

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0324-03

储存环自由电子激光器腔镜的光学膜系

高怀林, 王东蕾, 王永, 吕岩, 谭荣清, 万重怡

(中国科学院电子学研究所激光实验室, 北京 100080)

摘要 针对储存环自由电子激光器(SR-FEL)激光谐振腔腔镜对于光学膜系的要求,利用电子束蒸发沉积技术,研制了宽带与双带两种“ $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ”腔镜光学膜系。所研制的宽带紫外(UV)光学膜系,其光谱可调谐范围为 320~390 nm,在 355 nm 中心波长的透射率测量值为 $T(355 \text{ nm}) = 0.097\%$,绝对反射率测量值为 $R = 99.349\%$;所研制的双带谐振腔光学膜系,其光谱可调谐范围分别位于 200~274 nm 与 320~375 nm。在不同波长处的光学透射率测量值分别为 $T(198 \text{ nm}) = 1.275\%$, $T(248 \text{ nm}) = 0.028\%$, $T(266 \text{ nm}) = 0.100\%$, $T(355 \text{ nm}) = 0.194\%$ 。在不同波长处的绝对反射率测量值为 $R(248 \text{ nm}) = 98.423\%$, $R(266 \text{ nm}) = 98.298\%$, $R(355 \text{ nm}) = 99.651\%$ 。

关键词 薄膜; 储存环自由电子激光; 激光谐振腔光学膜系; 电子束蒸发沉积

中图分类号 TL594, TN242 **文献标识码** A

Broad and Dual-Band UV Optical Coatings for Application to Storage-Ring Free Electron Laser

GAO Huai-lin, WANG Dong-lei, WANG Yong, LÜ Yan, TAN Rong-qing, WAN Zhong-yi

(Laser Laboratory, Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract An “ $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ” optical coating with broad-band or dual-band has been investigated experimentally for the resonator mirror of storage-ring free electron laser (SR-FEL). It was deposited by the electron-beam evaporation. Based on the measured transmittance spectrum, it was shown that the range of the tunable wavelength is from 320 nm to 390 nm, and the measured transmittance is $T(355 \text{ nm}) = 0.097\%$, measured absolute reflectivity is $R(355 \text{ nm}) = 99.349\%$ for the broad-band mirror coating. For the dual-band mirror coatings, the bands are located at 320 nm to 375 nm and 200 nm to 274 nm. The measured transmittance is as $T(198 \text{ nm}) = 1.275\%$, $T(248 \text{ nm}) = 0.028\%$, $T(266 \text{ nm}) = 0.100\%$, $T(355 \text{ nm}) = 0.194\%$. The measured absolute reflectivity is $R(248 \text{ nm}) = 98.423\%$, $R(266 \text{ nm}) = 98.298\%$, $R(355 \text{ nm}) = 99.651\%$ at the different wavelength.

Key words thin films; storage-ring free electron laser; laser resonator optical coatings; electron-beams evaporation

1 引言

储存环自由电子激光(SR-FEL)由于它的产生机理完全不同于传统意义上的气体激光、固体激光以及半导体激光,它是相对论性电子束团的非量子化同步辐射与电子束团本身电磁相互作用的产物^[1,2]。在光学速调管内,其激光辐射的特点为自发辐射光谱带宽($\sim 100 \text{ nm}$)、脉冲重复频率高(MHz)、脉冲宽度窄(ps~fs)^[3,4]。为了将这种紫外(UV)与深紫外相干辐射进行放大,产生瓦至千瓦数量级的高平均功率激光输出,就需要使用激光谐

振腔技术。由于这种激光产生机理的不同决定了它对激光谐振腔光学膜系有着极其不同的要求。在一般激光谐振腔光学膜系的基础上,它的激光谐振腔光学膜系要具有宽带光谱可调谐能力,或双带光谱可调谐能力。并且,激光谐振腔光学膜系对于光学速调管内的激光基频辐射、高阶谐波辐射、窗口弯转磁铁处的同步辐射要具有抗同步辐射不退化的能力和抗激光辐射不损伤的能力,在数毫米范围内能够耐得住激光产生的高温与高温度梯度,并产生高亮度激光脉冲输出。

基金项目: 国家自然科学基金(10475081)资助课题

作者简介: 高怀林(1961—),男,中国科学院电子学研究所研究员,博士,主要从事激光技术方面的研究。

E-mail: ghl@mail.china.com

为此,在储存环自由电子激光技术研究中,开展高损伤阈值、宽带可调谐激光谐振腔光学膜系研究与研制工作非常重要。在意大利 ELETTRA 装置上的欧洲联合研究体(意大利、德国、英国、法国、瑞典)、日本和美国已经研制了四种储存环自由电子激光谐振腔光学膜系^[5,6]: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$, “ $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ”。本文主要介绍我们研究工作的最新进展,在当前国际标准带宽研究工作基础上,新近完成的“ $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ”宽带激光谐振腔光学膜系与双带激光谐振腔光学膜系的实验研究进展。

2 光学膜系物理设计

研究工作的物理设计内容与目标为,1) 在 $\lambda/4$ 标准光学膜系研究基础上,利用光学膜系光谱带宽扩充技术,研究宽带、紫外激光谐振腔光学膜系。使光学膜系的光谱带宽达到 80 nm;2) 在对宽带激光谐振腔光学膜系研究的基础上,利用膜系叠加技术,研究双波带激光谐振腔光学膜系,光谱带宽分别达到 50 nm;3) 在保持光学膜系带宽条件下,使其光学反射率达到 98%~99.0%;4) 为了使光学膜具有抗激光损伤与宽带光谱特性,在谐振腔光学膜系设计中,将 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 光学膜系的宽带特性与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 光学膜系的高破坏阈值特性进行了结合,形成复合光学膜系结构:“ $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ”宽带光学膜系与双带光学膜系。在该实验中,使用最为先进的数字化光学镀膜机,提供所需要的稳定实验条件,从而有效地控制过程参量,得到可靠的、重复性好的实验数据,最终实现物理设计目标。

3 光学膜系研制

当前研究的宽带与双带谐振腔光学膜系物理结构为“熔融石英基底 + $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ”。在薄膜沉积生长中,使用德国生产的 LEYBOLD APS1104 型光学镀膜机,利用纯电子束蒸发沉积方式对光学膜料进行了蒸发沉积。在下加热条件下,基片的沉积温度为 $T_D = 185^\circ\text{C}$ 。为了提高光学膜层的形成密度,高折射率材料与低折射率材料的沉积速率分别为 $V_{\text{DH}} = 0.5 \text{ nm/s}$, $V_{\text{DL}} = 0.6 \text{ nm/s}$,渗氧压力为 $P(\text{O}_2) = 1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。在完成光学薄膜电子束蒸发沉积生长之后,利用美国生产的 VARIAN Cary5000 分光光度计对样品进行了光谱特性测量。宽带“ $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ”光学膜系透射光谱测量结果如图 1(a)所示,其光谱可调谐范围为 320~390 nm,在 355 nm 中心波长处的透射率测量值为 $T(355 \text{ nm}) = 0.097\%$,绝对反射率测量值为 $R = 99.349\%$ 。在以上相同工艺条件下,沉积生长的双带紫外激光谐振腔光学膜系的实验研究结果如图 1(b)所示,其光谱调谐范围分别位于 200~274 nm 与 320~375 nm。在不同波长处的光学透射率测量值分别为 $T(198 \text{ nm}) = 1.275\%$, $T(248 \text{ nm}) = 0.028\%$, $T(266 \text{ nm}) = 0.100\%$, $T(355 \text{ nm}) = 0.194\%$ 。绝对反射率测量值为 $R(248 \text{ nm}) = 98.423\%$, $R(266 \text{ nm}) = 98.298\%$, $R(355 \text{ nm}) = 99.651\%$ 。其中不足的是在 198~208 nm 的光谱范围,形成了一个透射率 $T = 1.041\% \sim 1.275\%$ 的透光区,且与主带没有连接好。这是沉积参量要进一步研究的内容。

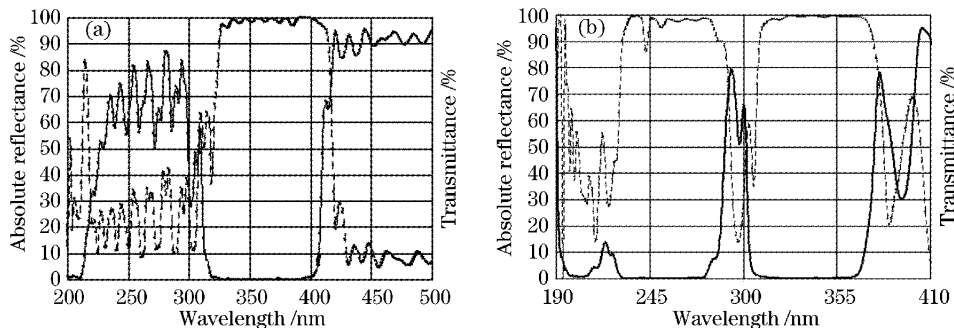


图 1 SR-FEL 谐振腔光学膜系的透射光谱与绝对反射光谱。(a)宽带光学膜系;(b)双带光学膜系

Fig. 1 Transmittance and absolute reflectivity of the resonator optical coating of SR-FEL. (a) broad-band; (b) dual-band

4 结 论

实验利用“ $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ”复合光学膜

系可以实现储存环自由电子激光器对激光谐振腔的基本要求:高反射率\宽带或多带。下一步要解决的

问题是改善分光光度计的测量环境,实现 200 nm 以下绝对反射率的精确测量,完成膜系抗同步辐射能力实验测量和抗激光损伤阈值实验测量,以及物理性能更好的谐振腔紫外光学膜系实验研究等,更好地为下一代储存环自由电子激光器服务。

致谢 感谢洪冬梅研究员、岳威工程师、马长勤研究员及范飞迪研究员在仪器设备使用中提供方便、帮助与有益讨论。

参 考 文 献

- 1 Patrick G. O'Shea, Henry P. Freund. Free-electron laser; status and application [J]. *Science*, 2001, **292**(5523): 1853~1858
- 2 Wang Naiyan. *New High-Power Laser* [M]. 1st ed., Beijing: Atomic Energy Press, 1997
- 3 王乃彦. 新兴的强激光[M]. 第一版,北京:原子能出版社,1997
- 3 He Duohui, Pei Yuanji, Jin Yuming *et al.*. The present status and the future of HEFEL national synchrotron radiation light source [J]. *J. Shenzhen University*, 1997, **14**(1): 1~7
- 何多慧,裴元吉,金玉命等. 国家同步辐射激光源现状及未来 [J]. *深圳大学学报(自然科学版)*, 1997, **14**(1): 1~7
- 4 Chen Nian, He Duohui, Li Ge *et al.*. General design of coherent harmonic generation storage-ring free-electron laser of NSRL [J]. *Nucl. Technol.*, 2004, **27**(6): 405~408
- 陈念,何多慧,李格等. NSRL 储存环相干谐波自由电子激光实验总体布局 [J]. *核技术*, 2004, **27**(6): 405~408
- 5 Masajito Hosaka. Temporal characteristics of the UVSOR storage ring FEL, the generation of ultra-short light pulse at storage-ring and their application [C]. Feb. 28~Mar. 1, 2005
- 6 A. Gatts, J. Heber, N. Kaiser *et al.*. High-performance UV/VUV optics for the storage ring FEL at ELETTRA [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, **A483**: 357~362