PbS 光導電セルの小入力での直線性の評価

正 員 中 川 靖 夫 (埼玉大)

非会員 勝 部 昭 明 (埼玉大)

1. ま え が き

光放射パワーの測定は、可視波長域 (380~780nm) では光束、光度などの測光量、色度、演色評価数などの色評価に対する精度的な要求が厳しいために、測定精度 1% 以下が実現できる水準になっている。一方、可視以外の紫外、赤外域でのパワー測定は、今までは需要面で可視域におけるほどの厳しさがなかったことと、測定それ自体の技術的困難さのために、測定精度の水準は可視域よりかなり劣っている。

しかし、赤外域での光放射パワーの工業利用は、最近、急速に広がってきており、それと共に測定精度向上の要望も増加している。特に、可視域に隣接した近赤外域では、放射源 (例えば電球) が可視域と共通なために、波長域によって測定精度に格差がつくことは種々の支障となる。

赤外域での光放射パワー測定の困難さの理由の主因に、検出器の性能があることはよく述べられている。可視域で高精度な測定に使用する検出器 (PMT, シリコンホトセルなど) は、波長 $1.2\mu\text{m}$ 位が感度の限界で、これより長波長で使用できる検出器の性能は、一般に可視域用のものよりかなり劣る*。また、高精度測定に必要な検出器の諸特性 (雑音特性、直線性、疲労など) の評価もあまり行なわれていないし、行なわれた例でも範囲が限定されている⁽¹⁾。

著者らは、最近、光源の近赤外域での分光放射測定をパワーレベル $10^{-8}\sim 10^{-5}\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ で実施した際に、代表的な近赤外放射検出器である PbS 光導電セルの入射パワーレベルと直線性の関係を波長パラメータで測定して、直線性成立の範囲について定量的な結果を

得たので、PbS セル使用上の指針として報告したい。また、それと共に、従来かなりあいまいに扱われていた直線性に対する考え方と、直線性はずれの要因について系統的な検討を行なった。

2. 放射検出器の直線性の考え方

〈2・1〉 感度と直線性 放射検出器に、特有の波長組成 (分光分布、例えば波長 λ_1 の単色光) を持った強度 i の光放射パワー P_i が入射したとき、検出器の出力 (例えば電流) が I_i であれば、このときの検出器の感度 (光電変換係数) S_i は (1) 式のようになる。

$$S_i = I_i / P_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、光放射の波長の組成が変わらず、パワーレベルだけが変化したとすると、感度が入射パワーレベルに依存せず一定である、すなわち $S(i) = S = k$ なら出力は入射パワーレベルに比例する。このような入・出力間の比例性を検出器の応答の直線性と呼ぶ。従って、直線性の成立する検出器では、任意強度の入射パワー P に対する出力を I とすると、暗出力を含む入出力は暗出力を I_d 、全出力を I_p とすると (2) 式のようになる。

$$I_p = I_d + I = PS = I_d + KP \dots\dots\dots (2)$$

もし、感度が入射のレベルによって変動すると (2) 式の比例性は成立しなくなって、応答は直線性からはずれる。このようなときには、感度はあらかじめ入射パワーレベルの関数 $S(P)$ 、あるいは出力の関数 $S(I)$ の形で与えられていなければならない。このときの応答の直線性はずれは次のように定義される。

(1) 暗状態から微小レベル入射 ΔP を与えて、このときの出力の増加 ΔI を求めて、(3) 式の S_0 を

* : 波長 $1.2\mu\text{m}$ 以上の赤外域用の量子形検出器は、一般に量子効率が低い。また、感度波長域が長波長になるほど材料のバンドギャップが狭くなって、背景の熱放射の影響を受けやすくなるので S/N が悪くなり、従って検出能力が低くなる。

Nonlinearity of PbS Photoconductors at Low Level Incident.
By Yasuo Nakagawa, Member & Teruaki Katsube, Non-member (Faculty of Engineering, Saitama University).
中川靖夫: 正員, 埼玉大学工学部電子工学科
勝部昭明: 非会員, 埼玉大学工学部電子工学科

基準感度とする。

$$S_0 = \Delta I / \Delta P \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$I = I_d + S_0 P \quad \dots\dots\dots (4)$$

そして、(4)式を検出器の直線応答と考えて、これを基準にして直線性はずれを評価する。すなわち、入射 P に対する直線性はずれ ΔL を(5)式のように考える。

$$\Delta L(P) = \{I / (S_0 P)\} - 1 = \{S(P) / S_0\} - 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2) 検出器の入射パワーレベルの最大限を P_m として、暗状態からこの間までの平均感度 $\bar{S}$ を(6)式のように決めて、これを基準感度とする。

$$\bar{S} = \frac{1}{P_m} \int_0^{P_m} S(P) dP \quad \dots\dots\dots (6)$$

これから直線応答を(7)式、直線性はずれを(8)式のように与える。

$$I = I_d + P \bar{S} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta L(P) = \{I / (\bar{S} P)\} - 1 = \{S(P) / \bar{S}\} - 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

この2種の定義はどちらもよく使われていて、いずれがより合理的であるか簡単には決められない。一般的には、光放射検出器の性能評価には(5)式がよく用いられ、電子装置の応答評価などでは(8)式が用いられるようである。

図1(a)に(1)項で述べた初期値を基準とした直線

図1 直線性の図的表現

Fig. 1. Schematic diagram of linearity.

図2 光導電検出器の回路

Fig. 2. Photoconductive detector circuit.

性の考え方を示し、同図(b)に(2)項で述べた平均値を基準とした直線性の考え方を示す。

〈2・2〉 光導電セルの負荷抵抗と直線性 シリコンホトセルなどの光起電セルでは、負荷抵抗によって応答の直線性はずれが生じることがよく知られているが、光導電セルでも同様な現象が生ずる。すなわち、セルの導電率の変化が入射に対して完全に比例しても、外部に接続する負荷の状態によって出力に直線性はずれが生ずる。

光導電形の検出器では、図2のように外部電源 E と負荷抵抗 R を接続し、 R 両端の電位差の変化分を信号として取出すのが一般的である。いま、セルの暗状態の導電率を G_0 、光放射の入射による導電率の変化分を ΔG とする。 R の逆数(負荷コンダクタンス)を $1/R = g$ とおけば、暗状態の回路電流 I_d と光放射入射状態の回路電流 I はそれぞれ次のようになる。

$$I_d = \frac{g G_0}{g + G_0} E \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$I = \frac{g(G_0 + \Delta G)}{g + (G_0 + \Delta G)} E \quad \dots\dots\dots (10)$$

これから、光放射の入射による電流の変動分 ΔI は(11)式のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta I &= I - I_d \\ &= \left(\frac{g G_0}{g + G_0} - \frac{g(G_0 + \Delta G)}{g + (G_0 + \Delta G)} \right) E \\ &= \frac{E g^2 \Delta G}{g^2 + G_0^2 + 2g G_0 + \Delta G(g + G_0)} \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

(11)式は変数 ΔG が分子、分母にあって、 ΔI と ΔG の関係は比例的でなく、直線性を成立しなくなる。この程度を PbS セルの通常の使用条件である $G_0 = g$ 、すなわち $R = R_d$ について求めると図3のようになる。

いま、入射による G_0 の変化分 ΔG が G_0 の 10^{-3} から 10^{-2} になった状態を考えると、これによる直線性はずれは 0.5% で、 $\Delta G / G_0$ が 2×10^{-2} になるとはずれはほぼ 1% になる。つまり、 $G_0 = g$ の使用条件で

図3 負荷抵抗による直線性はずれ

Fig. 3. Nonlinearity with load resistance value.

は、負荷両端からの信号出力は外部電源 E の 10^{-2} 程度にしないと精密測定はできないことになる。もし、 $g \gg G_0$ すなわち $R_d \gg R$ であれば直線性は十分良好にできる。光電管や PMT などは、通常の状態ではこの条件で使用されている。

〈2・3〉 変調光の入射と直線性 ここまでの論議は、入射が直流的である場合を想定していたが、入射が周期的に断続した交流的な変調光であるときは、直線性は変調状態に影響される。

入射 P に対する検出器の出力 I が $I=f(P)$ であって、入射が繰返し周期 T の変調光で時間 t の関数 $P=g(t)$ であれば、一周期の平均出力 $\bar{I}$ は次式のようにになる。

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T f\{g(t)\} dt \quad (12)$$

直線性が完全に成立して $I=KP$ であれば、このときの平均出力 $\bar{I}_0$ は次式のようにになる。

$$\bar{I}_0 = \frac{K}{T} \int_0^T g(t) dt \quad (13)$$

これから、直線性はずれは次式のようにになる。

$$\Delta L(P) = (\bar{I}/\bar{I}_0) - 1 \quad (14)$$

いま、入射 P に対する検出器の応答が、 P の増加に対して直線性から負の方向へはずれる関数であって、

$$I = KB \{1 - \exp(-\alpha P)\} \quad (15)$$

であると仮定する。そして、入射光が直流光と方形波および正弦波の変調光(最大値 P_m)であるとして、出力の平均値と直線性はずれを求めてみる。もし、(15)式の定数を $B=10$, $\alpha=0.1$, $K=1$ とすると、この応答の直線性はずれは $P_m=1$ とするとき P の $0 \rightarrow 1$ について約 5% である。

この状態で、直流光、方形波、正弦波変調光に対する直線性はずれは図 4 のようになる。これからわかるように、変調光では直流光に比べて出力レベルが低い状態で直線性はずれが大きくなっており、同程度の出力レベルでの直線性はずれは、直流光に比べて方形波では約 2 倍、正弦波でも約 1.5 倍になる。これは、変調光では直線性はずれは入射の最大値に依存するの

図4 変調波形と直線性

Fig. 4. Nonlinearity with incident chopping waveform.

に対して、出力は一周期の平均値になるためである。従って、パルス入射などでは出力(平均値)が小でも大きな直線性はずれが起こることになる。実際の光検出器の直線性はずれの形は(15)式の形で近似できることが多く、はずれの程度が入射光レベル 1:100 について数%になる場合もよくあるので、以上のような現象は現実問題として重要である。

3. 光放射検出器の直線性測定法

〈3・1〉 静的な測定法 光放射検出器の感度が $S(P)$ であれば、出力 I_p は、

$$I_p = I_a + PS(P) \quad (16)$$

であるから、この I_p を基準感度 S_0 または $\bar{S}$ による同じ入射レベルでの出力と比較すればよい。

これを具体的に実現するには種々の方法があるが、高精度の方法として、 S_0 を基準とする次のようなもの(レンズ・穴開き板法)がよく知られている⁽²⁾(図 5)。

安定な光源 S の放射をレンズ L で試料検出器 D へ

S: 光源, D_p: 拡散面, L: レンズ, B: 穴開き板, D: 検出器

図5 レンズ穴開き板法

Fig. 5. Linearity test method by lens and aperture diaphragm.

結像入射する。受光面上の照度は十分均斉にする必要がある。光源で拡散面 D_F を照射し、 D_F の像を受光面上に結像させるのが普通である。レンズ L の近傍には n 個の開口を持った穴開き板 B を置いて、それぞれの開口は単独にしゃ光できるようにする。

ここで、 B の穴を 1 個だけ開き、受光面上に放射パワー P_1 を与えて、この状態の出力 (増分) I_1 を求める。次に、2 番目の穴だけを開いて、放射パワー P_2 を与えて出力 I_2 を得る。このようにして、 $P_1, P_2, \dots, P_n$ による出力 $I_1, I_2, \dots, I_n$ を得る。 n 個の穴の面積がほぼ等しくて、 D_F と L の間の距離 a が十分大きければ $P_1, \dots, P_n$ はほぼ等しく、 $I_1, \dots, I_n$ もほぼ等しくなる。その次に、1 番目と 2 番目の穴を同時に開いて、放射パワー $P_1 + P_2$ を与えて出力 I_{1+2} を得る。以下、順次 ($P_1 + P_2 + P_3$) を与えて $I_{1+2+3}, (P_1 + \dots + P_n)$ を与えて $I_{1+\dots+n}$ を得て、(17) 式から直線性はずれを求める。

$$\Delta L(P) = \frac{I_1 + \dots + I_n}{I_1 + I_2 + \dots + I_n} - 1 \dots \dots \dots (17)$$

この式の第 1 項の分子は $S(P)P$ に相当し、分母は $S_0 P$ に相当するので、 S_0 を基準とした直線性が評価できる。

この方法は、単純でわかりやすい方法ではあるが、実施にあたっては、かなり大形の測光ベンチが必要なこと、装置の機械精度が必要なこと、測定に相当の熟練を要し時間もかかること、低感度の検出器の測定や分光測定が難しいこと、などの欠点がある。なお、この方法の改良法として、レンズを使わない方法⁽³⁾も提案されているが、その場合にも光源収納用により特殊な暗箱が必要となる。

〈3・2〉 動的な測定法 直線性の測定は、検出器の入、出力の静特性を測ることであり、そのためには入射パワー (またはその相対値) と出力の両方を正確に測定しなければならない。検出器の出力 (電流、電圧) の測定は容易であるが、入射の光放射パワーを広い範囲で正確に評価するのはなかなか困難で、そのためにレンズ穴開き板法のような工夫が必要であった。

入、出力のレベルを直接に測って直線性を求める代わりに、入力増分に対する出力の変化 (微分特性) を測定しても直線性を評価することができる。この方法では、レベルごとの入射パワーを逐一測定する必要はなく、入射増分の正値の見積りだけでできればよい⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

いま、未知の入射量で検出器の出力 I が得られているとする。この状態から入射に微増分 dP が追加されて、それに対応した出力増分 dI が得られたとす

る。ここで dP がわかっているならば、 dP/dI を I について積分して、 I に対応する入射量 P が求められる。

$$P = \int \frac{dP}{dI} dI \dots \dots \dots (18)$$

検出器を暗状態にして、まず入射の微小単位量 dP を与えて、単位出力 (暗出力からの増加) dI_0 を得る。次に、 dP をいったんしゃ断して、出力 I_1 ($I_1 \gg dI_0$) が得られるような dP と同じ波長組成の入射を与える。この状態で、再び dP を追加入射して出力 I_{11} を得る。この I_{11} とときの I_1 の差分を dI_1 とすると、これが出力 I_1 での入射増分 dP に対応した出力増分である。以下、このようにして $dI_1, dI_2, \dots, dI_n$ を得たとすると、出力 I_n に対応する入射量 P_n は次のようになる。

$$P_n = \frac{dP}{2} \left\{ \left(\frac{1}{dI_0} + \frac{1}{dI_1} \right) I_1 + \dots + \left(\frac{1}{dI_{n-1}} + \frac{1}{dI_n} \right) (I_n - I_{n-1}) \right\} \dots \dots \dots (19)$$

ここで、基準感度 S_0 を

$$S_0 = dI_0/dP \dots \dots \dots (20)$$

とすれば、直線性はずれは次のようになる。

$$\Delta L(P) = \{ I / (S_0 P) \} - 1 \dots \dots \dots (21)$$

この方法を具体的に実現する光路の一例を図 6 に示す。まず、主光源 (バイアス光源) S_1 と dP を入射する微分入射量 (基準量) 光源 S_2 を配置して、ビームスプリッタ H で両方の放射が検出器へ同時に入るようにする。 S_1, S_2 の分光分布は等しいか、十分近似していなければならない。 H と S_1 の間には減光器 A を入れる。最初に S_2 から dP だけを与えて dI_0 を得る。次に S_1 だけによって I_1 を得て、更に S_2 から dP を加えて増分の出力 dI_1 を得る。以下、逐次 S_1 からの入射を A で調整して、必要なレベルの範囲で dI を求める。 dP はこの間一定に保つ。 dP は絶対

図 6 動的 (微分的) な直線性測定法

Fig. 6. Differential linearity test method by tow radiation sources.

量であることが望ましいが、相対量でもこれを基準量として $I_1, I_2, \dots, I_n$ に対応する入射量が相対的に求められる。

この方法は入射の光学系が簡単で、光源についての制約が少なく、測定操作も容易であり、検出器を実際に用いる状態にセットしたままで測定ができる。分光器を用いた分光測定も容易であり、分光器の入射側に光学系を置けば、光路の波長特性に対する制約も楽になる。

一方、この方法を精度的にみると、 dI が差分測定になるので、 I/dI が大きいと測定精度が低下する欠点があり、直流入射での測定ではこのことが特に問題になる。しかしこの欠点は、例えば S_1 からの入射は直流入射とし、 S_2 からの dP を変調（交流）入射として、同期検波（ロックイン検出）することによって大幅に改善できる。なお、直流入射の差分測定でも、PMT による実験では $I \approx 10^{-7} \text{A}$ 、 $I/dI \approx 10$ で 1% 程度の精度を得ることは可能であった。

4. 動的な方法による PbS セルの直線性測定

〈4.1〉 試料と測定系 試料 PbS は浜松ホトニクス P-397、2 個である⁽⁶⁾。測定は分光的に行なった。光学系は図 7、図 8 に示す。分光器への入射方法は、高照度レベルでは集光レンズを用い（図 7）、低照度レベルでは拡散反射面を用いた（図 8）。この光路は、実際に光源やフィルタなどの分光測定を行なうときと

表 1 試料 PbS セル P 397 の定格⁽⁶⁾

Table 1. Rated data of P 397 PbS detector.

受光面積 (mm ²)	窓材料	暗抵抗 R_d (M Ω)	感度 ϵ	$D^*(1300, 100, 1)$ (cm $\cdot$ Hz ^{1/2} ·W ⁻¹)
4×5	ホウケイ酸 ガラス	~0.6	1.6	2×10^{10}

$\epsilon = (I_L - I_d)/I_d$ 2,856 K 電球光照射, 入射パワー 5 mW

図 7 動的（微分的）方法による PbS セルの直線性測定の光路

Fig. 7. Optical system of differential linearity test method for PbS detectors.

じものである。分光器（モノクロメータ）はニコン G-250 で、ブレイズ波長 $1 \mu\text{m}$ 、300 本/mm の回析格子を用い、スリット機械幅は入射、出射とも 2mm である。光源は S_1, S_2 ともに JC 形ハロゲン電球（直流点灯）で、 S_1 からの入射は変調せず（ただし、出力のレベルチェックの際のみ 12.5 Hz で変調）、 S_2 による dP は 12.5 Hz の変調光とした。変調周波数として 12.5 Hz を用いたのは、同じ光路で使用する熱形検出器との共用のためである（PbS だけを考えるなら 100 Hz ぐらいのほうが S/N が良い）。PbS セルの電圧は 16V で、負荷抵抗 R は増幅器の入力抵抗を含めて $0.5 \text{M}\Omega$ である。これは暗抵抗とほぼ等しくした。出力はロックイン検波器で測定した。

試料 PbS の相対分光感度特性は図 9 のとおりである。これは金黒蒸着の PVF_2 焦電形光放射検出器を標準として、図 7 の光路で測定した。測定時の入射レベルは $3 \sim 15 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ で、直線性測定の高照度域に相当する。

直線性測定の波長は $0.8, 1.2, 1.6, 2.0 \mu\text{m}$ で、単

図 8 拡散板を用いた入射系

Fig. 8. Incident optical system with reflective diffuser.

図 9 PbS セル P 397 の相対分光感度

Fig. 9. Relative Spectral sensitivity of P 397 PbS detectors.

図 10 PbS セル P 397 の直線性測定結果
Fig. 10. Nonlinearity of P397 PbS detectors.

色光の波長幅は約 $0.027 \mu\text{m}$, 入射レベルは $10^{-8} \sim 10^{-5} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。測定の手順は次のとおりである。

(1) S_2 からの入射 dP をチョップ Ch_2 で変調して基準出力 dI_0 を求める。このとき Ch_1 は光路からはずす。

(2) S_2 からの入射をしゃ断し, Ch_1 を光路に入れて S_1 からの入射を与えて出力 I_1 を得る。 Ch_1 による変調波形は台形波で, デューティ比は約 0.43 であり, 直流入射としたときの入射レベルは変調時の約 2.33 倍である。

(3) S_1 の入射を直流光として (Ch_1 をはずす), 再び S_2 からの入射 (Ch_2 で変調) を加えて, ロックイン検波器の出力を読む。 S_1 による入射は直流成分のため, 出力にならず dI_1 に相当する分だけが読みとれる。

(4) S_1 からの入射レベルを A で調整して, 同様の測定を繰返す。

測定は波長ごとに低レベル→高レベル, 高レベル→低レベルの往復の読みをとって平均した。

〈4・2〉 測定の結果 測定の結果を図 10 に示す。直線性はずれの評価は (5) 式によった。入射の基準値 dP は $1 \sim 3 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ と $1 \sim 4 \times 10^{-7} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ の二段階にとって, 差分測定である dI の精度が十分に保てるようにした。直線性は小さいほうの dP を基準として接続したデータで評価した。横軸の入射照度は直流光のレベルである。

図 10 からわかるように, いずれの試料も入射照度 $10^{-6} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (入射パワー $0.2 \times 10^{-6} \text{W}$) くらいから直線性はずれが認められて, $10^{-5} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ でははずれが 2~3% になる。直線性はずれの波長依存性はあ

まりははっきりしないが, 長波長でやや大きくなる。〈2・2〉節で述べた負荷抵抗の影響は, $\Delta G/G$ が最大でも 10^{-3} 以下なので無視できる。

この測定の試料の NEI (雑音等価入力) は波長 1~ $2.5 \mu\text{m}$ で, この使用条件で $0.5 \sim 1 \times 10^{-10} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。従って, 高精度測定のための雑音と直線性はずれの許容限界を, それぞれ $S/N=100$, 直線性はずれを 1% と考えると, 検出器の有効使用範囲 (ダイナミックレンジ) は入射照度 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ で, ほぼ 2 けたである。

5. 結果の検討と考察

一般に光導電形の光放射検出器において, 光励起された自由キャリアの密度を f , キャリヤの熱速度を v_{th} , 再結合中心の捕獲断面積を A , 再結合中心の単位体積内の数を N_r , 電子密度を n とすると, 電子の増加は次式のようにになる。

$$\frac{dn}{dt} = f - v_{th} A n (n + N_r) \dots \dots \dots (22)$$

ここで, キャリヤの寿命時間 τ は (23) 式となるので, これを (22) 式へ代入すると (24) 式のようにになる。

$$\tau = 1 / \{v_{th} A (n + N_r)\} \dots \dots \dots (23)$$

$$\frac{dn}{dt} = f - (n/\tau) \dots \dots \dots (24)$$

(24) 式の第 1 項は光入射で発生するキャリアの密度であり, 第 2 項は消滅するキャリアの密度である。光入射が増すと電子密度は大になるが, それにつれてキャリアの寿命時間も短くなり, キャリヤ消滅の密度も増大する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

いま, 光入射が定常状態であれば $dn/dt=0$ であるから, (24) 式の第 1 項と第 2 項は平衡して

$$f = v_{th} A (n^2 + n N_r) = K_1 n^2 + K_1 n N_r \dots \dots \dots (25)$$

図 11 光励起による電子密度 n の増加と直線性はずれの関係

Fig. 11. Nonlinearity with increasing of photoexcitation carrier density n .

となる。もし $n \ll N_r$ であれば、(25)式において n^2 の項は無視できるので、電子密度（電流） n と入射光による励起キャリア密度（入射光強度） f は比例関係にある。しかし、 n が大きくなって n^2 の項が無視できなくなると、比例関係が成立しなくなる（直線性からはずれる）。

図 11 は、 $n/N_r = 10^{-4}$ を基準点として、 n が増加したときの f と n/N_r を計算して、 n/N_r と直線性はずれの関係を求めた結果である。図 11 の曲線は、その形状が図 10 に示した実測結果に良く近似しているため、直線性はずれの原因は、前述したような電子密度の増加によるキャリア寿命時間の変化によると推察される。

このことを更に定量的に検証するために、実際の入射光強度と n/N_r の関係を求めてみる。まず、 N_r は PbS などでは $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ と考えられ、 n/N_r を 10^{-2} とすると、 n は $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ になる。キャリアの寿命時間 τ は素子の時定数とほぼ等しいとすると $\tau = 10^{-4} \text{ s}$ 程度で⁽⁶⁾、 $f = n/c$ とすれば f は $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ となる。光励起に寄与する素子の実効膜厚を 10^{-4} cm とすると、入射光子数は量子効率をほぼ 1 とすると $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ であって、これは波長 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の放射で $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ の入射照度に相当する。図 10 によると、入射照度 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ での直線性はずれ ΔL は $1 \sim 3\%$ であって、図 11 の $n/N_r = 10^{-2}$ での ΔL (約 1%) と良く一致する。

次に、直線性はずれの波長特性を考える。もし、直線性はずれが入射光子で励起されたキャリア（電子）の増加による τ の変化によるものであれば、その度合いは入射光子の数と光導電体の量子効率の積で決まる。従って、光子の保有エネルギー（波長）が異なっても、励起に寄与する光子の数と同じであれば、直線性はずれの度合いも同じになるはずである。この測定の実験の量子効率（相対値）の波長特性を図 9 に示した分光感度特性から求めると図 12 のようになる。こ

図 12 PbS セル P 397 の相対量子効率の波長特性

Fig. 12. Spectral characteristics of relative quantum efficiency for P 397 PbS detectors.

図 13 PbS セル P 397 の光励起キャリア密度と直線性はずれの関係

Fig. 13. Nonlinearity of P 397 PbS detectors by photoexcitation carrier density increasing.

の値に入射光子数（入射照度と波長から計算できる）を乗ずると、励起キャリア数（相対値）が求められる。

そこで、2 個の試料について波長 $0.8 \mu\text{m}$ 、入射照度 $4 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ での励起キャリア数を基準値（= 1）とし、このときの ΔL を基準（0%）とした直線性はずれの値をプロットしてみた。その結果は図 13 のとおりで、横軸を励起キャリア密度とすると、直線性はずれの波長依存性（図 10 参照）はほとんどなくなる。従って、直線性は光励起キャリアの数だけで決まることになる。これから、もし検出器の量子効率が波長によってあまり変化しなければ、短波長側ほど大きな入射パワーまで出力の直線性が保持できることになる。

6. む す び

以上、PbS 光導電セルの直線性評価を、動的な直線

性測定法によって、ほぼ3けたの入力範囲について、分光的に行なって PbS の精密測定用途での使用範囲を明らかにした。また、PbSの直線性はずれの原因が光励起キャリアの増加に基づくもので、本質的な波長依存性はないことを理論式と実験結果を対応して確かめた。この測定で用いた直線性の動的な測定法は、応用範囲の広い実的な方法と考えられるので、今後、更に検討を加えて、より利用性の良いものとしてみたい。

(昭和59年7月9日受付)

文 献

- (1) 鈴木, 他: 「紫外・可視・近赤外における分光放射輝度・照度標準の確立」, 電総研研究報告, No. 742, p. 32 (昭48)
- (2) M. Nonaka, et al.: "Linearity Characteristics of Multiplier Phototubes", *Japan J. Appl. Phys.*, **2**, 785 (1963)
- (3) 斉藤: 「受光器による実用測光標準の設定に関する研究」, 電総研研究報告, No. 803, p. 28 (昭54)
- (4) L. N. Aksyutov, et al.: "Method of Determining the Nonlinearity of Photodetectors", *Sov. J. Opt. Technol.*, **45**, 525 (1978)
- (5) A. R. Schaefer, et al.: "Silicon Detector Nonlinearity and related Effects", *Appl. Optics*, **22**, 1232 (1983)
- (6) 浜松ホトニクス赤外線検出素子カタログ
- (7) 前田, 他: 光電変換デバイス, p. 23 (昭50) コロナ社
- (8) T. S. Moss, et al.: *Semiconductor optoelectronics*, p. 152 (1973) Butterworth