

電子部品欠陥検査への1/fノイズの応用

吉田裕道* 三上和正*

Application of 1/f noise to the inspection of defects in electron devices

Hiomichi Yoshida and Kazumasa Mikami

Abstract 1/f noise has a power-spectrum that is inversely proportional to frequency. 1/f noise generated in semiconductors was considered and the formula of the sensitivity of 1/f noise was obtained. According to the formula, the mean square value of 1/f noise was increased by the fourth power of current density. Because of this high sensitivity to the current concentration, 1/f noise is available to detect device faults. Then photoconductive cells were examined and the faults were found from the 1/f noise curve. 1/f noise of carbon potentiometers was measured in gas corrosion tests of flowing sulfa-dioxide. The change of 1/f noise value after being exposed to gas was about 60 times larger than that of the resistance value. It showed that 1/f noise was available for finding out the defects in electron devices.

Keywords Noise, 1/f noise, Sensing, Defect

1. はじめに

パワースペクトルが周波数 f に反比例する雑音を $1/f$ ノイズと言う。実際にはパワースペクトルが f^{-1} に正確に比例するだけではなく、 f に比例し、 f が1に近い雑音を総称して $1/f$ ノイズと呼んでいる。 $1/f$ ノイズは、1925年、J. B. Johnsonによって真空管の電流中で発見され、その後、抵抗器や半導体素子等の電子部品等にも広範に存在することが明らかになっている¹⁾。半導体の場合は $1/f$ スペクトルが計測される上限は $10^3 \sim 10^6$ Hz であり、より高い周波数では熱雑音の方が大きくなる。 $1/f$ スペクトルの下限は発生源により 10^{-7} Hz にも及ぶと言われているが、一般にドリフトとの区別や再現性の確認が困難である^{2,3)}。 $1/f$ ノイズは電流を流したときだけ発生し、雑音電圧はバイアス電圧に比例する。表1に半導体内部で発生する主なノイズの特徴を示す。図1にコンピュータで作成した3種類の雑音の波形を示す。図の(a)はランダムな雑音の波形で熱雑音がこの波形をもつ。周波数特性は平坦でパワースペクトルは周波数によらない。(b)は $1/f^2$ 雑音でBrown雑音とも呼ばれる。数学的には(a)の波形を1回積分するとこのような形になる。

発生 - 再結合雑音がトラップの時定数より短い範囲(周波数 $f > 1/\tau$) でこの形を示す。(c)が $1/f$ 雑音の波形である。

図2に演算増幅器の雑音の測定例を示す。演算増幅器

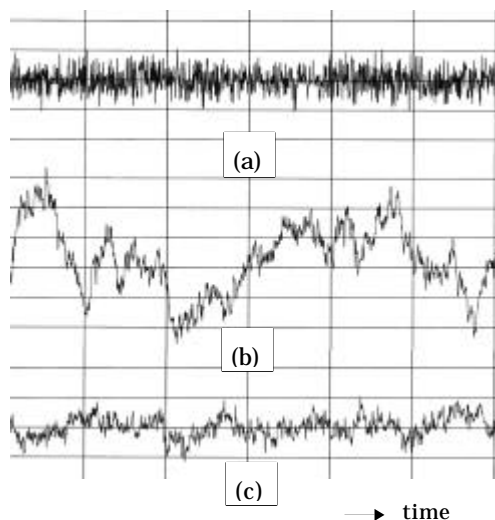


図1 雑音の波形 (a)熱雑音 (b)Brown雑音(f^{-2} 雑音) (c) $1/f$ 雑音

*電子技術グループ

表1 半導体中の主なノイズ

名称	1/f雑音 1/f noise	熱雑音(白色雑音) Thermal noise (White noise)	散弾雑音 (ショット雑音, Shot noise)	発生 - 再結合雑音 Generation-Recombination noise
発生原因	不明	キャリアのランダム熱運動	電荷の不連続性	キャリアの発生と再結合
パワースペクトル	$\frac{1}{f}$ $\langle u_n^2 \rangle \propto \frac{df}{f}$ u_n は雑音電圧, f は周波数, df は帯域幅	平坦 $\langle u_n^2 \rangle = 4k_B TRdf$ k_B はボルツマン定数, T は絶対温度, R は抵抗値	平坦 ショットキダイオードの場合 $\langle u_n^2 \rangle = 2k_B TR_0 \left\{ \frac{I + 2I_0}{I + I_0} \right\} df$ R_0 はダイオードの内部抵抗, I_0 は逆漏れ電流	低周波域で平坦, 高周波域で f^{-2} $\langle u_n^2 \rangle \propto \frac{t}{w^2 t^2 + 1} df$ $\omega = 2\pi f$ はトラップの時定数

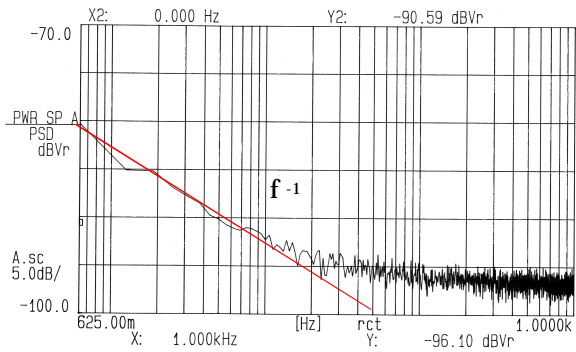


図2 オペアンプの雑音周波数分布 (TL072 非反転増幅回路1000倍, 帰還抵抗 1 M, 入力接地抵抗 1 k)

はTL072で入力段は接合型のFETである。増幅率1000倍の非反転増幅回路を1M と1k の抵抗器で構成し, 非反転入力端子を接地した。縦軸はパワースペクトル密度をデシベル表示したもので, 横軸は周波数である。直線は1/f スペクトルの傾きを表し, 雑音は, 約0.5 Hz ~ 30 Hz で1/fスペクトルを示している。

筆者等は, 1/fノイズは電流密度の4乗に比例して発生し, 半導体内部で起きる電流の部分的な集中に対してその大きさが変化することを明らかにしてきた⁴⁻¹¹⁾。本稿では, 1/fノイズのその特徴を生かし, 実際の電子デバイスで欠陥を検出する方法について述べる。

2. 1/f雑音を用いた欠陥検出

2.1 欠陥検出の原理

半導体内部で発生し, 電極間で計測される1/fノイズの大きさを求める研究は約30年前に開始され, 現在最も広範囲に適用できる式(1)が筆者らによって導かれている。この式はグリーン関数を使用して求めたもので, 1/fノイズの感度の研究から明らかになったものである¹¹⁾。

$$\langle u_n^2 \rangle = \frac{1}{I_T^2} \iiint_V \Delta r_n(Q)^2 \mathbf{i}(Q)^4 dv_Q \quad (1)$$

ただし, 左辺はノイズの2乗平均値, I_T は端子間の電流, $\mathbf{i}(Q)$ は電流密度, Δr は抵抗率の変化, v_Q は半導体の体積である。

一方, 電極間の抵抗値Rは各部の電力の消費から計算できるため次式で表される。

$$R = \frac{r}{I_T} \iiint_V \mathbf{i}(Q)^2 dv_Q \quad (2)$$

式(1)から1/fノイズの2乗平均値は電流密度の4乗を積分した値に比例し, 式(2)から抵抗値は電流密度の2乗を積分した値に比例する。抵抗体内部の局所的な電流集中に対しては, 抵抗値の変化を測定するよりも, 1/fノイズを測定する方が感度は高い。したがって, 部分的に電流が集中するような欠陥が, 1/fノイズによって検出可能である。部分的に電流が集中する例として, 図3に中央部にスリットをもつ抵抗器の電流電圧分布を示す。電流密度はスリットの先端部で最も大きく, その部分で1/fノイズも式(1)にしたがって大きくなっている。スリットを入れることによって抵抗値をトリミングする場合は, 1/fノイズの増加を考慮することが必要である。

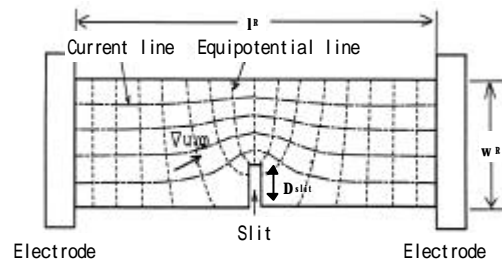


図3 中央部にスリットをもつ抵抗器の電流電圧分布

2.2 CdS光導電素子不良品の検出

CdS光導電素子の場合 照射光量を増すと抵抗値は指数関数的に減少する。正常な素子では, 一定の電圧をかけたときに, 1/fノイズの2乗平均値は抵抗値に比例する。

$$\langle u_n^2 \rangle \propto R \quad (3)$$

しかし、電極とCdS間に接合不良があるものは、照射光量を増加した場合に、抵抗値は減少するものの1/fノイズは増加する現象が現われた。

[実験方法] 1/fノイズを測定した試験品は、ハーメチックシールしたH社とM社の製品各100個である。光源は、色温度2859K、光度100カンデラの標準電球を直流点灯したものを使用した。照度は、光源と試験品の距離を変えて4~400lxの間を7段階に変化させた(1lx = 4μW/cm²)。CdSの光感度の特性を表す値を測定し、その値の近い試験品を直列に接続して直流バイアス電圧を加えた。直列接続した中点の雑音を増幅した後、選択度Q=10の帯域通過フィルタで周波数を分離した。中心周波数は200, 400, 1k, 2kHzである。

[実験結果] 図4に横軸にCdS素子の抵抗値の逆数、縦軸には中心周波数1kHzの1/fノイズの大きさを示した。抵抗値は照度を変えて変化させたものである。試験品1では、1/fノイズの大きさと抵抗値の逆数の間に式(3)の関係が成立している。抵抗値とキャリア数(CdSの場合は電子数)は逆比例するため、1/fノイズの2乗平均値がキャリア数Nに逆比例すると言う一般則³⁾はこの場合も成立している。しかし、試験品2では1/fノイズは式(3)と異なった関係を示している。対数プロットした1/fノイズの係数は1/2に近い値となった。雑音の2乗平均値は、抵抗値Rに逆比例しキャリア数Nに比例している。試験品は定電圧源でバイアス電流を流しているため、電流はCdSの抵抗値に逆比例している。

したがって、試験品2は、CdS素子の一部に大きな1/fノイズ発生源があり、バイアス電流の増加によりその部分から大きな1/fノイズが発生したものと考えられる。試験品1相当の1/fノイズ特性を持つもの20個と試験品2相当のもの3個を抽出して環境試験を実施した。試験品1の

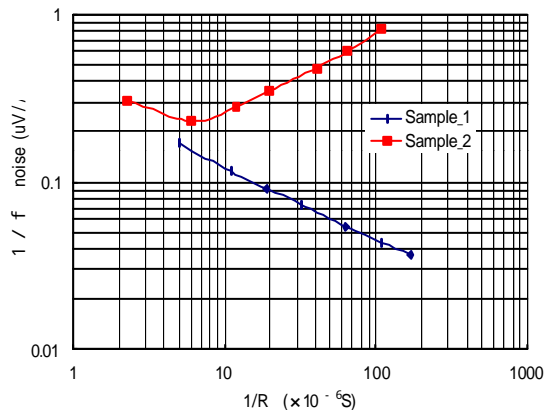


図4 抵抗の変化と1/f雑音の関係

抵抗値は、温度80℃で1000時間放置することによって、照度10lxにおける抵抗値変化が10%以下であった^{1,2)}。一方、試験品2の素子は、同じ時間、同じ条件で抵抗値が20~60%増加した。試験品1と試験品2は試験品1の方が抵抗値が小さい傾向がみられたが、照度の増加とともに両者とも同じように抵抗値は小さくなり、1/fノイズ以外の初期特性では大きな差が見られなかった。図4の関係は、1/fノイズの中心周波数が変化しても同様に観測された。

なお、CdSには時定数の長いトラップが存在し、トラップの量を直接測定することによっても、CdS素子の経時変化が予測可能になると思われる。半導体の欠陥がトラップになることも多く、それは1/fノイズの発生と密接な関係がある。

2.3 半固定抵抗器の環境試験評価への応用

1/fノイズを利用し、SO₂環境試験における半固定抵抗器の評価を行った。式(1)から電極間で観察される1/fノイズの2乗平均値は電流密度の4乗を積分した値に比例する。一方、抵抗値の変化は式(2)から電流密度の2乗に比例する。例えば、抵抗体の一部に抵抗値が極めて大きくなる欠陥があり、その部分の電流が1/1000の部分に集中して電流密度が平均の5倍になったと仮定すれば、全体の抵抗値は約2%、1/fノイズは約62%増加する。したがって、SO₂環境試験により主に接点表面の状態が変化したと思われる半固定抵抗器について、抵抗値と1/fノイズの測定を行った¹³⁻¹⁵⁾。半固定抵抗器の外観と測定端子を図5に示す。

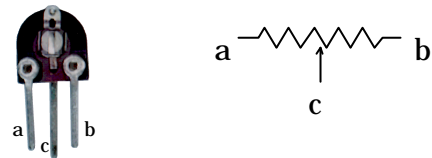


図5 半固定抵抗器の外観と端子

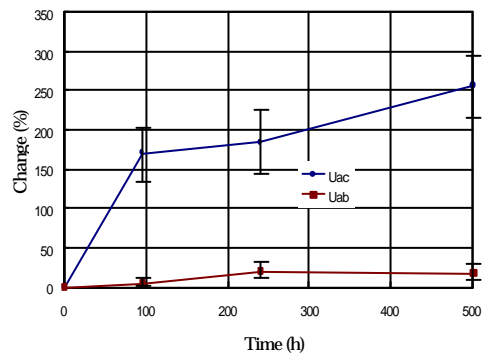


図6 半固定抵抗器の1/f雑音の経時変化

(R=10kΩ, n=10, 25%, 75%RH, SO₂=25ppm, Uac(0)=0.75uV/V, Uab(0)=0.34uV/V, P=1/8W)

環境試験条件はIECの規格に準拠して、SO₂濃度25 ppm、温度25℃、湿度75%を使用した。試料は炭素皮膜半固定抵抗器で、公称抵抗値は10kΩ、試料数は10個である。試料のしゅう動片は中点近傍に設定してラッカーで固定した。測定時間は、0, 96, 240, 500時間である。測定項目は、抵抗値と1/f雑音で、1/f雑音は1kHzを中心に1ディケードの周波数をQuantech Model-2136を使用してMIL規格に基づいて測定した。測定時の電圧は、電力が1/8Wになるように35.4Vを加えた。

抵抗値の経時変化は、端子接点としゅう動接点のa-c間の抵抗値R_{ac}の変化量が一番大きく、その値は最大で4.3%であった。図6に1/f雑音の経時変化を示す。接点a-c間でその変化量は257%に達している。同試験による抵抗値の変化量4.3%と比較すると60倍も大きく、経時変化に対する1/fノイズのセンシング感度が高いことを示している。周波数1kHzを中心とした1/fノイズの測定は交流バイアスでも可能で、半固定抵抗器の摺動子の位置によらず容易に実施可能である。1/fノイズの計測精度は印加電圧、抵抗値、及び周波数に依存するが、本実験条件では約0.5dB(約6%)である。1/fノイズは抵抗器等の電子部品を環境試験で評価する場合のパラメータとして有効であることがわかった。

2.4 固定抵抗器の組立検査への応用

固定抵抗器の場合、前述のように抵抗値調整用スリットの形状や材料の種類によって1/fノイズは変化する。その他、リード線取り付けの方法によっても1/fノイズが増加することがある。製造出荷後、経時変化が大きいとのクレームの相談を受けて図7に示す固定抵抗器を検査した。抵抗体は炭素をアルミナセラミックの円筒上に皮膜したものである。抵抗値の変化では0.1%程度の違いであり、抵抗体の膜厚の誤差範囲であった。しかし、1/fノイズは個々の素子によって個体差が大きく、平均より3dB以上大きいものが存在した。同様の構造をもつ他の正常な製品を調べた結果、1/fノイズがこのように大きくばらつくものはなかった。原因は電極キャップのかみ合わせの不良であり、その部分で集中的に1/fノイズが発生していると推定できた。組立工程でキャップを締める力を増加させる等の調整を行い、1/fノイズを減らし経時変化の改善をはかることが出来た。

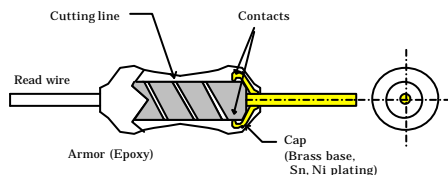


図7 円筒形固定抵抗器の構造

3. まとめ

1/fノイズが電流密度の4乗に比例して大きくなることを利用し、半導体内部で電流集中をもたらす欠陥及び酸化や不純物によるトラップの増加を検出した。その結

果、CdS光導電体素子では経時変化の大きい不良品を初期検査で発見する方法を明らかにした。発見した不良は他の照度-抵抗値特性等からは見つけることが出来ないものだった。また、半固定抵抗器のSO₂環境試験では、抵抗値の変化の60倍も大きく1/fノイズが変化することがわかった。半固定抵抗器のような表面が露出した電子部品の評価には1/fノイズの測定が有効である。さらに、固定抵抗器のリード線取り付けようのキャップの締め付け不良によっても1/fノイズは大きく発生することがわかった。

1/fノイズは多くの異なる現象に共通して観測されており、その発生に同じ原因があると考えられる研究者は多い。しかし、普遍的な発生のメカニズムを統一して説明する理論は存在しない。1/fノイズは、発見以来75年も経過しているにもかかわらず未だ謎を残している身近な自然現象である。不可解な自然現象を解き明かす興味からも、また、工学的な応用からも今後一層の研究が求められている。

参考文献

- 1) J. B. Johnson, Phys. Rev., 26, 71, (1925).
- 2) A. van der Ziel, Noise in Solid State Devices and Circuits, p. 93, John Wiley & Sons, (1986).
- 3) F. N. Hooge, Proceedings of the symposium on 1/f fluctuation, p. 88, Tokyo, Japan, (1977).
- 4) 宮島良一, 吉田裕道, 東京都立工業技術センター研究報告, 第3号, pp. 101-105 (1973).
- 5) 吉田裕道, 電子通信学会論文誌, Vol. 57 - C, No.1, pp. 30-31 (1974).
- 6) H. Yoshida, Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 3, pp. 1159 - 1161, (1978).
- 7) H. J. Butterweck, Philips Res. Repts., Vol. 30, pp. 316 - 321, (1975).
- 8) 吉田裕道, 電子通信学会論文誌, Vol. J65 - C, No.1, pp. 48 - 54, (1982).
- 9) T. G. M. Kleinpenning, Journal of Applied Physics, 48, 7, pp. 2946 - 2949, (1977).
- 10) L. K. J. Vandamme, W. G. van Bokhoven, Applied Phys. Vol. 14, pp. 205 - 215, (1977).
- 11) H. Yoshida, IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing, 16, 3, pp. 344 - 349 (1993).
- 12) 町田幹夫, 高橋治太郎, 宮島良一, 吉田裕道, 三上和正, 東京都立工業技術センター研究報告, 第7号, pp. 47 - 52, (1978).
- 13) 三上和正, 吉田裕道, 高橋治太郎, 東京都立工業技術センター研究報告, 第9号, pp. 155 - 156 (1980).
- 14) 三上和正, 吉田裕道, 高橋治太郎, 東京都立工業技術センター研究報告, 第9号, pp. 155 - 156, (1980).
- 15) 吉田裕道, 三上和正, 高橋治太郎, 川口尚宏, 佐川雅彦, 電気学会論文誌, Vol. 47, No.12 (1996).

(原稿受付 平成12年8月1日)