光検出器分光応答度の国内比較 ——シリコンフォトダイオードによる——

専門会員 中川靖夫* 専門会員 大谷文雄* 正会員 谷治 環*
専門会員 齋藤一朗*² 須山恵司*³ 正会員 大久保和明*⁴
正会員 大野義弘*⁵

Domestic Intercomparison of Relative Spectral Responsivity of Silicon Photodiodes

Yasuo Nakagawa, Fumio Ohtani (Fellow Member), Tamaki Yaji (Member)

(Saitama University)

Ichiro Saitoh (Fellow Member) (Electrochemical Laboratory)

Keiji Suyama (Hamamatsu Photonics Co. Ltd)

Kazuki Ohkubo (Member) (Matsushita Electric Industrial Co. Ltd)

Yoshihiro Ohno (Member) (NIST)

ABSTRACT

An intercomparison of relative spectral responsivities of silicon photodiodes was carried out among four laboratories, ETL (Electrotechnical Laboratory), Saitama University, Hamamatsu Photonics Co., Ltd. and Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

The photodiodes were calibrated in the 250–800nm range using each laboratory's spectral responsivity standards. As a result, the relative spectral responsivities of the photodiodes calibrated by each laboratory agreed within 1.1% standard deviation in the 400–800nm, 2.2% in 315–400nm, 3.9% in 280–315nm and 4.1% in 250–280nm. Therefore, it is confirmed that the 4 laboratories have sufficient accuracy for calibration of the relative spectral responsivity of the detector in the ultraviolet and visible wavelength region.

1. まえがき

光放射パワーの標準には、古くから光源（電球）が用いられているが、電球はその特性上から短波長側の放射が微弱であり、紫外放射の標準としては性能が十分とはいえず難しかった。また、電球自体が経時変化の大きいものであるために標準としての維持・管理にも問題がある。更に、精密な標準電球の製造には特別な技術が必要とされるため、最近では供給が困難になってきている。

このような事情から、最近では放射の標準に光検出器を用いようとする研究が行われており、ある種のシリコンフォトダイオードの内部量子効率が、ある波長範囲で1であることを利用した、自己校正法による標準の確立が試みられている¹⁾。

光検出器を放射標準に用いる場合にも、光源と同様に、使用できる波長域でその波長特性、すなわち分光応答特性が光源の分光

分布と同程度の正確さで測定されなければならない。光源の分光分布の測定・評価法は以前から詳しく研究されていて、十分な精度が期待できる水準に達している。一方、光検出器の分光応答特性の測定は、これに比べて、研究が着手されてからの日が浅いことや光検出器の安定性などの問題から、光源の分光分布測定に匹敵するだけの精度がなかなか得られなかった。しかし、最近の半導体製造技術の進歩などから、現在では極めて安定性のよいシリコンフォトダイオード（SPD）が容易に得られるようになり、測定法の誤差の原因の究明などが行われて十分な精度が期待できるようになってきた。²⁾³⁾

このような経緯を踏まえて、照明学会紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会（委員長 中川靖夫（埼玉大））では、紫外域での放射標準としてシリコンフォトダイオードを利用することを検討し、その実現のために、まず相対分光応答度（波長250～800nm）の測定の国内比較を実施した。この比較は4機関の参加によって1992年6月から10月までに行われ、満足できる結果が得られたので、その詳細を報告する。

2. 参加機関、試料

今回の比較に参加した機関は下記の4箇所である。

* 埼玉大学工学部 〒338 浦和市下大久保255

²⁾ 電子技術総合研究所量子放射部 〒305 つくば市梅園1-1-4

³⁾ 浜松ホトニクス株式会社 〒434 浜北市平口5000

⁴⁾ 松下電器産業株式会社照明研究所 〒570 守口市八雲中町3-1-1

⁵⁾ National Institute of Standards & Technology
B306, BLDG. 220, Gaithersburg, MD 20899 U.S.A.

図1 試料 SPD の外形図

- 1) 電子技術総合研究所 (ETL)
- 2) 浜松ホトニクス㈱
- 3) 松下電器産業㈱照明研究所
- 4) 埼玉大学工学部

使用した試料はシリコンフォトダイオード S1337-1010BQ (浜松ホトニクス) で、3 個を 1 組として測定対象とした。この試料は受光面 10×10mm のセラミックを封じ、石英窓付きのもので、同形のものが自己校正法による絶対応答度測定にも使用されていて⁴⁾、安定性、信頼性が十分にあると考えられた。図 1 にこの試料の外形を示す。

3. 比較測定と評価の手順

比較測定は、国際比較等で行われている方式によった。その手順はつぎのとおりである。

- (1) 参加した 4 機関で、まず 3 個の試料を機関固有の標準器によって、分光応答度の相対値 $S(\lambda)$ を値づけする。
- (2) 4 機関内の 1 機関が幹事局 (Center Lab.) になって、他の 3 機関で測定した試料 (計 9 個) を幹事局の標準で測定して、幹事局標準による分光応答度の相対値 $S_0(\lambda)$ を値づけする。
- (3) 幹事局は測定した試料をそれぞれの機関に返送して、3 機関は返送された試料を機関固有の標準器で再測定して、幹事局測定の前後の相互差を検討する。この相互差が測定誤差の範囲とみなされれば、前後 2 回の値の平均値 $\bar{S}(\lambda)$ を求めて、 $S_0(\lambda)$ との比較値 $\bar{R}(\lambda)$ を求める。

$$\bar{R}(\lambda) = \bar{S}(\lambda) / S_0(\lambda) \quad (1)$$

$\bar{R}(\lambda)$ の値は 3 個の試料に対する平均値について計算する。

- (4) 全機関の $\bar{R}(\lambda)$ について、その総平均 (Grand mean GM) $\bar{R}(\lambda)$ を求める。この場合、幹事局の $\bar{R}(\lambda)$ は 1.00 である。(手順(2))

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i(\lambda), \quad m = 4 \quad (2)$$

- (5) 総平均 GM に対する各機関の値の偏差 $D(\lambda)$ を求める。

$$D(\lambda) = \bar{R}(\lambda) / \bar{R} \quad (3)$$

以上の手順について、作業(2)は電子技術総合研究所が担当し、作業(4)、(5)は埼玉大学が担当した。

4. 測定の方法

4.1 試料の設定と測定波長域

試料 (S1337-1010BQ) の受光面 (有効面積 10×10mm) 中央部約 6mm ϕ を測定対象面とした。これは、周辺部では応答度のむらが生ずる懸念があること、周辺にある電極部からも光が入って誤差となる可能性があるためである。

測定波長域は、250nm～800nm で、測定の波長間隔は 5 nm とした。

4.2 相対値の求め方

分光応答度 $S(\lambda)$ は、全波長に対する平均値応答度 $\bar{S}$ で規格化した値とした。これは、特定の波長の値に重みがかかることを避

表 1 SPD 国内比較の測定条件

参加機関	A	B	C	D
標準受光器	可視：自己校正 SPD 紫外：放射計 (4-10 ³ nm)	全域：熱電対 (放射計) 自己校正 SPD	全域：NIST (NBS) 校正 SPD	全域：PVDF 焦電形検出器 (金黒、窓なし)
モノクロメータ	プリズム・回折格子 ダブルモノクロメータ	ニコン P250 600本/mm, プレース 300nm	ニコン P250 1200本/mm, プレース 250nm	ニコン G250 1200本/mm, プレース 250nm
使用光源	250nm～279nm D ₂ ランプ 280nm～800nm ハロゲン電球	250～360nm Xe ランプ 360～800nm ハロゲン電球	全域：Xe ランプ (75W)	1 全域：Xe ランプ (150W) 2 可視 ハロゲン電球, UV Xe ランプ
チョッピング	なし	なし	なし	12.5 Hz

入射側

光源の像を入射スリット上に結像

出射側

f = 120 凹面鏡

図2 機関Aの入射・射出光学系⁹⁾

入射側

光源の像を入射スリット上に結像

出射側

ビームスプリッタ (WG 230 フィルタ)

図3 機関Bの入射・射出光学系

入射側

光源の像を入射スリット上に結像

出射側

視野レンズで分散像を石英砂ずり板上に結像

Ref. は使用しない

図4 機関Cの入射・射出光学系

入射側

光源の像を入射スリット上に結像

出射側

視野レンズ f = 80

図5 機関Dの入射・射出光学系

けるためである。なお、最終結果 (GM に対する偏差 $D(\lambda)$) は波長560nm の値 $D(560)$ を 1 として規格化した。

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{\lambda i} \Delta \lambda \tag{4}$$

4.3 測定装置

4 機関における測定装置の概要を表 1 に示す。また、入射および出射の光学系の配置を図 2 ～図 5 に示す。このように各機関はそれぞれ異なった装置、異なった光学系、異なった標準器で測定を行った。

5. 結果とその評価

以上の測定は1992年に行われ、3. で述べた手順(1)は 6 ～ 7 月、(2)は 8 月、(3)は10月に実施された、その結果は次のとおりである。

5.1 測定の精密さと安定性の評価

ある機関（例えば A 機関）で測定した試料の相対分光応答度 $\bar{S}_A(\lambda)$ と、幹事機関で同じ試料を相対分光応答度したときの相対分光応答度 $S_0(\lambda)$ の比 $\bar{R}_A(\lambda) = \bar{S}_A(\lambda) / S_0(\lambda)$ は、両機関の測定が十分安定に行われていれば、3 個の試料について測定誤差の範囲で等しい値になるはずである。換言すれば、各機関に配付された試料について、前記した $R(\lambda)$ のばらつきを見れば、測定の安定性を推定することができる。これを 3 機関について波長域ごとに求めてみた。波長域は CIE の区分を用いて、400～800nm (可視域)、315～400nm (UV-A)、280～315nm (UV-B)、250～280nm (UV-C) とした。各機関の第 1 回目（幹事局への送付前）の測定値による結果を表 2 に示す。この値は各機関の 3 個の試料の $R(\lambda)$ の標準偏差の波長域毎の平均（二乗和平均）である。この結果、1 機関の UV-C における値を例外として、すべての値が±0.5%以内に入っており、幹事機関および各機関はいずれも十分に精密な測定を行っていることが分った。

5.2 測定の再現性の評価

幹事機関の測定をはさんだ、3 機関での前後 2 回の測定値を比較すると、試料の経時的な変化を含めた、測定の再現性が評価できる。表 3 にその結果を示す。この表の値は 2 回の測定の標準偏差 σ で示した（測定値の幅 $d \approx 1.13\sigma$ である）。すべての測定値は±1%の範囲に入っており、これも十分に満足できる値である。なお、機関 D の測定は前後の測定をそれぞれ異なった光源で行っており、それに起因する系統誤差も含まれている。

5.3 相対分光応答度の比較結果

先に 3. (4)、(5)で定義を示した総平均 GM に対する、幹事機関値を含む全機関の比較値および GM の標準偏差 σ を図 6 および表 4 に示す。その結果は次のとおりである。

- a) 400～800nm (可視域)での偏差は非常に少なく、平均0.4%、最大1.1%である。
- b) 315～400nm (UV-A域)での偏差は、平均1.3%、最大2.2%である。
- c) 280～315nm (UV-B域)での偏差は、平均3.1%、最大3.9%である。
- d) 250～280nm (UV-C域)での偏差は、平均3.6%、最大4.1%である。

以上の結果から、短波長域になるに従って偏差が大きくなるこ

表 2 測定の安定性

機 関	安定性 (±%)			
	400～800nm	315～400nm	280～315nm	250～280nm
B	0.05	0.08	0.07	0.18
C	0.18	0.40	0.32	1.82
D	0.04	0.11	0.08	0.17

表 3 測定の再現性

機 関	再現性 (±%)			
	400～800nm	315～400nm	280～315nm	250～280nm
B	0.07	0.21	0.34	0.73
C	0.11	0.24	0.31	0.34
D	0.38	0.50	0.18	0.46

表 4 相対分光応答度の比較結果

λ (nm)	機関 A	機関 B	機関 C	機関 D	偏 差
250	0.973	1.008	1.053	0.966	0.040
260	0.999	1.045	0.980	0.976	0.032
270	0.999	1.056	0.979	0.965	0.040
280	0.989	1.057	0.980	0.974	0.039
290	0.984	1.042	0.976	0.998	0.030
300	0.991	1.041	0.972	0.996	0.030
310	0.994	1.033	0.981	0.992	0.023
320	0.991	1.030	0.988	0.992	0.020
330	0.988	1.024	0.991	0.997	0.016
340	0.992	1.015	0.993	1.000	0.010
350	0.994	1.016	0.992	0.999	0.011
360	0.996	1.013	0.993	0.998	0.009
370	0.994	1.018	0.989	0.999	0.012
380	0.991	1.019	0.991	0.998	0.013
390	0.990	1.017	0.992	1.001	0.012
400	0.988	1.013	0.995	1.003	0.011
420	0.992	1.007	1.001	1.001	0.006
440	0.988	1.001	0.998	1.013	0.010
460	0.992	1.002	1.002	1.004	0.005
480	0.993	1.000	1.002	1.005	0.005
500	0.996	1.000	1.002	1.002	0.003
520	0.998	1.000	1.000	1.002	0.002
540	0.998	1.000	0.999	1.002	0.002
560	1.000	1.000	1.000	1.000	—
580	1.001	1.000	0.999	1.000	0.001
600	0.999	0.999	1.004	0.998	0.003
620	1.000	0.999	1.003	0.999	0.002
640	1.001	0.999	1.002	0.998	0.002
660	1.002	0.998	1.003	0.998	0.003
680	1.002	0.998	1.000	1.000	0.002
700	1.003	0.998	1.001	0.999	0.002
720	1.004	0.998	1.000	0.998	0.003
740	1.005	0.997	1.000	0.998	0.003
760	1.004	1.001	0.998	0.998	0.003
780	1.002	1.004	0.994	1.000	0.004
800	0.999	1.007	0.991	1.003	0.007

図6 a) 機関Aの分光応答度／全平均値 (GM)

図6 b) 機関Bの分光応答度／全平均値 (GM)

図6 c) 機関Cの分光応答度／全平均値 (GM)

図6 d) 機関Dの分光応答度／全平均値 (GM)

とがわかる。この原因は種々考えられるが、最も大きいのは各機関が用いた標準検出器の分光応答度の固有の差と思われる。これらについて7. で検討する。

結論的に、上記した各波長域での偏差は現在の測定技術水準では実用的に許容し得る範囲と考えてよく、4機関のいずれの値を用いても実用的には問題は生じないと思われる。

6. 分光応答度の絶対的な値⁴⁾

今回の測定は相対分光応答度についてのみ行ったものであるが、測定に参加した4機関は、過去に可視域で絶対応答度について比較測定を行ったことがあるので、その結果を今回の結果と重ねあわすことで、波長250nmから可視域に至る波長範囲で絶対応答度を導くことが出来る。

可視域における絶対応答度の比較は次のように行われている。

(1) 1989年に機関A, B, Cの間で自己校正法によって波長488, 633nmで行った。

(2) 1988年に機関Dが相対分光応答度と分光放射照度標準および全放射照度標準によって値づけした⁵⁾試料を、機関Cが自己校正法で校正した値と、波長442, 488, 544, 633nmで比較して行った。

この2つの比較は完全に同じベースで行われたものではないが、機関Cの値を仲介として相互に比較することができる。その結果は表5のとおりであって、4機関の相互差は幅1.2%に入っている(標準偏差±0.6%)。

相対分光応答度の測定と絶対応答度の測定は相互に独立した測定であるから、この組み合わせによって得られる絶対分光応答度の不確かさは、それぞれの不確かさの二乗和の平方根とみなすこと

表5 絶対分光応答度の比較結果

機 関	488nm	633nm
A	0.9997	0.9997
B	—	1.0018
C	0.9964	0.9986
D	1.0039	1.0111

図7 熱型検出器の分光応答度の例⁷⁾

図7 石英レンズ集光系で入射したときの射出単色光の放射照度分布の波長による変化の例

図9 試料SPDの受光面の応答度分布の波長による変化の例

ができる。この値は可視域で $\pm 1\%$ 以下、250~280nm域でも $\pm 4\%$ 以下となる（ハロゲン電球による分光放射照度標準の確度は、250nmで $\pm 3.1\%$ 、500nmで $\pm 1.4\%$ である⁶⁾。

7. 今回の測定の不確かさに関わる要因の検討

相対分光応答度測定の実差要因のおもなものは下記のとおりである。

- (1) 標準検出器の分光応答度の不確かさ
- (2) モノクロメータの出射単色光の放射照度および試料（または標準）検出器の応答度の受光面上でのむら（不均一性）の波長の変動。
- (3) 短波長側での入射パワー低下に伴うノイズ
- (4) 迷光の混入

今回の測定に関してこれらの検討を行ってみると次のようになる。

(1) 標準検出器は紫外域では3機関が熱型検出器を直接使用している（機関Cは他機関が値づけしたSPDを用いているが、そのオリジナルは熱型検出器と考えられる）。熱型検出器の分光応答度は、波長に対して一定とみなすのが普通であり、これは可視域について妥当と考えられているが、紫外域、赤外域では疑問があるとされている。図7は文献7)に示されている例であるが、紫外域で3%程の外れが認められている（空洞形検出器と比較している）。したがって、今回の結果に対してもこのような標準器固有の差は考慮しておく必要がある。

(2) 出射光の放射照度分布が波長によって変動し、その一方、検出器の受光面上の応答度のむらが波長的に変化すれば、その間に誤差が発生する⁸⁾。

出射単色光の放射照度の分布状態（均斉度）を決定する最も大きな要因は、光源の入射スリット上への結像状態であって、もし、入射の集光光学系に色収差（焦点距離の波長的な変動）があれば大きな影響がある。図8は図2とほぼ同じ配置の入・出射光学系（入射角の集光は $f=60\text{mm}$ の石英レンズ）で、光源にXeランプを用いたときの出射単色光の放射照度分布の例である（投射面積は約 $15\times 15\text{mm}$ ）。この例では集光レンズのピントは波長360nmで合わせているため、これよりも短波長側では結像点は入射スリットよりも前になり、長波長側では後になる。従って、いずれの場合でもスリットを通過して回折格子を照明する光にむらが生じて、その結果、出射単色光（像）の均斉度が悪化している。ただし、この例では、投射面の中央部 $6\text{mm}\phi$ については、波長250、360、780nmで、それほど大きな差は生じていないので、標準と試料の受光面が共に 6ϕ であれば、大きな誤差にはならない。

図9は、今回の測定に用いた試料の受光面の応答度分布の一例である（径 1ϕ のビームで測定）。これは非常にむらが少ないことがわかる。

(3) 短波長側でのノイズの増加については、使用した光源がそれぞれ十分に安定なXeランプで、短波長でかなり強い放射が得られるので、熱型検出器を使用した場合でも特に問題は起こっていない。なお、機関Cでは出射側に均斉度向上のために石英砂すり板を用いており、このために放射照度は約1桁低下するが、標準、試料共にSPDであるため、問題にはならない。

(4) 迷光の混入については、機関Aはダブルモノクロメータのため全く問題はない。他機関でもそれぞれ適当なフィルタを併用しているので誤差は無視できよう。

以上のことから、今回の測定の相互差の原因は主として(1)、(2)

にあるとみられるが、(2)のウェイトは比較的小さく、(1)が最も問題になるであろう。しかし、これを定量的に推測することは現段階では非常に困難である。

8. 結 び

国内における、光検出器の分光応答度の相互比較をシリコンフォトダイオードを用いて、波長250nmから800nmでの範囲で実施して、実用上満足な一致が得られることを確認出来た。今後は、これを工業的な実用標準とどのように結びつけるかが課題となる。

最後に、この比較の実施に際してご協力いただいた照明学会紫外放射照度測定方法特別研究委員会の各位、試料をご提供いただいた浜松ホトニクス㈱の関係各位に深く感謝する次第である。

（受付 1993年6月7日／採録 1993年8月10日）

参 考 文 献

- (1) E.F.Zalewski, et. al: Silicon photodiode absolute spectral response selfcalibration, Appl. Optics 19-8, (1980), 1214
- (2) 齋藤一朗：受光器による実用測光標準の設定に関する研究，電総研研報，No803, (1979)
- (3) 中川靖夫ほか：受光器分光感度の紫外・可視域での精度測定 (1)，照学誌 66-10(1982), 436
- (4) 大野義弘ほか：検出器の絶対分光応答度の国際比較，日本照明委員会誌 7-4, (1990), 15
- (5) 照明学会編：光の計測マニュアル，p143, (1990)，日本理工出版会
- (6) 鈴木守ほか：紫外・可視・近赤外域における分光放射輝度・照度標準の確立，電総研研報，No742, (1973), p53
- (7) CIE Pub.No.64: Determination of the spectral responsivity of optical radiation detectors, (1984), p21
- (8) 中川，大谷：受光器面感度と測定光照射度の不均一性による測定誤差の分光的評価，昭57年照明学会全国大会108, (1982)
- (9) 齋藤一朗：分光放射輝度・照度測定装置の製作，電総研研報，57-1, (1993), 75-96

なかがわ やすお
中川 靖夫（専門会員）

昭和9年12月15日生まれ。昭和32年3月東京都立大学工学部電気工学科卒業。同年3月理研光学工業株式会社（現㈱リコー）入社。昭和40年4月埼玉大学助教授。現在同学教授（工学部電気電子工学科）。電気電子工学科電子計測研究室所属。電気電子計測、測定と数値処理、光電工学の講義を担当。紫外・赤外放射測定、分光測定方法の研究に従事。昭和43年工学博士。昭和41年日本写真学会技術賞、昭和45年照明学会研究奨励賞、昭和54年照明学会賞、平成3年照明学会論文賞、平成3年通商産業大臣賞受賞。電気学会、応用物理学会、日本分光学会、日本写真学会、日本赤外線学会、OSA 各会員。