UDC 621.383.41.012.6-416

論文

49-A 60

PbS セルの動作特性

東京都立大学

東京都立大学

栗 國 安 一

芹 澤 龍之介

1. ま え が き

PbS セルは $0.5\sim 3\mu\text{m}$ の波長領域で優れた光導電性を示す素子である。PbS セルを赤外線応用機器の検出素子として使用する場合、セルの性能および動作条件による特性を詳細にはあくしておくことが望ましい。赤外線検出器の動作特性は、たとえば入射光の性質、動作条件などにより影響を受ける。さらに、PbS セルの赤外線検出能力はセルに発生する雑音によって制限され、セルの雑音特性も動作条件に支配される。

本文は、筆者らの試作した真空蒸着法による PbS セルについて、その光導電性応答および雑音の諸特性に関する実験結果、ならびにこれらの総合結果として得られる検出率の動作条件による特性について述べる。

2. 供試セルおよび実験装置

動作特性の測定に用いた PbS セルは、筆者らが開発した真空蒸着法によって製作したもので⁽¹⁾、第 1 表は供試セルの室温における暗抵抗、静電容量、受光面積を示す。

第 1 図は動作特性の測定回路の構成を示す。光源は単色光の特性を調べる場合には分光光度計（日立製、EPU-2 型）を用い、黒体放射の特性については黒体炉（Infrared Industries 製、model 404）を使用した。単色光としては $1.2\mu\text{m}$ の波長を採用したが、これは試作セルの分光感度がこの付近の波長に対して敏感であることと、水蒸気による吸収効果が無いことによる。セル受光面の放射照度は光源とセルとの距離を変えることによって調節し、受光面の放射照度は真空熱電対（日本分光工業製）によって測定した。

Operating Characteristics of PbS Cell. By Y. AWAKUNI, Member & R. SERIZAWA, Member (Electrical Engineering Department, Tokyo Metropolitan University)
栗國安一：正員，東京都立大学工学部
芹澤龍之介：正員，東京都立大学工学部

第 1 表 供試セルの暗抵抗、静電容量および受光面積

Table 1. Dark resistance, capacitance and photosensitive area of PbS cell.

セル番号	No. 1	No. 9	No. 19
暗抵抗 (MΩ)	0.57	0.10	3.2
静電容量 (μF)	120	100	4
受光面積 (cm ²)	0.24	0.23	0.25

第 1 図 測定回路の構成

Fig. 1. Block diagram of measuring circuit.

雑音測定も第 1 図に示した回路を用い、この場合、周囲からの放射効果を最小にするため暗室中でセルを動作させ、雑音電圧は記録計に現われた振れの 5 分間平均値とした。

3. PbS セルの比応答率、比雑音、検出率

〈3・1〉 比応答率 PbS セルの性能指数の一つとして、Petritz 氏および Spencer 氏は単位面積あたりの放射束、すなわち、セルの放射照度 H に対するセルのコンダクタンスの変化の割合を比応答率 (specific responsivity) と定義している⁽²⁾⁽³⁾。すなわち、比応答率 S_1 は次式で与えられる。

$$S_1 = \Delta G / HG \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 G はセルの暗コンダクタンス、 ΔG は放射照度 H なるときのコンダクタンスの変化分である。

第 1 図に示した測定回路において、入射光束を光チョッパで断続すると、負荷抵抗 R_L の両端には波高値 ΔV_L の方形波が発生し、これは次式で与えられる。

$$\Delta V_L = -R_L V_{dc} \Delta R / (R_d + R_L)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ΔR は断続光照射によるセルの抵抗の変化分、 V_{dc} はセルに印加されるバイアス電圧、 R_d はセルの暗抵抗である。(1)式および(2)式より

$$\Delta V_L = S_1 H R_d R_L V_{dc} / (R_d + R_L)^2 \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。いま簡単のため、断続光周波数の増加による波形のひずみを無視すると、この方形波の基本波の実効値 V_s は

$$V_s = \sqrt{2} \Delta V_L / \pi \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。 V_s は放射照度 H するときのセルのレスポンスであるから、以後これを信号電圧と呼ぶことにする。あらかじめ増幅器の増幅度を求めておけば記録計の出力電圧より信号電圧が求まり、また(3)式によって比応答率 S_1 も計算できる。

〈3・2〉 比雑音 PbS セルに発生する雑音を検討するために、Petriz 氏および Spencer 氏は比雑音 (specific noise) なるものを定義している⁽²⁾⁽³⁾。第1図の回路において、PbS セルの比雑音を N_1 とすると、これは次式で与えられる^{(2)・(4)}。

$$N_1 = \frac{A^{1/2} V_n}{(\Delta f)^{1/2} V_{dc}} \frac{(R_d + R_L)^2}{R_d R_L} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 A はセルの受光面積、 V_n は帯域幅 Δf 内で負荷抵抗端に発生する雑音電圧、 V_{dc} はバイアス電圧、 R_d および R_L はそれぞれセルの暗抵抗および負荷抵抗である。

いま、増幅器の総合増幅度特性 K が周波数の関数であるとし、通過帯域の中心における増幅度を K_0 とすれば、雑音等価帯域幅 Δf は

$$\Delta f = \int_0^\infty \{K(f)/K_0\}^2 df \dots \dots \dots (6)$$

で定義される⁽⁵⁾。こうすれば、増幅器出力雑音 E_n は $\bar{E}_n^2 = \bar{V}_n^2 K_0^2 \Delta f$ となり、これは増幅器の周波数特性を利得 K_0 、帯域幅 Δf の方形帯域特性に置換したこととなる。 K_0 と Δf を求めておけば、出力雑音から入力雑音の単位帯域幅あたりの大きさを $\bar{V}_n^2 = \bar{E}_n^2 / K_0^2 \Delta f$ として簡単に求めることができる⁽⁶⁾。

第2図は使用した選択増幅器 (横河電機製, DV-CR-201 型) の中心周波数 200 Hz における周波数帯域特性を示すもので、これより雑音等価帯域幅は(6)式の計算を図式的に行なって 10 Hz となる。第2表はこのようにして求めた雑音等価帯域幅と各中心周波数における利得を示したものである。このように、入力雑音 V_n および帯域幅 Δf がわかれば、(5)式によって比雑音が計算できる。

〈3・3〉 検出率 検出器の検出能力を表わすのに

第2図 雑音等価帯域幅の定義

Fig. 2. Definition of noise equivalent band width.

第2表 選択増幅器の雑音等価帯域幅および利得

Table 2. Noise equivalent band width and gain of the selective amplifier.

中心周波数 (Hz)	Δf (Hz)	利得 (dB)
35	1.4	62.7
90	4.3	61.1
200	10	61.9
500	24.5	60.6
1,200	54	60.6
2,000	105	59.7
3,000	160	59.0
5,000	330	57.8
10,000	660	57.6

最近よく用いられているものは検出率 D^* である。検出率 D^* は Jones 氏の提案によるもので⁽⁴⁾、これは単位帯域幅の雑音と検出器の単位受光面積あたりで評価した検出率であって、次のように定義される。

$$D^* = V_s (\Delta f)^{1/2} / H V_n A^{1/2} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 V_s は放射照度 H するときの信号電圧、 Δf は雑音等価帯域幅、 V_n は雑音電圧、 A はセルの受光面積である。(3)～(5)式および(7)式を比べるとわかるように、検出率、比応答率および比雑音の間には

$$D^* = \sqrt{2} S_1 / \pi N_1 \dots \dots \dots (8)$$

なる関係が成立する。

4. 実験結果およびその検討

〈4・1〉 比応答率の諸特性 第3図は試作セルのバイアス電圧に対する信号電圧および比応答率の変化を示す。この測定における光源は波長 $1.2 \mu\text{m}$ の単色光で、セル受光面の放射照度は $3.8 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ である。また、図中に示した t_c はセル温度、 f は断続

光周波数である。図に見るように、信号電圧はいずれもバイアス電圧に比例しているが、比応答率はバイアス電圧に依存しないで、ほぼ一定値となっている。第4図はバイアス電圧を48V一定とし、波長 $1.2\mu\text{m}$ の単色光の放射照度を変えたときの信号電圧および比応答率の変化を示す。放射照度が $4 \times 10^{-4} \text{W/cm}^2$ 程度以下では、信号電圧は放射照度に直線的に比例しており、比応答率もほぼ一定値を保っている。既述のように、信号電圧は増幅器の出力電圧から求めているから、放射照度の大きいところでの信号電圧の直線性のずれは、増幅器への入力電圧が過大になったための増

第3図 バイアス電圧対信号電圧および比応答率

Fig. 3. Dependence of the responsivity of PbS cells on the bias voltage.

第4図 放射照度対信号電圧および比応答率

Fig. 4. Dependence of the responsivity on the irradiance of the PbS cell.

幅器の飽和特性によるものである。

第5図は黒体炉を光源として用いたときの黒体炉温度（絶対温度）に対する信号電圧および比応答率の変化を示す。No. 1, No. 9 セルともにバイアス電圧は47V, 断続光周波数は200Hzである。図の特性から信号電圧は絶対温度の約11乗に、比応答率は絶対温度の約8.5乗に比例している。このようにPbSセルは温度放射に敏感に応答するから、被測定物の放射発散率がわかれば放射温度計の検出器として有用であり、この原理に基づく放射温度計について筆者らは既に発表している⁽⁷⁾⁽⁸⁾、現在では市販の製品もある。

第6図はバイアス電圧をパラメータとし、セル温度を変えたときの信号電圧および比応答率の変化を示す。光源は673K一定に保った黒体炉で、セル受光面の放射照度は $4.74 \times 10^{-6} \text{W/cm}^2$ である。この温度特性の測定では、セルは石英窓を備えたデュアびんに封入され、寒剤を用いて冷却を行ない、セル温度はアルメル、クロメル熱電対によって測定した。No. 9セルの暗抵抗は50°Cのときの60kΩから-80°Cにおける3.4MΩまで、温度低下に対して指数関数的に増加する。したがって、セルの暗抵抗の変化にマッチングした負荷抵抗を選択すべきであるが、本測定では簡便のため負荷抵抗は0.1MΩ一定とした。温度特性は図に見るように、冷却によって信号電圧は漸増し、比応答率は温度低下に対して指数関数的に増加する。な

第5図 黒体炉温度対信号電圧および比応答率

Fig. 5. Variation of the responsivity with the blackbody temperature.

第 6 図 信号電圧および比応答率の温度特性

Fig. 6. Variation of the signal voltage and the responsivity with the cell temperature.

お、光源が $1.2\mu\text{m}$ の単色光に対しても PbS セルの温度特性は第 6 図の特性と同じ傾向である。

第 7 図および第 8 図はセルに照射する放射束の断続光周波数を変化したときの信号電圧および比応答率の特性を示す。ここに、周波数特性の測定はセル温度をパラメータとし、光源は $1.2\mu\text{m}$ の単色光、セルの放射照度は $1.54 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ である。断続光周波数(以後、単に周波数と呼ぶ)の変化は光チョッパの歯数および駆動モータの回転数を変えて行なった。これらの図に見るように、周波数の増加につれて信号電圧および比応答率は低下しているが、これは主として PbS セルの時定数に起因するものである。この場合の負荷抵抗も $1\text{M}\Omega$ 一定であり、これは第 3 図および第 4 図における No. 19 セルの負荷抵抗の値 ($5\text{M}\Omega$) と異なる。このため、第 3 図、第 4 図に示した No. 19 セルの比応答率と、これらと同じ動作条件における第 8 図の比応答率との間にはかなりの差が認められる。

いまセルの時定数を τ 、周波数を f とすると、比応答率の周波数特性は次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$S_1(f) = S_1(0) / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\omega = 2\pi f$ 、 $S_1(0)$ は $2\pi f\tau \ll 1$ と見なせるような低い周波数のときの比応答率である。したがって、比応答率の周波数特性において、その値が低周波のときの -3dB となる周波数 f_1 を求め、 $2\pi f_1\tau = 1$ から時定数 τ を求めることができる。第 8 図において、 $f = 90\text{Hz}$ における比応答率を $S_1(0)$ と見なして時定数を求めると、 19°C 以下の低温では τ は約 $700\mu\text{s}$ であり、 50°C のときは約 $430\mu\text{s}$ である。

第 7 図 信号電圧の周波数特性

Fig. 7. Dependence of the signal voltage on the chopping frequency.

第 8 図 比応答率の周波数特性

Fig. 8. Dependence of the specific responsivity on the chopping frequency.

〈4.2〉 比雑音の諸特性 第 9 図は PbS セルのバイアス電圧対雑音電圧および比雑音の特性 (室温) を示す。バイアス電圧を印加しないときの非電流雑音は約 $2 \times 10^{-7} \text{ V}$ である。PbS セルの雑音は、電流雑音が著しく大きく、バイアス電圧約 10V 以上では雑音は電流雑音成分だけと見なしてもよい。図に見るように、電流雑音成分が支配的な範囲では雑音はバイアス電圧に比例して直線的に増加しており、また比雑音はバイアス電圧に依存せずほぼ一定となっている。

第 10 図は PbS セルの雑音の周波数特性を示す。バイアス電圧は 22.7V 以上であるから、雑音スペクトルは電流雑音成分のみと考えてよい。図に見るよう

第 9 図 バイアス電圧雑音電圧および比雑音
Fig. 9. Dependence of the noise with the bias voltage.

第 10 図 雑音電圧および比雑音の周波数特性
Fig. 10. Noise spectrum of PbS cell.

に比雑音はバイアス電圧に依存せず、周波数の増加とともに減少しており、Lummis 氏らの得ている結果⁽¹⁰⁾と定性的に一致している。Lummis 氏らの解析によれば、PbS セルの電流雑音の成分は $G-R$ 雑音と $1/f$ 雑音であり、 $G-R$ 成分が優勢であるほど比雑音の周波数特性は低周波領域でより平坦になることが示されている。第 10 図の比雑音の低周波域での減少の傾きが Lummis 氏らの求めている特性よりも大きいことから、真空蒸着法による PbS セルの雑音は、低周波領域での $1/f$ 成分がかなり主体を占めているものと考えられる。

pn 接合を始め多くの半導体素子で $1/f$ 雑音が問題となっており、その研究も行われているが、その発生機構についてはまだ完全な結論を見ていない⁽¹¹⁾。しかし、現在のところ $1/f$ 雑音の原因は微結晶粒子間の

接触にあり、また半導体表面の性質によって著しく影響を受けることが知られている。試作セルの PbS 薄膜は電子顕微鏡で調べたところ、単結晶化した $1\mu\text{m}$ 前後の微結晶粒子から構成されている⁽¹²⁾。一方、化学的沈殿法による膜は、Mahlman 氏⁽¹²⁾によれば膜の全面にわたって光導電性は均一である。筆者らの実験でも、真空蒸着法による PbS 膜の大部分には光起電力効果も認められるが、化学的沈殿法による膜では光起電力効果は全く見られない。このように、PbS 膜の製法の違いによって生成膜の微視的構造にかなりの差異が生じることも考えられる。このような膜の微視的構造の違いと関連して、 $1/f$ 雑音成分を定量的に検討することは今後に残されている課題かと思われる。

第 11 図は、バイアス電圧をパラメータとした PbS セルの雑音の温度依存性を示す。図に見るように、雑音電圧はセルを冷却するほど著しく減少する。しかし比雑音は温度低下に対してそれほど著しい減少を示していない。この測定における 200 Hz の周波数では、雑音の主成分は $1/f$ 雑音である。もし、雑音の主成分が $G-R$ 雑音であるとすれば、 $G-R$ 雑音はキャリアの発生、再結合あるいは捕獲のゆらぎによるキャリア密度のゆらぎに起因すると考えられるので、比雑音は冷却によって著しく減少することが期待できよう。

〈4.3〉 検出率の諸特性 第 12 図は室温における試作セルの検出率 D^* のバイアス電圧特性を示す。この測定における光源は 673 K 一定に保った黒体炉、周波数は 200 Hz である。図に見るように、検出率 D^* はバイアス電圧 50 V 付近に最大値をもっている。

第 13 図は検出率 D^* の周波数特性を示す。この場

第 11 図 雑音電圧および比雑音の温度特性
Fig. 11. Dependence of the noise on the cell temperature.

第 12 図 バイアス電圧対検出率 D^*

Fig. 12. Variation of the detectivity D^* with the bias voltage.

第 13 図 検出率 D^* の周波数特性

Fig. 13. Variation of the detectivity D^* with the chopping frequency.

合の光源は波長 $1.2\mu\text{m}$ の単色光であり、セルのバイアス電圧は 22.4V である。検出率 D^* は周波数 1.2kHz 付近で最大値を示し、この特性から判断する限りでは周波数を 1.2kHz 付近に選べば、検出能力を十分に発揮できるが、実用的には光チャップの回転羽根の機械工作における精度および駆動モータの回転数による制約を受ける。

第 14 図は検出率 D^* の温度特性を示す。ここに周波数は 200Hz 一定とし、図の実線は No. 9 セルの特性（光源は $1.2\mu\text{m}$ の単色光および 673K の黒体炉）、点線は No. 19 セルの波長 $1.2\mu\text{m}$ の単色光に対する特性である。図に見るように、光源の種類にかかわらず、検出率 D^* は温度の低下に対して指数関数的に増加している。なお、試作セルはその構造が平板形であるので、デュアビン内の冷却板あるいは電子冷凍素子の冷却板上にセルを貼布して、これを容易に冷却する利点を有している。

5. む す び

以上、真空蒸着法による PbS セルについて、その

第 14 図 検出率 D^* の温度特性

Fig. 14. Temperature dependence of the detectivity D^* .

性能指数を表わす比応答率、比雑音、検出率 D^* を導入することによって試作セルの動作特性についての詳細な検討を施してきた。これらの性能指数のバイアス電圧依存性はほとんどないが、光源の種類、断続光周波数、セル温度などによっては影響を受けることもある。

試作セルの雑音は電流雑音が支配的であり、特に比雑音スペクトルから判断すると、低周波領域では化学的沈殿法による PbS セルよりも $1/f$ 雑音成分が優勢であるように思われる。このことは、製作方法による PbS 膜の微細構造あるいは表面状態の差異の存在を示唆しているものと考えられ、今後さらに詳しい検討を施すことが必要であると思う。

PbS セルの最適動作条件を設定するのに検出率 D^* の動作特性が有効であることがわかったが、試作セルは、その検出率 D^* から評価しても赤外線応用機器の検出器として十分実用に供し得るものと思われる。

(昭和 49 年 1 月 30 日受付、同 49 年 8 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 栗岡・芹澤：電学誌 **83**, 982 (昭 38-6)
- (2) R. L. Petritz: Phys. Rev. **104**, 1508 (1956)
- (3) H. E. Spencer: J. Appl. Phys. **31**, 505 (1960)
- (4) R. C. Jones: Proc. I. R. E. **47**, 1495 (1959)
- (5) 関：雑音 152 (昭 30) 岩波書店
- (6) 田宮：電学誌 **73**, 1175 (昭 28)
- (7) 芹澤・栗岡・土田：昭 39 電気四学会連大 173
- (8) 芹澤・栗岡・土田：昭 40 同上 397
- (9) R. C. Jones: "Advances in Electronics" **5**, 1 (1953)
- (10) F. L. Lummis & R. L. Petritz: Phys. Rev. **105**, 502 (1957)
- (11) 菅野：昭 39 電気四学会連大シンポジウム S. 11-1
- (12) G. W. Mahlman: Phys. Rev. **103**, 1619 (1956)