

次世代ガンマ線源のための帯域可変ガンマ線分光器の開発

DEVELOPMENT OF A VARIABLE-BANDWIDTH MONOCHROMATOR FOR NEXT-GENERATION GAMMA SOURCES

羽島良一^{#, A)}, 早川岳人^{A)}, 静間俊行^{A)}, 沢村勝^{A)}, 永井良治^{A)}, 宮本修治^{B)}, 松葉俊哉^{C)}
Ryoichi Hajima^{#, A)}, Takehito Hayakawa^{A)}, Toshiyuki Shizuma^{A)}, Masaru Sawamura^{A)}, Ryoji Nagai^{A)},
Shuji Miyamoto^{B)}, Shunya Matsuba^{C)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} University of Hyogo

^{C)} Hiroshima University

Abstract

We have proposed a variable-bandwidth monochromator for the next-generation laser Compton scattering gamma-ray sources. The monochromator consists of comb-like crystals forced to vibrate by piezo actuators. The vibrating fins of the comb-like crystals are expected to enlarge the angular acceptance of the monochromator by the mechanism similar to mosaic crystals, which have a larger acceptance than perfect crystals. In this paper, we present the design of a comb-like crystal, fabrication of an aluminum mockup and results of vibration measurements.

1. はじめに

シンクロトロン放射光で発生される X 線は多くのユーザに利用され、先端科学および現代の産業に欠かせない存在となっている。“世代”で表される光源加速器の進化、すなわち高輝度化が半世紀以上にわたる放射光科学の発展を支えてきたことは加速器学会の発表でも繰り返し紹介されている。これと同時に、分光器、集光ミラーに代表される X 線光学素子も同様に進化を続けていることも見逃してはならない。X 線放射光科学の隆盛は、光源と光学素子の進化を両輪として成り立っているといえよう。

ガンマ線 (1 MeV 以上の光子) については、どうであろう。第一世代の加速器ガンマ線源は、制動放射による装置であり、原子核研究や非破壊測定などに利用されてきた。レーザーの発明に伴いレーザー・コンプトン散乱 (LCS) ガンマ線の発生が可能となり、制動放射では得られない準単色、偏極といった特徴を備えたガンマ線が新たなガンマ線研究を切りひらいた[1]。その後、加速器の低エミッタンス化、レーザーの高出力化などによって、さらに輝度を向上した次世代 LCS ガンマ線源が実現しつつある。ルーマニアに建設中の ELI-NP[2, 3]がその代表である。ところが、ガンマ線光学素子に目を向けると、レンズへの応用を目指して特異なガンマ線屈折現象の検証が行われた例[4]などがあるが、際立った進展がないのが現状である。

われわれは、次世代 LCS ガンマ線源の能力を十分に引き出すためには、ガンマ線光学素子のさらなる進化が必要であるとの認識に立ち、新規のガンマ線光学素子として帯域可変ガンマ線分光器の開発に着手した。

2. これまでのガンマ線分光器

結晶による光の回折 (Bragg 回折、Laue 回折) を使った結晶分光器 (モノクロメータ) は、ガンマ線でも利用できる。歴史を振り返れば、原子炉における中性子ガンマ線との組み合わせにて多数のガンマ線分光器が作られ利用されてきた。1950 年代に米国アルゴンヌ国立研究所の研究炉 Chicago Pile-5 に湾曲結晶を使ったガンマ線分光器が据え付けられ中性子捕獲ガンマ線の分光実験に利用された[5]のを皮切りに、1970 年代からは、フランスのラウエ・ランジュバン研究所 (ILL) の研究炉にて GAMS と呼ばれる一連のガンマ線分光器の建設と利用が始まった[6]。ところが、1980 年代にエネルギー分解能に優れた HPGe (High-purity Germanium) 検出器が実用化すると、ガンマ線結晶分光器の開発と利用は縮小し、現在は、ILL が高分解能に特化した分光器の開発を続けるのみとなっている。ILL の GAMS-4 は、1.1 MeV で 4.5 eV (Si 220 面) の分解能を持ち、物理定数 (アボガドロ数など) の精密測定などに用いられてきた[7]。最近になってさらに分解能と誤差を改善した GAMS-5 に置き換えられている[8]。

3. LCS ガンマ線とガンマ線分光器

LCS ガンマ線で発生するガンマ線は、エネルギーと散乱角度に相関があるため、コリメータを使って単色化できることが特徴である。しかしながら、コリメータによる単色化には限界がある。これは、電子ビームと衝突用レーザーがそれぞれ持つエネルギー広がり、衝突点における電子ビームの角度広がり (有限のエミッタンス) とレーザーの角度広がり (波長で決まる回折) があるためである [1]。現在稼働中の LCS ガンマ線源では、コリメータによる単色化は 3-5% 程度であり、次世代ガンマ線源の ELI-NP でも 0.5% 程度である。

LCS ガンマ線と原子核共鳴蛍光散乱 (NRF) を利用し

[#] hajima.ryoichi@qst.go.jp

た原子核物理実験や核種の非破壊検知・測定[9]では、ゲルマニウム検出器を使って NRF 信号の取得を行う。この時、測定したい NRF の共鳴幅 (1 eV 程度) に含まれない入射ガンマ線は全てバックグラウンドとなる。計数率に制限のある HPGe 検出器では、バックグラウンドの低減が測定の統計精度を上げるための鍵となる。次世代ガンマ線源においてガンマ線フラックスが向上しても、実験位置でのガンマ線エネルギー幅が大きければ、バックグラウンドによって検出器がパイルアップを起こしてしまい、せいかくの高フラックスを生かすことができない。

このようなパイルアップを防ぐ方法の一つが、多数の検出器をアレイ(または、クラスター)として利用することである。ELI-NP では、ELIAD (ELI-NP Array of Detectors) と呼ぶ 8 台の HPGe クローバー検出器、4 台の $\text{LbBr}_3(\text{Ce})$ 検出器からなるシステムを準備している[3]。このような検出器は非常に高価である。

もう一つの方法として、ガンマ線分光器を使って試料に入射するガンマ線を狭帯域化しておくことが考えられる。ビームラインに分光器を配置するのは、シンクロトロン放射光 (X 線) では常識であるが、LCS ガンマ線で分光器が使われた例はない。それは何故だろうか？

結晶の Bragg 回折(または Laue 回折)を利用した分光器は有限のアクセプタンス(角度、エネルギー)を持つ。完全結晶では、結晶内における光の多重散乱を考慮した動学的散乱理論からエネルギーアクセプタンス、角度アクセプタンスが求められる。この時、結晶の材料と回折面を固定すると角度アクセプタンスは光子エネルギーに反比例して小さくなることを示される。すなわち、1 MeV のガンマ線に対する角度アクセプタンスは、10 keV の X 線に比べて百分の一の値となる[10]。

一方で、光源自身の発散角度はシンクロトロン放射、LCS とともに $1/\gamma$ のオーダー (γ は電子のローレンツ因子) であり、シンクロトロン放射で 10 keV の X 線を発生する電子エネルギー (~3 GeV)、LCS で 1 MeV のガンマ線を発生する電子エネルギー (~300 MeV) では、LCS の発散角度が 10 倍大きい。

このように、X 線領域で有用な結晶分光器であるが、結晶の角度アクセプタンス、光源の発散角度といった物理的条件のために、ガンマ線領域では小さなスループットしか得られないことが、これまで LCS ガンマ線で分光器が使われなかった理由である。

次世代 LCS ガンマ線源として建設中の ELI-NP において、GAMS の導入が検討されたことがあるが、角度アクセプタンスのミスマッチのため、導入が見送られた経緯がある。

4. モザイク結晶によるガンマ線回折

今後、LCS ガンマ線源の高輝度化が進めば、フラックスとエネルギー帯域を自在に制御できる分光器の存在は、きわめて有意義となるであろう。われわれは、LCS ガンマ線に適した光学素子として、まず、モザイク結晶に注目した。

モザイク結晶は、格子欠陥による部分的な格子の変形などにより、結晶がわずかに方位の異なる微小な領域の集合となっている結晶である。

X 線において、積分反射強度(角度アクセプタンス)を

大きくする目的でモザイク結晶を用いるのは良く知られた方法である。代表的なモザイク結晶は、パイログラファイト(熱分解グラファイト)、LiF 結晶などであり、その積分反射強度をさらに大きくするために、結晶表面をエメリー粉などで磨いて、理想的なモザイク結晶に近づける場合もある[11]。透過力の強いガンマ線は、Laue 配置で分光器を構成するため、表面の二次元的なモザイク性だけでなく、深さ方向のモザイク性も分光特性を決める要因となる。

シリコンの場合、チョクラルスキー法で育成された単結晶を大気中でアニールし、結晶中に酸素を取り込むことでモザイク結晶を作成できることが知られている[12]。われわれは、この方法で作成したモザイク結晶を用いて Co-60 ガンマ線の回折実験を行い、モザイク結晶の厚さを増すことで積分反射強度が大きくなるとの結果を得た[13]。80 mm 厚のシリコン・モザイク結晶では、1.17 MeV および 1.33 MeV のガンマ線に対する (440) 面の角度アクセプタンス(積分反射強度)が $1 \mu\text{rad}$ を超えることを確認した。これは、2 mm 厚の Si 完全結晶 (50 nrad) に比べて 20 倍の大きな値である。

5. 櫛歯型結晶の提案と予備実験

モザイク結晶がガンマ線分光器における角度アクセプタンスの拡大に有効であることは確認できたが、結晶のモザイク度は結晶中の不純物濃度で決まるので、これを精密に制御することは難しい。また、角度アクセプタンスを変えるには、厚さの異なるモザイク結晶を用意しておく必要がある。

ガンマ線分光器の角度アクセプタンスを任意に、かつ、再現性良く可変できる光学素子として、われわれは、櫛歯型結晶の着想を得た。櫛歯型結晶は、完全結晶を櫛歯状に加工した上で、ピエゾ素子により櫛歯に振動を与えるものである。振動によって、それぞれの櫛歯がわずかに異なる角度となるため、モザイク結晶と同等の効果が得られると期待できる。ピエゾ素子が与える振動の大きさを制御することで「モザイク度」、すなわち、角度アク

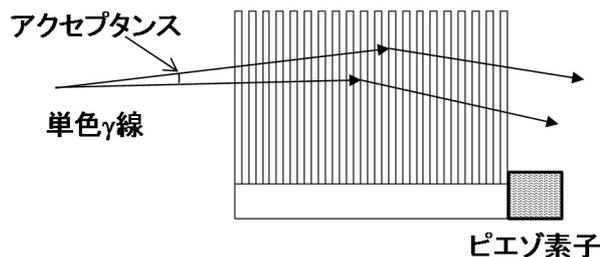


Figure 1: Proposal of a comb-like crystal for a variable-bandwidth gamma-ray monochromator.

セプタンスを可変できると考えた。結晶に超音波振動を与えて回折を制御する研究は、X 線の時分割測定を目的とした事例があるが、これは Bragg 配置であった[14]。

まず、櫛歯結晶に必要な仕様を見積もるため、簡単な計算を試みる。櫛歯の一枚を取り出し、一端を固定した片持ち梁で近似する。シリコンの物性値として、密度を 2.33 g/cm^3 、ヤング率を 190 GPa とし、櫛歯(梁)の形状

を、厚さ=2 mm、長さ=20 mm、幅=20 mmとした時、1次の固有振動数は 7.29 kHz と求められる。実験を予定している 1.7 MeV ガンマ線（兵庫県立大学 NewSUBARU）に対する、シリコン完全結晶（440 面）の角度アクセプタンスは約 50 nrad であるから、櫛歯の振動によってアクセプタンスを 10 倍に広げるには、櫛歯の傾きを 500 nrad とする必要がある。この時の櫛歯先端の振幅は 13 nm、振動速度の最大値は 600 $\mu\text{m/s}$ と計算できる。このような振動であれば、一般的なピエゾ素子で対応できる。

シリコン製結晶の作成にさきだって、アルミニウム製モックアップによる櫛歯構造の振動特性の解析を行うこととした。1.7 MeV ガンマ線を効率よく回折する条件として、Si 完全結晶（440 面）、厚さ 2 mm を選び、2 mm の歯を 10 枚重ねた櫛歯結晶を設計し、同じサイズのアルミニウム製櫛歯ブロックを製作した。振動源のピエゾ素子はベースの上面に取り付ける。Figure 2 に櫛歯結晶とホルダーの CAD 図を、Fig.3 に製作した櫛歯ブロックの写真を示す。櫛歯の切り欠きは、レーザードップラー振動計を使って個々の歯の振動を独立して測定できるようにするためである。切り欠きを片側のみとしたブロック、両側を対称に切り欠いたブロックの二通りを製作した。なお、櫛

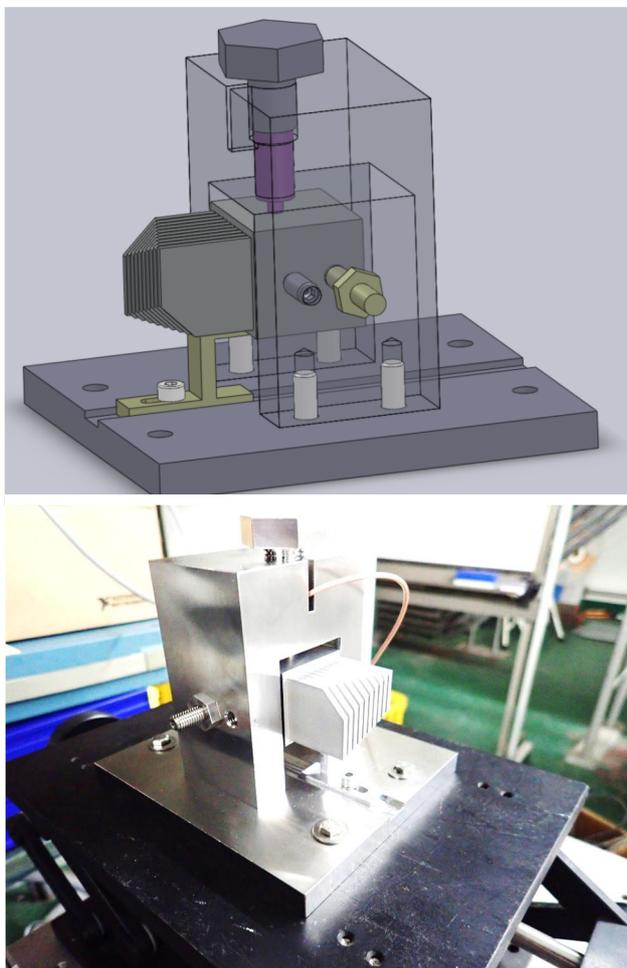


Figure 3: Aluminum model of a comb-like crystal for vibration measurements.

歯の加工はワイヤーカッターによるものである。

Figure 4 に、有限要素解析（INVENTOR 2017, NASTRAN-IN-CAD 2017）によるシリコン製の櫛歯結晶（片側切り欠きのブロック）の振動解析として、振動源の位置を変えた時の周波数応答を計算した結果を示す。縦軸は、全ての櫛歯のうちの最大変位の値である。周波数の低い方から順番に、1 次～10 次の固有振動（固有モード）が存在すること、振動源の位置によって励起されやすいモード、されにくいモードがあることがわかる。

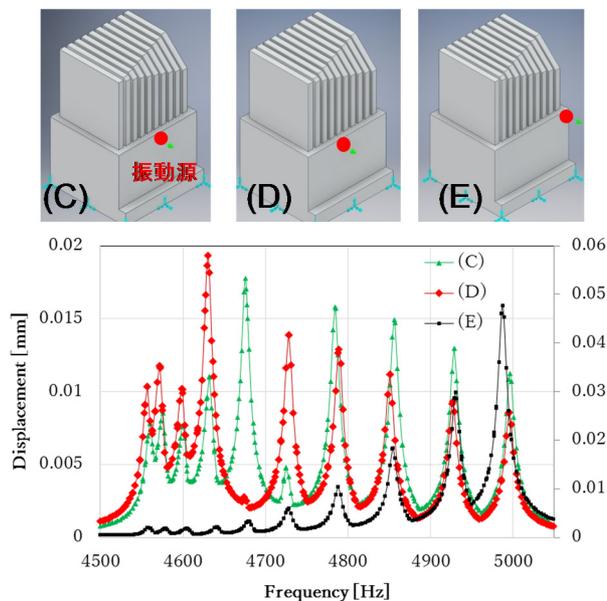


Figure 4: Frequency response of a comb-like Si crystal obtained by FEM analysis.

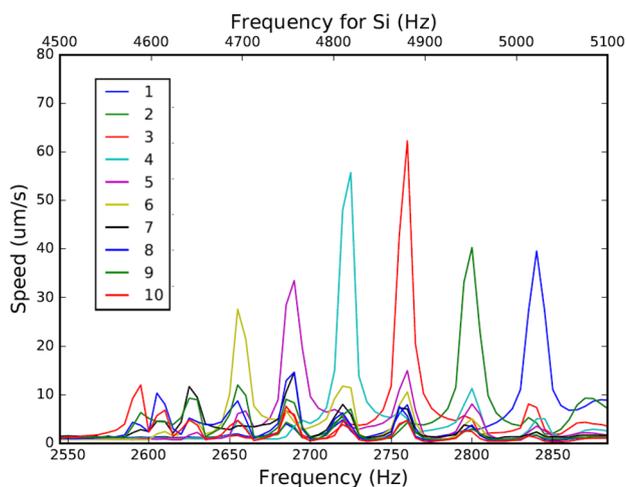


Figure 5: Frequency response of each fin in the aluminum comb-like block obtained by laser doppler measurement.

Figure 5 は、アルミニウム製の櫛歯ブロック（片側切り欠きのブロック）について、レーザードップラー振動計（電子

技研工業、V100-S type D)を使って測定した周波数応答の結果である。10 枚の歯、それぞれの応答を重ねてプロットしており、シリコンの物性値に置き換えた時の周波数の値も図の上端に示している。切り欠きの大小によって、それぞれの歯が異なる固有振動周波数を持っていること、それぞれの固有モードでは特定の歯が強く振動することで残りの歯も振動することが読みとれる。固有振動周波数は、シリコンとアルミニウムの物性値の違いを考慮すれば有限要素解析の結果とほぼ一致している。

次に、それぞれの歯の振動の位相に注目する。複数の歯が同一の振幅と位相で振動すると、角度アクセプタンスの拡大に寄与しないからである。Figure 6 に、両側を切り欠いた歯ブロックの 6 次の固有モードにおける位相と振幅の測定結果を、Fig. 7 に、同じく計算結果を示す。10 枚の歯は、同位相、逆位相に振動する組に分けられ、振幅はそれぞれ異なることがわかる。ここで示した 6 次のモードでは、振動の位相は計算結果と一致しているが、他のモードでは実験と計算が一致しない場合も見られた。また、Fig. 6 にて、振幅の対称性がくずれている点も計算と一致していない。これら実験と計算の不一致は、歯の製作誤差、ピエゾ駆動位置が中央からわずかにずれていることなどによると考える。

これら実験結果からは、心配されたような、角度アクセプタンスの拡大に寄与しない振動(複数の歯が同位相、同振幅で振動)が起こり難いことを確認できた。

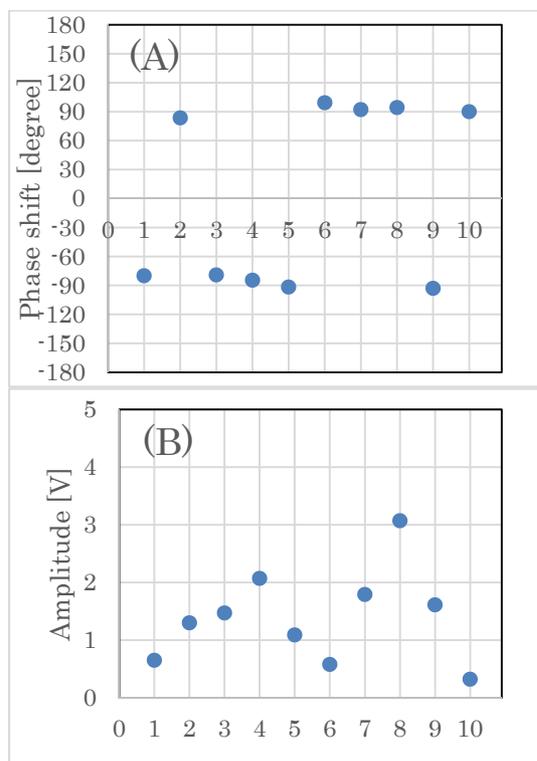


Figure 6: Vibration phase (A) and speed (B) of each fin in the aluminum comb-like block oscillated at 2785.1 kHz (the 6th eigenmode) obtained by laser doppler measurement. The horizontal axis is the fin number.

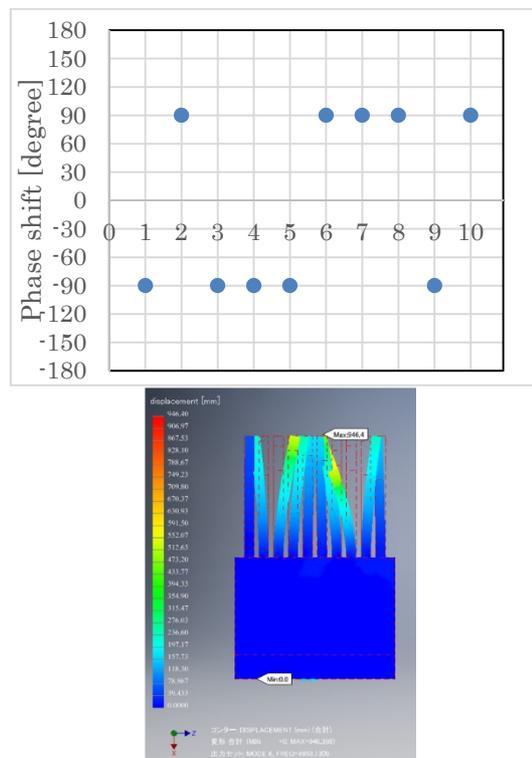


Figure 7: Vibration phase and displacement of each fin in the aluminum comb-like block oscillated at the 6th eigenmode calculated by FEM analysis.

6. 今後の計画

有限要素解析、および、アルミニウム製歯ブロックの振動測定の結果は、われわれが企図した歯結晶の特性を裏付けるものであり、回折素子における角度アクセプタンス拡大と帯域可変性の実現を見通すことができた。今後、シリコン製の歯結晶の製作と振動測定を行い、LCS ガンマ線を使った分光実験に進む計画である。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究(B) (課題番号: 17H02818) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] G. A. Krafft and G. Priebe, Rev. Acc. Sci. and Tech., **3**, 147-163 (2010); <https://doi.org/10.1142/S1793626810000440>
- [2] O. Adriani *et al.*, "Technical Design Report EuroGammaS proposal for the ELI-NP Gamma beam System", arXiv:1407.3669 (2014); <https://arxiv.org/abs/1407.3669>
- [3] N. V. Zamfir, EPJ Web of Conferences **178**, 01002 (2018); <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611710001>
- [4] T. Kawasaki *et al.*, Phys. Lett. A **381**, 3129-3133 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.07.030>
- [5] D. Rose, H. Ostrander and B. Hamermesh, Rev. Sci. Instrum. **28**, 233-244 (1957); <https://doi.org/10.1063/1.1715849>

- [6] H.R. Koch *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. **175**, 401-423 (1980);
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90755-7](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)90755-7)
- [7] E.G. Kessler Jr *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. **457**, 187-202 (2001);
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00753-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00753-1)
- [8] M.M. Günther *et al.*, Phys. Rev. A **95**, 053864 (2017);
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.053864>
- [9] R. Hajima *et al.*, J. Nucl. Sci. and Tech. **45**, 441-451 (2008);
<https://doi.org/10.1080/18811248.2008.9711453>
- [10] J. Als-Nielsen and D. McMorrow, “Elements of Modern X-ray Physics, 2nd edition”, Wiley (2011).
- [11] 菊田惺志, 「X線散乱と放射光科学(応用編)」;
<http://webpark1275.sakura.ne.jp/ProfKikuta/index.html>
- [12] J.R. Schneider *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B **29**, 661-674 (1988);
[https://doi.org/10.1016/0168-583X\(88\)90474-0](https://doi.org/10.1016/0168-583X(88)90474-0)
- [13] S. Matsuba *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 112402 (2016);
<https://doi.org/10.7567/JJAP.55.112402>
- [14] K.-D. Liss *et al.*, Proc. SPIE Vol. **3451**, 117-127 (1998);
<https://doi.org/10.1117/12.331833>