

解説

高熱負荷の X 線光学

山岡 人志

理化学研究所

A Review of High Heat Load X-Ray Optics for Synchrotron Radiation

Hitoshi YAMAOKA

The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

High heat load optics on the third generation synchrotron radiation are reviewed. In this article mainly we describe about hard x-ray optics such as x-ray mirrors and x-ray crystal monochromators with some cooling methods. Results of recent experiments are shown. The approach to reduce heat load on the optics from a view point of source including insertion device and slit system is also emphasized.

1. はじめに

1.1 放射光と熱工学

『もっと光を』あるいは『より強い光を小さな場所に』という要求は、その光をコリメートする光学系にとっては、トータルのパワーとパワー密度の増加をもたらす。通常の熱工学では、マイクロオーダーの変形は問題にされることは少ない。多少熱変形しても、予想される使用回数に耐えて性能をみたくものであればよいことが多い。しかし、通常の機器やビームラインの他の要素の除熱の問題と違い、放射光の光学系ではちょっとした熱変形も問題になる。ここに放射光光学系の熱負荷に対する特有の問題と困難さがあり、このことに関する専門家が必要となってくる理由でもある。

第3世代のリングの必要性が言われその設計が始まった頃から、光学系に対する熱問題の深刻さは認識されていた。1980年代に作られた第2世

代の放射光施設で熱設計を行ったビームラインはほとんどなかったといってよい。実際にビームラインを作ってから経験的に冷却法を改良していくという例が少なくなかった。しかし、第3世代では、第2世代よりも桁違いに大きいパワーが予想されたために、最初から熱負荷がもっとも大きな問題であると認識され、冷却法に関する多くの試みがなされてきた。冷却法に関する研究は、純粋に熱工学及びそれに関連した技術の問題である。しかし、それを放射光の光学系に適用しようとしたとき、第3世代の放射光では主としてX線光学の知識が不可欠となる。ここでは、第3世代のリングのビームラインのX線光学系に関して高熱負荷対策の観点からの解説を試みたい。

1.2 光学系への熱負荷

放射光のパワーは蓄積リングの電子エネルギー

連絡先: SPring-8

〒678-12 兵庫県赤穂郡上郡町金出地 1503-1

TEL 07915-8-0831 FAX 07915-8-0830

e-mail yamaoka@sp8sun.spring8.or.jp

Eの2乗に、パワー密度は4乗に比例すると言われた¹⁾。2.5 GeVのPFから8 GeVのSPring-8にいくと、パワーは約10倍に、パワー密度は約100倍になる。しかし、現実はこのように単純ではない。実際のパワーを比較したものを表1に示す。これから、PFのvertical wiggler (BL14)の約2倍のパワーがSPring-8のbending magnetからのパワーに対応していることがわかる。ビームラインでは、光学系の前にスリットやいくつかのフィルター、窓が置かれ、さらに光学系からの散乱成分もあるので、SPring-8の光学系では後述するように実際に照射・吸収されるパワーは1 kW以下になることが多い。SPring-8のウィグラーのパワーは桁違いに大きくなる。

2. 熱負荷のマイクロな過程とマクロな過程

2.1 ミクロな過程 (素過程)

光が物質にあたったとき起こる素過程をまとめたのが図1である。主な過程としては、コンプトン効果、レーリー散乱、光電効果などがある。ミラーだと全反射する成分とこれらの散乱で外に逃げた成分を引いたものが吸収されることになる。物質中に入った光がどのようにこれらの過程に分かれていくかの計算は、すでにTongや渡部らによって詳しく述べられているのでここでは詳細には立ち入らない²⁻⁹⁾。この計算はOEHL (Optical Elements Heat Load Analyses) コードとしてま

とめられている。

2.2 マクロな過程 (熱工学)

いったん光学素子のなかで吸収されたパワーは、熱伝導と熱伝達とにより拡散していく。熱伝導の基本方程式は定常状態では、

$$k \nabla^2 T + S = 0 \tag{1}$$

と書かれる。ここで k , T , S はそれぞれ熱伝導率 (W/m/K), 温度 (K), 単位体積当たりの吸収パワー (W/m³) である。基本的にはこの基本方程式を熱伝達境界などの与えられた境界条件のもとで解いて温度分布を導き、それをもとに構造計算をして変形を求めれば良い。しかし、解析的

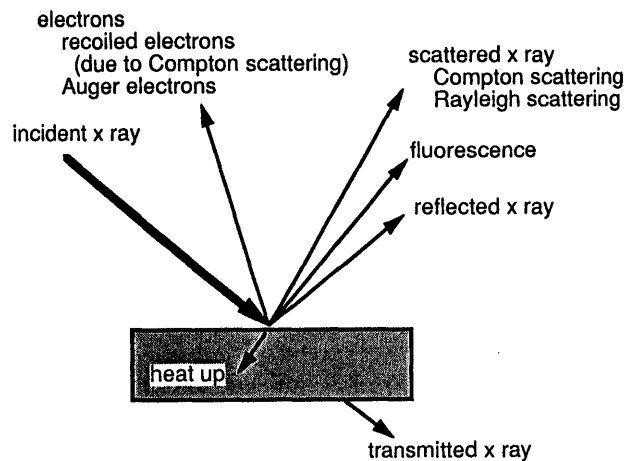


Figure 1. Scattering process of x-ray interactions with material.

Table 1. Comparison of the power from the sources in PF, AR and SPring-8.

	PF bending magnet	PF BL14 VW	PF BL16 wiggler	AR bending magnet	AR NE1 EMPW	AR NE3 undulator	SPring-8 bending magnet	SPring-8 BL41UX undulator	SPring-8 BL08W wiggler
E(GeV)	2.5	2.5	2.5	6.5	6.5	6.5	8	8	8
I(mA)	300	300	300	50	50	50	100	100	100
period(cm)			12		16	4		3.2	12
number		1 or 3	26		21	90		140	37
length(m)			3.12		3.36	3.6		4.48	4.44
B(T)	0.96	5		0.935			0.68		
ky			16.5		(kx=0)	1.47		1.66	11.2
power(kW)	0.019	0.099	8	0.054	4.45	0.74	0.222	5.56	17.9
	(1 mrad)			(1 mrad)			(1.6 mrad)		

に解ける例は限られるので有限要素法を使って計算機処理することが多い。問題をはっきりさせるために、ここではもっとも簡単な例として、内部発熱のない ($S=0$) 厚さ t (m)、面積 A (m^2) の平板表面で Q (W) のパワーが吸収され、その反対面で熱伝達率 h ($W/m^2/K$) で冷却された場合を考えよう。図2にその概念図を示す。温度差 ΔT_1 (K) は(1)式から、

$$Q = kA \Delta T_1 / t \quad (2)$$

と書ける。一方、冷却される面と冷却流体との間には熱伝達により温度差 ΔT_2 を生じる。

$$Q = hA \Delta T_2 \quad (3)$$

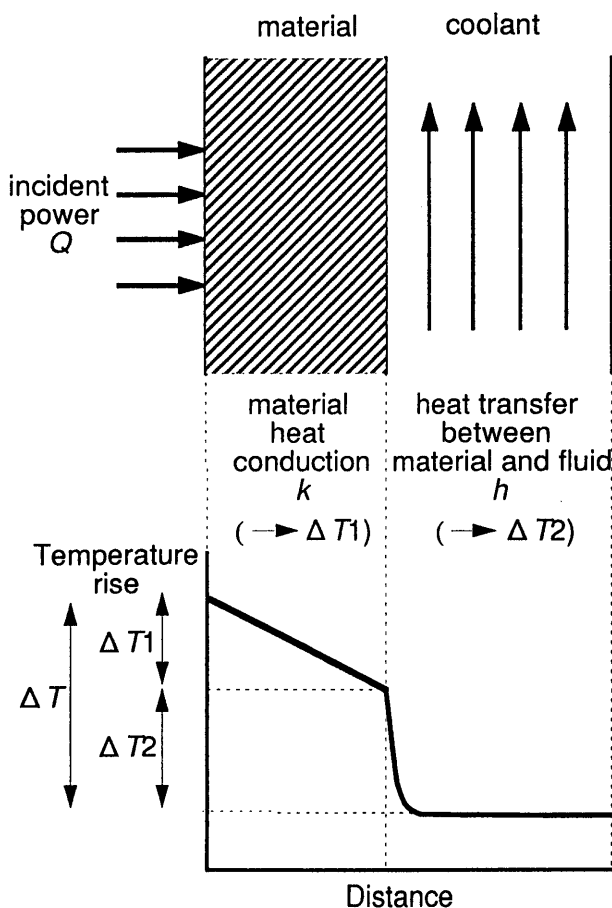


Figure 2. Concept of mechanism of heat conduction and heat transfer. Lower figure shows temperature rise of the material, the boundary between material and cooled fluid, and the coolant.

冷却流体と熱負荷を受けた表面の全体との温度差は、上式から次式のように表せる。

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = (t/k + 1/h)Q/A \equiv Q/U \quad (4)$$

ここで U (W/K) は熱コンダクタンスと呼ばれる量である。(4)式の第1項は物体内部の熱伝導抵抗を意味し、第2項は冷却面表面の熱伝達抵抗を意味する。これらの温度差が物質に熱変形を起こさせる原因となる。温度差 ΔT を小さくするためには、コンダクタンスを大きくする、すなわち、厚さ t を小さくする、熱伝導率 k の大きな物質を使う、冷却のところを工夫して熱伝達率 h を大きくする、そして面積 A を大きくとって単位面積当たりのパワーを小さくすることが要請される。

熱伝導率 k は物質固有の定数なので、物質を選ぶと自動的に決まってしまう。光学素子に適した物質でなるべく熱伝導率の大きな物質を選び、できるだけ表面と冷却流路との間の距離を短くすることが必要である。

熱伝達率 h は、 h を無次元化したヌッセルト数 Nu の式から求めることができる。

$$Nu = hd/k \quad (5)$$

よく使われる経験式として、

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (\text{水, 但し } 10^4 < Re < 10^5, 1 < Pr < 10) \quad (6)$$

$$Nu = 5 + 0.025 Re^{0.8} Pr^{0.8} \quad (\text{液体金属}) \quad (7)$$

$$Re = vd/\nu, \quad Pr = \nu/a \quad (8)$$

がある¹⁰⁾。ここで、 d , Re , Pr , v , ν , a はそれぞれ冷却炉の等価直径 (m)、層流か乱流かの判定にも使われるレイノルズ数、冷却媒体のプラ

ントル数, 冷却流体の流速 (m/s), 動粘性係数 (m^2/s), 温度伝導率 (m^2/s) である。レイノルズ数は流速に比例して大きくなるので光学素子に流す流量を大きくすれば熱伝達率 h をかせぐことができる。流れは必然的に乱流となる。また, そもそもヌッセルト数を大きくできる液体金属を使えばもっと熱伝達率を上げることができる。これが, Ga 冷却が行われる主な理由である。液体金属は動粘性係数が非常に小さいためにプラントル数が小さいという大きな特徴がある。流速を上げれば確かに熱伝達率は上がるが, このことは大きな圧力が冷却流路にかかることを意味し, 素子の圧力による変形をもたらす。上の熱伝導のところでは述べた厚さ t をなるべく薄くするということと, このことは相反することになる。滑らかな管の圧力損失 (loss head), $\Delta p (\text{N}/\text{m}^2)$, は一般に次式で与えられる。

$$\Delta p = (\lambda l/d + f)(\rho v^2/2), \quad \lambda = 0.3164 \text{Re}^{-0.25}$$

$$(\text{Re} = 3 \times 10^3 \sim 10^5) \quad (9)$$

ここで, l, d, f, ρ はそれぞれ冷却チャンネルの流体が流れる方向の長さ (m), 流路の内径 (m), 定数 (断面積が変化する場合及び流れの方向が変化する場合の圧力損失係数), 密度 (kg/m^3) である。液体金属ではこの式からわかるように, 圧力損失が密度に比例するため水の場合と比べ特に大きくなることに注意する必要がある。

上に述べたように温度差を小さくするためには, 熱伝導と熱伝達の両方の観点から考えなければならない。(4) 式において, 熱伝導抵抗と熱伝達抵抗の比は無次元数となり, どちらの抵抗が温度勾配を大きく引き起こし支配的かの目安になる。この比をビオー数という。いま仮にビオー数

$$\text{Bi} = th/k \quad (10)$$

を 1 とおいたとき, 厚さ t は, 丁度, 熱伝導によ

る温度差と熱伝達による温度差が等しくなる厚さを意味しており, 光学素子の冷却を考えるとのおおまかな指針となる。例えば, 熱伝達率が $5 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$ のとき, 室温のシリコンに対して厚さは約 3 mm となる。これを液体窒素温度にもっていくと, シリコンの熱伝導率が大きくなることから厚さは約 22 mm となって, 液体窒素温度で冷やしたシリコン結晶は t を厚くできることがわかる。これもあとで述べる液体窒素冷却のひとつのメリットである。

いずれにせよ, 熱伝導で決まる温度差と熱伝達で決まる温度差をできるだけ小さくおさえる努力をせねばならない。ミラーでも同様であるが, 熱負荷対策でもっとも重要なことは, 基本的に温度差を光学素子内部でつくらないということである。極端に言えば素子全体の絶対温度が上がったとしても全体として一様であれば, 温度上昇に伴う熱膨張による格子の歪みなどの影響のみで全体としての変形はない。

3. 冷却方法

3.1 冷却流体

一番簡便な方法は扱いやすい水冷である。もし, ハンドリングの楽な水冷で冷却がすむならばこれにこしたことはないであろう。しかし, 水冷の場合, 第3世代の挿入光源に対しては限界があり, 次に述べるように冷却流路の形状を工夫して (5) 式の熱伝達率 h を向上させるようにすること, または斜入射にしてパワー密度を下げるのが不可避となってくる。単純に熱工学の観点からだけであれば, 沸騰熱伝達を利用する考えも当然出てくるかもしれない。しかし, ミクロンからサブミクロンオーダーの変形が大きな問題となる X 線光学系では無理があることは容易に理解できるであろう。表2に光学系の冷却流体として有力な候補である水, Ga, 液体窒素の特性を示す。

熱伝達率を上げるには, 液体金属を使うのが一番である。高速増殖炉では高速中性子を減速せず

Table 2. Thermophysical properties of the coolants used in the beamlines.

	water	Ga	liquid N ₂
density (kg/m ³)	997.7	6.093 (305 K)	745.99 (90 K)
operation	room	> 30°C	~90 K
temperature	temperature		
melting point (K)	273.15	302.12	63.15
boiling point (K)	373.15	2256	77.35
specific heat (kJ/kg/K)	4.174	0.34309	2.139
kinematic viscosity (mm ² /s)	0.891	0.31018	0.147
thermal conductivity (W/m/K)	0.61	29.3~37.7	0.114
Prandtle number	6.06	0.0197	2.06
surface tension (mN/m)	72.74 (293 K)	735 (303 K)	6.19 (90 K)
heat of vaporization (kJ/kg)	2257	4249	1365
vapour pressure at room temperature (Torr)	0.17	< 10 ⁻¹⁴	7.5 × 10 ³

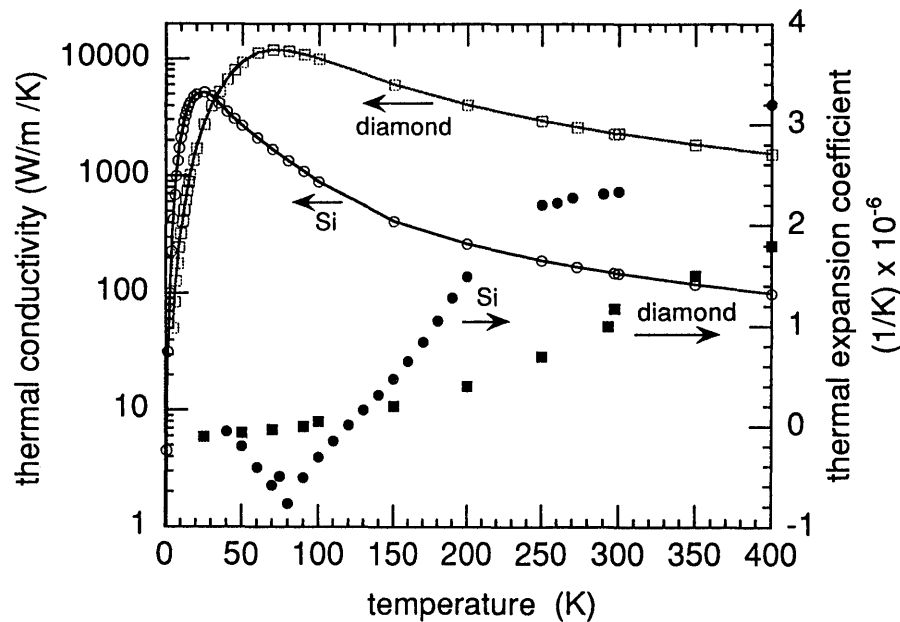


Figure 3. Heat conductivity and thermal expansion coefficient for silicon and diamond as a function of temperature. For silicon crystal we can observe zero-crossing point of thermal expansion coefficient at about 115 K that is around liquid nitrogen temperature.

かつ熱効率が良いことからナトリウムが使われている。しかし、取り扱いが困難なために放射光の施設では現実的ではない。融点が低く化学的にも

比較的扱いやすい液体ガリウムの使用がAPSのグループより提案され、ポンプの開発を含めたR & Dが行われ成果を収めてきた¹¹⁻¹⁴⁾。

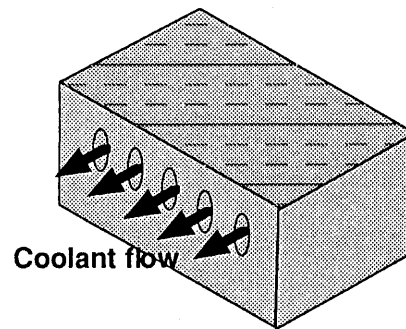
もうひとつの有力な方法は、放射光の分野では最初 Bilderback によって指摘された液体窒素を使った冷却である¹⁵⁾。図3にみられるように、シリコンやダイヤモンドの単結晶は温度とともに熱伝導率が上がり、熱膨張率が下がる¹⁶⁻¹⁸⁾。結晶を液体窒素温度付近で使ったとき、熱膨張係数がゼロ付近の小さな値をとるため熱変形が著しく小さくなり理想的な冷却方法と言える。当初このアイデアが出たときには2つの問題があった。ひとつは、循環ポンプの問題であり、もうひとつは限界熱流束の問題であった。ポンプの問題は、気化した窒素を液化して循環させずに、気化した分だけ外部から供給するという装置はすでに ESRF で実用化され順調に動いている¹⁹⁻²⁰⁾。液体窒素冷却の限界熱流束に関しては、甲藤らによって導かれた経験式から計算すると、現実的には流速を上げたとしてもせいぜい約 1 W/mm^2 以下が限界であり、通常はこれより一桁低い²⁷⁾。トータルパワーとしては約 1 kW まで除熱できることが実験的に ESRF の Marot らにより示された²²⁾。液体窒素の冷却ループには放射光の分野で使われてきたものには現在のところ液化器まではついていない。気化した分は外部より供給せねばならない。この液体窒素による結晶冷却の最近の成果については、モノクロメーターの節で述べる。

3.2 冷却流路の形状

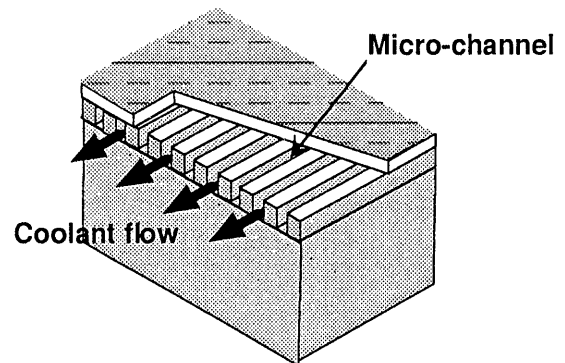
冷却流体が流れる流路は、分光結晶に対しては、最初は単純な丸い穴を結晶などの素子にあけてたり、スロット状にしたりして冷却していくことから始まった^{11, 12, 23)}。そしてスロット状の冷却チャンネルをより細かくしたマイクロチャンネルが開発された²⁴⁻²⁶⁾。また、光の当たる裏面にジェット水流をあてて熱伝達をあげる方法も Hart らにより試みられた²⁷⁻³⁰⁾。これらの改良にともない、熱伝達率はオーダーとしておよそ数千 ($\text{W/m}^2/\text{K}$) から始まったものが数万 ($\text{W/m}^2/\text{K}$) の値のところまで来た。現在は、さらに効率を上げるために

pin post という、円柱状のものを冷却通路に多く並べたものが提案され熱伝達率を約 $10 \text{ 万} (\text{W/m}^2/\text{K})$ 以上に上げることを目指している³¹⁻³³⁾。図4にこれらの概念図を示す。冷却流路を複雑にしていくと必然的に圧力損失が大きくなる。(9)式で与えられる圧力損失を $1\sim 2 \text{ kg/cm}^2$ 程度以下に押さえながら流路を工夫して設計していくことも必要である。

(a) Hole-drilled channel



(b) Slotted channel (Micro-channel)



(c) Pin-post configuration

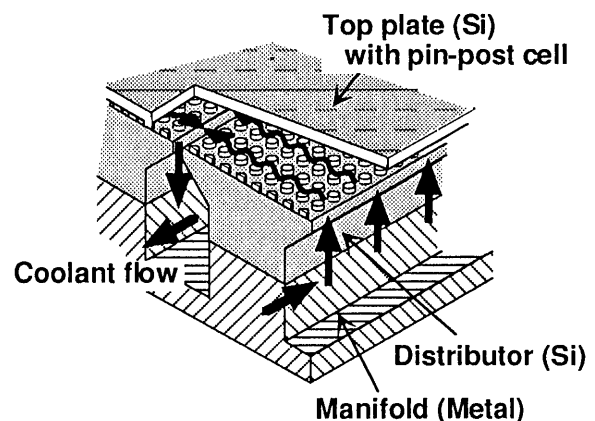


Figure 4. Improvement of cooled channels. (a) hole-core drilled channels, (b) slotted (micro) channels, and (c) channels with pin-post geometry.

3.3 間接冷却 (In-Ga)

入射パワーがそれほど大きくない場合は間接冷却の方法がとられる。通常は、ミラーやモノクロメーター結晶に In-Ga または Ga を通して直接冷却した銅などの熱伝導性のよいものを接触させて素子を間接冷却する。In-Ga は、銅やアルミなどを激しく腐食するので光学素子かまたは銅やアルミなどにニッケルコートなどをして In-Ga を接触させる。

In-Ga の熱伝達率を約 $3.4 \times 10^4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ とすると³⁴⁾、例えば 1 W/mm^2 の大きな入熱があると温度差はここだけで約 30°C もついてしまう。ダイヤモンド結晶のように光学素子の熱特性が良くて狭い領域に大きな入熱があるときこの In-Ga の層のところで大きな温度勾配ができて、全体の温度差を作る主な原因になることがあるので注意せねばならない⁶⁴⁾。従って、有限要素法などで細かな計算を行うときもこの部分を無視しないようにしたほうがよい。しかし、間接冷却は通常は 0.1 W/mm^2 程度以下の入熱に対して使われることが多いので無視できることも多い。

3.4 結晶の接合 (ボンディング) 技術

冷却チャンネルは熱伝達率を上げるためにより細かな加工へといく傾向がある。オーダーとしては数十ミクロンの幅の冷却チャンネルを加工する技術が必要とされる。一般にはこのような細かな

加工は深さ方向にはチャンネル幅の減少とともに浅くなる。例えばダイヤモンドカッターなどで光の当たる反対側の面から細かな冷却チャンネルを厚い結晶に作っていくというような加工が困難になる。浅い冷却チャンネルを表面に作り、それを他の素子にボンディングして全体を仕上げるといふプロセスを取らざるを得ない³⁵⁾。したがって、結晶に歪みを残さずに接合する技術の開発が不可欠である。我々は、ひとつの試みとして 300 ミクロンピッチで冷却溝を刻んだ厚い結晶に薄い 600 ミクロン厚のウエーハーを酸化膜を通して接合し、そのウエーハーの表面を反射面として使う方法を試みた²⁶⁾。ESRF のウィグラービームラインの実験では熱歪みはマイクロチャンネルの冷却によりある程度に押さえられたが、結晶のネットプレーンが約 1 km 以下の曲率をもともと持っていることがわかった。結晶同士を接合する際に温度を 100°C 程度まで上げるのでこれにより結晶全体が曲がったのか、あるいはウエーハーのネットプレーンがすでに曲がっていたのではないかと思われる。この問題を避けるために、厚い結晶同士を低温で接合する方法が提案されその R & D が行われている。図 5 に ESRF の実験で使った直接冷却のシリコン結晶の概念図を示す。また、図 6 に 2 つのボンディング方法の概念図を示す。

結晶のボンディング自体には、①酸化膜をつける、②薄い Au 膜を結晶の間にはさむ、③ glass

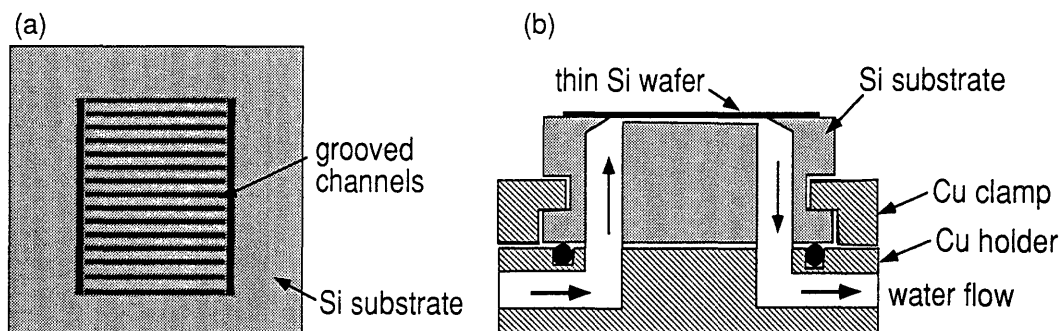


Figure 5. Example of schematic diagram of the grooved silicon substrate used in the high heat load test at the ESRF; (a) before bonding and (b) cross section through the complete assembly after bonding. The thin silicon wafer is oxide bonded to the thick substrate block.

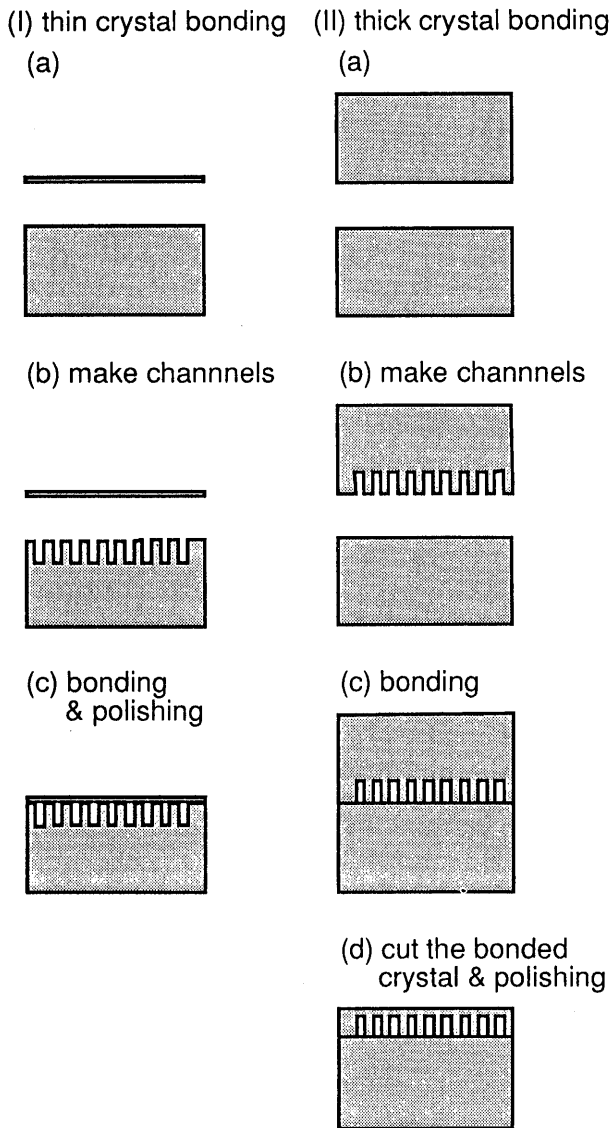


Figure 6. Concept of two kinds of crystal bonding process ; (a) thin crystal bonding on thick substrate, (b) thick crystal bonding on the thick substrate, thick bonded part is cut after the bonding.

fritを使う, ④Ag (or Ag-glass) pasteを使う, ⑤epoxyを使う, ⑥酸化膜なしで直接ボンディングする, などの方法がある。①の方法は上に述べたように接合温度が高いという難点がある。②は現在 SPring-8 で R & D が行われている。③と④は APS がヒートロードテストした結晶に対して試みられた。⑤は熱膨張係数がシリコンに近いものを選ぶことができるが, 放射線によるダメージの問題がある。⑥は原理的には可能であるが接合そのものが困難である。現在のところ歪みを全く残さないでボンディングする方法は見つかっていない。

ない。いずれにせよ, 結晶に歪みをなるべく残さないためには, 低温, 低圧の条件下でのボンディングが望ましい。また, 接合面はミラー反射面のように互いにできるだけ形状精度を良くし面粗さも小さくするようにせねばならない。

熱伝達率の表面積を大きくするために冷却溝を細かくする。しかし, 細かくすればするほど接合は一般に困難になってくる。結晶に歪みを残さないよう接合する技術は結晶の冷却法全体で鍵となる技術である。

4. 光源の側からのアプローチ

4.1 挿入光源の改良

SPring-8 では北村らのグループにより挿入光源側から不必要なパワーをカットして必要なエネルギーの部分だけ取り出すユニークなアイデアがいくつか出されている。ここでは, 8 の字型のアンジュレーターとミニポールウィグラーについてのみ述べる^{37, 38)}。

8 の字型アンジュレーターは, 電子軌道が挿入光源の中を蛇行し, 進行方向に垂直な断面をとったとき, 8 の字になることから名付けられた光源である。この蛇行することにより主なパワーが中心軸上からはずれて分布し, 必要なフラックスのみが中心軸上にくるといった性質を持っている。図7に田中らによって計算されたパワー密度分布の比較を示す。これにより, 中心軸上のパワーは全体パワーよりも一桁以上下がる。さらに高次のハーモニクスが抑制されるという特徴を合わせ持つ。波長は主に軟 X 線の領域の光の発生に限られる。短波長では K 値が小さくてよいので, 不必要な高調波による熱負荷は小さいので 8 の字アンジュレーターを使う必要はない。

第3世代では, ウィグラーは基本的に数十 keV 以下の低いエネルギー領域では使うべきではない。アンジュレーターを使えばよい。SPring-8 のウィグラービームラインでは約 100 keV 以上の光を非弾性散乱実験のために使う予定で, ビームライン

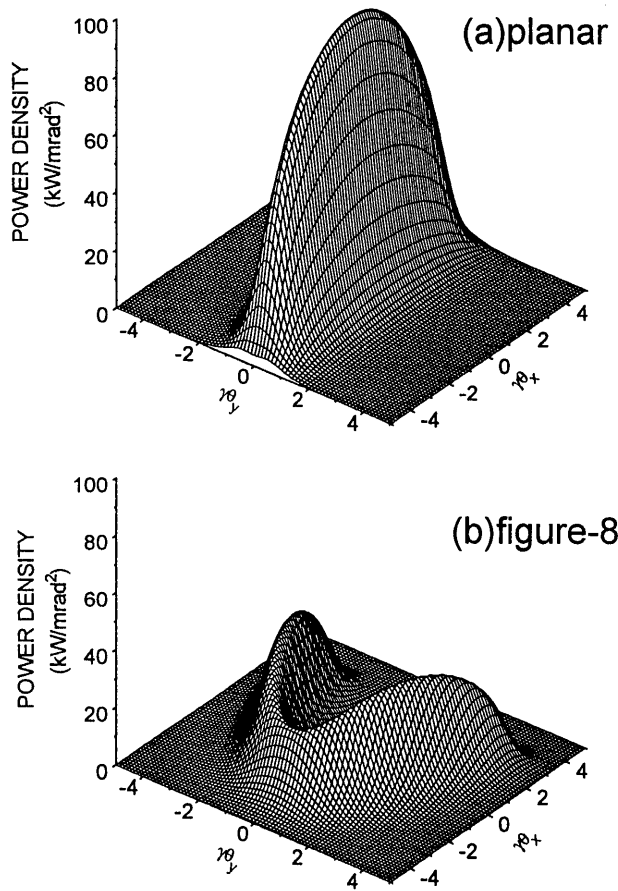


Figure 7. Spatial distribution of the power radiation in SPring-8 ; (a) a planar undulator ($K_x=0$, $K_y=4.72$) and (b) a figure-8 undulator ($K_x=K_y=3.34$). The power density of the planar undulator has maximum of 98 kW/mrad², on the other hand that of the figure-8 undulator is as low as 1.4 kW/mrad² on the axis. (After T. Tanaka and H. Kitamura)

ムラインの上流には 100keV 以下の光をカットするためにフィルターが挿入されている^{75, 76)}。しかし、これでも、最初のモノクロメーターには 18kW のもとのパワーのうち、約 2kW のパワーがくる。ミニポールウィグラーは、磁石を小さくし、磁石間のギャップを数 mm と狭めて 100keV 付近のみでのエネルギーを取り出そうとするものである。これによりパワーを約数十分の 1 まで下げることができる。この魅力的な装置の欠点は広い範囲のエネルギースキャンが困難な点であろう。

4.2 スリットの利用

アンジュレーターのパワー分布は確かに約 $1/\gamma$ 程度で広がっているが、よく使われると思われる

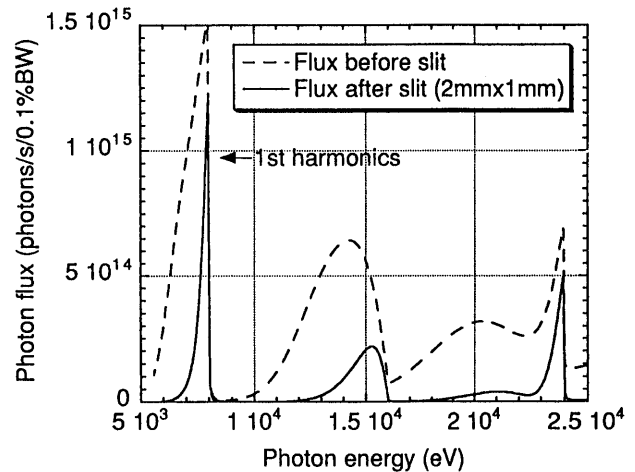


Figure 8. Comparison of the undulator flux between the conditions before and after the slit system ($1.2 \times 2.3 \text{ mm}^2$). The ID parameters are $\lambda = 3.2 \text{ cm}$, $N = 140$, $L = 4.5 \text{ m}$, $K = 1.66$ and $I = 0.1 \text{ A}$, respectively.

1 次光の 8keV 付近でそのフラックス分布を見ると、もっと狭い範囲に集中している。もし、SPring-8 のアンジュレーター ($\lambda = 3.2 \text{ cm}$, $N = 140$, $L = 4.5 \text{ m}$, $K = 1.66$, $I = 0.1 \text{ A}$) に対してスリットを使ってビームを光源から 40 m くらいのところで約 $1 \times 2 \text{ mm}^2$ に切ると、入射パワーは一桁落ちるけれども、1 次光のトータルのフラックスは約 20% 程度しか落ちない³⁶⁾。SPring-8 アンジュレーターの 1 次光付近の光についてスリットの影響を計算したものを図 8 に示す。但し、ここでは意味のある中心軸付近を比較するためにスリット前のフラックスは $\pm 50 \mu\text{rad}$ の範囲で積分してある。スリットを使ってよけいな光をカットしてやることにより、必要なエネルギーのフラックスを減じることなく光学素子にかかる熱負荷を一桁も減じることが可能である。SPring-8 のアンジュレータービームラインでは、この方針に基づいてビームラインの設計が行われている。この結果スリットには大きな熱負荷がかかることになるため、スリットの R & D も行われている³⁹⁾。

4.3 フィルター

結晶に対して余分な光をカットするパワーフィルターリングの方法は 2 つある。ひとつは、グラファイトなどの原子番号が低く熱特性のよい元素を置

いて低いエネルギーをカットしようとするもので、どのビームラインでも通常行われている。もうひとつは、ミラーを使って逆に高エネルギー成分をカットしようとする方法である。ミラーへの照射角を適当に変えてやることによりカットするエネルギーをある程度変えることができる。しかし、カットされた高エネルギー成分による熱は当然ミラーが背負わねばならなくなることに注意せねばならない。これらのフィルターとミラーとを組み合わせることにより大きなバンドパスフィルターを作ることができることはよく知られている。このバンドの幅をより狭くするために冷却された多層膜を使うという方法もある。

5. X線ミラー

5.1 ミラー母材

ミラーのうち、熱負荷が問題となるのは、主に分光器の上流側に設置される前置ミラーである。ミラーは鏡面研磨された基盤の上に、X線の反射率を高めるために屈折率が大きい金属（白金、金、ロジウム等）がコートされるが、金属コート層は厚さが100 nm程度で、熱負荷によりミラーに生ずる温度勾配にはほとんど影響しない。熱的な観点から見た場合、熱特性が優れた基盤の材質を選択することが重要となる。表3に代表的なミラー母材の特性を示す。我々は、PFでの実績から当初SiCを、また熱特性、入手し易さや価格の面で優れたシリコンを母材とした耐熱性ミラーの開発

をメーカーの協力を得て進めてきた⁴⁰⁻⁴³⁾。現在、SiC及びシリコンを母材とした長さ1 m、表面粗さが数Åの平面やシリンダー形状のミラーを得ることができる。分光器の下流に設置される後置ミラーには、熱負荷がかからないので比較的安価な溶融石英などの母材を用いることができる。

5.2 前置ミラーの冷却とベント

ミラー場合、放射光の照射角が数 mrad と小さいことから、パワー密度が直入射に比べ2~3桁低くなるので、ミラー表面の温度上昇や局所的な温度勾配は抑えられる。また、直接冷却方式の場合、冷却チャンネルは、ミラー表面を高い面精度で研磨するため、分光器結晶とは異なり、表面から離れた位置に設置されるので、冷却効率をあまり高くすることができない。これらの理由から、前置ミラーの冷却には、設置の容易な間接水冷却方式が用いられることが多い。

熱負荷により生じた前置ミラーの変形に対しては補正を行うことが必要である。ESRFのSusiniらは、MPWビームラインの前置ミラーの熱変形をレーザー光の反射位置測定によりモニターし、ミラー背面に取りつけられた複数個のピエゾ素子を駆動することにより補正する方式を開発した。ESRFでは実際にこの装置を採用しているビームラインがいくつかあるが、装置が大がかりで、コストがかかる点に難がある⁴⁴⁻⁴⁶⁾。我々は、SPRING-8の典型的なアンジュレーター ($\lambda=3.2$

Table 3. Properties of some possible mirror substrate materials.

	SiC	Glid-Cop	Si	Fused quartz
density (g/cm ³)	3.10	8.90	2.34	2.2
melting point (°C)	2700	1083	1685	~1600
Young Modulus (GPa)	400	130	130~190	73.1
Poisson ratio	0.18	0.33	0.27	0.17
thermal conductivity k (W/m/K)	110	365	168	1.4
thermal expansion coefficient α ($\times 10^{-6}$ 1/K)	4.5	21.2	2.33	0.4~0.55
figure of merit k/ α ($\times 10^{-6}$)	24.4	17.2	64.5	2.5~3.5

cm, $N=140$, $L=4.5$ m, $K=1.66$, $I=0.1$ A, トータルパワー ~ 440 W, 最大パワー密度 ~ 1.2 W/mrad²)用の前置ミラーに対して, 間接冷却方式と機構のシンプルな4点ベント装置により, 形状補正が可能かどうかをシュミレーション計算により調べた。その結果, ミラーを円筒面形状に曲げ戻す場合には, この方式が有効であることが分かった⁴⁷⁾。

5.3 長尺ミラー表面の評価

ミラー表面は, 反射光の強度やプロファイルに直接影響するため, 高精度に研磨することが要求されるが, その評価はミラーが大きくなるにしたがい容易ではなくなる。

長尺ミラーの表面粗さの評価は, 市販の接触型または非接触型測定器で, ミリメートルオーダーの領域の測定を数点について行われることが多い。より広い領域の表面粗さの評価は, X線の反射率や散乱光プロファイルの測定により行うことができる⁴¹⁻⁴³⁾。

オフラインでの表面形状評価には, レーザー光の反射や干渉を利用する装置が用いられている。代表的なものとしては, Takacsらにより開発された直線的な形状評価が可能なLTP (long-trace profiler) や, 佐藤らにより開発されたシリンダーミラーの形状測定が可能なプロファイラーがある⁴⁸⁻⁵⁰⁾。熱負荷がかかった状態での表面形状測定は, 上に述べたESRFで用いられている方式や, LTPの改造型が提案されている⁵¹⁾。今後, ミラーを湾曲した状態や, 真空チェンバー中で熱負荷がかかった状態で, 表面形状の評価がリアルタイムで行える簡便かつ汎用的な測定装置の開発が望まれる。

6. X線モノクロメーター

6.1 シリコン

我々は, ESRFのウィグラービームラインで, マイクロチャンネルを持つ結晶に対してヒートロー

ド実験をESRFの一番最初のビームラインが立ち上がっているときに行った。その結果パワーとしては1 kW程度, パワー密度としては1 \sim 2 W/mm²程度なら問題ないことがわかった²⁶⁾。しかし, 第三世代の放射光では, アンジュレーターを考えた場合パワー密度はもっと大きくなる。水冷方式を採用する限り斜入射にして幾何学的に表面のパワー密度を下げざるを得ない。これは(4)式において熱伝導率 k と熱伝達率 h がある程度決まってしまうために受光面積 A を上げざるを得ないという理由による。このために, 傾斜型のモノクロメーターがAPSなどで提案され^{52, 53)}, SPring-8でも石川らにより回転傾斜型モノクロメーターが提案されている⁵⁴⁾。SPring-8の標準分光器の結晶には冷却流路の形状のところで述べたようにマイクロチャンネルに変わってピンポストの形状を持った冷却チャンネルを用いることも候補として考えられている。

APSでは, 先に述べたように液体Gaを使った結晶冷却実験が行われてきた¹¹⁻¹⁴⁾。また, 最近様々な構造を持つ冷却チャンネルに対して液体Gaを含めたビームラインでのヒートロードの比較実験も行われている⁵⁵⁾。

液体窒素冷却は, 最初ESRFのグループによってNSLSでテストされその有用性が示された⁵⁶⁾。その後, ESRFのアンジュレーターとウィグラーのいくつかのビームラインでこの冷却方式が採用された^{57, 58)}。KEK AR NE3のビームラインでも液体窒素冷却の実験が行われた⁵⁹⁾。さらに, ESRF, APS, SPring-8の間の国際共同実験として, 薄いシリコン結晶の液体窒素冷却実験も行われ, 成果をあげている⁶⁰⁻⁶²⁾。図9にこの時実験に用いた光学系を示す。テストに用いたESRFのビームライン(Wundulator, BL3)では初段のシリンドリカルミラーを使って放射光をフォーカスすることによりSPring-8やAPSのアンジュレーター光のパワー密度を模擬することができる⁶³⁾。実験では, 結晶の位置で縦方向のビーム

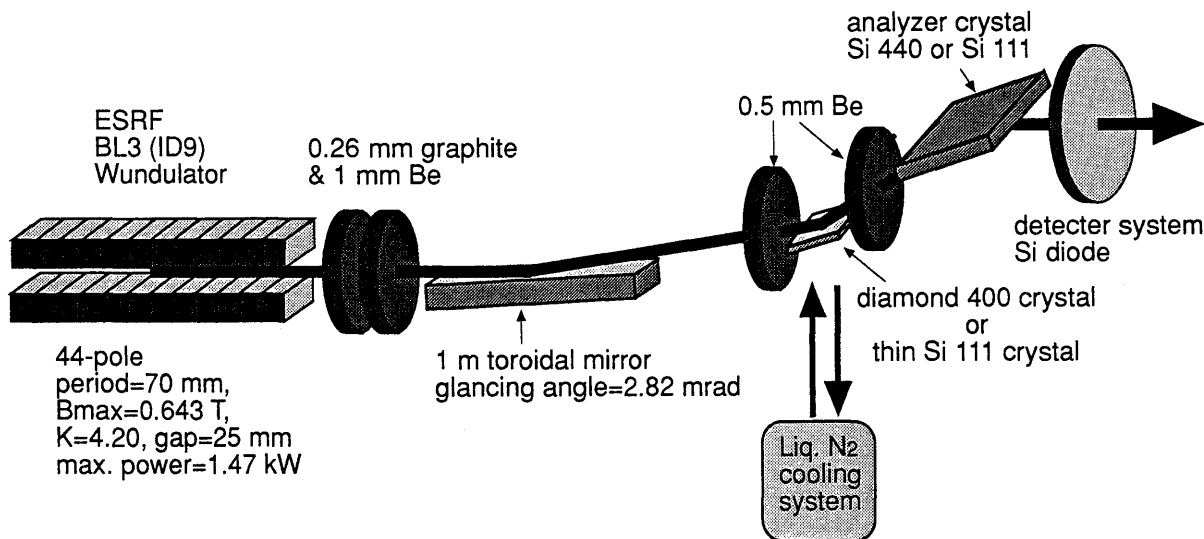


Figure 9. Experimental setup of high heat load experiments in BL3 of the ESRF. A bent-cylindrical mirror is used to get focused beam at the crystal position.

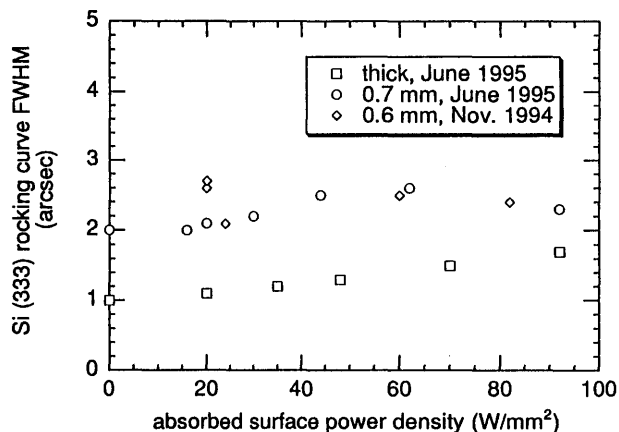


Figure 10. Si 333 rocking curve width (FWHM) at 30 keV as a function of absorbed power density on the surface of the crystal for the thin (0.7mm) and thick (more than 25mm) parts and previously tested thin (0.6mm) crystal.

サイズを半値全幅で0.3 mm, 横方向1.1 mmの大きさのビームを得ることができた。図10に実験結果を示す。パワー密度を上げていっても分光幅はほとんど変化しないのがわかる。液体窒素冷却されたシリコン結晶は第3世代のリングのアンジュレーターからの放射に対してひとつの解を与えると言える。上の実験では入射パワーは最大で約180W程度であったが、最近APSのグループにより液体窒素冷却でポラスな銅メッシュを冷却チャンネルのなかにいれて熱伝達率を上げようという試みがなされた。これは、フロントエンド

の冷却チャンネルでおこなわれていたアイディアを結晶の冷却にも応用したものである。これにより約1.8kW程度のパワーまでハンドリングできるようになった⁶⁴⁾。

冷却構造に関して、なるべく光のあたる場所と冷却面との距離を小さくして、結晶自身の熱伝導で決まる温度勾配を少なくすることが必要であり、このため水冷の場合先に述べたボンディングの技術が鍵となる。これに対し、液体窒素冷却を使うメリットとしては、熱伝導率が大きくなるために2-2節で述べたようにこの距離を大きくとることができ、ボンディングの技術は必要とされない点もあげられるであろう。

6.2 ダイヤモンド(自然がくれた贈り物)

熱的特性のよい結晶を分光素子として選ぶのもひとつの方法である。表4に様々な分光結晶の特性を示す。これからもわかるようにダイヤモンドは自然がくれたすばらしい特性をもっている。高熱負荷光学の観点からは、なるべく原子番号の低い結晶を使って余分な放射光による熱吸収を減らすことと結晶そのものになるべく熱特性の良い材料を使うことが望まれるがダイヤモンドはこの要求を十分に満たす。図3のグラフに見られるよう

Table 4. Thermal properties of monochromator crystals.

	silicon	diamond	Be	Ge	InSb	β -Al ₂ O ₃	YB ₆₆
atomic number	14	6	4	32			
density (g/cm ³)	2.33	3.51	1.85	5.32	5.78	3.24	
thermal conductivity k (W/m/K)	168	2190	200	67	17	2.1~2.5	25
thermal expansion coefficient α ($\times 10^{-6}$ 1/K)	2.6	1.0	13.4	5.7	4.8	6.2~8.0	4.5
figure of merit k/ α ($\times 10^{-6}$)	64.6	2190	14.9	11.8	3.54	0.40~3.81	5.6
melting point (°C)	1685	2190	1550	1211	809	2049	
Young modulus (GPa)	130-190	1050	320	130	67	465	150
Poisson ratio	0.27	0.1~0.29	0.02~0.08				
specific heat (J/kg/K)	700	520	190	323			

Table 5. Type of natural and synthetic diamonds. Type II a (synthetic single crystal) is used as a monochromator crystal. (after S. Sato et al.)

type	type I		type II	
	I a	I b	II a	II b
natural production rate	98%	0.1%	1~2%	~0%
man made (synthetic)	impossible	possible small particle	possible single crystal	possible single crystal
impurity nitrogen (PPM)	$\sim 2 \times 10^3$	$10^2 \sim 10^3$	~ 1	~ 1
impurity others (PPM)		metal $10^3 \sim 10^5$		
color	transparent ~yellow	yellow green ~brown	yellow	transparent blue
resistivity (Ω m)	$10^{14} \sim 10^{16}$		10^{16}	10^{16}
thermal expansion coefficient ($\times 10^6$ 1/K)	2.3		2.3	2.3
thermal conductivity (W/m/K)	~1000		~2000	~2000

に室温でのダイヤモンドの特性は、すでに液体窒素温度でのシリコンの特性に匹敵していることがわかる。X線の吸収を考えた場合ダイヤモンドの優位性はさらに大きくなる。ダイヤモンドは第三世代の放射光光源に対して完全な解を与える。ダイヤモンドの問題点はその結晶の完全性と大きさにあった。現在商業的に問題なく得られる比較的完全性の良い人工合成ダイヤモンドのサイズは、数 mm 角で約 20mm² である。これは、表 5 に示

すようにタイプ II a と呼ばれている^{16, 65)}。Spring-8 などの第 3 世代のアンジュレーターを考えたとき、十分にビームのサイズが小さい(約 1×2 mm² 程度)ために、実用上はこの大きさでも問題はなく、結晶の完全性も分光結晶としての仕様に耐えることが実験的に確認された⁶⁶⁾。図 11 に住友電工によって製作されたダイヤモンド単結晶のロックングカーブとトポグラフの例を示す。理論値に近いものが得られているのがわか

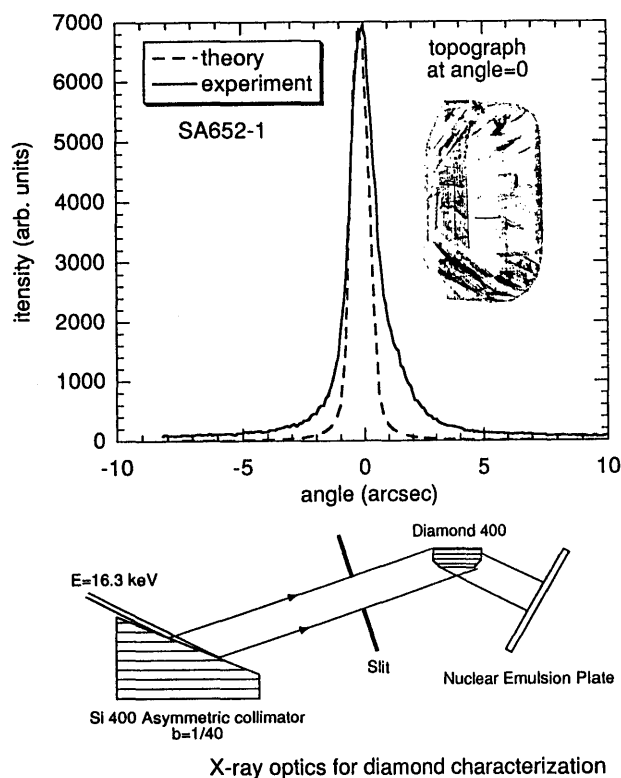


Figure 11. Rocking curve and topograph of a diamond single crystal (400) manufactured by Sumitomo (SA652-1) with theoretical curve at 16.3 keV. Experimental set up is also shown. To get expanded and narrow band width beam, asymmetrically cut Si 440 crystal ($\alpha = 22.3^\circ$) is used.

る。この結晶をより大きくする R & D が現在 SPring-8 と住友電工の間でなされている。ダイヤモンドのデメリットは、表 6 に示すように格子定数がシリコンなどと比べて小さいため、反射できるエネルギーが数 keV 以上に限られること、そしてシリコンと比べ結晶構造因子が小さいため得られるフラックスが小さいことであろう。

ESRF では、TOROIKA というビームラインで実際にダイヤモンド結晶が分光器に使われている、そして QUADRA というビームラインでは使うことが計画されている⁵⁸⁾。また、ヒートロード実験として、両端が In-Ga 通して間接冷却された、厚さ 100 μm のダイヤモンド単結晶に断面積 0.2 \times 0.4 mm^2 のフォーカスした約 280 W のビームを照射する実験が先の BL3 で行われたが、熱負荷がある時とない時でロッキングカーブ幅に変化は見られなかった。この実験におけるパワー密度

Table 6. Scanning energy range for each crystal d-spacings at the Bragg angle from 5 to 80 degrees.

crystal	d-spacing 2d (Å)	energy range (keV) ($5^\circ < \text{Bragg angle} < 80^\circ$)
Si 111	6.271	2.01~22.7
Si 400	2.715	4.64~52.4
Si 331	2.492	5.05~57.1
diamond 400	1.780	7.07~79.9
diamond 111	4.111	3.06~34.6
Ge 111	8.512	1.93~21.8
InSb	7.481	1.48~16.7
α -Quartz	6.533	3.06~34.6
YB ₆₆	11.72	1.07~12.1
Beryl 1010	15.95	0.789~8.92
β -Al ₂ O ₃	22.53	0.559~6.31

はなんと約 3.5 kW/mm^2 にもなる⁶⁷⁾。さらに最近、液体窒素冷却されたダイヤモンド結晶のヒートロード実験も行われ、良好な結果を得ている⁶⁸⁾。

また、SPring-8 のアンジュレーター光に対する解析も行われ問題ないことが示された⁶⁹⁾。具体的にダイヤモンド結晶を使う試みとして、SPring-8 ではトリクロメーターと言ってダイヤモンド結晶を並べて分光し、同一軸上に 3 つの違うエネルギーを取り出す分光器の提案もなされている⁷⁰⁾。

表 7 に、シリコン及びダイヤモンド分光結晶に関してこれまで行われてきたヒートロード実験の代表的な例をまとめたものを示す。

6.3 高熱負荷と結晶ベント

ビームの集光や熱負荷によって歪んだ結晶の補正を行うために結晶をベントすることが必要となってくる場合がある。熱負荷がかかった状態での結晶のベントは、熱負荷のない状態とくらべ大分違ってくる。冷却系が不十分な場合、熱変形が素子に起こり、それを強制的にベントすることになる。我々は、直接冷却されたシリコン結晶に熱負荷をかけてベントする実験を ESRF のウィグラービームラインで行い良好な結果を得ることができた⁷¹⁾。このような試みはこれからもなされてい

Table 7. Results of typical high heat load experiments performed at several facilities.

crystal	type	coolant	cooling	source	beam foot print (mm ²)	max. power (W)	max. power density (W/mm ²)	angle (°) & geometry	energy (keV) & plane	year of experiments & key person
Si	slotted, long fin, & thick crystal	water	direct	PF BL16X wiggler	~50x42	~700	~0.3	13.8 Bragg	8.3 (111)	1988 Oversluizen
Si	micro-channel	water	direct	CHESS wiggler	21x12	250	1	9.5 Bragg	12 (111)	1990 Arthur
Si	adaptive & jet	water	direct	NSLS X-25 wiggler	2.4x0.42	50	50	18.7 Bragg	6.17 (111)	1991 Hart & Berman
Si	cryogenic	liq. N ₂	in direct	NSLS X-25 wiggler	1.1x1.3	75	50	17.5 Bragg	6.6 (111)	1991 Marot
Si	slotted-channels	liq. Ga	direct	CHESS F2 wiggler	30x13	1000	2.6	10.4 Bragg	11 (111)	1990 Smither
Si	inclined & slotted	liq. Ga	direct	CHESS undulator	~33x2.2	380	5.3	22.6 Bragg	5 (111)	1991 Macrander
Si	inclined & slotted	liq. Ga	direct	NSLS X-25 wiggler	~11.6x0.8	37.7	3.9	22.6 Bragg	5 (111)	1991 Lee
Si	thin crystal & cryogenic	liq. N ₂	direct	ESRF BL3 wiggler	1.1x1.6	186	106	11.4 Bragg	10 (111)	1994 & 1995 Rogers
Si	hole-drilled & cryogenis	liq. N ₂	direct	CHESS F2 wiggler	30x13	1803	4.6	14.3 Bragg	8 (111)	1995 Rogers
Si	micro-channel	water	direct	ESRF ID11 wiggler	78x34	900	0.34	8.75 Bragg	13 (111)	1993 & 1994 Yamaoka
Si	pin-post	water	direct	CHESS F2 wiggler	~40x5/4?	<400?	<2?	14.31 Bragg	8 (111)	1995 Lee
diamond	jet-cooled	water	direct	NSLS X-25 wiggler	0.8x1.2	75	78	18.7 Bragg	21.7 (400)	1991 & 1992 Berman
diamond	edge-cooled 100 μm thick	water	in direct	ESRF BL3 wiggler	0.2x0.4	280	3500	Laue	14.7 (220)	1994 Als-Nielsen
diamond	edge-cooled	liq. N ₂	in direct	ESRF BL3 wiggler	0.6x2	120	96	17 Bragg	24 (400)	1994 Yamaoka

くであろう。

6.4 評価実験について

結晶に高熱負荷をかけたときの特性を評価する実験は通常ホワイトの光を冷却した結晶で受けて、それを (+, -) の配置におかれたほとんど同じ格子間隔の完全結晶でロッキングカーブをとってその広がりから評価するのが一般的である。注意せねばならないのは、格子間隔の違う結晶をこの配置で使ったときには、

$$\delta\theta = \Delta\theta_b (1 - \tan\theta_2 / \tan\theta_1) \quad (11)$$

にしたがって分散がおきて、結晶自体の熱歪みに

よるひろがりとの間のコンボリューションになって分散が起きてしまう点である。ここで、 $\Delta\theta_b$, θ_1 , θ_2 はそれぞれビームの発散角、第1及び第2結晶のブラッグ角で、この分散による広がりをできるだけ小さくしないと熱歪みの正確な評価ができない。非対称反射を利用するという方法も考えられる。また、1結晶配置に対して、河田らは、適当な物質の吸収端付近の吸収曲線の微分曲線から分解能を得ている⁷²⁾。

最初の結晶への熱負荷や入射ビームサイズは、途中にいくつかのフィルターやスリットがあるため計算だけでは不正確になりやすい。パワーは熱絶縁した銅ブロックなどによるカロリーメーターで、ビームサイズはスリットやワイヤーモニター

などのスキャンで測定すべきである。これらの測定で初めて正確なパワーとパワー密度が得られる。結晶の温度が赤外線カメラで測定されることもある。これは赤外線のシリコンの透過率を考えると不正確であるので目安としてしか使えない。ミラーでは干渉系を使って素子表面の熱変形を測るという方法も使われたことがある⁷³⁾。しかし、やはり、ロッキングカーブから結晶の歪みを評価するのが一番簡単で確実な方法であろう。基本的には、①パワーを直接測定すること、②ビームサイズを測定すること、③ほとんど熱負荷のかからない弱いビームを使ってもとの熱負荷のない状態でのロッキングカーブを測定し高熱負荷のかかったときの状態と比較することの3つが結晶の高熱負荷がかかったときの評価実験として最低限必要である。

6.5 散乱X線の問題

高エネルギー研のAR NE1のビームラインでは第一結晶からの散乱X線により第2結晶が暖められゆっくりと光学系のアライメントがずれるということが起きた。第2結晶を冷却してやることによりこの問題は解決された⁷⁴⁾。

SPring-8では、第2世代の光源とくらべて全体として数10keVの比較的高いエネルギー成分が増えてくる。散乱は、例えばシリコンの場合、約50keV以上ではコンプトン散乱の割合が光電効果の割合を越えるようになる。数10keV以上のエネルギーを主として使うようなビームラインではこの散乱X線の影響も無視できなくなる。図12にSPring-8ウィグラービームラインBL08 ($\lambda = 12$ cm, $N=37$, $L=4.44$ m, $Ky=11.2$, $I = 0.1A$)^{75, 76)}の300keVシリコンモノクロメーターに対してOEHLコードを用いて行ったパワー計算の例を結晶の厚さの関数として示す。入射角を約3度としモノクロメーター前には、36mmの等方性グラファイトと20mmのアルミニウムフィルターを低エネルギーをカットするために入れてある。モノクロメーターへの入射パワーは約460

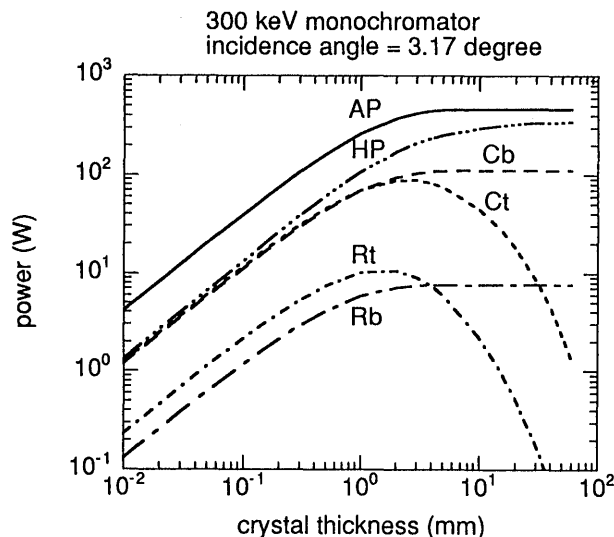


Figure 12. Power distribution of silicon crystals at the Bragg angle of 3.4 degree in the SPring-8 wiggler beamline BL08W as a function of crystal thickness. AP, HP, Cb, Ct, Rb and Rt are absorbed power, pure heat power, Compton back scattered, Compton transmitted power, Rayleigh back scattered power and Rayleigh transmitted power, respectively. The ID parameters are $\lambda = 12$ cm, $N=37$, $L=4.44$ m, $Ky=11.2$ and $I=0.1A$, respectively.

Wとなる。AP, Cb, Ct, Rb, Rt, HPはそれぞれシリコンで吸収されたパワー、コンプトンの後方散乱成分と透過成分、レーラー散乱の後方成分と透過成分、そして実際に熱になるパワーを意味している。これから、このウィグラービームラインでは、1mm以上の厚さの結晶を使った場合、常時100W以上のパワーが主としてコンプトン散乱により周囲に放出されているのがわかる。これを放置しておけばチェンバー全体の温度が上がってきて問題を起すことが容易に予想できる。分光器の設計はこのことを考慮して設計されている。

7. 放射光光学系の熱設計の方法

何を実験するかを決め、エネルギーやその分解能、フォトンフラックスとビームサイズなどを決めると、おのずから挿入光源と光学系に対する要求が決まるであろう。基本的な挿入光源のスペクトル計算には北村らによりSpectraというコードが用意されている⁷⁷⁾。スリットなどを通過後の光源スペクトルがわかればOEHLコードを用い

て散乱や透過 X 線の分をひいた正味の吸収パワーが計算できる。具体的な冷却系の形状が決まれば、有限要素法による計算コードを使って素子の変形が求められる⁷⁸⁾。将来的には、この結果とレイトレースのコード⁷⁹⁾とを組み合わせることで最終的なフラックスや分解能がわかることが理想であろう。しかし、これらのコードを使う前の基本設計を当然行っておく必要がある。これらのコードは基本的に基本設計の手助けをするにすぎないことを忘れてはいけない。

また、光源側からのアプローチの節で述べたように光源側の改良により光学系の状況が一変することもあり得る。これらは、光学系に余計な熱負荷をかけないためにも、光源から実験ハッチの実験装置までを総合的にとらえ、各グループと連携をとりビームライン全体を考えて光学系の設計をしていかねばならない。

8. おわりに

ここでは、高熱負荷の観点から放射光光学系の問題に対する解説を試みた。多くのことを並べて書いたので、個々については浅い内容になったかもしれない。それぞれの項目の詳細についてはまた別に紹介する機会があると思う。もっと深く知りたいと思うかたは、参考文献をみていただきたい。高熱負荷の放射光光学系の総合的理解という観点から、本稿がその一助になればと思う。

これまでに上に述べたような多くの努力がなされ高熱負荷の X 線光学は大きな進歩をとげてきた。これからも光学系は高熱負荷に対処するために様々な R & D を継続的に行っていくことになるだろう。熱負荷がかかったときのミラーの評価方法、結晶のボンディング技術の改良と確立、低エネルギー (1~5keV) でのモノクロメーターの開発、より大きな熱入力に対する対応など解決すべき課題は多い。

謝辞

高熱負荷の放射光光学系に関する研究では国内だけでなく ESRF や APS の方々にもお世話になった。あらためて列挙はしないが、ここで感謝の意を表したい。最後に、原稿に目を通していただいた望月哲朗氏、宇留賀朋哉氏に感謝したい。

文献

- 1) G. Brown, K. Halbach, J. Harris, H. Winick, Nucl. Instrum. & Methods **208**, 65 (1983).
- 2) X. M. Tong, T. Watanabe, H. Yamaoka and H. Nagasawa, Rev. Sci. Instrum. **63**, 493 (1992).
- 3) X. M. Tong, S. Munekawa and H. Yamaoka, Nucl. Instrum. & Methods **B71**, 427 (1992).
- 4) X. M. Tong, H. Yamaoka, Y. Sakurai, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1739**, 514 (1992).
- 5) H. Yamaoka, X. M. Tong, T. Uruga and Y. Sakurai, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1739**, 552 (1992).
- 6) T. Watanabe, X. M. Tong, H. Yamaoka and H. Nagasawa, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1739**, 562 (1992).
- 7) X. M. Tong, H. Yamaoka, H. Nagasawa and T. Watanabe, J. Appl. Phys. **78**, 2288 (1995).
- 8) X. M. Tong, H. Yamaoka, Y. Sakurai, S. Munekawa and T. Watanabe, Hoshako **5**, 217 (1992) (in Japanese).
- 9) T. Watanabe, X. M. Tong, H. Yamaoka, Hoshako **8**, 151 (1995) (in Japanese).
- 10) JSME Data Book : *Heat transfer* (4th Edition) ed. by JSME (Maruzen, 1986) (in Japanese).
- 11) R. K. Smither, G. A. Forster, C. A. Kot, T. M. Kuzay, Nucl. Instrum. & Methods **A266**, 517 (1988).
- 12) D. H. Bilderback, C. Henderson, J. White, R. K. Smither, G. A. Forster, Rev. Sci. Instrum. **60**, 1973 (1989).
- 13) R. K. Smither, W. Lee, A. Macrander, D. Mills, S. Rogers, Rev. Sci. Instrum. **63**, 1746 (1992).
- 14) A. T. Macrander, W. K. Lee, R. K. Smither, D. M. Mills, C. S. Rogers, A. M. Khounsary, Nucl. Instrum. & Methods **A319**, 188 (1992).
- 15) D. Bilderback, Nucl. Instrum. & Methods **A246**, 434 (1986).
- 16) J. E. Field eds, *The Properties of Diamond* (Academic Press, Tokyo, 1990) & *The Properties of Natural and Synthetic Diamond* (Academic Press, Tokyo, 1992).
- 17) G. A. Slack and S. F. Bartram, J. Appl. Phys. **46**, 89 (1975).
- 18) Touloukian, Kirby, Taylor and Lee eds. *Thermophysical Properties of Matter*, vol. 2 & vol. 13 (Plenum, New York, 1975).
- 19) G. Marot, M. Rossat, A. K. Freund, St. Joksche, H. Kawata, L. Zhang, E. Ziegler, L. E. Berman, A.

- Chapman and M. Iarocci, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 477 (1992).
- 20) G. Marot, *Opt. Eng.* **34**, 426 (1995).
 - 21) Y. Katto, *J. Heat & Mass Transfer* **24**, 109, 533, 541 (1981) & **25**, 1353 (1982).
 - 22) G. Marot and M. Rossat, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1739**, 464 (1992).
 - 23) T. Overslizen, T. Matsushita, T. Ishikawa, P. M. Strefan, S. Sharma, A. Mikuni, *Rev. Sci. Instrum.* **60**, 1493 (1989).
 - 24) J. Arthur, W. H. Tompkins, C. Troxel, Jr, R. J. Contolini, E. Schmitt, D. H. Bilderback, C. Henderson, J. White and T. Settersten, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 433 (1992).
 - 25) K. Takeshita, T. Matsushita, A. Mikuni, T. Maruyama and H. Yamaoka, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1739**, 528 (1992).
 - 26) H. Yamaoka, D. Häusermann, A. K. Freund, M. Krumrey, and Å. Kvik, *Nucl. Instrum. & Methods* **A351**, 559 (1994).
 - 27) R. Cernik and M. Hart, *Nucl. Instrum. & Methods* **A281**, 403 (1989).
 - 28) M. Hart, *Nucl. Instrum. & Methods* **A297**, 306 (1990).
 - 29) L. E. Berman and M. Hart, *Nucl. Instrum. & Methods* **A300**, 415 (1991). **A302**, 558 (1991).
 - 30) L. E. Berman, M. Hart and S. Sharma, *Nucl. Instrum. & Methods* **A321**, 617 (1992).
 - 31) T. Tonnessen and S. Fisher, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1740** (1992).
 - 32) T. Tonnessen, S. Fisher, F. Anthony, D. Lunt, A. Khounsary, K. Randall, E. Gluskin, W. Yun, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1997**, 340 (1992).
 - 33) M. Kuroda, H. Yamaoka, T. Ishikawa, *SPRING-8 Annual Report 1994* (SPRING-8, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken, Japan) p. 205.
 - 34) M. Asano, J. Ogata and Y. Yoshinaga, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1739**, 652 (1992).
 - 35) D. H. Bilderback, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 1977 (1989).
 - 36) M. Kuroda, *SPRING-8 Engineering note, FE-007-93* (1994) (internal report in Japanese).
 - 37) T. Tanaka, H. Kitamura, *Nucl. Instrum. & Methods* **A364**, 368 (1995).
 - 38) H. Kitamura, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2007 (1995).
 - 39) M. Oura, H. Kitamura, D. Shu and T. M. Kuzay, *SPRING-8 Annual Report 1994* (SPRING-8, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken, Japan) p. 170.
 - 40) T. Uruga, H. Yamaoka, E. Arakawa, X. M. Tong, M. Matsuoka and K. Yamashita, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1739**, 554 (1992).
 - 41) H. Yamaoka, T. Uruga, Y. Sakurai and M. Matsuoka, *RIKEN Review* **1**, 3 (1993).
 - 42) H. Yamaoka, T. Uruga, Y. Sakurai, E. Arakawa, M. Matsuoka, Y. Ogasaka and K. Yamashita, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1997**, 369 (1993).
 - 43) H. Yamaoka, T. Uruga, E. Arakawa, M. Matsuoka, Y. Ogasaka, K. Yamashita and N. Ohtomo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 6718 (1994).
 - 44) J. Susini, G. Marot, L. Zhang, R. Ravelet and P. Jagourel, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 489 (1992).
 - 45) J. Susini, R. Baker, M. Krumrey, W. Schwegle and Å. Kvik, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2048 (1995).
 - 46) J. Susini, *Opt. Eng.* **34**, 361 (1995).
 - 47) T. Uruga, K. Ohtomo, H. Yamaoka, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2251 (1995).
 - 48) P. Z. Takacs, S. -N. Qian and J. Colbert, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **749**, 59 (1987).
 - 49) S. Sato, Y. Higashi, S. Haya, M. Otsuka and H. Yamamoto, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 1490 (1992).
 - 50) J. Susini, R. Baker and A. Vivo, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2232 (1995).
 - 51) S. -N. Qian, W. Jark, P. Z. Takacs, K. J. Randall and W. Yun, *Opt. Eng.* **34**, 396 (1995).
 - 52) W. K. Lee, A. T. Macrander, D. M. Mills, C. S. Rogers, R. K. Smither, L. E. Berman, *Nucl. Instrum. & Methods* **A320**, 381 (1992).
 - 53) W. K. Lee and D. M. Mills, *Nucl. Instrum. & Methods* **A347**, 618 (1994).
 - 54) T. Uruga, H. Kimura, Y. Kohmura, M. Kuroda, H. Nagasawa, K. Ohtomo, H. Yamaoka, T. Ishikawa, T. Ueki, S. Hashimoto, Y. Kashiwara, K. Okui, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2254 (1995).
 - 55) W. K. Lee, P. B. Fernandez, T. Graber and L. Assoufid, to be published in *Rev. Sci. Instrum.*
 - 56) G. Marot, M. Rossat, A. Freund, S. Joksch, H. Kawata, L. Zhang, E. Ziegler, L. Berman, D. Chapman, J. B. Hastings and M. Iarocci, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 477 (1992).
 - 57) M. Krumrey, Å. Kvik and W. Schwegle, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 1715 (1995).
 - 58) *ESRF Beamline Handbook 1994* (ESRF, Grenoble, France).
 - 59) T. Mochizuki, X. Zhang, H. Sugiyama, J. Zhao, M. Ando and Y. Yoda, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2167 (1995).
 - 60) G. S. Knapp, M. A. Beno, C. S. Rogers, C. L. Wiley, P. L. Cowan, *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 2792 (1994).
 - 61) C. S. Rogers, D. M. Mills, W. K. Lee, G. S. Knapp, J. Holmberg, A. Freund, M. Wulff, M. Rossat, M. Hanfland and H. Yamaoka, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 3494 (1995).
 - 62) C. S. Rogers, D. M. Mills, P. B. Fernandez, G. S. Knapp, M. Wulff, M. Hanfland, M. Rossat, A. Freund, G. Marot, J. Holmberg and H. Yamaoka, *Rev. Sci. Instrum.* **66** (1995), to be published.
 - 63) M. Wulff, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1739**, 576 (1992).
 - 64) C. S. Rogers, D. M. Mills, L. Assoufid and T. Graber, *Rev. Sci. Instrum.* **66** (1995), to be published.
 - 65) S. Sato, S. Yazu, K. Tsuji, A. Hara, N. Urakawa, A. Yoshida, *Sumitomodenki* **129**, 99 (1986) (in Japanese).
 - 66) H. Yamaoka, K. Ohtomo, D. Hirata, T. Ishikawa, *SR Science and Technology Information* **5**, 6 (1995) (in Japanese).
 - 67) J. Als-Nielsen, A. K. Freund, M. Wulff, M.

- Hanfland and D. Häusermann, Nucl. Instrum. & Methods **B94**, 348 (1994).
- 68) H. Yamaoka, A. K. Freund, J. Holmberg, M. Rossat, M. Wulff, M. Hanfland, W-K. Lee, and D. M. Mills, Nucl. Instrum. & Methods. **A364**, 581 (1995).
- 69) H. Yamaoka, K. Ohtomo and T. Ishikawa, Rev. Sci. Instrum. **66**, 2116 (1995).
- 70) M. Yamamoto, T. Fujisawa, M. Nakasako, T. Tanaka, T. Uruga, H. Kimura, H. Yamaoka, Y. Inoue, H. Iwasaki, T. Ishikawa, H. Kitamura and T. Ueki, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1833 (1995).
- 71) H. Yamaoka, A. K. Freund, K. Ohtomo, M. Krumrey, Rev. Sci. Instrum. & Methods **66**, 2092 (1995).
- 72) H. Kawata, M. Sato, T. Iwazumi, M. Ando, N. Sakai, M. Ito, Y. Tanaka, N. Shiotani, F. Itoh, H. Sakurai, Y. Sakurai, Y. Watanabe, S. Nanao, Rev. Sci. Instrum. **62**, 2109 (1991).
- 73) W. Jark, S. Mourikis, S. Joksche and V. Saile, Nucl. Instrum. & Methods **A291**, 319 (1990).
- 74) T. Iwazumi, M. Sato and H. Kawata, Rev. Sci. Instrum. **63**, 419 (1992).
- 75) Y. Sakurai, H. Yamaoka, H. Kimura, X. M. Marechal, K. Ohtomo, T. Mochizuki, Y. Kashiwara, T. Harami, Y. Tanaka, H. Kawata, N. Shiotani and N. Sakai, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1774 (1995).
- 76) X. M. Marechal, T. Tanaka and H. Kitamura, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1937 (1995).
- 77) H. Kitamura, Synchrotron Radiation Calculation Program for PC, *Spectra*.
- 78) ANSYS, Swanson Analysis system Inc., Houston, PA, USA.
- 79) Y. Furukawa, Ray tracing program RTW.

一口メモ

山 椒

古名は“はじかみ”と呼ばれていたみかん科の落葉樹として、雌雄異株です。北海道南部以南日本国中広く自生しています。4月になりますと若葉と共に黄色の花が咲き、枝や葉のつけ根に2本の対となっているトゲが付いています。食用となる葉はアゲハ、カラスアゲハ、モンキアゲハなどのアゲハチョウ科の幼虫が好んで食べます。秋に赤熟する実はキジバト、ヒヨドリなどの鳥類の好物です。また、固い材部はつえやすりこぎに利用されています。

種子から簡単に発芽しますので、庭に1本植えてみてはいかがでしょうか。

(K. Ohshima)

