

文章编号 1004-924X(2004)02-0151-05

# 水冷双晶单色器结构的研究

柳 晖<sup>1</sup>, 高雪官<sup>2</sup>

(1. 上海师范大学 机电学院, 上海 201418;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘要:**介绍了同步辐射双晶单色器第1晶体热负载的情况,分析了热变形的原因,尝试了用光学追迹的SHADOW软件计算同步光在晶面上的能量分布,并用有限元方法模拟分析了底冷式和曲顶槽式两种水冷结构。结果表明,两种水冷却结构均能有效降低晶体表面的温升,减小变形量,其投角的变化小于投角调节精度(1 $\mu$ rad),其中曲顶槽型结构效果更佳,可用于晶体表面热功率密度约为1.0 W/mm<sup>2</sup>的场合。

**关键词:**双晶单色器; 同步辐射; 水冷结构

中图分类号:TH744 文献标识码:A

## Structure of water cooling double crystal monochromator

LIU Hui<sup>1</sup>, GAO Xue-guan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical & Electronic Information Engineering,  
Shanghai Teachers University, Shanghai 201418, China;

2. School of Mechanical & Dynamical Engineering,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The thermal load on the first crystal of a synchrotron radiation double crystal monochromator is discussed, the cause for the thermal distortion is analyzed, and attempts were made to calculate the energy distribution over the first crystal using SHADOW software. Simulation analyses were made using finite element method to analyze two types of water cooling structures. Simulation results indicate that the structure of plot style with curved surface can be used to achieve better results, and it can be applied to a power density of about 1.0 W/mm<sup>2</sup>.

**Key words:** double crystal monochromator; synchrotron radiation; water cooling structure

## 1 引言

双晶单色器是同步辐射的关键部件,其作用是将入射光单色化,通过改变入射光束与晶面的夹角(Bragg角)而改变出射单色光能量,为同步辐射实验室提供单色同步辐射光束,测定实验对象的三维复杂结构。

因实验分析对象的特殊性,一般要求光强尽量高,但考虑到样品的承受力,也不能过高。同步辐射入射到第1晶体上的功率密度(垂直于束流方向)通常为1 W/mm<sup>2</sup>左右,会产生较大的热变形,如果不能有效地消除将使晶体单色器的输出性能大大降低。另一方面,为了提高测试的精度须保证出射光路固定,两晶体平行。因此,要尽可

能降低晶体的热变形, 使其控制在允许的范围。目前已研究出许多解决热变形的办法, 包括: 低温冷却光学元件, 并尽可能增大冷却面积; 利用高传导率、低热膨胀系数的材料如硅晶体、金刚石等制作光学元件; 选取理想的衍射几何形状, 如晶体的非对称切割, 光学元件的掠入射受光, 以减少受光面的功率密度等。而目前用得最多的是低温冷却<sup>[5]</sup>, 采用的冷却剂有水、液态镓、液氮等。液态镓具有低气压和高热传输系数等优良性能, 是一种非常好的冷却剂, 但成本太高, 且易与其他金属反应; 液氮的低温冷却效果较好, 热变形和热应力的数值与水相比较, 可以降低两个数量级, 但液氮也有不足, 如对流换热系数是水的一半, 其临界热通量(CHF)是水的 1/10; 液氮的正常工作温度仅 63~ 77 K; 低温冷却会使晶体晶格参数发生变化。水是最常用的冷却剂, 具有成本低、化学稳定性好等特点, 且水冷装置简单, 为此本文作了一些研究分析。

## 2 晶体热变形分析

晶体表面受到的热负载会使晶体内部产生很大的温度梯度, 从而产生 3 种热变形<sup>[1]</sup>, 即晶体的总体弯曲, 光束处造成的局部凸起及晶面间距的变形, 如图 1 所示。其中,  $T_1, T_2$  为衍射面、冷却液体相接处晶面的温度,  $D$  为晶体厚度,  $Q$  为热通量。

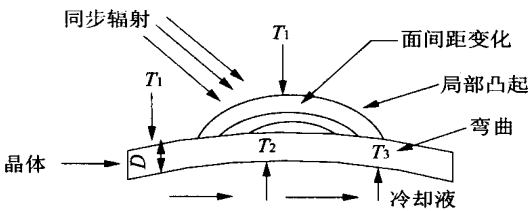


图 1 晶体的热变形  
Fig. 1 Crystal heat warp

### 2.1 晶体总体弯曲

在垂直光束方向上的温度梯度引起不同高度位置上的热膨胀系数不同, 造成晶体总体的弯曲。

$$\rho = \frac{D}{\beta \Delta T_{12}} \quad (\beta \text{ 为线性膨胀系数})$$

$$\Delta T_{12} = T_1 - T_2 = \frac{QD}{K} \quad (K \text{ 为热传导系数}), \text{ 带}$$

入上式得,

$$\rho = \frac{K}{\beta Q}$$

表明晶体总体弯曲曲率半径与晶体厚度无关, 仅与晶体材料  $\beta$  和  $K$  及热负载有关。总体弯曲引起的衍射角变化,  $\Delta\theta_{\text{bend}}^{[2]}$ ,  $\Delta\theta_{\text{bend}} = \frac{\Delta X}{\rho} = \frac{\beta}{K} \Delta X$  ( $\Delta X$  为总体弯曲造成面元沿晶体表面移动距离)。

### 2.2 晶体局部凸起

若同步辐射功率分布成高斯形状, 则局部凸起的曲率半径为<sup>[3]</sup>:

$$\rho = K\delta^2 / \beta Q_0 D^2$$

$Q_0$  为热通量的最大值;  $\delta$  为高斯分布的标准偏差。

### 2.3 晶面间距变化

同步辐射引起晶面间距变化为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d}{\Delta d} = \beta \Delta T$$

换算成衍射角变化为  $\Delta\theta = \frac{\Delta T \beta}{\tan \theta}$

在上述 3 种原因中, 总体弯曲是引起衍射角改变的主要原因, 晶体局部凸起和晶面间距变化的影响可忽略不计<sup>[2]</sup>。对于硅晶体,  $\beta = 1.57 \times 10^2$  (W/(m/K)),  $K = 2.6 \times 10^{-6}$  (1/K), 热功率密度  $q = 0.6$  W/mm<sup>2</sup> 时, 造成的晶体弯曲曲率半径为 89 m, 面形误差为 994  $\mu$ rad, 大大超过了所要求的 3  $\mu$ rad, 严重影响了单色器的光学性能。

## 3 有限元分析

采用 COSMOS 软件进行分析。首先对第 1 晶体进行建模, 因为模型的规则性, 可以采用运算速度快、结果较精确的 8 节点单元 SOLID70 进行建模(模型图略)。

### (1) 同步光能量分布

同步光入射角(Bragg 角)最大时, 第 1 晶体表面所受到的单位面积功率密度最大, 热变形也最大。使用 SHADOW 软件<sup>[4]</sup> 计算出同步光的能量在空间发散角上的分布, 并投射到第 1 晶体晶面上, 得到同步辐射光在第 1 晶体上的能量分布情况, 如图 2 所示。作为晶体表面的热负荷进行加载, 开始有限元分析。

### (2) 材料有关参数

晶体、铝底座材料和水的有关参数如表 1。

表 1 有关参数

Tab. 1 Relative parameters

	硅 111	铝	水
弹性模量(1 000 W/m)	1. 62	69. 6	
泊松比	0. 17	0. 32	
导热系数(W/m <sup>2</sup> ·K)	157	175	
热膨胀系数(10 <sup>-6</sup> m/K)	2. 6	23. 2	
换热系数(W/m <sup>2</sup> ·K)			4 600

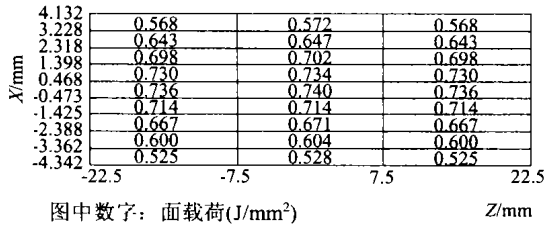


图 2 同步光能量分布图  
Fig. 2 Distribution of SR energy

(3) 冷却边界条件

第 1 晶体的尺寸为 75 mm × 52 mm × 10 mm, 固液界面间的换热采用单项液体充分发展的强迫对流换热模式。冷却效果的好坏, 除冷却槽的结构、尺寸外, 还有水进出口中心和水槽的夹角以及水温、流速等因素。经参考国外资料和进行有限元模拟, 确定水流截面积为: 1. 5 mm × 7 mm, 水流出的中心和水槽夹角为 45°, 水流速度 ≥ 1. 2 l/s, 恒温 20 °C。其他热边界条件作绝热近似处理。

3. 1 无水冷晶体温升及变形

图 3, 图 4 为晶体表面热功率密度约 0. 6 W/mm<sup>2</sup> 时的温度和变形彩色云图。由图中可知, 晶体表面的最高温度为 60. 9 °C, 最大变形与最小变形量之差为 3. 62 μm。



图 3 无冷却温度情况

Fig. 3 Temperature distribution of the crystal surface without cooling



图 4 无冷却晶体变形情况

Fig. 4 Distortion distribution of the crystal surface without cooling

3. 2 底冷结构的耦合分析

第 1 晶体安装在铝底座上, 在铝底座上开有一立方形的空腔, 晶体与底座之间约有 0. 8 mm 的空隙, 底座两端各开一通孔, 底冷结构如图 5 所示。

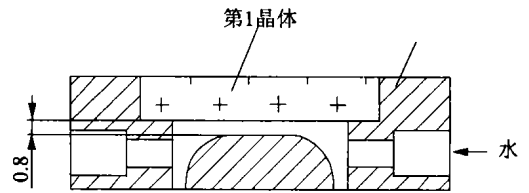


图 5 底冷结构

Fig. 5 Structure of the cooling base

水从空腔中流过, 带走晶体所吸收同步光的辐射能量。图 6, 图 7 分别表示当晶体表面受热功率密度达到 0. 6 W/mm<sup>2</sup> 时, 有限元分析的温度、变形情况。

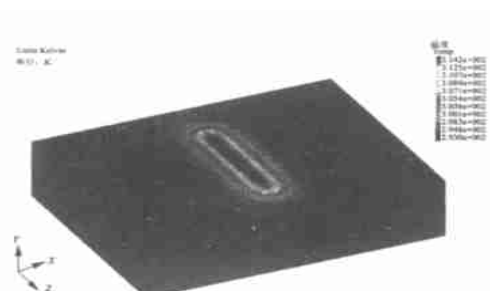


图 6 底冷结构温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution of the crystal surface of the structure of the cooling base



图 7 底冷结构变形情况

Fig. 7 Distortion distribution of the crystal surface in the structure of the cooling base

此时, 晶体表面最高温度为 41.2℃, 下降近 20℃, 最大与最小变形量之差为 1.2 μm, 减少 67%。以晶体长度方向(即 X 方向)为横坐标, 以高度方向(即 Y 方向)变形量为纵坐标, 绘制变形量分布曲线, 如图 8 所示。

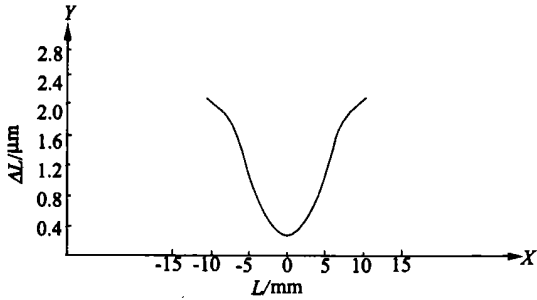


图 8 底冷结构变形量分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of the structure of the cooling base

由曲线上斜度最大的两点近似计算热变形所造成的面形误差为  $35 \times 10^{-3}$ , 约 0.18 μrad, 对 Bragg 角的影响较小。

### 3.3 曲顶槽式结构的耦合分析

当晶体表面受热功率密度达到 1.0 W/mm<sup>2</sup> 时, 晶体表面温度近 100℃, 最大与最小变形量达 15 μm。在这种情况下, 采用底冷结构效果不好, 其光学性能衰变, 因此本文研究一种曲顶槽式结构。

在晶体上开一些槽, 贯穿整个晶体。中间槽宽度约 10 mm, 两边略窄, 晶体上槽是沿长度方向从中心到两边按抛物曲线递增, 晶体槽顶呈曲面状, 晶面中心处的槽顶与晶面的距离最小, 约 5 mm。在底座上的相应位置也开槽, 但两端有积水槽, 底座上的槽都开到积水槽, 积水槽与进水孔

和出水孔相通, 冷却水就可从进水孔流入, 出水孔流出, 如图 9 所示。图 10, 图 11 为当晶体表面受热功率密度达到 1.1 W/mm<sup>2</sup> 时, 用有限元分析此种结构晶体表面温升和变形的情况。

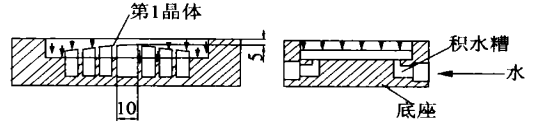


图 9 曲顶槽式结构

Fig. 9 Structure of plot style with curve surface

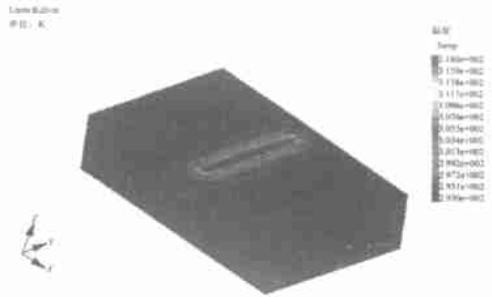


图 10 曲顶槽式结构温度情况

Fig. 10 Temperature distribution of the crystal surface of the structure of plot style with curve surface



图 11 曲顶槽式结构变形情况

Fig. 11 Distortion distribution of the crystal surface of the structure of plot style with curve surface

由图中可以看出, 最高温度为 45℃, 最大与最小变形量之差为 1.9 μm, 同样绘制变形量分布曲线, 如图 12 所示。

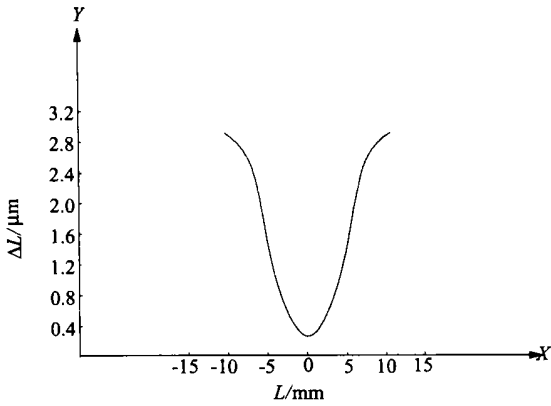


图 12 曲顶槽式结构变形量分布曲线

Fig. 12 Distortion curve of the structure of plot style with curve surface

曲线上斜度最大的两点近似计算热变形所造成的面形误差为  $(55 \times 10^{-3})''$ , 约  $0.275 \mu\text{rad}$ 。

## 4 结 论

晶体吸收同步辐射光的大部分能量, 在运行过程中产生热变形, 影响晶体的衍射效果。本文介绍的水冷却结构能有效降低晶体表面的温升, 减小变形量, 其投角的变化均小于投角调节精度 ( $1 \mu\text{rad}$ ), 其中曲顶槽式结构有更好的效果, 尤其适用热功率密度约  $1.0 \text{ W}/\text{mm}^2$  场合。过去一般认为, 水冷 Si 晶体单色器适用于晶体表面受热功率密度  $1.0 \text{ W}/\text{mm}^2$  以下的情形。若降低水温, 会有更好的作用。

## 参考文献:

- [1] 夏邵建. 液氮冷却硅晶体单色器的研究[J]. 高能物理与核物理, 1997, 7: 664-667.  
XIA SH J. Research of  $\text{LN}_2$  cooling Si crystal monochromator[J]. *High Energy & Nuclear Physics*, 1997, 7: 664-667. (in Chinese)
- [2] JOKSCH S. Heating effects of monochromator crystals at a high intensity wiggler beam line[J]. *Nucl Instrum Methods*, 1990, A291 (1): 325-331.
- [3] VAN DER LAAN G. A chromatic premirror system for a double crystal monochromator[J]. *Nucl Instrum Methods*, 1990, A291 (1): 225-227.
- [4] LAI B, CERRINA F. SHADOW: A synchrotron radiation ray tracing program[J]. *Nucl Instrum Methods(A)*, 1986, 246: 337-341.
- [5] 汤琦. 弧矢聚焦双晶单色器设计[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(4): 411-415.  
TANG Q. Design of a sagittally focusing double crystal monochromator in synchrotron radiation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4): 411-415. (in Chinese)

作者简介: 柳 晖(1962-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 上海师范大学机电学院高级工程师, 主要研究方向为机电。E-mail: liuhui5791@sina.com