

真空室材料二次电子产额特性研究*

张耀锋¹⁾ 王勇 尉伟 王建平 范乐 管长应 刘祖平

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 设计了针对加速器真空室材料样品的二次电子产额测试装置. 对测试装置的设计及测试过程进行了详细介绍, 并给出了常见真空室材料的二次电子产额测试结果以及不锈钢材料在经过镀 TiN 薄膜处理前后的测试对比结果, 分析了影响二次电子产额的一些因素, 为真空室的表面处理提供了依据.

关键词 电子云 二次电子产额 真空室材料 TiN 镀膜

1 引言

在粒子加速器中, 由于带电粒子、同步辐射与储存环真空室内壁的作用, 在真空室内产生大量电子. 这些电子在束流场的作用下反复多次轰击真空室壁, 导致大量二次电子产生, 同时又加剧了粒子束流与电子的作用, 最终在真空室壁或附近聚集, 形成电子云^[1-2]. 电子云对储存环中束流的稳定性、能量、发射度、寿命等参数产生重要影响, 严重时将直接威胁到加速器的正常运行^[3-5]. 研究表明产生电子云效应的主要原因之一在于真空室材料的二次电子产额较高. 加速器真空室内产生二次电子的初始电子能量大部分低于数 keV^[6], 研究此能量范围内真空室材料的二次电子产额性能对于降低电子云效应的危害、改善系统的真空性能、保证加速器正常稳定运行具有重要意义. 国外加速器实验室如 SNS、SLAC、CERN 等都进行了这方面的详细研究.

真空室材料的二次电子产额是与电子云形成密切相关的物理性能, 它随着入射电子束能量的变化而变化. 本文设计了针对真空室材料小样品进行的二次电子产额测试的装置, 并对常见的真空室材料进行了二次电子产额测试. 为了使测试结果能真实反映真空室材料的性能, 测试条件尽可能接近于真空室内的情形, 一般入射电子束能量在几 keV 内, 流强在 nA 数量级.

2 材料的二次电子性能

材料受到入射电子轰击而从表面发射出来的二次电子包括各种原因产生的电子, 如被材料表面弹射回

来的原电子、被材料内原子核弹射回来的原电子、内级电子克服表面势垒逸出的电子等, 它们主要区别在于能量的不同. 一般材料的二次电子能谱如图 1 所示.

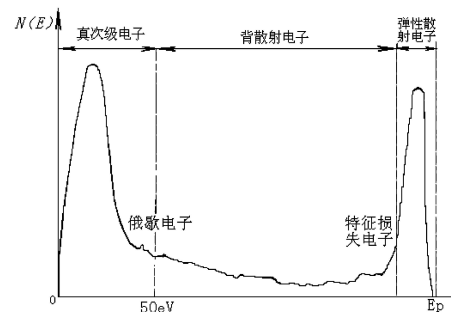


图 1 材料的二次电子能谱

二次电子的能谱可以大体上分为 3 部分: 在 E_p (入射电子的能量) 附近出现一个峰, 称为快峰; 在 0—50eV 范围内, 出现一个峰, 峰值位置在 10eV 附近, 这部分是真正的二次电子; 其余部分没有明显的峰, 电子数量相对很小. 其中快峰与原电子的能量 E_p 对应, 实际上是从发射体表面势垒反射回来或与发射体表面晶格原子发生弹性碰撞后反射回来的原电子. 只有在中等能量的原电子轰击发射体时, 快峰是很狭窄的, 这些快电子数目只占到二次电子总数的百分之几. 但是当原电子能量较低 (< 20eV) 或很高 (几万 eV) 时, 反射电子的数目可以占到很高的比例^[7].

加速器真空室内, 激发二次电子的原始电子主要来源于同步辐射与真空室作用产生的光电子 (对电子储存环) 以及特殊位置产生的电子 (如注入段、高频腔

2008 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金(10675119)资助

1) E-mail: zhangyf@mail.ustc.edu.cn

等). 这些电子一般能量都相对较小, 在几个 keV 以内, 属于中等能量范围, 它们所激发的二次电子中绝大部分为真二次电子, 其能量在 50eV 之内, 其中弹性散射电子数目很少, 可以忽略. 在这样的测试条件下, 二次电子的成分比较简单, 能量范围单一, 给二次电子产额的测试带来方便.

3 真空室材料的二次电子产额测量装置介绍

3.1 电子发射源及电子束引出

电子发射源为热阴极灯丝, 对钨丝通电流加热产生发射电子. 实验要求入射到样品上的电流在 nA 数量级, 可以通过调整灯丝加热电流来实现. 灯丝、栅极、阳极要有合理的结构设计才能保证入射电子束具有良好的聚焦性能, 使得绝大部分入射电子束照射到测试样品上, 提高测试结果的准确度. 测试装置的聚焦结构通过 Opera-3D 软件设计计算, 结果如图 2.

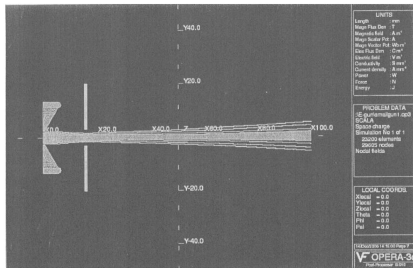


图 2 电子束聚焦结构设计图

图 2 中, 灯丝与阳极之间由 ORTEC 556 电压源施加在 0—3000V 之间的可调电压. 最终入射电子束的能量在 0—3000eV 之间变化.

3.2 二次电子收集与测量

一般的二次电子收集装置采用法拉第筒. 在二次电子产额测试装置中, 法拉第筒的存在使得样品直接接收入射电子的面积减小, 增加了入射电子束照射到法拉第筒上的几率, 给测试带来误差以及安装的不便. 设计中采用真空室壁作为二次电子的收集极, 它与其余真空室壁通过陶瓷绝缘隔开. 二次电子形成的电流用 KEITHLEY2400 型皮安表测量, 它可以测量精确到皮安级的电流强度, 符合实验要求.

4 常用加速器真空室材料二次电子产额测量结果及分析

在测试装置上进行了不锈钢及无氧铜材料的二次电子测试, 并测试了不锈钢样品在经过镀 TiN 薄膜处理后的结果, 如图 3, 4 所示:

图 3 中, “SS” 为不锈钢样品的 SEY 测试结果, “OFHC” 为无氧铜样品的 SEY 测试结果. 样品在测试前进行了简单的清洗. 图中可以看出, 在入射电子束能量大于 2200eV 时, 两者的测试结果基本没有什么差别, 不锈钢材料稍稍小一些. 其余能量范围内, 无氧铜的 SEY 比不锈钢材料要明显小很多. 两者峰值都出现在 400eV 附近, 不锈钢峰值为 2.02, 无氧铜为 1.68. 图 4 中, “SS” 仍为不锈钢材料的测试结果, “TiN/SS(1)” 为经过镀 TiN 薄膜处理后的不锈钢样品的测试结果, 该样品在大气状态下保存 10 天左右, 材料表面受到较为严重的污染; “TiN/SS(2)” 为另一个经过镀 TiN 薄膜处理后的不锈钢样品的测试结果, 该样品在镀膜处理完成后, 立即进行 SEY 测试, 中间暴露大气的的时间约为 10min, 样品受到了轻微的大气污染. 可以看出镀 TiN 薄膜处理是一个非常有效的减小真空室材料二次电子产额的方法, 但镀膜的表面状态对材料的 SEY 性能有较大影响. 样品暴露大气时间越短, 则表面受到碳氧化物污染就越轻, 其 SEY 值就越小. 由于条件所限, 没有进行镀膜样品的原位 SEY 测试. 而 F. Le Pimpec 等人对被污染镀膜样品进行离子束清洗, 发现其二次电子产额会进一步降低^[8], 最终得到整个测试能量范围内镀膜样品的 SEY 降低到 1 附近, 满足实际应用需要.

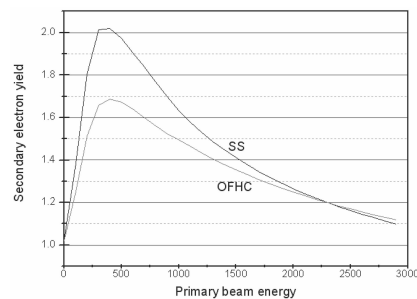


图 3 不锈钢及无氧铜测试结果

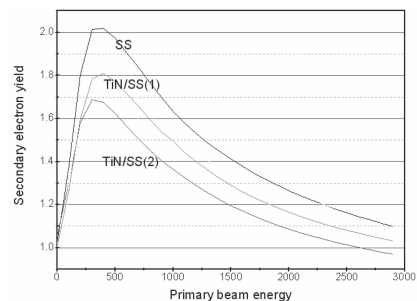


图 4 不锈钢及经镀膜处理后的测试结果

5 结论

为了研究真空室材料特性对电子云形成的影响, 设计了真空室材料样品的二次电子产额测试装置, 测试了常见的真空室材料不锈钢、无氧铜的二次电子产

额特性, 并测试了不锈钢材料在经过镀 TiN 薄膜处理前后的对比测试结果. 测试结果表明镀 TiN 薄膜处理

是降低不锈钢材料二次电子产额的有效处理方法.

参考文献(References)

- 1 GUO Z Y, LIU Y D, QIN Q et al. Proceedings of APAC 2004, Gyeongju, Korea. 44—48
- 2 Furman M A, Pivi M. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001. 1898—1900
- 3 Harkay K. Electron Cloud Observations: a Retrospective [C]//Proc. of The 31st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Electron-Cloud Effects "E-CLOUD'04". California, 2004
- 4 Zimmermann F. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001. 666—670
- 5 Harkay K et al. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001. 671—675
- 6 YIN Li-Xin. Physical Design and Experimental Study of the Ultrahigh Vacuum System for Synchrotron Radiation Storage Ring. Master degree thesis of University of Science and Technology of China, 1997. 49—50 (in Chinese) (殷立新. 同步辐射电子储存环超高真空系统物理设计与实验研究. 中国科学技术大学硕士学位论文, 1997. 49—50)
- 7 JIANG Jian-Ping, WENG Jia-Hui, YANG Pan-Tang. The Principle of Cathodes Electronics and Gas Discharge. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. 222—223 (in Chinese) (江剑平, 翁甲辉, 杨泮棠. 阴极电子学与气体放电原理. 北京: 国防工业出版社, 1980. 222—223)
- 8 Le Pimpec F et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, **551**: 187—199

Secondary Electron Yield Studies on Vacuum Materials^{*}

ZHANG Yao-Feng¹⁾ WANG Yong WEI Wei WANG Jian-Ping
FAN Le GUAN Chang-Ying LIU Zu-Ping

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract A secondary electron yield test device for vacuum material study is set up, and its detailed design described in this paper. The test results for a few common vacuum materials with and without TiN film coating are presented, and the influential factors on secondary electron yield are analyzed. All the work will be helpful to the surface pretreatment of vacuum materials.

Key words electron cloud, electron secondary yield, vacuum chamber material, TiN coating

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10675119)

1) E-mail: zhangyf@mail.ustc.edu.cn