

# 液氮间接冷却晶体单色器第一晶体热变形模拟计算\*

王纳秀 朱毅 傅远

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

**摘要** 针对上海光源U27波荡器光源,用ANSYS有限元软件对晶体单色器第一晶体液氮间接冷却进行数值模拟,给出晶体表面倾斜误差与热负载、冷却条件和布喇格角范围等因素的关系,为晶体单色器的设计与制造提供热缓释依据.晶体距光源中心24m时最大垂直入射功率密度约为 $60\text{W}/\text{mm}^2$ ,在布喇格角调节范围小于 $30^\circ$ 时,晶体厚度大于30mm,晶体吸收总功率上限可到240W,即可满足SSRF储存环电子束流升级到400mA的需求,采用正常液氮(78K)冷却晶体,晶体表面热变形倾斜误差可控制在 $3\text{arcsec}$ 以下.

**关键词** 晶体单色器 液氮冷却 有限元分析

## 1 引言

近二十年来随着大流强和高能量为特征的同步辐射装置的不断建成,以及插入件技术的成熟,高热负载光学元件已经成为限制利用X射线光源亮度进一步提高的瓶颈之一,实验表明在晶体单色器后面的X射线通量已经不再与储存环的电流成正比<sup>[1]</sup>.为了充分利用同步辐射装置产生的X射线,国际上已对晶体单色器的热缓释展开了多层次的研究,目前已经形成低功率密度用水冷却,高功率密度用液氮冷却的共识.但由于各个同步辐射装置光谱分布具有不同的特征,甚至同一个同步辐射装置上不同光束线由于使用插入件的类型和参数的不同光谱分布的特征也相差甚远,使得单色器的热缓释结构设计具有多样性.其中用于波荡器光束线的晶体单色器所吸收的热负载具有高功率密度(每平方毫米几十瓦)和中等总功率( $\sim 200\text{W}$ )的特点,多采用液氮间接冷却技术冷却.在光束线设计和晶体单色器的研制过程中需要用数值模拟的方法准确地预测晶体在热负载状态下的面形误差,以及可能达到的能量分辨率.目前国际上有许多结果可以借鉴<sup>[2-4]</sup>,但并不能解决所有的工程问题.

随着上海光源的正式开工,首批光束线站中至少有3条光束线要采用液氮间接冷却的晶体单色器,故

首先开展液氮间接冷却晶体单色器第一晶体热变形的数值模拟,一方面给光束线设计提供晶体单色器较准确的能量分辨率,另一方面又反过来指导光束线设计过程中如何更加合理地有效地在光学元件之间分配热负载.

## 2 数值模拟的模型

晶体间接冷却的几何模型布局如图1,长方体单晶硅通过铜片夹在两个无氧铜块之间,铜块内有冷却槽,槽内通液氮用强迫对流换热模式冷却到液氮温区,硅通过热传导把吸收的X射线所转化的热量传递给液氮得以冷却.图1中 $h_0$ 为铜块中液氮冷却槽内的强迫对流换热膜系数, $h_{\text{eff}}$ 为等效换热膜系数,它与硅-铜-铜之间的接触热阻、对流换热膜系数和铜内冷却槽固液换热面积与硅-铜接触面积之比的大小等因素有关<sup>[4]</sup>.

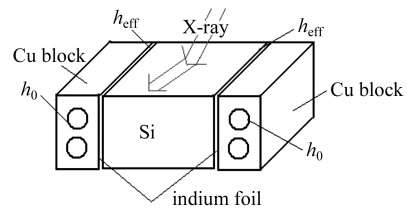


图1 晶体间接冷却的几何模型

2005-06-29 收稿, 2006-02-28 收修改稿

\* 国家自然科学基金(10205024)资助

采用 ANSYS 软件的耦合场技术对晶体做热应变分析, 在分析过程中包括硅材料热传导系数和热膨胀系数的非线性特性<sup>[2-5]</sup>. 光源是 SSRF 光束线拟采用的 U27 波荡器 ( $\lambda=27\text{mm}$ ,  $K=2.45$ ,  $N=74$ ), 晶体单色器距光源中心点 24m, 接受角为  $0.1\text{mrad}\times 0.05\text{mrad}$ . 采用 XOP 软件计算光源在单色器位置的垂直接受功率密度分布, 再按晶体表面与水平面夹角把功率密度分布展宽到晶体表面. 在本文数值模拟中假定晶体受光表面与晶体内晶格弥勒指数面平行, 即不考虑斜切割晶体表面的降低功率密度的方法. 按 X 射线功率被晶体表面全吸收来近似表征晶体的热负载. 由于光源分布的对称性数值模拟的模型采用四分之一模型, 在热分析过程中晶体边冷采用等效对流换热边界条件<sup>[4]</sup>, 即在有限元分析中只对硅晶体建模, 在硅两侧面施加等效膜系数作为冷却边界条件, 并忽略室温真空室对低温硅的辐射换热; 在热应变分析过程中除了采用对称约束外, 还固定约束两个几何对称面交线与晶体下表面交点的位移为零, 即晶体的变形是纯热应变. 本文中并没有特别指明的时候, 倾斜误差为二分之一有效长度上的倾斜误差.

光束线设计要求热负载对晶体单色器摇摆曲线展宽的贡献小于几个弧秒, 在此范围晶体表面的倾斜误差与晶体的摇摆曲线的展宽相当, 可以用晶体表面的倾斜误差来表征晶体的摇摆曲线的展宽<sup>[2]</sup>, 即用晶体表面倾斜误差的大小来表征晶体热变形的大小. 其中表面倾斜误差定义为表面平行 X 射线入射方向中心线在 X 射线光斑范围内的倾斜误差, 如图 2 中倾斜误差为最大值与最小值的差<sup>[2, 5]</sup>.

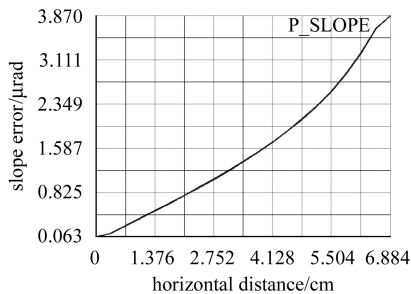


图 2 光斑范围倾斜误差

### 3 模拟结果

#### 3.1 晶体变形与晶体厚度和布喇格角的关系

SSRF U27 波荡器光源在接受角为  $0.1\text{mrad}\times 0.05\text{mrad}$  范围内被晶体吸收的总功率为 165W, 其功率密度分布如图 3, 呈二维高斯分布.

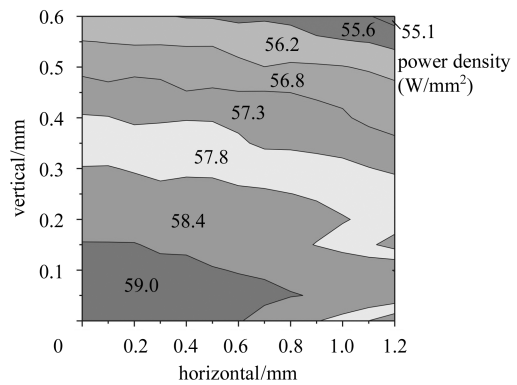


图 3 U27 波荡器光源在 24m 处功率分布

晶体的长度和宽度原则上由光斑的大小确定, 波荡器光源尺寸很小, 但考虑到单色器机构对长度的要求、冷却面积和工程实施的方便性等原因, 一般取  $100\text{mm}\times 50\text{mm}$ . 晶体的厚度原则上只要有足够多的衍射原子层数即可, 显然在毫米量级足以. 但从晶体的热变形角度来说却对晶体的厚度有一定的要求. 表面倾斜误差以  $10\mu\text{rad}$  为标准, 即晶体单色器在全量程范围内调节布喇格角时晶体表面的倾斜误差都小于  $10\mu\text{rad}$ . 图 4(a) 给出定负载条件下晶体变形随晶体厚度和布喇格角大小的关系. 从图 4(a) 中可知如果单色器布喇格角旋转范围越大, 晶体的厚度要越厚. 最大布喇格角为  $50^\circ$  时, 晶体厚度要大于  $50\text{mm}$ ; 最大布喇

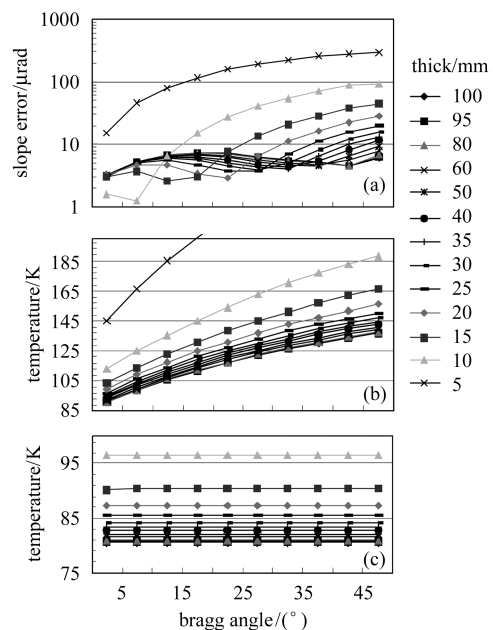


图 4 晶体变形与晶体厚度和布喇格角的关系

(a) 晶体表面倾斜误差与晶体厚度和布喇格角的关系; (b) 晶体表面最高温度与晶体厚度和布喇格角的关系; (c) 晶体冷却表面最高温度与晶体厚度和布喇格角的关系. (SSRF U27@24m,  $H=0.1\text{mrad}$ ,  $V=0.05\text{mrad}$ ) 晶体: 长度=95mm, 宽度=50mm, 吸收总功率=165W, 对流换热系=5000W/m<sup>2</sup>.

格角为 $30^\circ$ 时,晶体厚度要大于20mm.如果表面倾斜误差以 $8\mu\text{rad}$ 为标准,最大布喇格角为 $50^\circ$ 时,晶体厚度要大于80mm;最大布喇格角为 $30^\circ$ 时,晶体厚度要大于20mm.图4(b)给出相应条件下晶体的最高温度,分析数据可知晶体最高温度控制在130K左右,晶体表面热变形最小.通过降低液氮冷却剂的温度来控制晶体的最高温度可以获得较小的晶面热变形.图4(c)给出相应条件下晶体冷却壁的最高温度,此温度定义所需要的液氮饱和蒸汽压的大小,以确保液氮的纯液相运行环境.当晶体厚度小于25mm时,晶体冷却壁的最高温度高于85K,相应的液氮饱和蒸汽压要在3个大气压以上,会带来额外的应力变形,使晶体表面倾斜误差比纯热应变要大,是使用较大厚度晶体的又一原因.

### 3.2 晶体变形与总功率的关系

总功率的变化表征由于储存环电子束流的增加而增加的热负载变化,此时功率密度分布的形状不变,只是数值大小放大一个相同的因子.图5给出布喇格角为 $15^\circ$ 时不同换热条件下晶体变形与总功率的关系.从图5可知在总功率250W以下,晶体热变形与换热能力的大小几乎没有关系,即SSRF储存环电子束流从目前设计的300mA升级到450mA,此单色器的晶体表面的热变形倾斜误差仍在 $8\mu\text{rad}$ 以下.图6给出布喇格角为 $30^\circ$ 时不同换热条件下晶体变形与总功率的关系.从图6可知在总功率200W以下,晶体热变形与换热能力的大小几乎没有关系,即SSRF储存环电子束流从目前设计的300mA升级到360mA,此单色器的晶体表面的热变形倾斜误差仍在 $8\mu\text{rad}$ 以下.所以在晶体吸收功率在200W以下时,对流换热系数的提高意义不明显,即在工程上不必化代价去追求液氮冷却能力的提高.

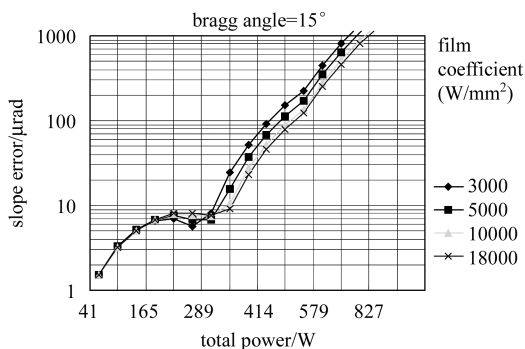


图5 布喇格角 $15^\circ$ 时晶体变形与吸收总功率和换热能力的关系

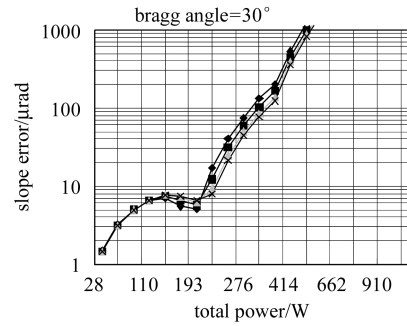


图6 布喇格角 $30^\circ$ 时晶体变形与吸收总功率和换热能力的关系(图示见图5)

### 3.3 70K与78K液氮冷却效果的比较

在本节以前所有模拟计算液氮的初始温度都是78K,由于降低液氮的温度有利于改善晶体表面的热变形.本节模拟70K过冷液氮的冷却效果.晶体几何尺寸长宽高分别为100mm,50mm和100mm,冷却用对流换热系数为 $5000\text{W}/\text{m}^2$ .图7是总功率分别为165W,200W和300W时两种不同液氮温度冷却介质的冷却效果.总功率165W,200W和300W分别对应SSRF储存环电子束流为300mA,360mA和540mA.从图7可知,在储存环电子束流为300mA时,70K液氮冷却效果并不明显,在高布喇格角范围( $>20^\circ$ )冷却效果反而比78K液氮差,所以推荐布喇格角扫描范围超过 $30^\circ$ 时,用78K正常液氮来实现低温冷却.当储存环电子束流升级到400mA时,假定布喇格角扫描范围不超过 $45^\circ$ 时,单色器内部晶体冷却结构不用调整,只需要用70K液氮进行低温冷却即可;但如果假定布喇格角扫描范围不超过 $30^\circ$ 时,用正常78K液氮来实现低温冷却即可.当储存环电子束流升级到500mA时,不调整单色器内部晶体冷却结构,即使布喇格角扫描范围不超过 $20^\circ$ ,必须用70K液氮进行低温冷却才能保证晶体表面的倾斜误差小于 $10\mu\text{rad}$ .

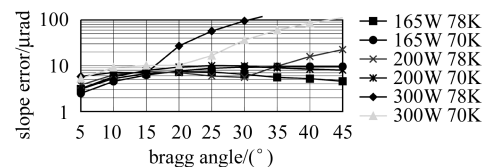


图7 总功率165W,200W,300W时70K和78K液氮冷却效果

## 4 结论和讨论

综上所述,晶体单色器液氮间接冷却晶体表面倾斜误差与晶体布喇格角的调整范围有密切关系,这一点容易理解,当晶体处于高布喇格角时,入射X射线

的功率密度被展宽的因子小,晶体实际吸收的功率密度相对较大,热缓释的难度增大.布喇格角调节范围越大,晶体厚度要越厚,晶体所能承受的总功率越小,对过冷液氮的要求也越大.在表1给出了不同布喇格角调节范围对应的液氮间接冷却晶体所能接受的最大总功率,其中光源正入射到晶体的最大功率密度约为 $60\text{W}/\text{mm}^2$ .

表1数据可表述为晶体表面热变形 $10\mu\text{rad}$ 倾斜误差的保证条件如下:

(1) 单色器布喇格角调节范围小于 $45^\circ$ 时,储存环

电流小于 $300\text{mA}$ 时,用 $78\text{K}$ 液氮冷却即可;储存环电流小于 $400\text{mA}$ 时,单色器内部不动,用 $70\text{K}$ 液氮冷却即可;但储存环电流为 $500\text{mA}$ 时,用 $70\text{K}$ 液氮也无法使晶体热变形小于 $10\mu\text{rad}$ .

(2) 单色器布喇格角调节范围小于 $30^\circ$ 时,储存环电流小于 $400\text{mA}$ ,用 $78\text{K}$ 液氮冷却即可;但储存环电流为 $500\text{mA}$ 时,用 $70\text{K}$ 液氮也无法使晶体热变形小于 $10\mu\text{rad}$ .

(3) 单色器布喇格角调节范围小于 $15^\circ$ 时,储存环电流小于 $500\text{mA}$ ,用 $78\text{K}$ 液氮冷却即可.

表 1 液氮间接冷却晶体热承受能力

Bragg角调节范围/ $^\circ$		储存环束流/ $\text{mA}$					
		300		400		500	
0—15	晶体厚度/ $\text{mm}$	15		100		100	
	晶面最大倾斜误差/ $\mu\text{rad}$	8		$< 8$		7	
	液氮温度/ $\text{K}$	78		78		78	
0—30	晶体厚度/ $\text{mm}$	20		100		100	
	晶面最大倾斜误差/ $\mu\text{rad}$	8	10	$< 8$	$< 8$	90	35
	液氮温度/ $\text{K}$	78	70	78	78	78	70
0—45	晶体厚度/ $\text{mm}$	60		100		100	
	晶面最大倾斜误差/ $\mu\text{rad}$	8	10	$> 20$	10	$> 200$	100
	液氮温度/ $\text{K}$	78	70	78	70	78	70

感谢欧洲同步辐射装置张琳博士的有益讨论.

## 参考文献(References)

- 1 Donald H. Bilderback, Andreas K. Freund, Gordon S. Knapp et al. J. Synchrotron Rad., 2000, **7**: 53—60
- 2 ZHANG Lin, Lee Wah-Keat. J. Synchrotron Rad., 2003, **10**: 313—319
- 3 Lee Wah-Keat, Kamel Fezzaa, Patricia Fernandez et al. J. Synchrotron Rad., 2001, **8**: 22—25
- 4 ZHANG Lin. Proc. SPIE 1993. 1997, 223—235
- 5 WANG Na-Xiu et al. Nuclear Technique, 2002, **25**(6): 401—407 (in Chinese)  
(王纳秀等. 核技术, 2002, **25**(6): 401—407)

# Simulation of Thermal Distortion of DCM Crystal Indirectly Cooled by $\text{LN}_2$ \*

WANG Na-Xiu ZHU Yi FU Yuan

(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The simulation result of thermal distortion of DCM crystal indirectly cooled by liquid nitrogen( $\text{LN}_2$ ) at Shanghai synchrotron radiation facility (SSRF) has been reported. The source is U27 undulator. The maximum of power density at 24m is  $60\text{W}/\text{mm}^2$ . We give the correlation of the slope error of crystal surface vs. Bragg angle, the convection film coefficient, the bulk temperature of  $\text{LN}_2$  and total power absorbed by the first crystal, respectively. The slope error is less than 3 arcsec when the Bragg angle is less than  $30^\circ$ , the thickness of crystal is larger than 30mm, the current of storage ring is up to  $400\text{mA}$  and cooled by  $78\text{K}$   $\text{LN}_2$ .

**Key words** double crystal monochromator(DCM), cooled by liquid nitrogen, finite element analysis

Received 29 June 2005, Revised 28 February 2006

\* Supported by NSFC (10205024)