

光の強度を測る II—シリコンフォトダイオード—

加藤昌弘 独立行政法人 産業技術総合研究所
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2
E-mail: masahiro-katou@aist.go.jp

齋藤則生 独立行政法人 産業技術総合研究所
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2
E-mail: norio.saito@aist.go.jp

1. はじめに

放射光利用実験で、光の強さ（光子数、光パワーなど）を測るという場合、入射光の強度を測る場合と、研究対象と励起光の反応の結果生じた光の強度を測る場合に分けられるでしょう。今回は検出器シリーズの第2回としてシリコンフォトダイオードを取り上げますが、入射光の強度測定を行う場合を想定しています。また10数 eV~10 keV 程度の真空紫外光および軟 X 線を対象とします。

入射光強度を測定するのはなぜでしょうか？それは普遍性のある結果を示すために必要だからではないでしょうか。入射光強度依存性のある信号を用いてなんらかの物理量を測定する場合、私たちはいくつかの測定量と同時に入射光強度を測定し、普遍性のある物理量を得ようとしています。したがって、もし入射光強度の測定がうまくいっていないと、導き出したい最終的な物理量が不正確だということになりかねません。

放射光利用実験で入射光強度を測定する場合は、あまり多くの時間を費やすわけにはいかないので測定が容易なもの、また施設外から持ち込むことが想定されるので、持ち運びに便利なものが良いでしょう。さらに一般的に検出器は、エネルギー特性や個体差を持ちますので、光の強さに対する感度が安定しているものが適しています。シリコンフォトダイオードは、これまで多くの研究例があり、また安定で、一度校正しておけば、検出される電流値から、容易に入射光強度の絶対値を導くことができます。さらに小型であるために持ち運びにも便利ですので、入射光強度測定に用いる検出器として、適していると言えるでしょう。

これに対して、真空紫外~軟 X 線の領域では、金属メッシュからの電流値やミラーのドレインカレント（後置鏡に光が当たったときに発生する光電子を電流として検出します）が使われることもありますが、一般的に光子数と検出電流値の換算係数はエネルギー依存性や強度依存性が大きいので、シリコンフォトダイオードに比べると測定が困難です。Fig. 1 に例を示します¹⁾。これはある放射光施設

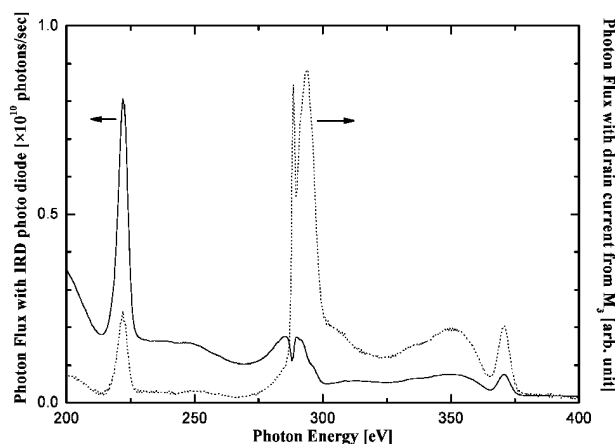


Fig. 1 フォトダイオード（実線）とミラーのドレインカレント（点線）による入射光強度測定の比較¹⁾。

のビームラインで測定された入射光の強度です。実線で示したものは、感度のわかっているシリコンフォトダイオードで測定した光子数、点線はミラーからのドレインカレントです。ミラーのドレインカレントと光子数のエネルギー依存性は大きく異なります。ミラーの反射率などが原因で、換算係数に大きなエネルギー依存性があるためでしょう。この場合、換算係数のエネルギー依存性について、何らかの方法で情報を得ない限り、ドレインカレントから入射光強度の絶対値、あるいは異なるエネルギー間で比較できる相対値を導くことはできません。

今回は、「入射光の強度を正確に測る」という立場から、シリコンフォトダイオードを利用した入射光強度測定について考えてみたいと思います。まず2章では、一般的に強度測定に用いられているシリコンフォトダイオードの特徴について実際の製品を例に挙げて説明します。3章ではシリコンフォトダイオードの感度を決定する方法を説明します。そして4章では、放射光利用実験で、シリコンフォトダイオードを利用して入射光強度を測る場合の注意点について考察を行います。

2. シリコンフォトダイオードの特徴

実際に真空紫外から軟 X 線領域の放射光の入射光強度測定に用いられている International Radiation Detectors, Inc. (IRD 社) のシリコンフォトダイオードを中心に、シリコンフォトダイオードの特徴を説明します。利用情報に URL をのせましたので、そちらも参考にしてください。また他の主要メーカーとして浜松ホトニクス㈱と OSI Optoelectronics も利用情報に紹介しています。浜松ホトニクスは、数多くの種類のフォトダイオードを扱っています。同社の p-i-n 構造 (2.1 節参照) のフォトダイオードは、よりエネルギーの高い X 線領域でよく採用されています。

IRD 社では 3 つのシリーズのフォトダイオードが扱われており、それぞれ次のような特徴があります。

- AXUV：真空紫外から X 線領域までをカバーするタイプです。0.0124 nm から 1100 nm (1.12 eV-100 keV) で使えます。シリコンの有感層の厚さが、10 μm から 55 μm のものが標準的です。
- SXUV：金属シリケイドを窓材に用いています。放射線損傷に強い検出器です。
- UVG：SiO₂ 窓の厚さが 70-150 nm で、140 nm から 1100 nm (1.12-8.9 eV) の真空紫外光の検出に適しています。

シリコンフォトダイオードは、光を電流として検出しますが、AXUV シリーズと UVG シリーズは、理論値に近い量子効率 (検出される電子の数と入射光子数の比) を持つことも特徴です。フォトダイオードの例として AXUV-100 の写真を Fig. 2 に示します。検出部の有効面積は 10 mm \times 10 mm で、100 mm² です。シリコンフォトダイオードによる入射強度の測定の特徴を、ミラーのドレインカレントや、メッシュからの電流値で入射光強度を測定する場合と比較すると次のようなことが言えます。

1) 検出器が入射光をほとんど吸収してしまう。

シリコンフォトダイオードの厚さと光のエネルギーに依りますが、一般に真空紫外～軟 X 線領域の光をほとんど吸収します。そのため、放射光のサンプルへの照射と入射

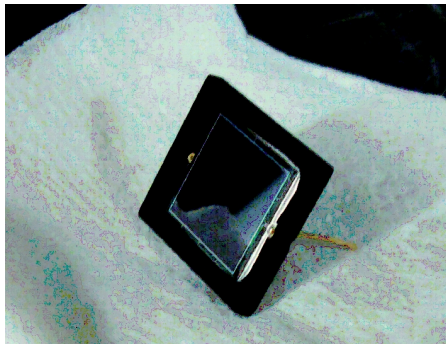


Fig. 2 シリコンフォトダイオード AXUV シリーズ (AXUV-100)。受光面の有感面積は 10 mm \times 10 mm。

光強度の測定を同時に行うことが困難です。

2) 標準器として使われている。

IRD 社製のシリコンフォトダイオードは、より上位の標準器に対して校正されることで、標準器として使われています。これは、一度校正してしまうとかなりの期間、安定に使うことができるということを意味します。さらに、標準研究所間の比較における仲介検出器としても使われており、輸送に強く信頼性の高い検出器であるといえます。

2.1 動作原理

フォトダイオードは、p-n 接合型と p-i-n 構造のものが最もよく使われています。AXUV, SXUV, UVG などは p-n 接合型のフォトダイオードですが、p 型半導体と n 型半導体が隣接し、その境界部に電子も正孔もほとんど存在しない空乏層が存在する構造を持ちます。p-i-n 構造のフォトダイオードでは、p 型半導体と n 型半導体の間に不純物濃度が低い真性半導体層 (i 層) が挟まれています。

Fig. 3 のようにシリコンフォトダイオードのカソード (n) とアノード (p) を結線した状態で、空乏層あるいはその近傍に 1.12 eV 以上の光が照射されると、電流が発生します。この現象は以下のようにして理解されています²⁾。模式図を Fig. 4 に示します。半導体の禁制帯幅 (シリコンの場合 1.12 eV) より大きなエネルギーをもつ光子が吸収されると、電子-正孔対が生成されます。これらが内部電場により、電子は p 層の方へ、正孔は n 層の方へ広がっていきます。その結果、電流が発生します。フォトダイオードの中の、光の吸収に伴って電流が発生する領域を有感層、光が吸収されても電流発生に寄与しない半導体の領域を不感層といいます。

光のパワーを P_{rad} (W)、検出電流値を I_{PD} (A) とすると、 P_{rad} は次の式で導かれます。

$$P_{\text{rad}} = \frac{I_{\text{PD}}}{r} \quad (1)$$

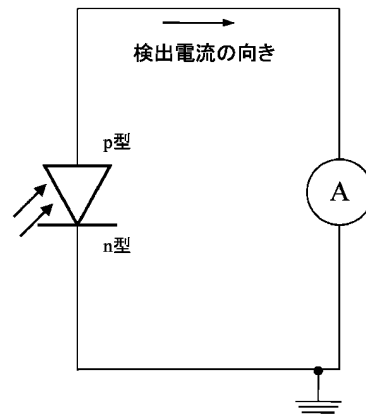


Fig. 3 ゼロバイアスモードによるフォトダイオードの電流測定。フォトダイオードにおける p 型半導体と n 型半導体の位置の関係、および検出電流の向きを図中に示す。

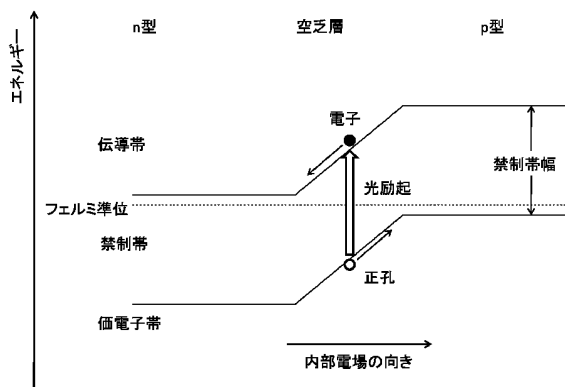


Fig. 4 pn 接合型シリコンフォトダイオードに光が吸収されて電流が流れる様子の模式図。

この式における $r(A/W)$ を受光感度あるいは単に感度 (responsivity) と呼びます。式と感度の単位から明らかですが、光のパワー [W] に対してどれだけの電流 [A] が流れるかを表します。理論的にはシリコンの W 値 (W_{si})、つまり一つの電子-正孔対を作るのに要する平均のエネルギーから求められます。(1)式で $P_{rad}(W)$ は、入射光子エネルギーが $E_p(eV)$ 、入射光子数が $n(s^{-1})$ の場合、 $1 eV = e \times 1 V$ より、次の(2)式で表わされます。ここで e は素電荷 ($1.602 \times 10^{-19} C$) です。

$$P_{rad} = nE_p e \quad (2)$$

単色化されていてもエネルギー幅を持つので、厳密には積分の形になりますが、ここでは単純化して書きました。また(1)式で検出電流値 $I_{PD}(A)$ は、検出器に入射した光のパワーが全て電子-正孔対を作るために使われたとすると、

$$I_{PD} = n(E_p/W_{si})e \quad (3)$$

と表すことができます。よって感度は(1)、(2)、(3)式より、 $r = 1/W_{si}$ となります。シリコンの W 値は通常は3.65 eV が使われているようです。ICRU レポートでは $3.68 \pm 0.02 eV^3$ 、最近の Scholze らの報告では $3.66 \pm 0.03 eV$ です⁴⁾。 $W_{si} = 3.66 \pm 0.03 eV$ を用いると、 $r = 0.273 \pm 0.02 A/W$ であると導かれます。

実際のシリコンフォトダイオードの感度は、光が有感層に達するまでに検出器の窓や不感層で吸収されることが原因で、 W 値から導かれる感度よりも小さくなります。光の吸収はエネルギーに依存しますし、窓や半導体の厚さは、型式が同じだとしてもフォトダイオードごとに一つ一つ異なります。そのため感度にはエネルギー依存性や個体差が出てきますので、光強度の絶対値を求める場合は、用いるフォトダイオードの感度を何らかの方法で知る必要があるでしょう。

シリコンフォトダイオードの感度には、光のエネルギー

の他にも、環境温度・光の強度・放射線損傷・方向依存性・検出器の均一性などのさまざまな要素が影響を与えます。要素によっては大きく寄与するものもあれば、あまり感度に寄与しないものもあります。上に挙げた IRD 社製のフォトダイオードを用いる場合、これらの要素の中で放射光実験をする際に一番気をつけるべきなのはエネルギー依存性です。エネルギー依存性は、既に感度が分かっているシリコンフォトダイオードとの比較、あるいは絶対測定をできる検出器との比較により求めます。感度を決定する方法は3章で説明します。

2.2 シリコンフォトダイオードの電流の測定方法

前節に書いたように、p-n 接合型のフォトダイオードは内部電場によって電流が発生するので、逆バイアス電圧を印加することなく電流を測定することができます。この使い方はゼロバイアスモード、太陽電池モードなどと呼ばれています (Fig. 3 参照)。フォトダイオードから発生する電流は、フォトダイオード内部の電子-正孔対生成の他に、フォトダイオード表面から放出される電子によっても電流が発生します。そのため、電子-正孔対生成と放出電子の両方の電流を測定するには、シリコンフォトダイオードから得られる正の電流を測定するように注意してください。

検出器の種類や測定の条件によっては、逆バイアス電圧を印加する測定法が有効です。逆バイアス電圧を加えると、空乏層が広がり応答速度が上がるという利点があります。一方で逆バイアス電圧を加えない場合は、ノイズが小さいという点で有利です。p-i-n 構造のフォトダイオードでは、i層が存在するので十分厚い空乏層を得るためには逆バイアス電圧を印加して測定を行うことが必要です。

2.3 シリコンフォトダイオードの感度に影響を与える要素

この節では、シリコンフォトダイオードの感度に影響を与える要素のうち、光のエネルギー以外のものについて説明します。エネルギー依存性も含めてここで取り上げる要素は、シリコンフォトダイオードに限らず、金属メッシュ等の検出器を使う場合においても、一通り押さえておくべき項目です。それぞれの要素についてどの程度まじめに調査する必要があるかは、それぞれの要素が測定結果に与える影響の大きさと入射光強度測定をどの程度の不確かさで測定する必要があるかに依存します。

・温度依存性

一般的に半導体は、温度が高くなるほど禁制帯幅が小さくなることが知られています。したがって、感度を測定した温度と異なる環境温度で測定をする場合は注意が必要です。ORTEC のカタログには、室温で W 値は3.62 eV、80 K で3.72 eV という値が紹介されています⁵⁾。また IRD 社の資料では254 nm (4.88 eV) における感度に0.03%/K の依存性があると報告されています。さらに Kjornat-

tanawanich らの報告によれば、AXUV については波長により 0.013–0.053%/K、SXUV については、0.020–0.084%/K の依存性があります⁶⁾。シリコンフォトダイオード (SXUV, AXUV, UVX) は –200°C から 70°C で使用可能ですが、270 K 違うと数%から20数%の違いになります。放射光施設で入射光強度の測定をする場合、多くの場合は室温での測定だと思いますので、感度は室温で求めれば問題ないと思いますが、特殊な温度条件で測定を行う場合は温度依存性に注意する必要があります。

• 強度依存性

Korde らの研究によると、通常のフォトダイオードでは 500 μA 以上の光電流が流れる場合、感度が低下しますが、IRD 社製の UVG–20 であれば 3 mA であっても感度の低下は 0.02% に過ぎません⁷⁾。Korde らの論文には、強度が強くなってしまった場合に感度が光電流値に対してどのような挙動を示すかについて議論されているので、興味のある方は参考にしてください。あまりにも強度特性が気になる検出器であれば、光電流値の変化が小さい条件で測定するのが良いでしょう。

500 μA という電流値は、感度を 0.273 A/W とすると、10 keV でおよそ 1×10^{12} photons/s、100 eV で 1×10^{14} photons/s に対応します。真空紫外～軟 X 線領域の放射光の入射光強度の測定で 500 μA に達することはあまり無いかもしれませんが、高エネルギー・大強度の光を扱う場合は注意するべきでしょう。

• 放射線損傷

紫外線・真空紫外線による Si 結晶の放射線損傷によって感度が低下することが知られています。AXUV シリーズは、従来のものよりも放射線損傷に強く、SiO₂ 吸収線量が 1–10 MGy まで耐えられます。SXUV はさらに放射線損傷に強いシリーズです。IRD 社の資料では、AXUV、SXUV 両シリーズのフォトダイオードに 100 eV の光を 10^{16} – 10^{18} photons/cm² 照射した場合の結果が報告されています。結果として、AXUV シリーズには感度低下が認められますが、SXUV シリーズには変化が見られていません。大強度の光を測定する場合や長期間使う場合は、放射線損傷の影響に留意して測定する必要があります。また場合によっては、購入時に放射線損傷に強いタイプのものを検討する必要もあるでしょう。

• 方向依存性

シリコンフォトダイオードの感度を低下させる要因の中には、入射窓による入射光の吸収と表面再結合によるものがありますが、光軸に対してフォトダイオードの受光面が傾いていると、これらの要因に影響を与えます。Si および SiO₂ の吸収が大きく感度に影響を与えるエネルギーにおいては、あまりにフォトダイオードが傾いていると問題になります。Saito らによる研究例⁸⁾があるので参考にされると良いでしょう。

• 受光面における感度の均一性

シリコンフォトダイオードの受光面は一定の大きさを持っていますが、縁のほうは中央部分よりも感度が小さいことがあります。放射光施設で入射光強度を測定する場合、測定する対象の光の大きさは大きくても数 mm 径でしょうから、なるべく中央部分を使って測定するのが良いでしょう。フォトダイオードの中央がどこか決めるには、例えば光軸に対して上下左右にフォトダイオードを動かし、電流値を測定して決定する方法があります。

AXUV・UVG シリーズでは、SiO₂ の吸収が大きいエネルギーでは均一性が悪くなります。これは SiO₂ 窓の厚さにばらつきがあるためだと考えられています。

• 高次光、散乱線の影響

シリコンフォトダイオードは、可視光にも感度がありますので可視光が入らないようにしなければなりません。また、高次光や散乱線にも感度はあります。4 章で示すように、AXUV は SXUV に比べて、感度のエネルギー依存性が小さいので、高次光や散乱線を特に強調することが少ないといえます。

• 偏光の影響

シリコンフォトダイオードは、直入射で測定する限り偏光の影響はないと考えられます。ミラーのドレインカレントの場合には、偏光の影響を受けるので注意が必要です。

3. 感度を決定する方法

シリコンフォトダイオードで強度測定を行う場合、強度測定に用いるフォトダイオードの感度を精度良く決定することが重要です。感度を決定するのに最も手取り早い方法は、校正機関に感度測定を依頼することです。PTB (ドイツ物理工学研究所)、NIST (アメリカ国立標準研究所)、NMIJ (産業技術総合研究所 計量標準総合センター) などの標準研究所では、シリコンフォトダイオードの感度測定に関する研究が行われており実際に校正値を供給しています。例えば NMIJ では、軟 X 線領域 (90–3900 eV) について、相対拡張不確かさが 0.7% 程度¹⁾、シリコンフォトダイオードの感度を測定することができます。

この章では、シリコンフォトダイオードの感度がどのようにして決定されるのかを説明します。代表的な手法として、極低温放射計を使う方法と多段電極型電離箱を使う方法を紹介します。極低温放射計は L–1 Standards and Technology, Inc. から、レーザ用として販売されています。利用情報で紹介しましたので御覧ください。

¹⁾ 包含係数 $k=2$ を用いて、信頼水準約 95% で評価した値です。拡張不確かさは、信頼水準に応じて決定される包含係数 k を、標準不確かさに乗ずることで求めることができます。標準不確かさは、標準偏差で表した測定の不確かさです。

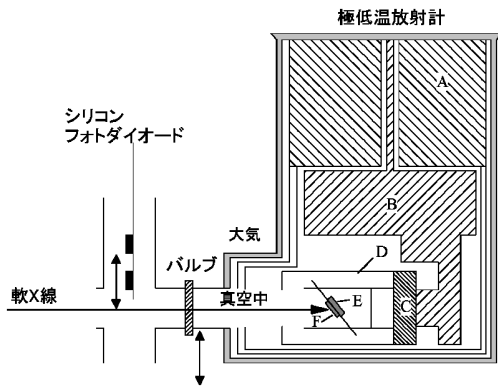


Fig. 5 極低温放射計とシリコンフォトダイオード。A: 液体窒素, B: 液体ヘリウム, C: リファレンスブロック, D: キャビティ, E: ヒーター, F: 温度センサー。

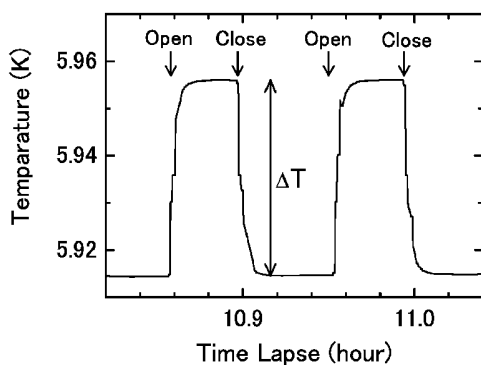


Fig. 6 放射計のキャビティの温度変化。Open・Closeはゲートバルブの開閉を示す¹¹⁾。

3.1 極低温放射計を用いたシリコンフォトダイオードの感度測定⁹⁻¹¹⁾

測定を行うエネルギーに応じたビームラインに、絶対測定を行える検出器である極低温放射計と感度を測定したいシリコンフォトダイオードをセットアップします。模式図を Fig. 5 に示します。極低温放射計で光強度の絶対測定を精度良く行うためには、ある程度の光強度が必要です。シリコンフォトダイオードからの電流は、微小電流計で測定します。

極低温放射計は液体ヘリウムで冷却します。吸収体であるキャビティは、銅できており、対象とする軟 X 線領域 (90~3900 eV) では X 線をほぼ完全に吸収することができます。単色化された放射光は、ゲートバルブを開くと 8 mm 径のキャビティ内に導入されます。一例として 3 keV の単色光 (エネルギー分解能およそ 1.5 eV) を測定した時のキャビティの温度変化を、Fig. 6 に示します。キャビティのバックグラウンドの温度は約 5.915 K で、一回の測定時間 (10分程度) 内での変動は 0.05 mK 以下です。バルブを開けてからおよそ 1 分でキャビティの温度が 41.56 mK 上昇し、数分で安定します。光がキャビティに当たっている状態での温度の変動は 0.1 mK 以下です。放

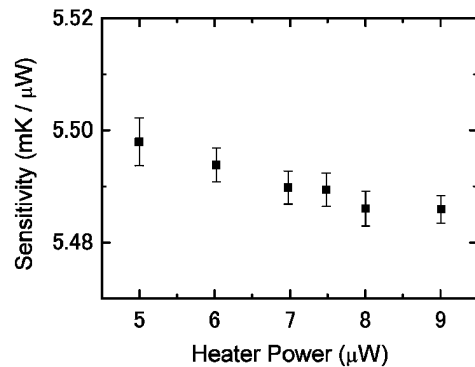


Fig. 7 放射計の感度の例¹¹⁾

射光が吸収体に吸収されたときの温度上昇 ΔT から絶対強度を導くためには、放射計の感度 s が必要です。放射光の強度 P_{rad} (W) は、次の式により得ることができます。

$$P_{\text{rad}} = \frac{\Delta T}{s} \quad (4)$$

感度 s は、放射光が吸収体に当たらない条件でヒーターを用いることで求めます。ヒーターのパワーを P_h (W)、そのときの温度上昇を ΔT_h とすると、感度 s は次の通りです。

$$s = \frac{\Delta T_h}{P_h} \quad (5)$$

s の測定例を Fig. 7 に示します。放射光の感度には小さな強度依存性がありますが、入射光強度が数 μW の条件では、およそ 5.5 mK/ μW で測定の標準不確かさはおよそ 0.1 % です。Fig. 6 の例では $s = 5.490 \text{ mK}/\mu\text{W}$ です。式より放射光強度 P_{rad} は 7.57 μW であると求めることができます。(4)式から分かるように、放射計を用いた放射強度測定の不確かさは、温度上昇をいかに精度良く測定するかに依存します。つまりある程度の強度が無いと精度よく測定できません。

フォトダイオードの感度 r は、 P_{rad} と (1)式から導くことができます。3.0 keV の感度測定についての結果と不確かさを Table 1 にまとめます。

3.2 多段電極型電離箱を用いた方法^{12,13)}

多段電極型電離箱は複数の電極を持ちますが、ダブルイオンチェンバーの測定手法¹⁴⁾を利用するため、複数の電極の中に同じ長さの電極の組が一組以上含まれます。充填ガスは希ガスあるいは乾燥空気を用います。例として、軟 X 線用の多段電極型電離箱の模式図を Fig. 8 に示します。放射光は 450 nm 厚ポリイミドフィルターを通して電離箱に入射されます。6 つの電極のうち最上流と最下流の電極

Table 1 3.0 keV における、極低温放射計を用いたシリコンフォトダイオードの感度測定

| | 記号 | 値 | 相対標準不確かさ (%) |
|------------------|------------|--------------------------|--------------|
| 放射計の感度 | s | 5.490 mK/ μ W | 0.1 |
| シリコンフォトダイオードの電流値 | I_{PD} | 2.046×10^{-6} A | 0.1 |
| 放射光の温度上昇 | ΔT | 41.56 mK | 0.15 |
| シリコンフォトダイオードの感度 | r | 0.2706 A/W | 0.2 |

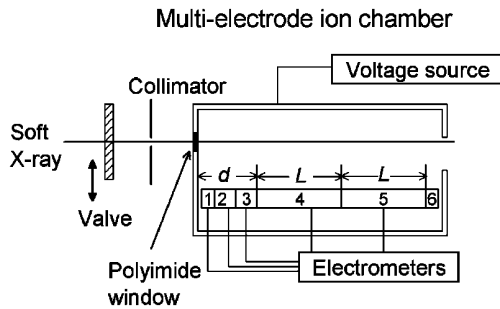


Fig. 8 軟 X 線用多段電極型電離箱¹¹⁾

(Fig. 8 の 1 と 6) は、収集領域を規定するための保護電極として使います。電離箱内で生成された電荷は、2 番目から 5 番目の電極で検出します。通常、4 番目と 5 番目の電極で検出した電流値を使って光強度を求めます。4 番目と 5 番目の電極はそれぞれ 50.1 cm で同じ長さです。4 番目と 5 番目の電極からの電流値をそれぞれ i_4 , i_5 とすると、次の式から光強度を求めることができます。

$$I_0 = \frac{i_4^2}{\gamma e (i_4 - i_5)} \quad (6)$$

γ は光イオン化量子収率あるいは生成されたイオンの平均の電荷数を表します。真空紫外領域では 1 光子吸収で 1 個のイオンを生成しますが¹⁴⁾、軟 X 線領域においてはそうはならないので、 γ 値をエネルギーの関数として知る必要があります。(6)式が意味しているところは、光吸収断面積を用いなくても、ガスの密度が分からなくても、光強度の絶対値を求めることができるということです。多段電極型電離箱で絶対測定を行うときは、各電極からの電流値の印加電圧依存性、ガス圧依存性を測定し、測定に適した条件を決定することが重要です。

絶対値の測定の不確かさへの寄与は、電流値の測定の不確かさと γ の不確かさが主になります。電離箱による測定の不確かさは、放射計の場合と異なり光の強度にはあまり依存しません。よって光の強度が小さい場合は、放射計よりも小さい不確かさで測定できることがあります。

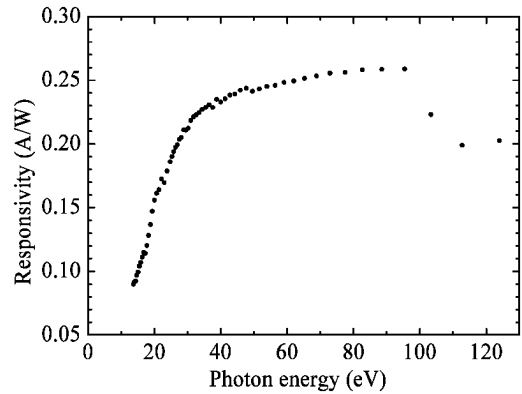


Fig. 9 真空紫外領域におけるフォトダイオードの感度の例¹⁵⁾。型式は UV-100 である。

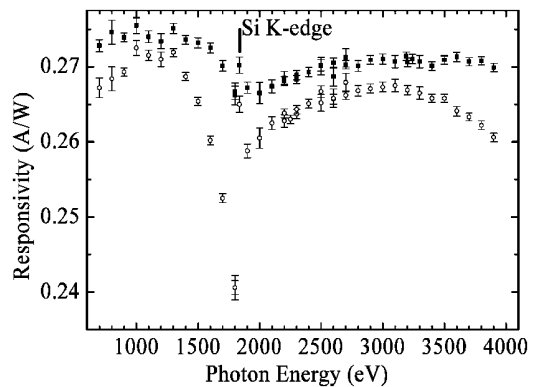


Fig. 10 軟 X 線領域におけるフォトダイオードの感度の例。■が AXUV¹¹⁾、○が SXUV である。エラーバーは感度測定の不確かさ ($k=2$) を示す。縦線で Si の K-edge¹⁶⁾ を示す。

4. シリコンフォトダイオードを用いて放射光強度を測定する際の注意点

シリコンフォトダイオードを用いて放射光強度測定を行う際に必ず問題になるエネルギー特性と、全体的な注意点について述べます。

4.1 エネルギー特性に関する注意点

Fig. 9 に、シリコンフォトダイオード XUV-100 の真空紫外領域におけるエネルギー特性を示します¹⁵⁾。XUV-100 は UDT 社製のもの（現在は OSI Optoelectronics から入手可能）で、AXUV とほぼ同等のものです。99.8 eV の Si の L 吸収端¹⁶⁾ はあまり目立ちません。100–120 eV で感度が落ちていますが、この領域は個体差が現れやすいところで、このダイオードは長く使っていたために劣化が進んでおり、感度に影響が現れています。

Fig. 10 に、放射計を用いて測定したフォトダイオードの軟 X 線領域における感度を示します。赤が SXUV、黒が AXUV¹¹⁾ の感度です。0.2% の不確かさで感度の測定ができますが、不確かさをエラーバーで示しています。両者の

感度曲線の違いは、AXUVは内部量子効率がほぼ100%であるのに対し、SXUVは多少ロスがあること、さらに窓の材質がSXUVは金属シリケイド、AXUVはSiO₂であるということに起因しています。

1800 eV-1900 eVを中心にSiのK吸収端による影響がはっきりと見られます。Si K吸収端以上のエネルギーでは、光を吸収したSiが蛍光を放出する過程の寄与が大きくなるため、感度が落ちます。感度が大きく変化しているエネルギー領域では光強度は正しく測定できないことがありますので注意が必要です。さらに図では分かりにくいかもしれませんが、4000 eV付近になると感度が落ちてきます。これは光のエネルギーが高くなるにつれて透過力が高くなるのに対し、フォトダイオードの有感層の厚さが限られているためです。X線の場合は、全ての光を吸収できないため、エネルギーが高くなるほど感度が落ちてしまいます。AXUVシリーズには、425 μmの有感層を持ち10 keVまでのX線を全て吸収するタイプもありますが、ノイズが大きくなります。そのため、厚さが分かっているフォトダイオードに対して補正を施すほうが現実的には扱いやすいといわれています。

4.2 放射光利用実験でシリコンフォトダイオードを用いる際の注意点

シリコンフォトダイオードを入射光強度測定に用いる場合、フォトダイオードには個体差があるため、用いる検出器のエネルギー特性・温度特性・強度依存性・放射線損傷の感度への影響・方向依存性・受光面における感度の均一性を知る必要があります。知る方法としては

- (a) カタログや文献で、同じ型式の検出器の一般的な特徴を把握する。
- (b) 実際に自分で測定やシミュレーションを行う。
- (c) 校正機関に校正を依頼する。

などが考えられます。どの方法を選ぶかは、それぞれの要素が測定に与える影響の大きさと、要求される測定の不確かさ次第です。シリコンの吸収の大きなエネルギー領域(感度が大きく変化しているエネルギー領域)を除き20%程度で測定できればいいのであれば、保証はありませんが、カタログ値・文献値だけでも大丈夫でしょう。2-3%の不確かさが要求されるのであれば、最低でも感度のエネルギー依存性は、校正機関、あるいは自前で測定すべきでしょう。

次に、シリコンフォトダイオードで、真空紫外～軟X線領域の光を測定する場合は、光がほとんどフォトダイオードに吸収されてしまいます。つまり、フォトダイオードで入射光を測定すると、その測定中は、本来の実験のために放射光が使えません。現実的には、実際のサンプルを使った実験中の入射光の強さを知りたいことがほとんどだと思いますので、何らかの方法で対処する必要があります。いくつか考えられる解決案としては

- (a) 金属メッシュ等の光を吸収してしまわない検出器を、シリコンフォトダイオードで校正し、実際の実験中は光を吸収してしまわない検出器を使う。
 - (b) 本測定の前後にシリコンフォトダイオードを使って強度を測定し、実験中の入射光強度を推定する。
- などがあります。ビームラインの特性や、測定時間によって使い分けると良いと思います。光を吸収してしまわない検出器を校正して入射光強度測定に用いる際には、シリコンフォトダイオードで測定する際の注意点多くがそのまま使えます。つまり、感度に影響を与える要因を洗い出し、どの程度不確かさに影響を与えるかを見積もり、要求される測定の不確かさに応じて依存性を調べるのが重要です。

5. 終わりに

安定して強度を測定できる検出器として、シリコンフォトダイオードの特徴について説明をしました。また、放射光利用実験で入射光強度を測定する際の注意点を考察しました。安定性・信頼性・使いやすさの面から、シリコンフォトダイオードは入射光強度測定をするにあたり非常に有用です。感度に関わる要素について理解を深めることで、それぞれの実験の条件に適した入射光強度測定ができるでしょう。基準・標準となる素性の良く知れた検出器の一つ持っていることは、放射光利用実験を行う上で有益です。いくつかの検出器による測定結果間の比較が容易になります。シリコンフォトダイオードは、素性の知れた基準・標準となるべき検出器に最も適している検出器のひとつではないでしょうか。

謝辞

本解説を書くにあたってデータを提供していただいた、足立純一氏(高エネ機構)、齋藤輝文氏(産総研)に感謝いたします。

利用情報

1. シリコンフォトダイオード
International Radiation Detectors (IRD)
<http://www.ird-inc.com/index.html>
日本の代理店：例えば
ラドデバイス株式会社
<http://www.rad-dvc.co.jp/index.html>
浜松ホトニクス
<http://jp.hamamatsu.com/>
OSI Optoelectronics
<http://www.osioptoelectronics.com/>
2. 極低温放射計
L-1 Standards and Technology, Inc.
<http://www.l-1.biz/>

3. シリコンフォトダイオードの校正
産業技術総合研究所計量標準総合センター
<http://www.nmij.jp/>

参考文献

- 1) J. Adachi: Private communication.
- 2) J. H. Moore et al.: Building Scientific Apparatus (Addison-Wesley, Reading, MA, 1989).
- 3) ICRU, Average Energy Required to Produce an Ion Pair. ICRU Report 31, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD (1979).
- 4) F. Scholze et al.: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **439**, 208-215 (2000).
- 5) ORTEC, <http://www.ortec-online.com/>.
- 6) B. Kjornattanawanich et al.: IEEE Transactions on Electron Devices **53**, 218-223 (2006).
- 7) R. Korde et al.: Metrologia **40**, S145-S149 (2003).
- 8) T. Saito and H. Onuki, Metrologia **37**, 493-496 (2000).
- 9) Y. Morishita et al.: J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147**, 1071-1073 (2005).
- 10) M. Kato et al.: AIP Conference Proceeding 879 Synchrotron Radiation Instrumentation: Ninth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation. 1129-1132, Daegu, Korea, 28 May-2 June 2006.
- 11) M. Kato et al.: Rad. Phys. Chem., submitted.
- 12) T. Saito and H. Onuki: Metrologia **32**, 525-529 (1995).
- 13) N. Saito and I. H. Suzuki: J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **101-103**, 33-37 (1999).
- 14) J. A. R. Samson: Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy (Wiley Interscience, New York, 1967).
- 15) T. Saito: Private communication.
- 16) B. L. Henke: Atomic Data and Nuclear Data Tables **54**, 181-342 (1993).