

分光応答度計測技術

齋 藤 輝 文

Spectral Responsivity Measurement

Terubumi SAITO

Measurement/calibration techniques and necessary considerations for photodetector spectral responsivity are reviewed. Among several factors affecting its measurement uncertainties, the author introduces his recent studies at NMIJ/AIST on the important effects of beam divergence and photoemission current contribution for the UV-VUV measurement by semiconductor photodiodes.

Key words: spectral responsivity, quantum efficiency, photodiode, calibration, divergence, photoemission

1. 検出器感度の定義

光検出器のいわゆる感度を表す定義には、次の2種類がある。1つは光検出器へ入射する放射の単位パワー当たりの光検出器の出力（半導体フォトダイオード、光電管等の多くの光検出器は、その光電流が光入力に比例するので、通常、電流の単位が用いられる）として定義される分光応答度（分光感度ともいう） R である。もう1つは、光検出器へ入射する1個の光子当たりの光検出器の出力電荷(対)の数で定義される分光量子効率 η (無次元)である。 R の単位が[A/W]であるとき、入射光の波長を λ [nm]とすると両者の関係は以下のようになる。

$$R = \frac{e\lambda\eta}{hc} \approx \frac{\lambda\eta}{1240} \quad (1)$$

ここで、 e は電子の素電荷、 h はプランク定数、 c は光速である。

先の定義では、分母を入射する光の量（パワーまたは光子数）としたが、これを検出器が吸収する光パワーもしくは光子数とする定義のほうが便利な場合があり（2種類の定義の違いの要因は、光検出器表面での反射ならびに不感層における吸収）、この場合は分光応答度あるいは分光量子効率の前に「内部」という修飾語を付ける。これに対し前者の（入射する光の量を分母にする）定義との区別を明確にするために、前者の用語の前に「外部」あるいは「み

かけの」という修飾語をつけることが多い。

熱型の検出器は、放射が熱エネルギーに変換されることを利用しているので、内部分光応答度が波長によらず一定となる。

一方、シリコン・フォトダイオードのようないわゆる量子型の光検出器では、入射した光が有感層をつき抜けることなく、かつキャリヤーの収集効率が完全であれば、半導体のバンド・ギャップから少なくともその2倍の光子エネルギー範囲においては、吸収された光子が一对の電子-正孔を生成するので、内部分光量子効率は波長によらず1となる（この場合、内部分光応答度は、式（1）から明らかなように、波長に比例して大きくなる）。上記条件は、市販のいくつかのシリコン・フォトダイオードでかなりよく満たされており、実際 self-calibration 法¹⁾とよばれる手法により絶対検出器を手軽に実現する方法として重用されている。

2. 検出器標準の実現方法

検出器標準の実現方法は大別して、(1) 一次標準検出器による方法、(2) 一次標準放射源と透過率既知の分光素子を用いる方法、(3) 他の波長域からの熱型検出器等による拡張、に分類される。

当該波長域で一次標準検出器が存在する場合には、(1) の方法が最も直接的である。例えば産業技術総合研究所

(以下、産総研と略す)では、10~90 nm 波長域の分光応答度標準は、希ガス電離箱^{2,3)}を、250~1150 nm 波長域の中のいくつかのレーザー波長点では、極低温放射計を一次標準検出器としている(極低温放射計の導入以前は、上述の自己校正法によるシリコン・フォトダイオードを分光応答度標準の一次標準検出器としていた)。

特に極低温放射計は不確かさが最も小さいもののひとつで、原理的にも使用波長範囲に制約がない上、市販品として入手できるようになったために、近年数多くの国立標準研究機関で紫外・可視・赤外の波長域で一次標準検出器として採用されている⁴⁾。極低温放射計は、熱型検出器の一種で、吸収部で入射放射がもたらすのと同じ温度上昇を内蔵のヒーターに加える電力で置換することによって、入射放射のパワーを知る電力置換型絶対放射計の極低温バージョンである。一般に物質の比熱は温度を下げるにより大きく低下するので、同じ放射パワーによる受光部の温度上昇を大きくすることができ、信号対雑音比を改善するとともに応答を早くすることが可能となる。さらに吸収部の熱伝導性も極低温にすることによって著しく大きくなることができる、光加熱とヒーター加熱の等価性を室温の場合に比べて飛躍的に向上させることができた。入射放射パワーの決定にともなう不確かさ要因には、(a) 入射光の吸収率(反射率)評価、(b) 光電子放出、蛍光による損失、(c) 光加熱とヒーター加熱の非等価性等がある。紫外・真空紫外域では、(a)に加えてパワー・レベルが小さい等の問題があり、真空紫外域で極低温放射計を開発・使用しているのは、現在のところ PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)⁵⁾と NIST (National Institute of Standards and Technology)⁶⁾のみである。

(2) の方法については、分光素子が干渉フィルターあるいは分光器のいずれの場合にも、分光透過率が偏光状態に強く依存するので、その不確かさを小さくすることは容易ではない上、その評価のために大掛かりな機構を必要とするために、一般にはあまり用いられていない。

(3) の方法は、紫外、赤外域等でよく用いられ、感度に波長依存性がない熱型検出器を用いて、一次標準検出器が存在する波長域から拡張するものである。しかし、サーモパイアル、焦電型検出器等の熱型検出器は感度が低いために、レーザー以外の放射源では一般に信号対雑音比が悪く、測定精度を高めるのは容易ではない。熱型検出器の感度の低さによる上記の困難さを克服する第1の手法は、前述のように熱型検出器として室温動作型に代え、液体ヘリウム温度で動作する極低温放射計(電力置換の機能を附加することにより一次標準検出器としても使用される)を用

いる方法である。第2の手法は、放射源そのものの強度を増すことである。分光パワーとして比較すると、分光したシンクロトロン放射より水素放電管等の輝線スペクトルのほうが強力であり、室温動作型の熱型検出器の使用が可能である。しかし輝線スペクトルでは使用できる波長が限定される欠点があるので、産総研では、他に例がない方法として、放射源にシンクロトロン放射より強力かつピーク波長可変のアンジュレーター放射を使用する方法⁷⁾を採用し、かつ一次標準として紫外・真空紫外域専用の極低温放射計を開発しつつ、90~250 nm 域の分光応答度標準の開発を進めている。

3. 検出器校正・使用時に配慮すべき事項

検出器校正時および使用時に配慮すべき事項には、以下のようなものがあり、これらを十分に検証しておくことが重要である。(1) 感度の安定性、(2) 感度の直線性⁸⁾、(3) 感度の均一性、(4) 感度の温度特性、(5) 測定光学系、検出器の偏光依存性^{9,10)}、(6) 検出器応答の入射ビーム発散角依存性¹¹⁾、(7) 入射ビームのスペクトル幅依存性。

ここで注意したいことのひとつは、上記項目のほとんどが入射光の波長の関数にもなっていることである。例えば(2)については単に入射光の強度のみならず波長にも依存し、シリコン・フォトダイオードでは約 900 nm 以上の波長域で波長が長くなるほど非直線性が増大することが報告されている¹²⁾。また、(3)については等分光応答度分布が、例えば波長 120 nm での測定分布が 110 nm での測定分布と大きく異なることなどが、産総研の測定でも明らかに認められている。

加えて実際の実験条件では、さまざまな制約から上記項目、さらには他の要因が複合して問題が生じることが多い。例えば、信号対雑音比を高めるために小さな受光面の検出器を用いる場合、分光器出射スリット下流に収束光学

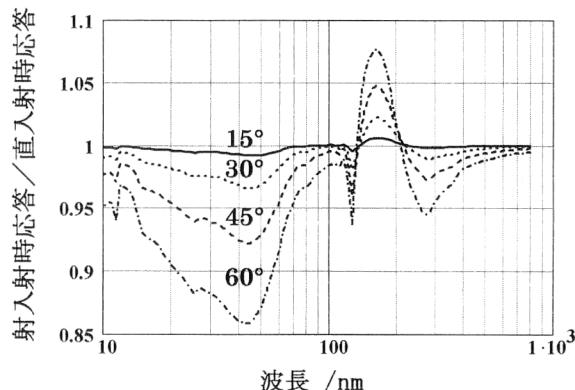


図 1 15°, 30°, 45° および 60° の半頂角をもつ等方的入射ビームに対する Si フォトダイオード(酸化膜厚 27 nm)の応答の平行ビームに対する応答の比(計算)。

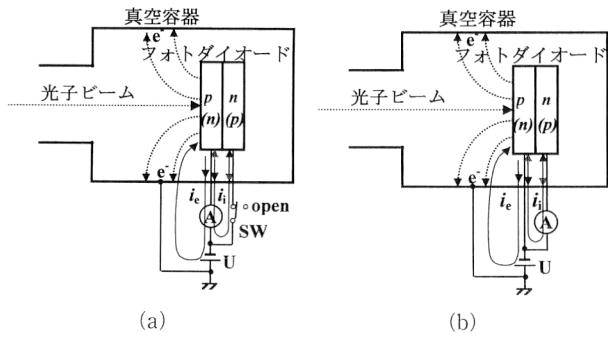


図2 電流測定の配置図。(a) 裏面電極接地配置, (b) 表面電極接地配置。A:微少電流計, U:外部光電子引出し用印加電圧, SW:スイッチ。 i_e :内部光電効果生成電流, i_e :光電子放出電流。

系を用いて検出器への入射ビーム径を小さくすることがよく行われる。この場合、光子ビームの発散角が大きくなることによる(6)の問題に加えて、もし回折格子の分散面が正しく回転軸に対して直交するように調整されていないと、波長走査とともに像点位置が移動して、再現性の不足、(3)にかかわる問題を引き起こし得る。

波長領域の中で特に紫外、真空紫外域では、あらゆる物質の吸収が強くなるので、上記(1), (3), (5), (6)の特性に問題が生じやすい。(6)については(5)とも関係するが、検出器に入射するビームがある発散角をもつと、入射光軸が検出器に垂直であっても、斜め入射成分が存在し、これによって検出器は異なる偏光成分に対する合成した応答を示すので、平行ビームを入射させた場合と一般には異なる応答を示す。産総研は、この影響を実験で裏付けられた理論モデルを用いて定量的に評価し、紫外・真空紫外域でその寄与が大きいことを明らかにした¹¹⁾。その一例を図1に示した。

さらに真空紫外域に限定された別の要因として、光電子放出電流の寄与が大きな不確かさ要因になり得る。Siフォトダイオードのような内部光電効果を利用する検出器では、これまで、この光電子放出電流に対しては、あまり注意が払われていなかったが、筆者らは電流測定期時の接地極性の違いによって、その寄与がかなり大きい(Siフォトダイオードの場合、波長120 nm近辺で約10%)ことを明らかにした^{13,14)}。図2(a)に示したように、フォトダイオードの表面側電極に電流計を接続(裏面側電極を接地)した場合、光電子放出電流が重畠した電流を計測するのに対し、その反対極性にした場合、電流計の計測する電流は光電子放出電流を含まない。光電子放出電流は表面状態、周囲の電界等の影響を受けて変化しやすいので、精密な計測では

図2(b)の配置にすることが重要である。

文 献

- 1) E. F. Zalewski and J. Geist: "Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1214-1216.
- 2) T. Saito and H. Onuki: "Detector calibration in the 10-60 nm spectral range at the Electrotechnical Laboratory," *J. Opt.*, **24** (1993) 23-30.
- 3) T. Saito and H. Onuki: "Detector calibration in the wavelength region 10 nm to 100 nm based on a windowless rare gas ionization chamber," *Metrologia*, **32** (1995/1996) 525-529.
- 4) For example: T. J. Quinn and J. Martin: "Cryogenic radiometry, prospects for further improvements in accuracy," *Metrologia*, **28** (1991) 1206-1213.
- 5) H. Rabus, V. Persch and G. Ulm: "Synchrotron-radiation-operated cryogenic electrical-substitution radiometer as the high-accuracy primary standard in the ultraviolet, vacuum-ultraviolet, and soft-x-ray spectral ranges," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 5421-5440.
- 6) P. Shaw, T. C. Larason, R. Gupta, S. W. Brown, R. E. Vest and K. R. Lykke: "The new ultraviolet spectral responsivity scale based on cryogenic radiometry at Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility III," *Rev. Sci. Instrum.*, **72** (2001) 2242-2247.
- 7) T. Saito, I. Saito, T. Yamada, T. Zama and H. Onuki: "UV detector calibration based on ESR using undulator radiation," *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.*, **80** (1996) 397-400.
- 8) 斎藤輝文、小貫英雄、西 師毅、長坂武彦：“電総研電子蓄積リングビーム電流測定装置とその校正”，電総研彙報，**49** (1985) 431-439.
- 9) T. Saito and H. Onuki: "Polarization characteristics of semiconductor photodiodes," *Metrologia*, **32** (1995/1996) 485-489.
- 10) T. Saito, L. R. Hughey, J. E. Proctor and T. R. O'Brian: "Polarization characteristics of silicon photodiodes and their dependence on oxide thickness," *Rev. Sci. Instrum.*, **67** special issue in CD-ROM (1996).
- 11) T. Saito and H. Onuki: "Difference in silicon photodiode response between collimated and divergent beams," *Metrologia*, **37** (2000) 493-496.
- 12) H. J. Jung: "Spectral nonlinearity characteristics of low noise silicon detectors and their application to accurate measurements of radiant flux ratios," *Metrologia*, **15** (1979) 173-181.
- 13) T. Saito: "Difference in the photocurrent of semiconductor photodiodes depending on the polarity of current measurement through a contribution from the photoemission current," *Metrologia*, **40** (2003) in press.
- 14) M. Richter, U. Kroth, A. Gottwald, C. Gerth, K. Tiedtke, T. Saito, I. Tassy and K. Vogler: "Metrology of pulsed radiation for 157-nm lithography," *J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 7167-7172.

(2002年9月26日受理)