

BEPC 同步辐射软 X 射线光刻光束线的总体设计特性

邵景鸿 徐正良

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 介绍我们为北京正负电子对撞机(Beijing Electron Position Collider, BEPC)同步辐射实验室建造的软 X 射线光刻光束线的总体设计思想, 并说明其中的束线物理设计、反射镜扫描、调整机构、激光模拟光源、真空系统和电子学、微机控制等系统中的关键技术。此外, 对束线中的关键器件之一的超薄铍窗(18 μm 厚)的耐压强度给出了与理论计算趋势相一致的实验结果。

关键词: X 射线光刻; 光束线; 真空; 扫描; 铍窗

1 引言

同步辐射装置是由产生电磁辐射的电子贮存环、与贮存环直接联接的光束线前端区以及适应各种不同物理实验要求的若干条光束线和其相应的实验站所组成。软 X 射线光刻光束线的物理功能是为光刻实验站提供符合亚微米光刻严格要求的软 X 射线照明光源。

经过光刻束线调整后的软 X 射线同步辐射光同普通电子轰击靶的常规 X 射线源相比具有许多优异的特性。其光强要高两个数量级, 曝光效率可以提高(20~30)倍。光束垂直发射角仅($10^{-3}\sim 10^{-4}$)弧度, 且光源点尺寸很小, 这些特性都大大减小了光源几何效应引起的刻线误差, 从而提高了图形的加工分辨率。此外, 辐射的高稳定度对光刻曝光的均匀性也是非常有利的。因此, 到目前为止, 可以认为经光束线调整的同步辐射是软 X 射线光刻最理想的光源。

为了更好地保持和运用同步辐射的优异特性, 在光刻束线的总体设计中必须解决以下三个方面的问题。即为了适应贮存环严格的真空要求, 束线必须具有超高真空的能力; 其次, 对强辐射造成的各关键部件的热畸变, 必须有相应的冷却措施, 消除变形影响。此外, 通过合理的掠入射光学系统和滤波器的设计, 正确地给出有效工作波段和最大限度地输出高强度和均匀的照明光斑。

2 光刻束线概述

2.1 工程指标

(1) 波段范围 $4\text{\AA} \sim 14\text{\AA}$ (有效波段 $4\text{\AA} \sim 14\text{\AA}$); (2) 水平接收光束角 7.5mrad ; (3) 垂直接收光束角 0.4mrad ; (4) 光束与镜面夹角 1.5° (掠射角); (5) 铍窗输出光斑尺寸为 $35 \times 35\text{mm}^2$, 铍窗压差 $1/3\text{bar}$ (待试验后定); (6) $35 \times 35\text{mm}^2$ 光斑区内光强均匀性优于 $\pm 10\%$; (7) 无光照时, 镜箱系统的静态真空度优于 $5 \times 10^{-10}\text{Torr}$; (8) 光源点垂直漂移 $\pm 0.3\text{mrad}$ 。

2.2 光刻束线的组成

光束线除超高真空镜箱和高真空管道以及各种阀门和测量规计外, 主要由以下几个部分组成 (光刻束线各主要分系统示于图 1):

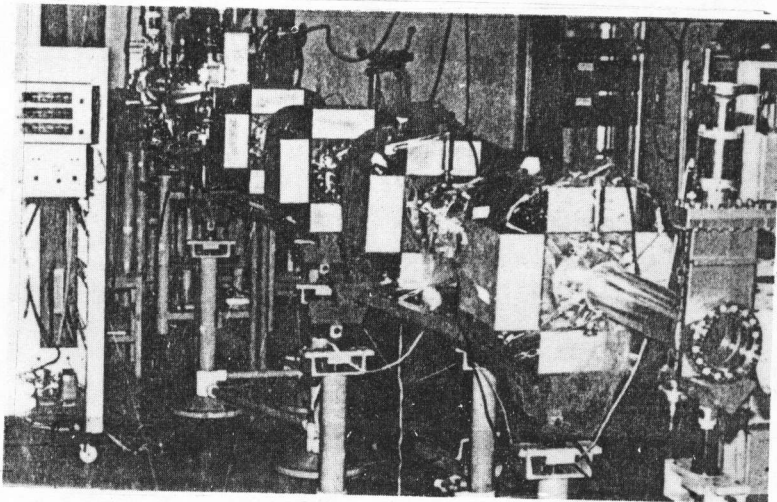


图 1 光刻光束线主要系统部分, 从最前端依次为水冷挡光快门; 激光模拟光源; 反射镜系统; 差分系统及各系统调整支架

(1) 水冷挡光板装置, 主要用来在非曝光时间内避免同步辐射对反射镜和镜箱的长期照射, 其工作状态由曝光的开启和关闭指令进行联锁控制。

(2) 激光对准系统, 在调光时用来模拟同步光, 以便于反射镜系统和光束管道的调整, 最终达到均匀照明光斑和光刻面的对准。

(3) 光束垂直漂移位置监测器, 主要用来监测每次注入时光源点在垂直方向的角漂移, 以便控制反射镜按相应漂移角在垂直方向平移, 从而消除由于角漂移所造成的能量损失。

(4) 反射镜系统, 包括反射镜和反射镜的扫描、调整及超高真空的馈入机构, 是光刻束线的核心部分。

(5) 铍窗组件, 用以隔离氦气室和高真空管道系统, 并作为光学系统的高通滤波器, 截去光刻不需要的低能 (900eV 以下) 波段。

(6) 声波传感器, 为了防止由于意外铍窗破裂和其它人为事故所造成的对贮存环超高真空环境的破坏, 该传感器可指令前端区快速阀在 (5—8) ms 时间内关闭。

(7) 氦气室, 位于铍窗和光刻室之间, 通过氦气循环实现对掩模的冷却, 当氦气具有一定压力时, 还可以对硅片起到压平的作用。当氦气超过额定压力时, 还设有低压传感器可立即指令反射镜后面的快速阀立即关闭, 对超高真空系统实行第一级保护。

(8) 束线各种结构支架, 可对所支承的镜箱和有关部分进行多维调整, 从而保证光学系

统和同步光光轴重合。

(9) 控制系统，通过计算机和手动两种状态可分别实现反射镜扫描和俯仰、平移、侧摆三维调整及水冷挡光板升降的控制功能以及各单元系统工作状态的显示功能。

(10) 真空系统，由与前端区直接相接的超高真空系统、差分系统和高真空管道三部分组成。超高真空系统包括水冷挡光板、激光对准系统和反射镜箱三部分。在超高真空系统和差分系统间有气动和快速阀。高真空管道和光刻氦气室间由厚度为 $18\mu\text{m}$ 的铍窗作隔离元件。

3 光刻束线光学系统物理设计特性概述

反射镜与激光模拟光源系统见图 2。

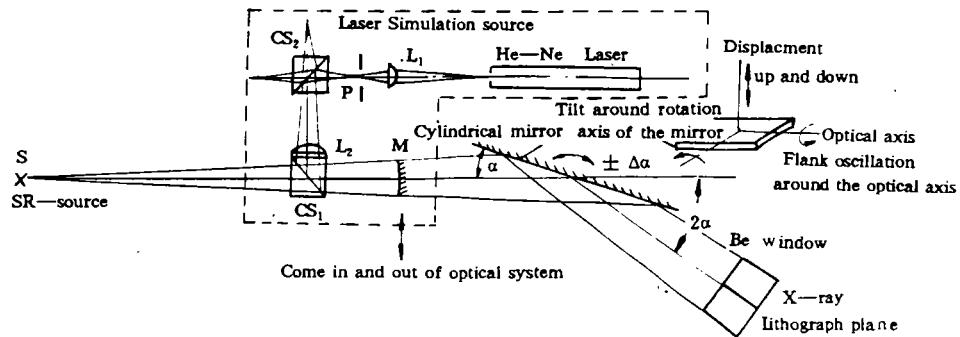


图 2 光刻束线掠入射光学系统与激光模拟光源系统 (图中示出了反射镜三维调节的运动方向及 M 反射镜进出光路的方向)

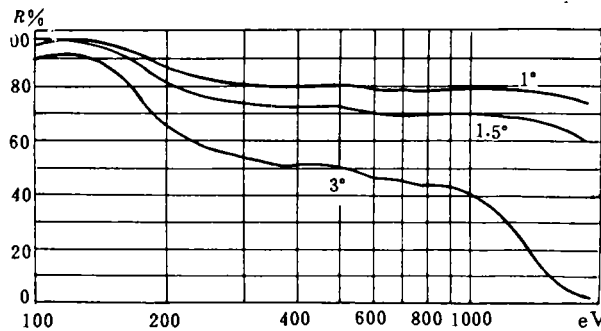


图 3 反射镜金镀层，在不同掠射角 (1° , 1.5° , 3°) 下软 X 射线的光谱反射率

由于同步辐射的强度分布在水平方向是均匀的，但在垂直方向却成高斯状态分布，为解决在垂直方向的光强不均匀性，我们在方案拟定阶段，曾就国外实现光斑扫描的多个方案进行过比较，此外，考虑了 BEPC 同步辐射的特有条件而确定了一个根据曝光剂量要求，可随时改变扫描频率的掠入射金属柱面反射镜系统。该反射镜系统与束线后面的铍窗一起构成了反射光学的滤波系统。

根据工程指标中的反射镜掠射角 α ，垂直发射角 θ ，反射镜中心至光源点的距离 l ，水平发

射角 ψ ，我们首先计算了反射镜的几何尺寸：长为 240mm，宽为 100mm。

反射镜半径为 $R = 2 \cdot \sin \alpha \cdot f^{[1]}$ ，式中 α 为反射镜的掠射角， f 为系统焦距，它取决于反射镜工作在何种状态，一般设计原则是反射镜应工作在准直状态，在我们的物理方案设计时，考虑到由于反射镜远离（13.5m）光源所造成的光能损失，而采用了聚焦状态。当然，聚焦状态下的几何效应对刻线误差的影响程度应可忽略不计，否则，这种有意识设置的聚焦状态是得不偿失的。

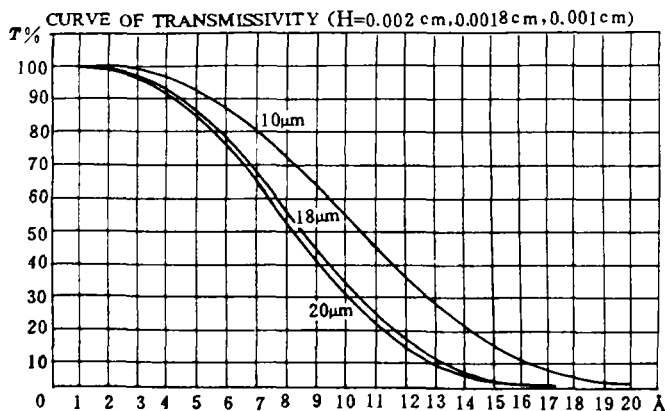


图4 不同厚度（10, 18, 20μm）的超薄铍膜的软 X 射线光谱透射特性

由于反射镜的焦距与掠入射角 α 的函数关系为 $f = R/2 \cdot \sin \alpha^{[2]}$ ，故经反射后的光斑在水平方向的宽度随扫描角 $\pm \Delta \alpha$ 的变化（此时焦距 f 是 $1/\sin \alpha$ 的函数）而使光斑的能量密度在作非线性变化。为了补偿光斑宽度的非线性变化，在整个扫描范围内所造成的不均匀照明，则必须控制扫描速度作为掠入射角 α 的函数，使光斑作非等速扫描，即瞬时扫描速度与相应的光斑宽度乘积为一常量。

通过建立光斑宽度和系统光学参数的关系，可求得保证在扫描范围内均匀照明的非线性扫描凸轮方程为： $\rho(\theta) = 0.001911032 \cdot \theta - \frac{1}{2} \cdot 2.215166 \times 10^{-6} \times \theta^2$ 。式中 θ 为凸轮半周期扫描的转角（180°）， $\rho(\theta)$ 为凸轮升程即连接反射镜的推杆移动量。

根据已建立的凸轮方程，可求出光斑在扫描范围中心的速度。进而可求得 MASK 面上所需的总曝光时间 $t = (0.064/n) \cdot N$ ，式中 n 为扫描频率， N 为所需扫描次数。

当反射镜随镜箱装入束线后，如何保证反射镜与入射光束的掠射角为 1.5°，这对提供光刻所需波段是很关键的调整技术，为了解决这个问题，我们在反射镜后安装了一个与柱面镜母线方向成 85°角的平面反射镜，当与激光模拟光源调同轴时，可在激光对准系统中看到与反射镜成 5°角的自准反射像，之后通过俯仰机构可把反射镜准确地调到 1.5°。

前面已提到掠入射反射镜和铍窗构成了光束线的滤波器。根据散射因子^[9]所计算的反射镜金膜的光谱反射曲线（图3）可以看到：当掠射角为 1.5°时，波长为 6.3 Å（2000eV）的光谱反射率 $\geq 50\%$ ，当能量 $> 2000\text{eV}$ 时，反射率将明显下降。铍膜的透射特性可由 $T = e^{-\mu \cdot h}$ 求得，式中 μ 为铍膜的线性吸收系数， h 为铍膜厚度， $\mu = 0.78\lambda + 0.125\lambda + 0.226 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ ，其中 λ 以 Å 为单位计算。由算计曲线（图4）看出 $< 900\text{eV}$ （13.9 Å）的光子能量将全部吸收，而

>900eV 的能量将全部通过。

激光对准系统由图 2 可见，激光模拟光源若等效同步辐射光源，其唯一条件是它的发射角必须与同步光的水平发射角相同而且光轴重合，为了实现此条件，对准系统中环面反射镜 M 的曲率半径必须等于该镜到光源的距离，这样才能保证与激光经 M 镜反射后同时按激光的原路反射到对准系统并会聚于观察像面。否则，调整对准系统中的模拟光源与同步光重合。

4 反射镜扫描、调整机构的工作原理

4.1 反射镜扫描

反射镜扫描是靠镜箱 (MB) 外的扫描凸轮 (ca) 推动通过波纹管 (BI) 连接反射镜的推杆 (Le1) 按凸轮方程 $\rho(\theta) = r_0\theta - \frac{1}{2}a\theta^2$ 实现扫描运动。

4.2 反射镜的三维调整

反射镜通过俯仰、平移和侧摆三个调整机构实现其三个自由度的精度调节。其中俯仰和平移均靠两个步进电机 (M_1, M_2) 带动两个均为相同螺距的精密螺旋副 (SW_1, SW_2) 实现其反射镜上下移动，而侧摆调整是靠步进电机带动一个大速比的蜗轮副 (W) 使其反射镜中心在垂直于光轴的平面内旋转，为避免反射镜在旋转时产生侧向平移，蜗轮副的旋转中心必须与反射镜中心重合。

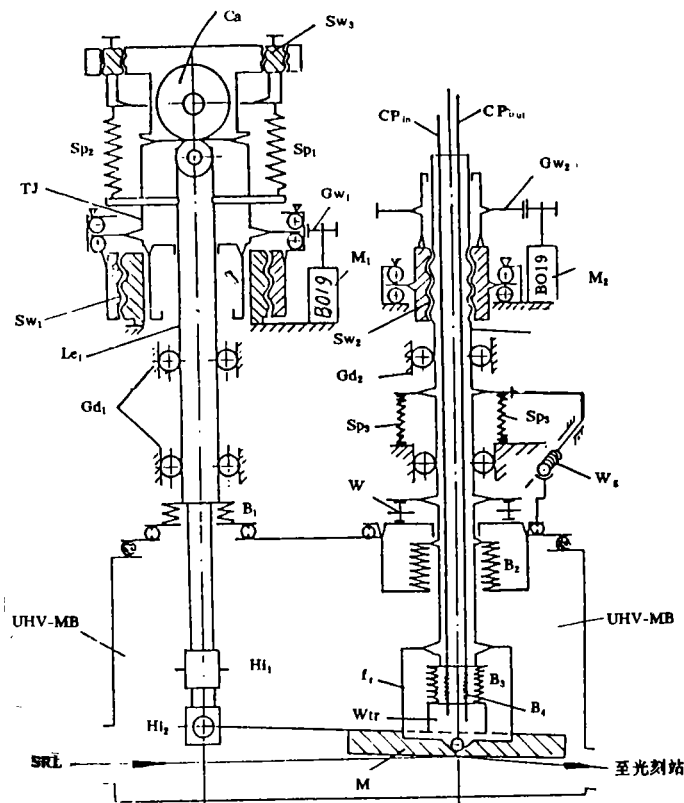


图 5 反射镜扫描调整机构原理图

当俯仰调整机构单独运动时，可使反射镜在含光轴的子午平面内旋转，在步进电机控制下，给出所需的俯仰角，其中包括 1.5° 掠射角和 5° 自准角。当光漂时，通过“同步控制”可实现二套机构同步移动，即实现反射镜上下平移，以适应光漂。平移后，为保证高能波段截止波长不变，可用俯仰机构调整漂移角，使掠射角仍为 1.5° 。

5 铍窗耐压强度的计算与实验

束线中铍窗即是一个高通滤波器，同时又是一个真空隔离元件。作为光学元件要求铍窗尽量的薄，而作为具有一定压差的真空系统的隔离元件则需尽量的厚。显然在压差允许改变的情况下，铍窗应首先满足束线的光学要求。根据铍窗对 X 射线辐射能量的吸收和氦气室所需压力，我们把铍窗厚度定为 $18\mu\text{m}$ 。

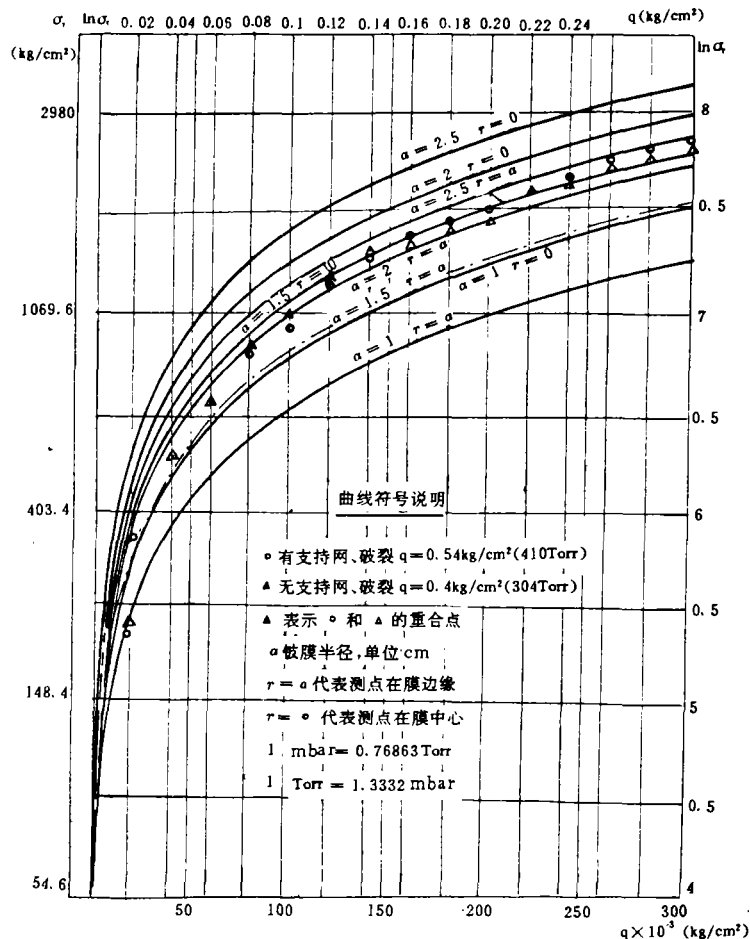


图 6 $\Phi 30$ 铍膜在均匀载荷，边缘、中心张应力理论和实验值作为 q 的 $3/2$ 次方的函数变化趋势

根据板壳理论^[8]，我们对不同直径的 $18\mu\text{m}$ 的铍窗进行了强度计算和相应实验。结果表明实验应力和理论计算的变化趋势是一致的（见图 5）。

从实验和理论曲线的一致性说明实验设计的边界条件和参数的控制是正确的。根据实验结果，通光孔径为 $\Phi 30\text{mm}$ 的铍膜，它的极限破坏载荷定为 245Torr (325mbar) 是可靠的。而

氦气室的工作压差必须按原定指标降低一倍为 150mbar (114Torr)，此时膜的张应力对直径 $\Phi 50\text{mm}$ 的窗口，压差只能为 90mbar， $\Phi 40$ 窗口为 110mbar。

由于镀膜在束线光学系统中作为一个高通滤波器，则 900eV 以下的低能辐射对膜的抗张强度影响也必须考虑。目前实验阶段使用的窗口为 $\Phi 20\text{mm}$ ，且在兼用模式下工作，而未采用冷却措施。

美国 FES 公司在产品质量检验报告中已明确提出 $18\mu\text{m}$ 镀膜只能光学密封而不能真空密封，其漏率为 $2E-4\text{STD} \cdot \text{CC}/\text{sec}$ (压差为一个大气压)，在该漏率下，镀膜作为高真空隔离器件，无疑给高真空系统抽气带来过大负担，因此，从保持高真空的角度降低氦气室压力也是必要的。

6 真空差分系统物理功能的兼容设计

根据光刻束线光束扫描的要求和一线多用的使用原则，真空系统除了正常的布泵，阀和测量规计外，我们重点对隔离超高真空和高真空的差分系统进行了既要保证系统的差分效果同时也应保证扫描光斑在差分系统中畅通无阻的物理兼容设计。通过现场调试，证明差分系统的兼容设计是成功的。系统差分梯度为 $1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-10} \text{Torr}$ 。通过曝光实验，证明四级差分口对在要求的扫描角 $\pm \Delta\alpha$ 范围的扫描光束无任何拦光现象，这一结果进一步表明四级矩型差分口通光孔径尺寸按光斑和扫描参数所进行的几何分配是合理的。

7 控制系统

7.1 束线总体对电控系统的要求

(1) 束线由专用微机控制，通过 RS-232 接口与光刻实验室中央处理机通讯；在不联机时，可以手动操作；(2) 反射镜扫描频率 4~15 转/秒；(3) 扫描负载力矩 $0.3\text{kg} \cdot \text{cm}$ ；(4) 反射镜扫描由光强监测装置发第一个脉冲启动，发第二个脉冲停止。在扫描过程中，中央处理机若发出停止命令，则立即停止扫描；(5) 在扫描过程中，每个周期的第一步，向光强监测装置发出一个起始脉冲。脉冲信号为 TTL 电平；(6) 反射镜进行平移，俯仰和侧摆三个自由度调整，并有相应的行程限位保护及指标；(7) 平移负载力矩 $35\text{kg} \cdot \text{cm}$ ；(8) 光源角漂移 $\pm 0.3\text{mrad}$ 时，应对反射镜进行平移和角漂移的修正；(9) 控制挡光快门的开关及状态指示。

7.2 电路设计特性

束线电路框图如图 7 所示。它由 STD 控制计算机、扫描控制电路、反射镜调整系统和束线安全控制系统等四部分组成。主要特点有：

(1) 采用 STD-BUS 工业控制标准总线。我们研制了 DFC 功能模板，开发了束线操作系统和中央处理机对于束线的管理系统，组成束线专用的 STD 控制计算机。

(2) DFC 电路输出频率在 0—10kHz 程控可调，线性达 3×10^{-4} 。频率最小增量为 2.5Hz。取最低扫描频率 1600Hz 计算，频率的相对变化为

$$\frac{\Delta f}{f} < 2 \times 10^{-3}$$

为光强不均匀性的修正提供了灵活有效的手段。

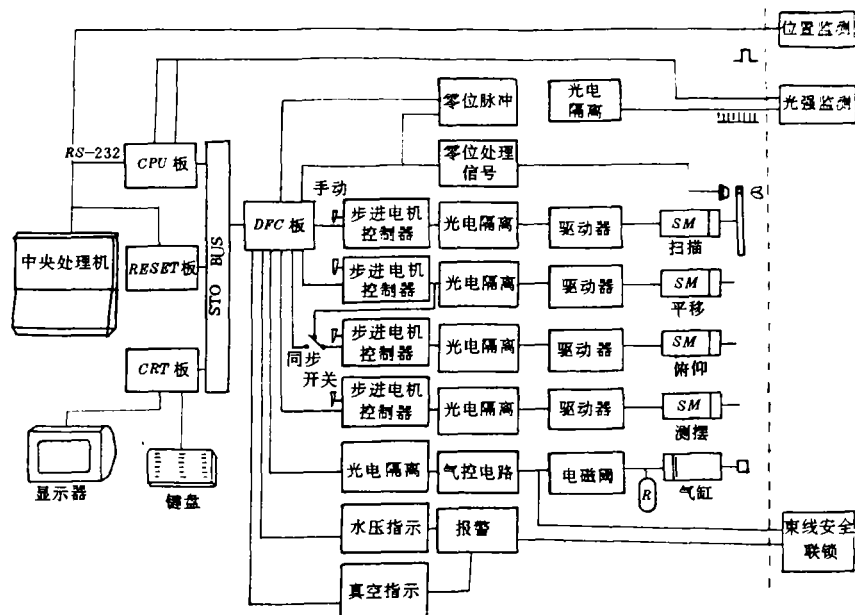


图7 束线控制系统框图

(3) 采用高低压双极桥式驱动电路。扫描运动行频率高达 8000Hz 以上。

(4) 系统设有手动和计算机控制二种方式：

计算机工作方式，不但可以接受束线专用微机控制，还可以接受中央处理机的控制，两者操作功能是一样的。反射镜扫描范围即可以是全区间的，也可以任意设定。

手动方式，适用于低速运行，便于试验和调整。

(5) 复位精度高。在每次扫描结束时，反射镜准确地停在零位，精度在 1 角秒以内，重复性良好。

(6) 系统安全可靠。束线的真空系统，水冷保护系统和气动系统被监视，发生异常时自动报警。水冷挡光快门只有在真空、水压和气压都正常，并且由安全联锁装置发出打开允许信号时才能打开。

8 研制结果与讨论

整条束线经过三个月的现场安装调试，各项主要指标均已满足工程指标要求，并于 1990 年 6 月 8 日首次成功地实现了同步辐射软 X 射线光刻，实验时，贮存环正在进行对撞实验，束流仅为 8mA，但仍得到反差优良，分辨率为 1 μ m 的清晰线条，之后，在专用模式下又分别获得了分辨率为 0.5 μ m 和 0.3 μ m 的清晰线条，曝光时间仅用了 5 分钟。光刻实验的成功，说明光刻束线的物理与工程设计是合理的，工程质量是优良的，目前已开始应用于亚微米光刻的实验研究。

一线多用的总体考虑与实施为扩展束线的使用功能提供了灵活性，在束线低、高通滤波系统之间可给出 4 \AA 至红外波段的连续辐射，这样，相应的物理实验可在此波段范围任意选取各自所需的辐射光源。目前在束线 24M 处已增设了生物物理实验站，1992 年 6 月在生物站后

又增设一个多层膜反射率测试装置, 现正在进行测试实验。

为了更好地运用同步辐射的准直特性, 将来有可能将反射镜的聚焦工作状态改为自准状态下工作, 但这取决于近期光刻实验研究结果。如果光刻线条的“半阴影”与聚焦状态下理论计算的“半阴影 ($0.05\mu\text{m}$)”是相符的, 则反射镜在聚焦状态下工作仍是一种理想方案, 否则, 应该改变反射镜的工作状态。

通过铍膜的强度实验, 说明铍膜的抗张强度低于它的抗拉强度极限。因此, 氦气室的压力应按实验结果降低, 否则, 铍窗的通光口径不可能加大, 也就是说, 将来氦气室的压力在保证掩模冷却的条件下, 可以随时调节, 以适应不同的通光口径的工作铍窗, 就其铍膜的漏气率来说, 也应降低氦气压。

参 考 文 献

- [1] R. P. Haelbich, J. P. Silverman, *J. Vac. Sci. Technol.*, B1 (4) Oct. — Dec. 1262, (1983)
- [2] M. Bieber, H. V. Scheunemann, H. Betz, A. Heaberger, *J. Vac. Sci. Technol.*, B1 (4), Oct. — Dec. 1291 (1983)
- [3] K. Heirrich, H. Betz, A. Heaberber, *J. Vac. Technol.*, B1 (4), Oct. — Dec. 1352 (1983)
- [4] F. Cerrina, H. Guckel, J. D. Wacey, *J. Vac. Technol.*, B3 (1), Jan. — Feb., 277 (1985)
- [5] K. H. Müller, H. Burghause, *J. Vac. Technol.*, B3 (1), Jan. — Feb., 241 (1985)
- [6] G. P. Williams, M. R. Howells, *Nucl. Inst. Meth.*, 208, 37~42 (1983)
- [7] S. Cerino, R. Cronin, *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 26, 3816 (1979)
- [8] S. Timoshenko and S. W. Krieger, “Theory of plates and shees”, Mehraw—Hill Book—Co., INC, 1955
- [9] J. Kirz, D. T. Attwood, B. L. Henke, et al., “X—ray Data Boodlet”. LBL., Oct. (1985)
- [10] R. P. Haelbich, J. P. Silverman, J. M. warlaumont, *Nucl. Inst. Meth.*, 222, 222 (1984)
- [11] K. Heinrich, H. Bety, A. Heuberger, *J. Vac. Sci. Technol.*, B1 (4) 1352, (1985)

Overall Design Characteristic of Soft X—Ray Lithograph Beamline for Synchrotron Radiation at BEPC

Shao Jinghong, Xu Zhengliang

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes our design considerations for the Soft X—ray Lithograph Beamline constructed for Synchrotron Radiation Lab of BEPC by our Institute during the period of Seventh 5—year plan. The key technical problems in are solved the physical designs of the beamline, scanning and adjusting mechanism of the mirror, laser—simulating source, vacuum system, electronics and microcomputer control system. In addition, it is presented that experimental results of pressure—resisting intensity in accord with theory calculation, for the ultra—thin Beryllium window that is one of the key divesces in the beamline.

Key words: X—ray lithograph, Beamline, Vacuum, Scanning, Beryllium—window