

辐照受损 Wiggler 的再充磁利用*

李亚南 李永贵 陆辉华 李成泽

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 报导了北京自由电子激光装置中所用永磁 Wiggler 的辐照受损情况及再充磁利用的研究,对于辐照受损后场强有近三分之一下降的 Wiggler,对其磁块经再充磁、优化排列、重新组装,可恢复到原来的场强水平。初步实验表明,再充磁 Wiggler 在相同电子束流的辐射条件下应用时间比先前 Wiggler 多了一倍。最后,还分析了磁体辐射损伤的机制和改进办法。

关键词 自由电子激光 Wiggler 辐照损伤 充磁

1 引言

Wiggler 作为自由电子激光装置的关键设备之一,其性能好坏直接影响激光的输出功率。在加速器高辐照环境下工作的永磁 Wiggler,随着实验时间的积累,Wiggler 的品质会逐渐下降以致不能使用,特别是在荧光靶附近。而每制造一个新 Wiggler,研究周期长,磁块价格昂贵,调节机构和磁块装夹固定装置的机加工精度高,成本高。为此,李永贵老师提出了对辐照受损后的 Wiggler 的磁块进行再充磁利用的构想,该构想已付诸实验并获得成功。本文介绍了北京自由电子激光装置中所用的钕铁硼平面永磁 Wiggler^[1-3]的辐射受损及再充磁利用的实验情况。

2 BFEL 中 Wiggler 工作环境

BFEL 中的 Wiggler 是由 400 块 NdFeB(7.5mm × 7.5mm × 40mm)按 HALBACH 方式排列成 50 个常周期组成,长 1.5m,选用 NdFeB 材料主要考虑它具有较高的磁能积和剩磁,能以较小的体积达到所需的场强设计要求,并且价格仅是 SmCo 永磁材料的五分之一,但经过一段实验发现,NdFeB 材料的抗辐照能力较差。

下面的图 1(a)就是我们调试好的 Wiggler 被安装在实验现场的布局图。由射频电子直线加速器产生的电子束经两个 45°弯转铁和 Q 铁组成消色散段进入 Wiggler 后,在 Wiggler 出口处由另一个 45°弯转铁将电子束引向法拉第筒。在聚焦磁铁的作用下,电子束在

2000-08-23 收稿

* 国家 863 计划激光领域资助

Wiggler 入口、中部和出口处,各形成截面直径分别为 2mm,1.5mm 和 2mm 的束斑,该束斑是通过在 Wiggler 前后端部和中部安装的 3 个束流截面探测器测量的. 截面探测器是一个面积为 4mm × 8mm,厚 1.5mm 的 Al₂O₃ 陶瓷片,与 Wiggler 轴线成 45° 放置,可插入或抽出 Wiggler 轴线,如图 1(b)所示. Wiggler 的 GAP 为 14mm,一个壁厚为 0.5mm 的无磁不锈钢真空管道置于 Wiggler 的 GAP 内,流经其中的电子束流强为 150—200mA,能量为 23—26MeV,宏脉冲宽度 4μs,重复频率 3Hz.

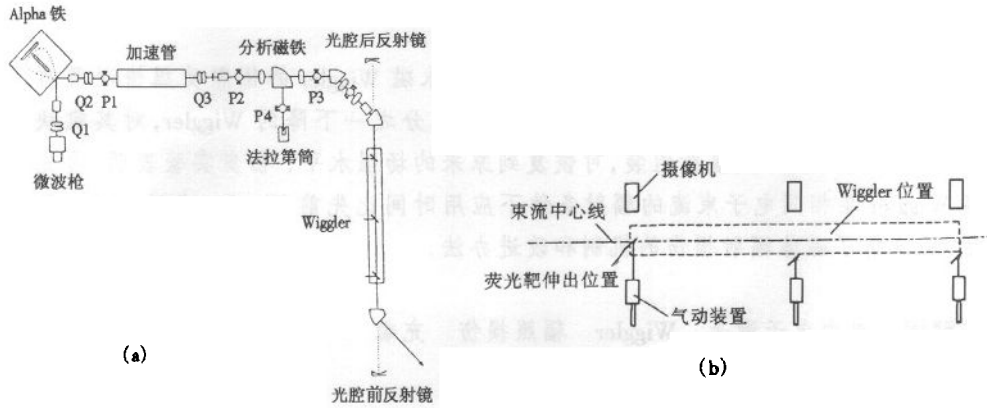


图 1 Wiggler 段工作环境示意图

(a) Wiggler 实验现场布局示意;(b) Wiggler 段束流截面探测器示意.

下面的图 2 显示了经 300 多小时辐照后钹铁硼 Wiggler 相对受辐照前 Wiggler 基本性能的对比.

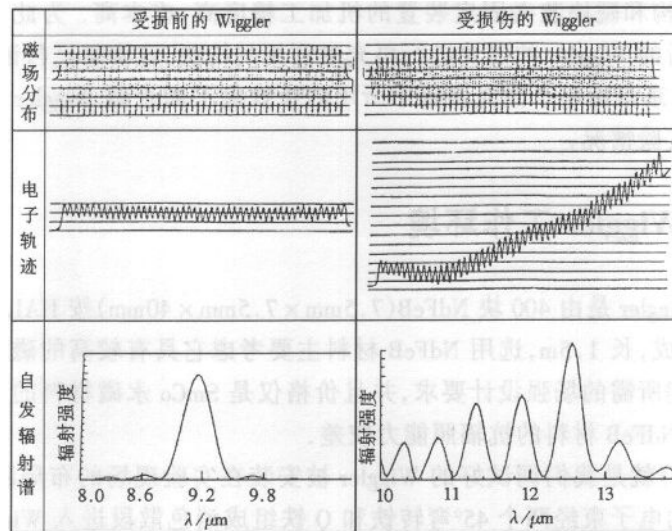


图 2 辐射受损前后 Wiggler 基本性能的比较

Wiggler 品质的优劣由磁场测量得到的磁场分布峰峰差、电子轨迹偏离和电子束通过每个 Wiggler 周期的相位差决定. 这些指标可反映在单电子的自发辐射谱分布上. 峰峰差

的大小不仅影响基波谱的高度和半高宽,而且还使高次谐波分量增大,特别是在基波附近出现多峰结构. 电子轨迹的偏离,一方面使自发辐射谱的共振波长发生位移,另一方面在 Wiggler 轴线方向上产生偶次谐波. 由图 2 看出,辐照受损 Wiggler 的电子轨迹有较大的偏离,自发辐射谱已没有明显的主峰. 辐照前的 Wiggler 峰峰差为 1%,受损后达 55%;辐照前的电子轨迹偏离在 1.5m 长度上小于 0.05mm,受损后偏移达 1.3mm,这些指标都表明 Wiggler 品质的下降,从图中还可看出,辐照后的 Wiggler 磁场分布,在入口端部和中部,都有 3-5 个周期的场强下降,该下降约为 50%,对应于束流截面探测器偏后的位置. 其他位置处,场强虽没有明显的下降,但峰峰差增大. 据分析,造成场强明显下降的机制来自高能电子轰击真空管道的不锈钢材料和荧光显示靶的氧化铝陶瓷材料,产生的中子辐射和 x,γ 射线所致,辐射使磁体材料内部局域磁畴退化,引起整体磁场下降. 另一个重要的原因,是局部热效应所致. 为此我们对 NdFeB 磁块做了升温测定磁块稳定性能的实验,实验表明早先的 NdFeB 磁块在 80℃ 时,磁场下降 50%,可见在 Wiggler 磁块场值下降最大的地方温度相对增高,以致磁块场值下降较多. 还有一个不可忽视的原因就是它也存在受电子束直接轰击的可能. 这是我们初步判断的结果. 由于 Wiggler 工作环境的复杂性,定量判断磁块辐照受损机制和剂量是困难的. 关于辐照环境的准确测量和磁块的辐照受损机制有待进一步研究.

3 单块 NdFeB 磁体充磁前后性能比较

Halbach 型平面永磁 Wiggler 的每个磁周期分别由 8 块 A, B, C, D 型矩形磁块组成,根据安装面和充磁方向的不同, A, B 型磁体充磁方向垂直于 Wiggler 轴线, C, D 型磁体充磁方向平行于 Wiggler 轴线. 将辐照受损后的磁块拆下来,测定其磁矩、磁偏角及磁块表面给定位置处的表面场发现, A, B 块充磁方向与电子束运动方向垂直,辐射受损相对较小,充磁前后参数变化不明显. C, D 磁块却因充磁方向与电子束方向同向,遭受辐射损伤较大,充磁前后参数变化明显. 如表 1 所示. 我们可以看到,不管是 A, B 块还是 C, D 块,通过再充磁(饱和充磁),辐射受损 Wiggler 都能大体恢复到原来的场参数. 这说明辐射受损磁块磁性能的可逆性.

表 1 单体磁块辐照受损前后和再充磁(饱和充磁 20000GS)前后,对给定点处表面场的测量结果

	(单位:GS)					
	A 块	B 块	C 块		D 块	
充磁前	+ 1310	- 1350	- 870	+ 860	+ 872	- 875
辐照后	+ 1105	- 1137	- 294	+ 287	+ 241	- 235
再充磁后	+ 1276	- 1307	- 854	+ 844	+ 854	- 855

表 2 单体磁块辐照受损经再充磁后磁偏角、磁矩的计算

	My	Mz	ANGLE		My	Mz	ANGLE
C1 块	5148.503	45.9344	0.5114326	D1 块	5073.517	41.58379	0.469838
C2 块	5181.156	48.46382	0.536193	D2 块	5133.459	43.91085	0.4903363

从表中可以看到,磁偏角充磁后仍在 1° 以内,是理论计算误差值允许范围内的。

表3 充磁前后受辐照损伤最大和最小处磁块特定位置点表面场的比较

	A 块	B 块	C 块		D 块	
辐照最大处	+1034	-1031.95	-698.1	706.7	765	-767
辐照最小处	+1058	-1055.2	-1085.5	1064.2	1167.9	-1191.5

同表1的结果类似,受辐射损伤的主要磁块是C,D块,充磁前后引起场值较大变化的也是C,D块。同时,我们注意到,不管是A,B还是C,D块,充磁后磁单块性能可大体恢复到损伤以前的水平。

4 再充磁 Wiggler 的性能和在线出光实验

将辐射受损后的矩形小磁块从受损 Wiggler 上拆下后,将全部 400 块磁块重新在 2 万高斯的充磁机下按原充磁方向再充磁,经过测量、筛选、优化排列、重新组装、整体调试等过程所得到的充磁后的 NdFeB Wiggler 性能如图3所示。

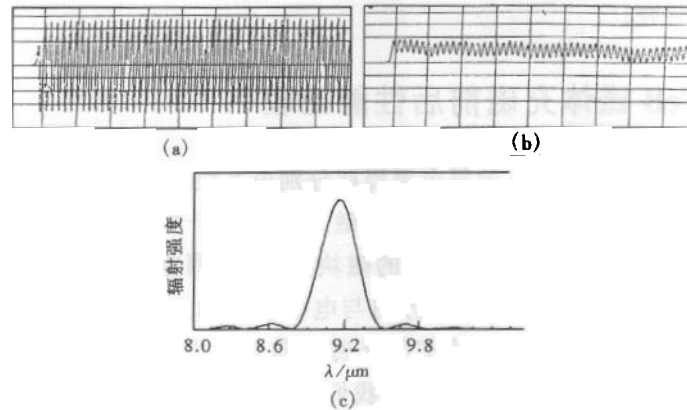


图3 再充磁 Wiggler 的磁场性能
(a) 磁场分布(峰峰差1%); (b) 电子轨迹(偏移量0.2mm);
(c) 自发辐射谱(谱宽4.1%,中心波长9.125 μm)。

图3与图2相比,可以看到再充磁 Wiggler 的基本性能也恢复到了受损前的水平。这里有两点值得注意,磁块的辐射受损结果,一是整体磁场强度的下降,二是磁偏角(即磁矩方向与矩形磁块的几何轴线方向的夹角)的变化,当再充磁后,单体磁块可以恢复到原来的程度和离散水平,且磁偏角没有太大的离散变化,那么它们的重新组合只要合适的优化,也就是非常容易做的事情。我们将再充磁后的 Wiggler 于1995年11月装在BFEL装置上,先后经过600小时左右的开机实验使用效果很好。正常的电子束能量在23MeV到28MeV间变化,通过的束流信号在200mA(4 μs 内宏脉冲平均)左右,峰值电流(4ps内微脉冲平均电流)15A左右,Profile同先前一样使用,只是正常开机期间使用次数较先前减少约二分之一,目前该充磁 Wiggler 已完成现场实验,在实验中达到了输出波长在10 μm 处饱和

振荡的水平. 自发辐射谱实测结果表明, 在电子束能散度为 7‰ 的情况下, Wiggler 的自发辐射谱宽在 $10\mu\text{m}$ 附近为 4% (损伤 Wiggler 的自发辐射谱宽大于 10%), 受激辐射线宽为 $< 1\%$, 这说明再充磁 Wiggler 经过近一年的使用, 仍有较好的性能.

图 4 是使用该 Wiggler 得到的受激辐射线宽的测量结果. 实验中 Wiggler Gap 保持不变, K 值为 0.98, 仅靠改变电子束能量来改变输出光波长. 实验结果表明, 在相同电子束流的辐射条件下, 未充磁 Wiggler 仅用 300h, 实测自发辐射谱也大于 10%, 场强下降大约 30%, 电子轨迹有很大偏离. 而再充磁 Wiggler 经过 600h 的相同辐照, 磁性能却没有那么大的变化, 这是一个值得进一步探讨的问题.

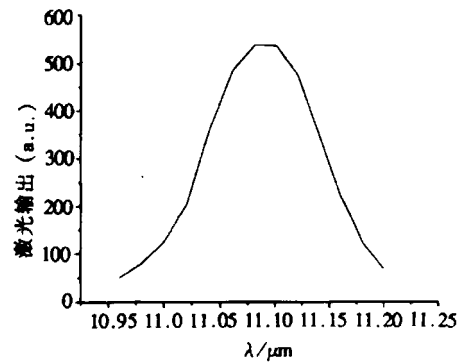


图 4 再充磁 Wiggler 的辐射线宽

5 结束语

我们尝试分析了辐射受损的原因, 通过 Wiggler 的再充磁实验, 发现磁块的辐射受损具有可逆性, 即通过再充磁, 磁性能基本可以恢复. 再组装后的 Wiggler 在相同的辐照条件下, 显示出了它的使用寿命. Wiggler 受辐照损伤是一个极其复杂的问题, 其原因也是多方面的, 如温度变化、中子、 γ 射线、X 射线及辐照时间等. 不同因素影响程度的定量分析, 在我们的实验现场还无法实现, 损伤机制的研究还有待进一步探讨. 但对受损后的 Nd-FeB Wiggler 进行再充磁取得较好结果的事例说明, 除了采用抗辐射强度高的磁块制做 Wiggler 外, 利用对受损后的再充磁方法, 为降低实验成本提供了一种有意义的尝试.

参考文献 (References)

- 1 XIE Jia-Lin, ZHUANG Jie-Jia, ZHAO Chun-Nong et al. Nucl. Instr. & Meth., 1991, A304:770 (in Chinese)
(谢家麟, 庄杰佳, 赵春农等. 核仪器和物理方法, 1991, A304:770)
- 2 HUANG Min, LI Yong-Gui, ZHAO Chun-Nong. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1991, 15(9):776 (in Chinese)
(黄敏, 李永贵, 赵春农. 高能物理与核物理, 1991, 15(9):776)
- 3 ZHAO Chun-Nong, ZHONG Yuan-Yuan, LI Yong-Gui et al. High Power Laser and Particle Beams, 1994, 6(1):131 (in Chinese)
(赵春农, 钟元元, 李永贵等. 强激光与粒子束, 1994, 6(1):131)

Remagnetizing Utilization of the Radiation Damaged Wiggler*

LI Ya-Nan LI Yong-Gui LU Hui-Hua LI Cheng-Ze

(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100080, China*)

Abstract In this paper, a study of the radiation damage and re-magnetizing utilization of the permanent magnet wiggler used in the Beijing Free Electron Laser facility is reported. For the radiation damaged wiggler, the magnetic strength can be restored to the original value by magnet re-magnetization, arrangement optimization and re-assembly. The preliminary experimental result shows that the effective lifetime of the re-magnetized wiggler can be longer than the original wiggler under the same beam radiation condition. Also the mechanism of the magnet damage by radiation and the modification method are discussed.

Key words free electron laser, wiggler, radiation damage, magnetization

Received 23 August 2000

* Supported by National 863 Plan Laser Field of China