

# MOS 形電界効果トランジスタの低周波雑音について (第 1 報)

Low Frequency Noise in MOS Field Effect Transistors

安 達 芳 夫・松 下 孟 史・上 村 幸 守

Yoshio ADACHI, Takeshi MATSUSHITA and Yukimori UEMURA

## 1. ま え が き

最近、電界効果トランジスタが開発され、この素子の雑音特性に非常に関心が寄せられている。半導体の低周波雑音で支配的になる  $1/f$  雑音は、主として表面から発生されると考えられているが<sup>1)</sup>、MOS 形電界効果トランジスタ (以下 MOS トランジスタと略す) は表面を利用するために、大きな  $1/f$  雑音を発生する。この大きな  $1/f$  雑音を発生するにもかかわらず、MOS トランジスタは集積回路に非常に適した構造を持つ素子であるので、今後広く用いられると思われる。そこで MOS トランジスタの低周波雑音の低減化を目的として、 $1/f$  雑音の発生機構を、MOS トランジスタの温度を室温、200°K、85°K とそれぞれ変化させて測定して調べた。実験結果から、 $1/f$  雑音の源として McWhorter の提案した slow surface state<sup>2)</sup> (以下略して slow state と略す) がかなり有力である。

## 2. 雑音理論<sup>3)</sup>

MOS トランジスタの構造を図 1 に示す。MOS トランジスタの低周波領域の雑音には、チャンネル熱雑音、ゲート 1・ソース間、ゲート 2・ソース間をそれぞれ流れるリーク電流によるショット雑音、チャンネルとサブストレートの間の空乏層で発生する発生・再結合雑音、チャ

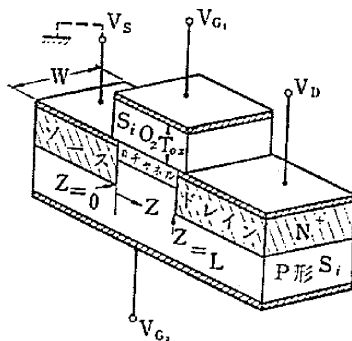


図 1 n チャンネル MOS トランジスタ

ネル内で発生する発生・再結合雑音、およびいわゆる  $1/f$  雑音があるが 25 kHz 以下の低周波領域では  $1/f$  雑音に比べて、 $1/f$  雑音以外の雑音は無視できる。

McWhorter は半導体の  $1/f$  雑音を求めているが、その理論を MOS トランジスタに拡張すると、 $1/f$  雑音  $i_{nf}^2$  は

$$i_{nf}^2 = \frac{q^2 \mu^2}{f \ln(\tau_2/\tau_1)} \left( \frac{W}{L^3} \right) \left( \frac{1}{N_0} + \frac{1}{N_{n1}} + \frac{1}{N_{n2}} \right)^{-1} V_D^2 \Delta f \quad (1)$$

であたえられる。ここで  $q$  は電子の電荷、 $\mu$  は移動度、 $W$  はチャンネル幅、 $L$  はチャンネル長、 $N_0$  はチャンネル内の電子の単位面積あたりの密度、 $N_{n1}$  は空の slow state 密度、 $N_{n2}$  は満ちている slow state 密度、 $\tau_2$ 、 $\tau_1$  はそれぞれチャンネルと slow state との間の電荷の交換の時定数  $\tau$  の上限と下限を示し、 $V_D$  はドレイン電圧、 $\Delta f$  はバンド幅をあらわす。 $1/f$  雑音が支配的な周波数での MOS トランジスタの雑音指数  $F$  は、信号源抵抗  $R_s$  をゲート 1・ソース間に入れた場合、入力回路の容量を  $C$  として、 $\omega CR_s \ll 1$  のような  $R_s$  を選べば、次式であたえられる。

$$F = 1 + \frac{q^2 T_{ox}^2}{4kTR_s \epsilon_{ox}^2 W \cdot L \ln(\tau_2/\tau_1)} \times \left( \frac{1}{N_0} + \frac{1}{N_{n1}} + \frac{1}{N_{n2}} \right)^{-1} \frac{1}{f} \quad (2)$$

ここで  $T_{ox}$  は酸化膜の厚さ、 $\epsilon_{ox}$  は酸化膜の誘電率をあらわす。

## 3. 実験方法

MOS トランジスタの出力雑音電流自乗平均値  $\bar{i}^2$  は、

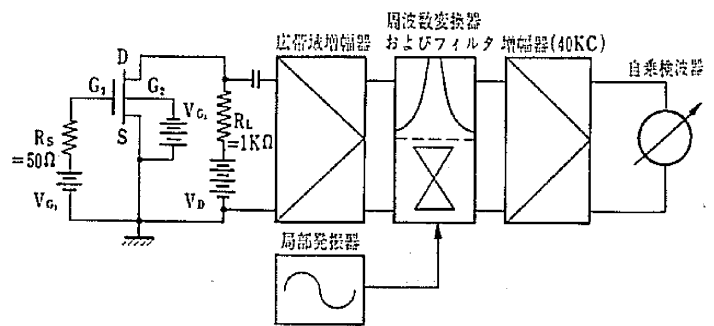


図 2 MOS トランジスタ(n チャンネル)の出力雑音測定回路

図 2 に示す測定回路で、負荷抵抗  $R_L$  の両端に生ずる  $\bar{i}^2$  を測定し、この  $\bar{i}^2$  の値と次式より求めた。

$$\bar{i}^2 = (G_d + G_L)^2 \bar{v}^2 \quad (3)$$

ここで  $G_d$  はドレインコンダクタンス、 $G_L = 1/R_L$  は負荷コンダクタンスを表わす。 $G_d$  は  $R_X$  メータで測定した。

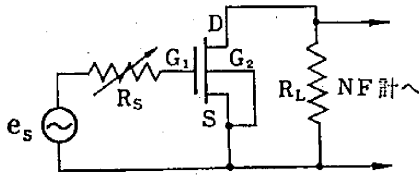


図 3 雑音指数測定方法

$F$  の測定方法を図 3 に示す。

4. 実験結果と考察

$\bar{i}^2$  の周波数特性の結果を図 4 に示す。このように MOS トランジスタは低周波でほとんど  $1/f$  スペクトル

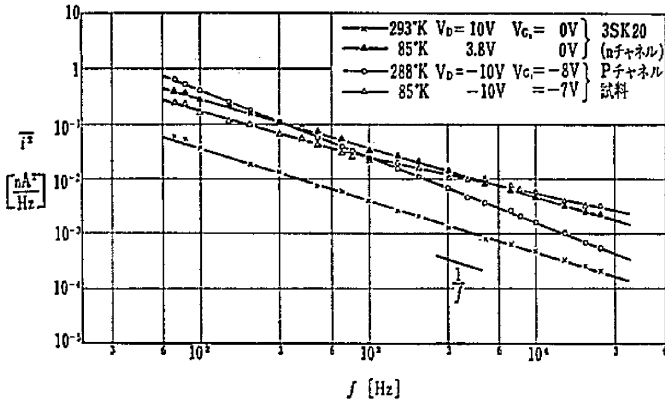


図 4  $\bar{i}^2-f$  特性

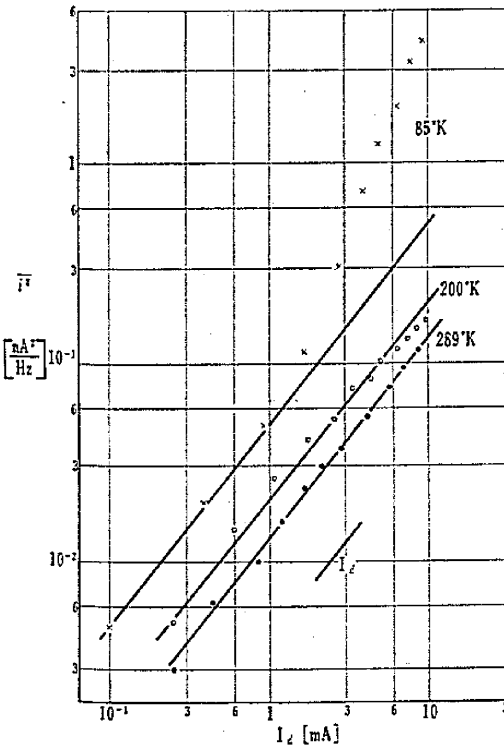


図 5  $\bar{i}^2-I_d$  特性 ( $L=15 \mu, f=1 \text{ kHz}$ )

を示し、この測定周波数範囲では  $\bar{i}^2 = \bar{i}_{n^2}$  とみなせる。

次にチャネル長の異なる試料 ( $n$  チャネル) で実験したが、その大きさを表 1 に示す。チャネル飽和後の  $\bar{i}^2 - I_d$  特性を図 5 に示す。図 5 によると  $\bar{i}^2$  は  $I_d$  に比例しているが、これは (1) より  $\bar{i}_{n^2}$  はチャネル飽和後、飽和ドレイン電圧  $V_{Ds^2}$  に比例し、 $I_d$  は  $V_{Ds^2}$  に比例す

表 1 チャネル長の異なる試料 ( $n$  チャネル) の大きさ

チャネル長 $L$	5 $\mu$	15 $\mu$	25 $\mu$
チャネル幅 $W$	518 $\mu$		
酸化膜の厚さ $T_{ox}$	1500 $\text{\AA}$		

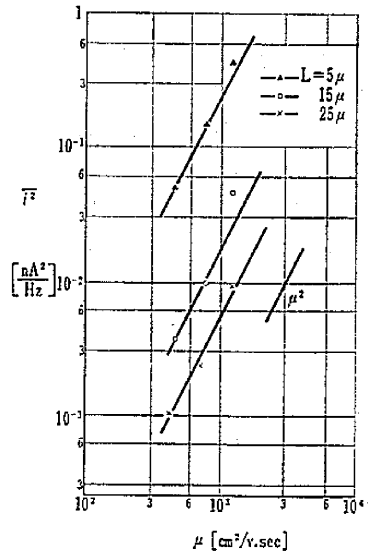


図 6  $\bar{i}^2-\mu$  特性 ( $f=1 \text{ kHz}$ )

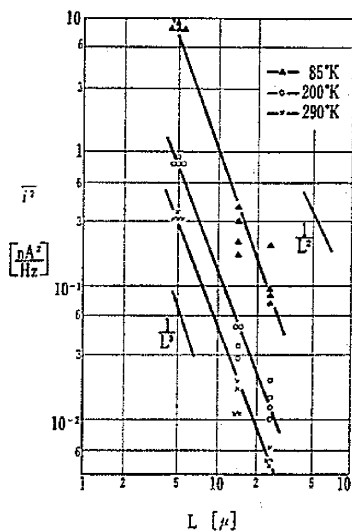


図 7  $\bar{i}^2-L$  特性 ( $f=1 \text{ kHz}$ )

るからである。 $V_D=1V$  における  $\bar{i}^2-\mu$  特性を図 6 に示す。 $\mu$  は温度を変えることによって変化させた。図 6 によると  $\bar{i}^2$  は  $\mu^2$  に比例しているが、これは (1) 式より理解される。図 5 より  $\bar{i}^2$  は  $I_d$  に比例するので、各チャネル長ごとと同じ  $I_d$  になるようにしてチャネル長の違いによる雑音比較をし、 $\bar{i}^2-L$  特性を図 7 に、

研 究 速 報

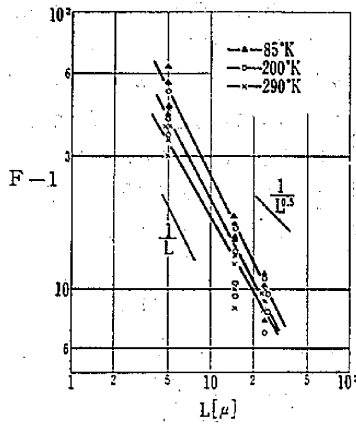


図 8 (F-1)-L 特性  
f=1kHz, R<sub>s</sub>=100kΩ, R<sub>L</sub>=10kΩ

5. む す び

(1) 式が MOS トランジスタの 1/f 雑音を比較的良好に説明できることがわかった。MOS トランジスタの雑音

(p.51 よりつづく)

における駐車場においても、到着台数分布・発車台数分布はともにポアソン分布にしたがうと考えるのもよいようである。

さらに、区分単位時間内に、駐車を終了して発車する自動車の台数と、駐車のために到着する自動車の台数の比を流出入量比とすると、この流出入量比は、駐車場の利用度を考える場合にきわめて重要な意味を持つものである。

実測結果から、最も混雑を予想される昼食時における流出入量比の推移を 5 分間単位で求めたものを(図11)に

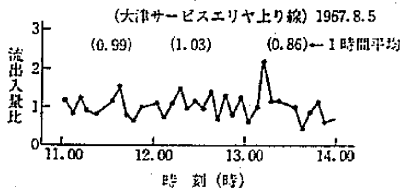


図 11 時刻別 5 分間流出入量比

(F-1)-L 特性を図 8 にそれぞれ示す。図 7 より  $\bar{F}$  はほぼ  $L^{-3}$  に比例しているが、これは (1) 式より理解され、また図 8 より (F-1) がほぼ  $L^{-1}$  に比例することは (2) 式よりわかる。

指数を減少させるには、(2) 式より slow state の密度を減少させるのが最も望ましいが、MOS トランジスタの形状についていえば、チャネル幅またはチャネル長を大きくするか、酸化膜の厚さを薄くすればよい。また slow state 密度が SiO<sub>2</sub> のそれより小さい、あるいは、同じオーダーなら SiO<sub>2</sub> の誘電率より高い誘電率を持つ膜を用いるのも、雑音指数低減化に有効である。

謝辞： 試料を製作していただいた日立製作所の大野稔氏、日本電気の藤江明雄氏、ソニーの石谷彰康氏、渡辺誠一氏、また実験にご協力して下さった日大卒論生林光明氏に感謝する。  
(1968年3月25日 受理)

参 考 文 献

- 1) T.G. Maple, L. Bess and H.E. Gebbie, J. Appl. Phys, 26 (1955) 490.
- 2) A.L. McWhorter "Semiconductor Surface Physics" Editor, R.H. Kingston (University of Pennsylvania Press, Philadelphia) p. 226.
- 3) 詳しくは、安達, 松下, 上村: 電気学会トランジスタ専門委員会資料 43-2, 昭和 43 年 2 月.

示してある。

(図11)から、流出入量比が 1 を中心にして増減を繰り返している状態が見られ、ここに示されているかぎりでは、一方的な駐車不能車の堆積が生じていないと考えられる。

4. お わ り に

高速道路のサービスエリアにおける駐車特性を得るための解析結果の 1 例を示した。今回は、本線交通量と駐車希望台数との 1 次相関関係の適合性、駐車場における到着台数分布ならびに発車台数分布のポアソン分布への適合度、混雑時の流出入量比の推移を明らかにしたが、次回は駐車時間分布について報告するつもりである。

(1968年3月26日受理)

参 考 文 献

- 1) たとえば、小林輝一郎: 駐車場に関する一考察, 第 2 回道路学会論文集 p.p. 547~550 (1954)
- 2) 米谷・加藤・稲見: 大都市中心部における駐車場問題について, 第 3 回日本道路学会論文集 p.p.764~768 (195)

