

射超软 X 射线辐照的植株,它具有较高生物效应,也将会有较大的突变频率和宽的突变频谱出现.从而扩大了可选育突变新品种的范围;它可成为一个有利的重要诱变手段之一.

还需指出的,在今后实验中,需要注意研究同步辐射的能谱和剂量的不同性和重复性对生物效应的影响.

参 考 文 献

- [1] 顾德法,软 X 射线在农林业中的应用,原子能出版社,(1988),146—148.
- [2] F. K. S. Koo, Induced Mutations in plants, IAEA/FAO, Vienna, (1969), 305—312.
- [3] 许耀奎等,作物诱变育种,上海科学技术出版社,(1985),177—193.

同步辐射软 X 射线单色仪的进展¹⁾

吕 丽 军

(中国科学技术大学合肥国家同步辐射实验室,合肥 230029)

摘要 介绍了同步辐射单色仪光束线和与之相关的光学技术,阐述了第三代高亮度光源对单色仪光束线提出的新挑战,最后简要介绍了目前国际上主要的同步辐射软 X 射线单色仪系统和它们的发展.

关键词 软 X 射线,单色仪,同步辐射

同步辐射作为一种理想的 X 射线、真空紫外(XUV)光源,已在众多科学技术领域中发挥越来越大的作用.研究并发展 XUV 光学技术和仪器是同步辐射应用的重要前提.同步辐射是一种具有连续光谱分布的光源,而大部分实验需要的是在一定波段范围内可选择的单色光,并且对光束的光子通量、偏振、截面尺寸等都有要求,因此在同步辐射光源和实验站之间需要一些专门的光学装置(光束线)把它单色化并聚焦到实验样品处.单色仪光束线是一项相当复杂的光学工程,它对光学设计、光学元件的加工、检测和评价等一系列理论和技术问题提出了许多新挑战.研究并提高光束线的性能对开拓 XUV 波段光学技术和有效利用同步辐射具有重要的意义.

1 单色仪光束线的概念

光束线的主体是单色仪,它起着把同步辐射单色化的作用.在软 X 射线、真空紫外波段,我们一般采用光栅单色仪;而在硬 X 射线波段,则用晶体单色仪.为了把同步辐射光源聚焦于单色仪的入缝处(在色散平面内),我们通常采

用一个前置光学系统;它以一定的缩放比成像,使光源与单色仪的接收相匹配.在许多情况下,实验对样品处的光束尺寸和准直度也有要求,这样就需要用后置光学系统把单色仪分光后的光束再次成像到实验样品处.

众所周知,XUV 辐射在空气和绝大多数物质中被强烈吸收,光束在单色仪光束线内的传输必须在超高真空下进行,整个光束线系统必须密封,并用泵把它抽成超高真空.光束线主要由镜箱、传输管道、各种真空阀门和真空泵等组成.由于 XUV 光辐射本身的这种特殊性能以及实验对光源光谱性能(如分辨率、光通量、束斑尺寸等)的要求,因此,光束线一般应符合下列基本要求:

首先,考虑光的传输效率.由于 XUV 辐射几乎不能透过所有材料,因此只能采用反射或衍射光学系统,如反射镜、光栅和晶体元件.光除了被吸收外还会被散射,实验表明,光的散射与光波波长和表面光滑程度有关,当光的波长比表面粗糙尺度大得越多,光的散射就越小;在 XUV 波段,光的波长比可见光短得多,因

1) 1995 年 6 月 12 日收到初稿,7 月 19 日收到修改稿.

此, 光学元件表面粗糙度要求很小 ($<1\text{nm}$), 才能获得足够高的反射率。另外, 光的反射还与光线入射方向有关, 入射角越大, 反射率就越高。在 30nm 以下的软 X 射线波段范围, 一般采用掠入射光学系统, 才能获得足够高的反射率。此外, 元件还要经受很强的同步光的长期照射, 这就要求光学元件的材料不仅硬而耐磨, 而且还要有很好的机械化学、热稳定性能; 一般采用碳化硅、石英、微晶玻璃、晶体及铜合金等作为这些元件的材料。

其次, 由于要求光束线有超高真空的环境, 束线上绝大部分机械部件应采用不锈钢、硬铝、无氧铜等真空性能很好的材料; 在超高真空环境下, 所有光学元件的运动及调整都必须密封传动。单色仪的分辨与仪器的长度成正比, 与通光狭缝的宽度成反比; 镜子或光栅成像的焦距一般都有几米长, 为满足高分辨光谱实验的要求, 单色仪的狭缝宽度要足够小 (例如 $10\mu\text{m}$), 这样光学元件大都要求有很高的机械定位、调节精度, 才能保证光通过狭缝或打在光学元件面上的正确位置。与波长扫描有关的光学元件运动一般采用微机控制, 和实验站数据采集、处理同步。

总而言之, 光束线是一项集精密光学、精密机械、超高真空和微机控制的综合性技术, 费用十分昂贵。至今还没有其他光学系统要求这么宽的波段、这么短波长的反射及在超高真空环境下承受这样强的 X 射线载荷; 而且它要求有很高的像质, 以满足高分辨要求。为了单色仪光束线有高的传输效率, 系统有好的成像性能, 光学元件有高的加工质量, 已经在束线的研制、光学元件的制备、评价和检测等方面进行了大量工作。

近年来, 第三代高亮度同步辐射光源成了人们关注的焦点。这种先进的光源是以波荡器和扭摆器 (Undulator 和 Wiggler) 插入装置为特征的, 它比第二代光源具有更小的发射度和更高的光谱亮度。也就是说, 在较小的源发散角内具有较多的光子数, 光源本身尺寸也小。从单色仪角度来看, 接收角越小, 光学系统成

像质量就越好; 源尺寸越小仪器分辨率就越高。所以第三代高亮度光源为光子通量、光谱分辨和空间分辨上一个台阶提供了基础。但是, 单色仪的光谱性能, 如分辨率 (或光通量), 是与光源尺寸、光学系统的像差、光学元件面形精度等因素的卷积有关。因此, 要保持高亮度光源带来的优势, 就要对单色仪光束线技术提出更苛刻的要求。

首先, 更高的光谱或空间分辨要求单色仪系统本身的成像质量更好; 在实际设计中, 一般要求光学系统基本消除主要像差 (离焦、像散), 并且要求彗差和像散彗差也足够小。另外, 光学元件的面形精度成了实现高分辨光谱的关键因素之一; 例如, 为实现近 10000 的光谱分辨率, 要求单色仪中的光学元件面形精度达 0.2 弧秒 (甚至 0.1 弧秒)。这样对光学元件的研制和检测技术提出了更高的要求。目前, 因为非球面形精度的限制, 所以单色仪设计倾向于采纳具有简单面形的元件 (如平面、球面和柱面)。

其次, 由于光源具有很高的辐射功率, 将使光学元件产生严重的热形变。根据实验和计算, 如不加冷却装置, 光学表面变形将会是面形加工精度的数十倍。因此光学元件必需采用有效的冷却手段, 使元件表面热变形符合设计要求, 结果实际装置往往非常复杂。同时, 对光学元件材料的要求也极为苛刻, 至少光束线上游的元件一般应采用 SiC, glidcopper (铜合金) 等材料。

第三点, 由于光源具有更小的发射度, 使得光束具有更小的束腰截面和发散角; 同时, 更高的光谱分辨要求单色仪的狭缝宽度开得更小; 因此, 各光学装置的稳定度也应提高, 这样对环境、材料、机械等因素要求也就更高。

自 80 年代以来, 随着光源从第二代专用同步光源发展到第三代高亮度光源, 单色仪的性能得到迅速提高。分辨率从 500 提高到 10000 , 通量增加二到三个量级, 亮度增加四到五个量级。使高分辨率光谱应用于光电子发射、能量分辨荧光光谱和显微术成为可能。这惊人的成

就除了光源性能提高的因素外, 很重要的来自于上述单色仪光束线技术的不断改进。

2 同步辐射软 X 射线单色仪的发展

在这一节中, 我们将简要介绍主要的全反射软 X 射线单色仪系统 (工作在 1—100nm 波段范围) 和它们的发展。从 60 年代到 90 年代, 软 X 射线单色仪经历了很大的发展, 人们相继提出了许多单色仪系统, 通常把它们分为平面光栅和球面光栅单色仪两类。实际上在单色仪发展过程中, 这两类单色仪相互对比、相互借鉴, 有的在工作原理上也没有本质的区别。

1968 年, C. Kunz 提出了叫 Gleispimo 的平面光栅单色仪设计^[1]。在他的设计中, 把同步辐射光源作为单色仪的源(入缝), 把入射光束近似认为平行光, 在平面光栅前应用一既转动又平移的平面前置镜, 使光栅在出射方向保持着最大衍射效率, 且能有效地抑制高级次, 然后用一后置抛物镜将光束聚焦于出缝。在超高真空下, 前置平面镜要作二维运动, 而且要满足的一定的精度要求, 实现相当困难。在 1978 年, W. Eberhardt 提出了叫 Flipper 的单色仪^[2], 它应用几块不同角度的固定平面前置镜代替这运动的平面前置镜, 每块镜子覆盖一波段范围。这两个单色仪的分辨率主要受离焦和抛物镜面形精度的限制。在 80 年代初期, 由 H. Petersen 在 Gleispimo 和 Flipper 单色仪基础上, 提出了 SX-700 单色仪的概念^[3], 它在平面光栅前也应用一前置平面镜, 但是绕着一镜面外的轴转动, 以控制光束在光栅上的偏角, 使光栅的像位置与波长无关, 再应用一后置椭球镜将光束聚焦于出缝。这个仪器在所有波长完全消除了离焦, 而且前置平面镜只有转动没有平移容易实现; 但分辨率主要受椭球镜的面形精度影响。随着这块镜子加工精度的不断提高, 它在软 X 射线波段已获得了 10000 的分辨率, 但仪器比较复杂昂贵。在 Petersen 的 SX700 设计中, 不仅椭球镜的加工很困难, 而且存在着严重的像散。针对这些问题, 由 R. Nyholm

等^[4], Lu (本文作者) 等^[5], W. Jark^[6], H. A. Padmore 和 R. Reininger 等^[7,8]提出了几种 SX-700 改进型设计。

在平面光栅单色仪早期工作中, 应该提到 K. P. Miyaka 等在 1969 年提出的一个简单的平面光栅单色仪设计^[9]: 它应用一平面光栅和一固定的后置球面镜, 在一个波长处消除离焦。M. R. Howells 进一步研究了单色仪特性, 发现同一球面镜有两个位置可以消除离焦, 因此他建议改进这块后置球面镜的机械装置, 使之可以移动^[9]。

在球面光栅单色仪方面, 较早的设计是一些符合罗兰圆条件的单色仪设计。比较典型的设计是 Grasshopper 单色仪^[11]。从原理上看, 该仪器有较好的分辨率, 但它的波长扫描运动很复杂, 实现十分困难。在 80 年代初期, 由 W. R. McKinney, Howells 和 C. T. Chen 等研究并设计了环面光栅单色仪^[12,13], 它的波长扫描运动简单, 具有高光子通量和中等光谱分辨率。后来, Chen, H. Hogrefe 和 Padmore 应用水平和垂直分离聚焦几何, 提出了一新的球面光栅单色仪设计 (Dragon)^[14-16]。在单色仪的入缝和出射缝之间, 光学元件仅用球面光栅; 为了在各波长处都消除离焦, 除了要求光栅转动, 同时还要移动出缝。它具有高分辨率和高通量的性能, 已广泛用于许多光谱实验中。它的不足之处是光栅覆盖波段范围较窄, 移动出缝时会造成样品处光斑尺寸变化, 且高级次抑制性能差。针对这些问题, Padmore 提出了一变角度的球面光栅单色仪^[7], 它应用一个类似于 SX-700 中的前置平面镜来控制光束在光栅上的偏角以消除离焦, 结果保持出缝位置固定, 但对 Dragon 的调谐范围窄, 高级次抑制性能差的情况改进不大。

软 X 射线单色仪在最近又取得了新的进展。一是 Lu 等提出了一简单的平面光栅单色仪^[17], 它避免了一般平面光栅单色仪中应用复杂的非球面元件, 而是在平面光栅前应用一块或几块转动的前置球面镜, 波长扫描机制和 Padmore 变角度球面光栅单色仪相似。单色仪

具有宽的工作波段和好的高级次抑制性能,并具有很高的光谱分辨率。二是在罗兰圆单色仪方面, E. Ishiguro 和 F. Senf 等提出了一近似满足罗兰圆条件的单色仪设计^[18,19], 它克服了一般罗兰圆单色仪波长扫描的复杂运动, 在球面光栅前应用一块或几块不同角度的平面或球面前置镜, 在入射光束方向移动光栅-镜子箱体, 并同时转动光栅使之近似满足罗兰圆条件, 仪器的性能较为理想。上面叙述的单色仪都是采用等槽距的常规光栅。我们都知道光线的衍射方向由光栅方程决定, 如光栅刻槽间距呈一定分布, 就可以修正衍射光线的方向, 也就是校正像差。M. C. Hettrick, Mckinney 等人研究并发展了的变间距刻槽光栅单色仪, 它具有固定的人缝和出缝, 波长扫描仅需光栅的转动^[20,21], 但光栅制造比较复杂。

从单色仪发展过程, 我们有以下经验和教训: (1) 应用面形简单的光学元件, 以减小光学元件面形精度对仪器性能的影响; 光学元件数目尽可能少, 以减少反射损失(特别是在小于 4nm 的波段范围); (2) 光学系统应该基本消除离焦和像散, 并且把彗差和像散彗差控制得足够小; (3) 具有简单的波长扫描运动; (4) 变角度单色仪有利于得到宽的波长调谐范围和高级次抑制。

参 考 文 献

- [1] C. Kunz, R. Haensel, B. Sbnntag, *J. Opt. Soc. Am.*, **58**(1968), 1415.
- [2] W. Eberhardt, G. Kalkoffen, C. Kunz, *Nucl. Instrum. Methods*, **521**(1978), 81.
- [3] H. Petersen, *Opt. Commun.*, **40**(1982), 402.
- [4] R. Nyholm, S. Svensson, J. Nordgren et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **A246**(1986), 267.
- [5] Lu Li-Jun, Chen Jin-Yong, *Nucl. Instrum. Methods*, **A369**(1991), 581.
- [6] W. Jark, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**(1992), 1241.
- [7] H. A. Padmore, *Rev. Sci. Instrum.*, **60** (1989), 1608.
- [8] R. Reininger, V. Saile, *Nucl. Instrum. Methods*, **A288**(1990), 343.
- [9] K. P. Miyake, R. Kato, H. Yamashita, *Sci. Light*, **18**(1969), 39.
- [10] M. R. Howells, D. Norman, J. B. West, *J. Phys. E*, **11**(1978), 199.
- [11] F. C. Brown, R. Z. Bachrach, N. Lien, *Nucl. Instrum. Methods*, **A152**(1978), 73.
- [12] W. R. Mckinney, M. R. Howells, *Nucl. Instrum. Methods*, **A172**(1980), 149.
- [13] C. T. Chen, E. W. Plummer, M. R. Howells *Nucl. Instrum. Methods*, **A222** (184), 103.
- [14] H Hogrefe, M. R. Howells, E. Hoyer, *SPIE*, **733**(1986), 274.
- [15] H. A. Padmore, *SPIE*, **733**(1986), 253.
- [16] C. T. Chen, *Nucl. Instrum. Methods*, **A256**(1987), 595.
- [17] Lu Li-Jun, D. Cocco, W. Jark, *Nucl. Instrum. Methods*, **A339** (1994), 604.
- [18] E. Ishiguro, M. Suzui, J. Yamazaki et al, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**(1989), 2105.
- [19] F. Senf, F. Eggenstein, W. Peatman, *Rev. Sci. Instrum.*, **63** (1992), 1326.
- [20] M. C. Hettrick, S. Bowyer, *Appl. Opt.*, **22**(1983), 3921.
- [21] W. R. Mckinney, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**(1992), 1410.

(上接第 768 页)

题 目	作者 期号 页码
顶夸克已被发现	李卫国 8 (512)
发现 111 号和 110 号新元素	孙汉城 9 (533)
«一代师表叶企孙»一书已出版发行	虞 昊 9 (封四)
数理科学部物理学科基金项目资助情况和优先资助领域	国家自然科学基金委员会数理科学部 10 (630)
新的光折变晶体——掺铈钛酸钡	朱 镛 10 (636)
中微子通信原理和技术	吴 锋 10 (637)
现有光刻技术改造后可以制造线宽为 0.1 μ m 的集成电路	吴自勤 11 (703)
弘扬«物理»特色, 增强«物理»生命力——第六届«物理»编辑委员会全体会议简介	冯禄生 11 (704)
先有手性均一性还是先有生命?	王文清 牛卫东 12 (742)
含笼状 Si ₂ 的金属硅化物的合成和物性	吴自勤 12 (743)