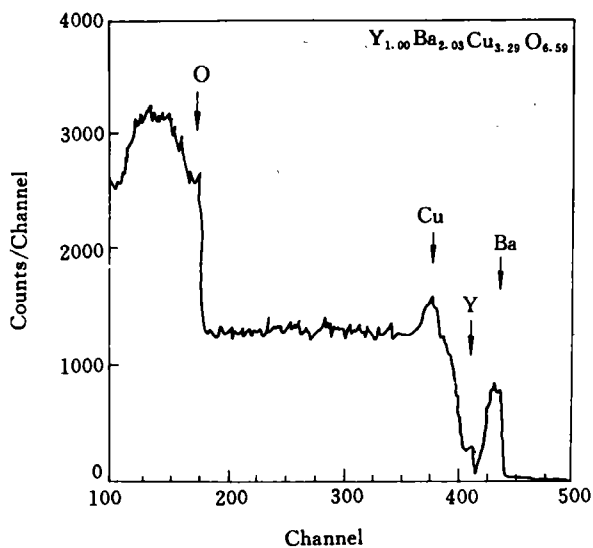


图 10 典型条件下制备的 YBCO 薄膜的 RBS 图

Fig. 10 RBS curve of a typical sample

## 参 考 文 献

- 1 Koren G, Gupta A, Giess EA et al. Appl phys lett, 1989, 54(11): 1054.
- 2 Xiong GL, Wang SZ. Appl phys lett, 1989, 55(9): 902.
- 3 Michikami O, Asahi M, Asano H. J appl phys(JPN), 1989, 28(3): L448.
- 4 Terashima Y, Sagol M, Kubo Ket al. Jappl Phys(JPN), 1989, 28(4): L653.
- 5 Eom CB, Sun JZ, Yamamoto K et al. Appl phys lett, 1989, 55(6): 595.
- 6 Hellman ES, Schlom DG, Marshall AF et al. J materres, 1989, 4: 476.