

透射式 GaAs 光电阴极的 X 射线衍射研究

米 侃 朱李安 赛小峰 张景文 侯 洧

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要 本文介绍了高精度多晶多反射 X 射线衍射仪的一种新的应用。首次将其应用于研究高灵敏度第三代微光象增强器中由掺 Zn 的 p 型 GaAs/GaAlAs、玻璃组成的光电阴极的材料特性; 发展了用倒格子空间衍射图方法评价光电阴极组件晶体质量的方法。通过分析得知, 衍射强度在倒格子空间沿 ω 方向展宽主要起因于晶体中的嵌镶效应的增强。文中采用衍射动力学理论的计算方法并忽略初始条件, 模拟后得到的曲线与衍射强度沿 $\omega/2\theta$ 方向的投影强度曲线符合的比较好。粘接良好的阴极样品表明, GaAs/GaAlAs 晶格常数的变化基本上可以消除, 但粘接引起的嵌镶效应的增强却不能完全消除。

关键词 GaAs; 光电阴极; 倒格子空间二维图

0 引言

X 射线衍射分析技术作为近代物理测试的一种重要手段, 在探索物质的微观结构和宏观组织性能之间的关系中有着不可替代的作用。因其无损、高精度以及无需特别制样等特点, 多年以来, 作为一种实用的分析方法一直受到材料科学研究人员的青睐。近年来随着材料科学的进一步发展和相关技术领域的进步, X 射线本身也有了重要的进展¹。对于单晶体材料已经可以在倒格子空间的二维平面上探测到衍射强度的分布, 这也就是目前正在蓬勃发展的所谓倒格子空间二维图(Reciprocal Space Mapping)方法。二维图的信息量比常规的摇摆曲线(Rocking Curve)要丰富的多。它将晶体中的晶向效应和晶格参数效应对衍射峰展宽的贡献区分开来², 在分析超晶格、量子线、量子点³ 和评价 GaN 外延层与非线性光学晶体质量⁴ 等方面越来越受到人们的重视。在以负电子亲和势 GaAs 透射式光电阴极为主要特色的第三代象增强器的研制过程中, 阴极材料的晶体质量, 尤其是制成阴极组件后材料的晶格完整性对阴极性能有重要的影响。

1 实验

实验在 Philips X'Pert MRD 高分辨率多晶多反射衍射仪(High-Resolution Multi-crystal Multi-reflection Diffractometer)上进行。三轴扫描模式(Triple-axis Mode)的光路如图 1 所示。光源为波长 0.15406nm 的 Cu $\text{k}\alpha$ 辐射, X 射线的发散角约 $5\sim12\text{arc sec}$, $\Delta\lambda/\lambda=2\sim5\times10^{-5}$ 。出射 X 射线对探测器的张角约 12arc sec . ω 和 $\omega/2\theta$ 方向的扫描步长为 0.0005arc sec 。阴极组件的结构如图 2 所示, 在 GaAs (001)衬底上采用 MOCVD 方法外延生长多层 GaAs/GaAlAs 结构, 在顶层 GaAlAs 上采用 PECVD 方法沉积一层约 100nm 厚的 Si_3N_4 过渡层, 然后与窗口玻璃热粘接, 再用选择性腐蚀方法去除衬底 GaAs 和过渡 GaAlAs 层。我们分别做了粘接前后 GaAs/GaAlAs 的(004)晶面的倒格子空间强度分布图。

收稿日期: 1997-05-17

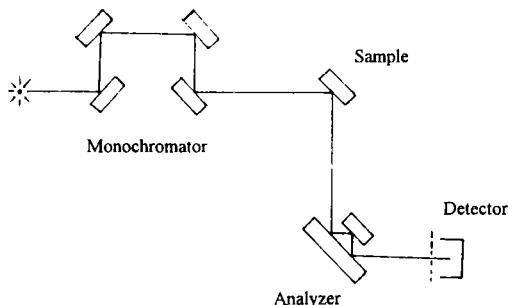


图 1 标准三轴扫描光路

Fig. 1 The standard optical arrangement of the triple-axis mode

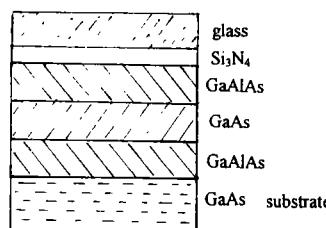


图 2 透射式 GaAs 光电阴极结构

Fig. 2 The structure of GaAs transmission photocathode

2 结果与分析

倒格子空间二维图通常采用等强度线表示,为了便于分析衍射强度峰型的变化,我们采用倒格子空间强度分布三维表示方法。图 3(a)为衬底的峰型。此型与外延层峰型相似,可见外延层质量是比较好的;(b)为外延 GaAlAs 层的倒格子空间强度分布。对于完整晶体,X 射线衍射动力学指出,衍射强度在倒格子空间分布有一定的宽度⁵。对于 GaAs 材料约为 10arc sec。可以认为实际晶体材料是由许多线度约 10^{-6} m 的小晶块组成,每个小晶块内部结构接近理想晶体结构,块与块之间有小的取向偏离,此即为晶体的嵌镶模型⁶。分析图 3 可以看出,衍射强度分布有明显的中心强度峰,沿 ω 、 $\omega/2\theta$ 方向分布对称且相似。

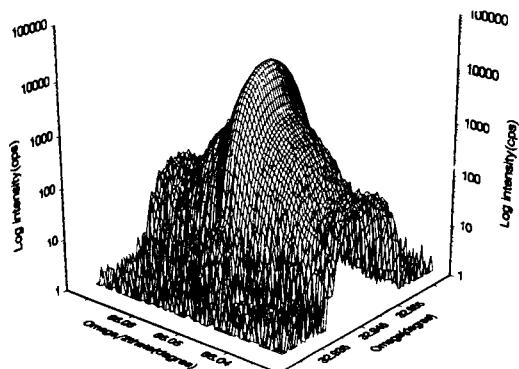


图 3(a) 衬底 GaAs(004)晶面的倒格子空间衍射强度分布

Fig. 3(a) The (004) reciprocal space intensity profile of GaAs substrate

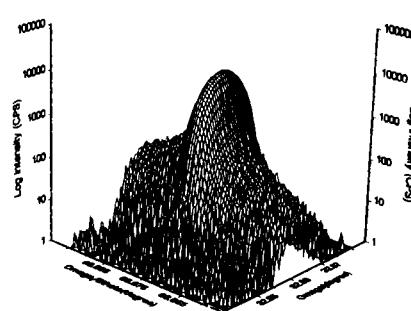


图 3(b) 外延层 GaAlAs(004)晶面的倒格子空间衍射强度分布

Fig. 3(b) The (004) reciprocal space intensity profile of GaAlAs layer

图 4 为阴极组件(004)晶面衍射的倒格子空间强度分布。图 5 为图 4 强度分布沿 ω 方向的投影。衍射峰在 ω 方向有明显的展宽。半高宽为 70arc sec 的峰顶部呈平台分布,上升边缘陡峭。沿此方向的展宽是由于晶向效应引起的,因此,在 ω 方向顶部平台对应的角范围内,相应取向晶面的数量较多,使这些晶面对应的衍射强度大致相等,形成峰顶部的平台。考虑到阴极晶体材料与玻璃的粘接方法以及实际晶体的嵌镶结构模型,可以认为,在粘接退火过程中,由于非晶体的玻璃内部应力作用,导致晶体中小晶块的取向发生变化。图 5 的平顶型分布说明,对峰值强度有贡献的晶块数量较粘接前明显增加。对称的峰型分布说明,阴极组件内部没有明显的由于应力引起的倾斜晶面分布的不对称性。我们也发

现有些不成功的粘接样品在 ω 方向的半高宽达到113arcsec,甚至更大,而且沿 ω 方向峰型的对称性差.这种阴极往往激活灵敏度不高,这可能是由于小晶块间倾角的增加在晶体内部引入了较多的缺陷,使晶格完整性变差,降低了少数载流子的扩散长度,使阴极的激活灵敏度下降.虽然阴极材料中的嵌镶效应与激活灵敏度的确切关系还有待于进一步的实验研究,但本文无疑为此提供了有力的分析方法.

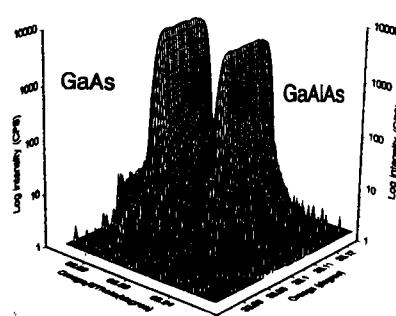


图 4 光电阴极组件 GaAs/GaAlAs(004)晶面的倒格子空间衍射强度分布

Fig. 4 The (004) reciprocal space intensity profile of GaAs/GaAlAs Photocathode

图 6 中的实际表示图 4 沿 $\omega/2\theta$ 方向的强度分布曲线,GaAlAs 峰的半高宽为 13arc sec. 虚线为采用动力学理论模拟的结果. 考虑到阴极组件的结构,模拟过程中采用完整晶体的模型,并将衬底的反射忽略. 从图中可以看出,实验曲线与模拟曲线符合比较好. 由于沿 $\omega/2\theta$ 方向反应出的完全是晶格常数的效果,因而可以说阴极 GaAs/GaAlAs 材料的晶格常数几乎没有受到粘接应力的影响. 从这个角度讲,所测量样品的粘接是成功的. 对其它样品的分析发现, $\omega/2\theta$ 方向的展宽有些已经增加了 80% 以上,但较之 ω 方向的展宽量仍然是较小的.

3 结论

以上分析说明,阴极与窗口玻璃粘接后,由于

嵌镶结构的取向分布发生了变化,晶体衍射峰在倒格子空间沿 ω 方向的展宽是主要的. 通过优化粘接工艺, ω 方向的展宽可以极大地减小. 对应晶体内部嵌镶晶块的倾角相对于晶面法线方向减小,但是很难完全消除,而沿 $\omega/2\theta$ 方向晶格常数的变化则是可以基本消除的. 采用本文的检测方法,通过优化粘接工艺,有助于做出较为理想的阴极组件. 本文的实验手段对于其它种类的晶体与非晶材料的粘接质量也提供了一种普遍的评价方法.

参考文献

- 1 Fewster P F. Appl Phys, 1994, A58(1): 121~127
- 2 Fewster P F. Semlcond Sci Technol, 1993, 6(8): 1915~1934
- 3 Darhuber A A, Koppensteiner B, Bauer G, Wang P D, Song Y P, Sotomayor torres C M, Holland M C. J Phys (D): Appl Phys, 1995, 27(1): 195~199

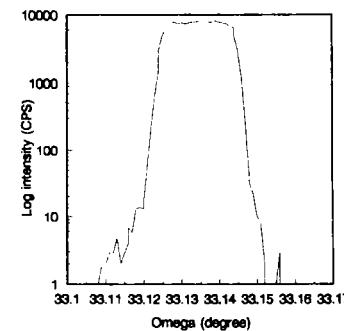


图 5 图 4 衍射强度沿 ω (Omega)方向的投影分布

Fig. 5 The projected diffracted intensity of Fig. 4 along Omega direction

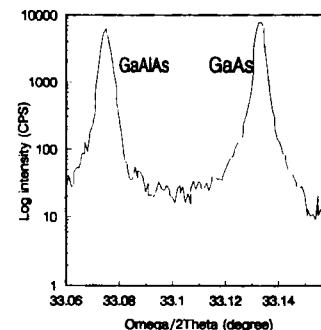


图 6 图 4 衍射强度沿 $\omega/2\theta$ (Omega/2Theta)方向的投影分布(实线)和模拟强度分布曲线(点线)

Fig. 6 The projected diffracted intensity of Fig. 4 along Omega/2Theta direction (full line) and simulated curve (dotted line)

- 4 Hu Z W, Thomas P A, Webjorn J. *J Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, 28(1): 189~194
 5 许顺生, 冯端. X射线衍射貌相学. 科学出版社, 1987: 168~172
 6 黄胜涛. 固体X射线学(一). 高等教育出版社, 1995: 347

GaAs TRANSMISSION PHOTOCATHODE BY X-RAY DIFFRACTION

Mi Kan, Zhu Lian, Sai Xiaofeng, Zhang Jingwen, Hou Xun

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 1997-05-19

Abstract This paper presents a new application of high resolution multi-crystal multi-reflection diffractometer (HRMCMRD). For the first time, the HRMCMRD has been used to study the high sensitivity photocathode of the third generation intensify tube, which is composed of Zn-doping p-type GaAs / GaAlAs crystal bounded to glass. The reciprocal space mapping has been developed to evaluate the crystal quality of the photocathode. It is shown that the broadening of the reciprocal space profile along ω direction results in the increased mosaic effect. The projected diffraction intensity along $\omega/2\theta$ direction is accorded with the simulated curve by dynamical diffraction theory and to neglect the initial condition eliminated. Well-bounded photocathode sample suggests that the variation of crystal lattice parameter can almost be eliminated by optimizing the technological process, but the increased mosaic effect can not be eliminated completely.

Keywords GaAs; Photocathode; Reciprocal Space Mapping

Mi Kan was born in 1966. He received his B. S. and M. S. degree from Physics Department and Electronic Engineering Department of Xi'an Jiaotong University in 1989 and 1995, respectively. Now he is a Ph. D. student in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences. His research interests include the surface problem of III-V compound semiconductor, high resolution X-Ray diffraction and the third generation GaAs image intensifier.

