

# 液氮冷却硅晶体单色器的研究

夏 绍 建

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1996-07-15收稿

## 摘 要

第三代同步辐射光源给光束线设计带来的关键问题之一是高热负载。本文讨论了采用液氮冷却硅晶体单色器的原理、实验装置以及测试结果。

**关键词** 同步辐射, 液氮冷却硅晶体单色器, 摇摆曲线。

## 1 引 言

同步辐射(SR)已成为现代科学研究和技术发展的重要工具。在中国建造第三代SR光源,是二十一世纪前沿学科研究和技术开发所迫切需要的。第三代光源提供同步光亮度为 $10^{18}$ — $10^{19}$  Phs / s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · 0.1%BW。随着电子能量的提高,电子束流强的增大及发射度的减小,以及大量插入元件的采用,SR的辐射功率密度可达到每平方米几十瓦至几百瓦。极高的热负载给光束线设计带来一系列第一代、第二代SR光源尚未遇到的关键问题。

已经采取了许多方法来解决高热负载问题,并且形成了“高热负载光学”这一新的光学分支技术。这些方法包括:低温冷却光学元件,采用的冷却剂有水、液态镓、液氮等,并尽量增大光学元件的冷却面积;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,如晶体的非对称切割,光学元件掠入射受光等,以减少受光面的功率密度。而液氮冷却硅基底光学元件(硅晶体单色器,硅基底反射镜),则是第三代同步辐射光源最吸引人的关键技术之一。

## 2 原 理

由插入件 Wiggler 和 Undulator 引出的同步光的功率密度  $P_d$  由下式计算<sup>[1]</sup>:

$$P_d = \{10.8BE_e^4 I N_p G(K)\} / S^2 (\text{W} / \text{mm}^2),$$

式中

$$G(K) = \{(K^7 + 24K^5 / 7 + 4K^3 + 16K / 7) / (1 + K^2)\}^{7/2};$$

$B$  为磁场强度(T);  $E_e$  为电子能量(GeV);  $I$  为电子流强(A);  $N_p$  为周期数;  $S$  为从插入件中心到光束线部件的距离(m);  $K$  为偏转系数。

目前, 世界上已建成的和正在建造中的第三代同步辐射装置, 由 Wiggler 和 Undulator 引出的同步光, 在距光源点 20m 内, 入射到光束线光学部件上的功率密度(垂直于束流方向)通常为每平方毫米几十瓦到几百瓦。由于光学元件表面的高热负载, 造成元件内部产生很大的温度梯度。以分光晶体为例, 会产生三种热变形, 如图 1 所示。一是晶体的总体弯曲, 二是光束处造成的局部凸起, 三是晶面间距的变化。如果不能有效地消除热变形, 将使晶体单色器的输出性能大大降低; 产生很大的热应力, 甚至破坏光学元件。

一个好的解决办法是利用液氮(LN<sub>2</sub>)冷却硅(Si)晶体分光元件。Si 的高温传热率  $k$  随着温度的降低而增大, 高温膨胀系数  $\alpha$  随着温度的降低而减小(到 80K)。光学元件的高温变形与系数  $\alpha/k$  成正比。

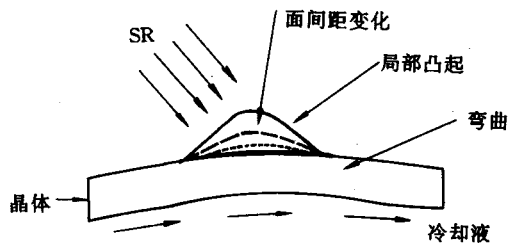


图1 分光晶体的热变形

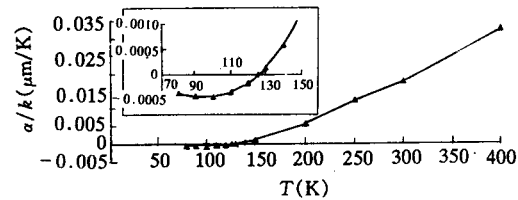


图2 不同温度下 Si 的  $\alpha/k$  值

图 2 给出了不同温度下 Si 的  $\alpha/k$  值。零点大约在 125K, 冷却液的温度应该低于 120K。1atm 时的蒸发温度为 77K, 10atm 时的蒸发温度为 104K 的液氮, 是一种合适的冷却剂。在液氮温度下, Si 的  $\alpha/k$  值是常温下的 1%。这样, Si 晶体分光元件的变形就要小得多。采用 LN<sub>2</sub> 冷却的 Si 晶体易于降温到 100K 左右。

### 3 实验装置

图 3 给出了利用液氮冷却 Si 晶体单色器的系统图<sup>[2]</sup>。这是由 LN<sub>2</sub> 容器、绝热保温管道、LN<sub>2</sub> 循环泵、LN<sub>2</sub> 流速和温度控制组元、晶体液氮室、氮气排出管道等组成的系统。该系统用于日本 KEK, TRISTAN-AR (6.5GeV, 40mA) 的 NE<sub>3</sub> 光束线(由 Undulator 引出)。总功率为 2.5kW, 峰值功率密度为 30kW / mrad<sup>2</sup>, 入射到晶体表面的总功率为 815W, 功率密度为 4.3W / mm<sup>2</sup>。

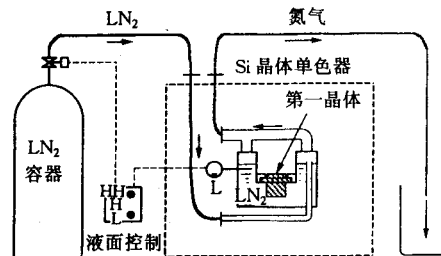


图3 液氮冷却硅晶体单色器系统图

因为液氮冷却 Si 晶体散热面的热传导系数是水冷时的 1/2, 其临界热通量(CHF)是水冷的十分之一, 所以它要求比水冷更大的冷却面积。我们的设计是将 Si 晶体浸泡在 LN<sub>2</sub> 池中冷却, 并开了一些槽(槽间晶体厚度的尺寸要考虑抗冷却液压力产生的变形), 以增加冷却面积, 改善热传导性能。此时热载的上限就是 CHF。池内沸腾冷却时的 CHF

可用下式估算<sup>[3]</sup>:

$$q_{\max} = 0.16\Delta h_v \rho_v \left\{ \rho_v^2 / \sigma g (\rho_l - \rho_v) \right\}^{-1/4},$$

式中  $q_{\max}$  为 CHF,  $\Delta h_v$  为汽化潜热,  $\rho_v$  为蒸气密度,  $\rho_l$  为液体密度,  $\sigma$  为表面应力,  $g$  为重力加速度. 1atm LN<sub>2</sub> 时  $q_{\max}$  的计算值为 0.19W/mm<sup>2</sup>. 若散热面的温度不变, 则晶体受 1kW 热载时所需的冷却面积为 5300mm<sup>2</sup>. 该设计中, Si 晶体冷却面积 11800mm<sup>2</sup>, 晶体的温度分布用有限元法进行了计算, 在热负载总功率~800W, 峰值功率密度~9W/mm<sup>2</sup>条件下, 计算结果为: 晶体的最高温度为 152K, 散热面的最高温度为 96K.

## 4 实验结果

图 4 给出了水冷却和液氮冷却 Si 晶体单色器在不同热负载(总功率)  $P$  下的  $FWHM$  值<sup>[4]</sup>.

在高热负载下, LN<sub>2</sub> 冷却的 Si 晶体单色器保持了好的光学性能. 图 5 是总功率  $P$  为 790W, 峰值功率密度  $P_d$  为 4.2W/mm<sup>2</sup> 时, Si 晶体单色器的摇摆曲线,  $FWHM$  值为 6.9arcsec, 外形没有明显的变化. 横坐标为角度  $\theta$ ; 纵坐标为强度  $I$ (任意单位).

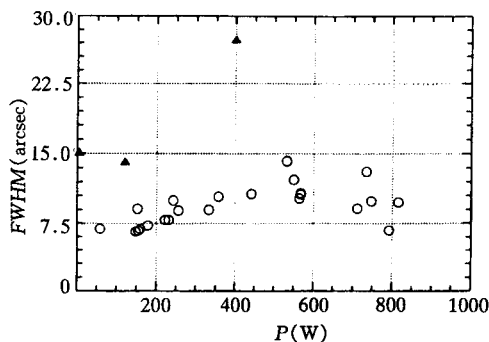


图 4 水冷却和液氮冷却 Si 晶体单色器的  $FWHM$  值  
 $\theta_B = 7.9^\circ$ ,  $\circ$  LN<sub>2</sub> 冷却,  $\blacktriangle$  水冷却.

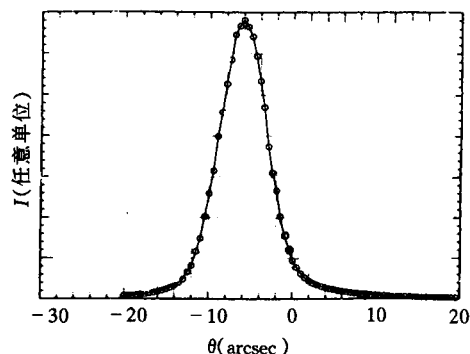


图 5 LN<sub>2</sub> 冷却 Si 晶体单色器的摇摆曲线  
Si (111),  $\theta = 7.9^\circ$ .

多次实验证明, 水冷 Si 晶体单色器适用于晶体表面受热功率密度为 1.0W/mm<sup>2</sup> 以下的情形, 如果功率密度高于 1.0W/mm<sup>2</sup> 以上, 其光学性能变坏. 而 LN<sub>2</sub> 冷却 Si 晶体单色器, 可用于热负载为 1kW, 峰值功率密度为 30W/mm<sup>2</sup> 的情况. 此时, 相应于同步辐射光束功率密度为 220W/mm<sup>2</sup>, 这相当于第三代 SR 光源产生的辐射强度. 因此, LN<sub>2</sub> 冷却的 Si 晶体单色器, 是第三代 SR 光源中 Undulator 束线合适的选择. 当然, 当热负载高于该值时, 液氮冷却 Si 晶体将不再合适, 因为, 温度的升高, 将使冷却液沸腾, 而 Si 晶体本身的温度, 也达到适宜温度范围之外.

作者在日本高能物理所(KEK)从事该课题研究期间, 得到日本国文部省资助并与安藤正海教授、张小威博士及望月哲朗博士进行了卓有成效的合作, 受益匪浅, 在此一并

表示感谢.

### 参 考 文 献

- [1] Andreas K. Frund, Francois de Bergevin, Gerard Marort *et al.*, *OPTICAL ENGINEERING*, **29**(1990)930.
- [2] 夏绍建, 同步辐射光束线工程, 束线光学与新技术研讨会论文集, (1995)119.
- [3] Tetsuro Mochizuki, Xiaowei Zhang, Hiroshi Sugiyama *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**(1995)2168.
- [4] 望月哲朗, 博士论文, 日本 KEK, 1993.

## Studies on Liquid Nitrogen Cooling of Silicon Crystal Monochromator

Xia Shaojian

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Received 15 July 1996

### Abstract

There are a lot of crucial problems for beam lines design in the third generation of the synchrotron radiation source. One of the problems is high heat load. The principle, device and test results for liquid nitrogen cooling of silicon crystal monochromator are described.

**Key words** synchrotron radiation, liquid nitrogen cooling of silicon crystal monochromator, rocking curve.