

# 等価回路解析による二重平板導波路型発振器の動作領域推定

福山職業能力開発短期大学校  
福山大学工学部

平 島 隆 洋  
田 中 聡

An Analytical Study of Operating Range for A Double Parallel Plane Guides Oscillator

Takahiro HIRASHIMA • Satoshi TANAKA

## 要約

平行平板導波路を構成した金属板の端面に固体素子としてHEMT (High Electron Mobility Transistor) を装荷し、その後部に反射板を設けた二重平板導波路型マイクロ波発振器において、従来解析してきた多素子発振器の構成単位であるFET 発振セルを単一素子発振器に適用し、その動作特性を等価回路を用いて周波数領域解析した。次に、Cバンドでの試作動作実験を行い、理論結果とほぼ一致することを確認した。

## I まえがき

衛星通信・衛星放送や携帯電話・自動車電話をはじめとする通信ネットワークの急速な発展により、マイクロ波を用いた通信需要が飛躍的に増大してきた。そのようななか、限られた電波資源を有効利用するために、信号および信号処理の多角化や狭帯域化が進められているが、従来用いられてきたX, Ku バンドまでの周波数領域では、いずれ加入者の増加・情報量の増大には対処できないため、ミリ波やサブミリ波などのより広い周波数帯域の電波資源の利用が求められている。

また、衛星通信・衛星放送では、衛星搭載用中継器や地上局用の高出力マイクロ波源として従来から用いられてきた進行波管をガンダイオードやHEMTなどの固体素子に置き換え、小型・軽量化および長寿命化、そして信頼性の向上を目指している。固体化マイクロ波発振器・増幅器で大電力を得るためには、電力合成が必須であり、ウィルキンソン合成器やハイブリッド回路を組み合わせた回路網による合成技術が従来から用いられてきた。しかしながら、ミリ波帯では回路による電力損失が無視できなくなるため、現在では多数の素子出力を空間に放射して出力合成を行う空間出力

合成法が注目されるようになってきた<sup>(1)・(3)</sup>。なかでも、Z.B.Popovicらによって提案された Bar-Grid Oscillator<sup>(4)</sup> や Planar Grid Oscillator<sup>(5)・(6)</sup> は、構造が簡略化でき高集積化が可能であるなどの利点から、ミリ波帯での電力合成器として有望視されている。

本報告では、平行平板導波路を構成した金属板の端面に固体素子としてHEMT を装荷し、その後部に反射板を設けた二重平板導波路型マイクロ波発振器<sup>(7)・(8)</sup> について、その単一素子装荷型発振器の動作特性を理論と実験により調べる。すなわち、従来解析してきた多素子発振器の構成単位であるFET 発振セルを単一素子発振器に適用し、その動作特性を等価回路を用いて周波数領域解析する。次に、Cバンドでの試作動作実験を行い理論結果と比較検討する。

## II 動作解析

### 1. 構造

発振器は図1および図2に示すように、一定間隔  $c$  で平行に配置された幅  $L_{wg}$  の3枚の金属板の端面にHEMT を装荷し、さらにこの金属板の端面から距離  $L_{bs}$  だけ隔てた位置に金属製反射板を配置した構造である。3枚の金属板は幅方向にTEM波を伝送する2

組の平行平板線路となっており、HEMTのゲートおよびドレインのリードを流れる高周波電流により各導波路に電磁界が誘起される。このとき、2組の平行平板導波路から出力側に現れる進行波の位相が同じであるような周波数および各辺の電流振幅の条件が成立するとき、安定した発振動作が可能となる。ここで、HEMT 1個分を含む領域を反射板に垂直に切り出した部分をFET発振セルと呼ぶことにし、これを図3に示す。

また、平行平板導波路を構成する金属板はバイアス線路および放熱板の役目を兼ねており、誘電体ブロックはマイクロ波の側方への漏れを防止するためのものである。

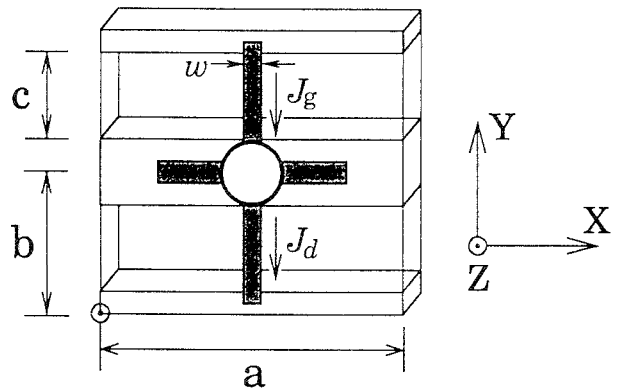


図3 FET発振セル

2. 等価回路モデルと発振動作

図4にFET発振セルの等価回路を示す。X<sub>r</sub>は金属板端面から反射板までの距離によって決まるリアクタンス、B<sub>s</sub>、B<sub>m</sub>は金属板間および次隣接金属板間の端部における漏れサセプタンス、X<sub>s</sub>、X<sub>m</sub>はHEMTのゲートおよびドレインのリードにおける自己リアクタンスおよび相互リアクタンスである。平行平板導波路内では、電界はY方向成分(図3参照)を考えるとTEMモードとTMモードの累積和で表され、この系のグリーン関数は次式で与えられる。

$$G(x, y | x', y') = \frac{1}{abk} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_{n,0})(k^2 - k_x^2)}{2ab\gamma_{mn}k^2} \cdot \cos k_x x \sin k_y y \cos k_x x' \sin k_y y' \quad (1)$$

ただし、m, nは正の整数、

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}, \quad k_x = \frac{m\pi}{a}, \quad k_y = \frac{n\pi}{2b}, \quad \gamma_{mn}^2 = k_x^2 + k_y^2 - k^2$$

さらに、HEMTリード部における電流密度をそれぞれJ<sub>g</sub>、J<sub>d</sub>とおき、フーリエ級数展開すると、

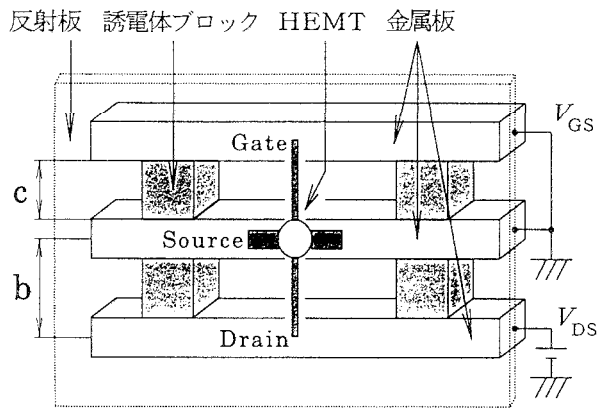


図1 発振器の構造

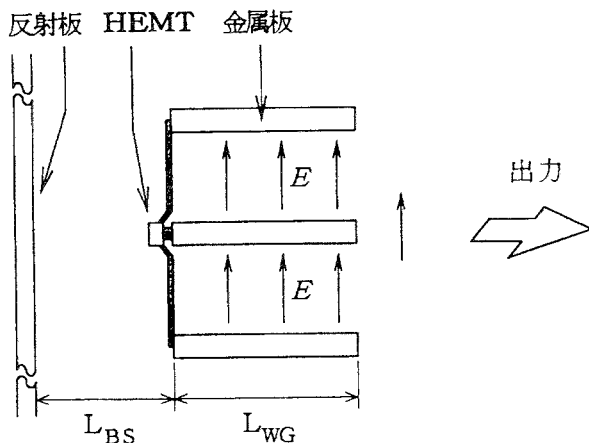


図2 発振器側面図

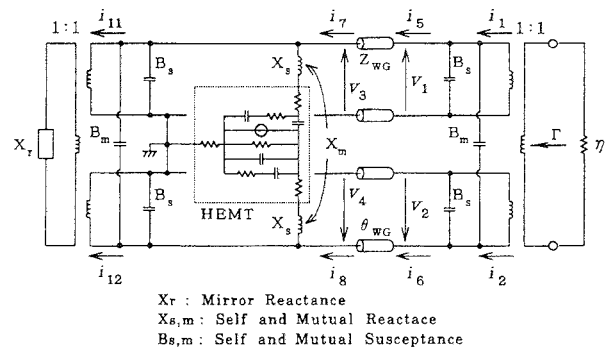


図4 発振器系の等価回路

$$\begin{aligned}
 J(x, y) = & \frac{wc}{2ab}(J_g + J_d) \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2wc}{bm\pi}(J_g + J_d) \cos \frac{m\pi}{2} \sin \frac{m\pi w}{2a} \cos k_x x \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4w}{an\pi} \sin \frac{n\pi c}{4b} \left( J_d \sin \frac{n\pi}{4} + J_g \sin \frac{3n\pi}{4} \right) \sin k_y y \\
 & + \frac{16w}{mn\pi^2} \cos \frac{m\pi}{2} \sin \frac{m\pi w}{2a} \sin \frac{n\pi c}{4b} \\
 & \cdot \left( J_d \sin \frac{n\pi}{4} + J_g \sin \frac{3n\pi}{4} \right) \cos k_x x \sin k_y y
 \end{aligned} \quad (2)$$

となり、これをグリーン関数と掛け合わせ、畳み込み積分を行うことにより座標  $(x, y)$  における電界  $E$  が導出される。

$$E(x, y) = \iint G(x, y | x', y') J(x', y') dx' dy' \quad (3)$$

さらに、上式よりTEMモードとTMモード成分を用いて放射電力  $P$  を求めると、

$$P = VI_n = \iint E_n(x, y) J_n(x, y) dx dy \quad (4)$$

となり、電圧  $V$  を与えることによりリードリアクタンスおよびフリンジングサセプタンスが算出される。

HEMTリード部における自己および相互リアクタンスは、

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned} X_s, \text{ 右辺上号} \\ X_m, \text{ 右辺下号} \end{aligned} \right\} = & \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \text{sinc}^2 \frac{m\pi w}{a} \\
 & \cdot \left\{ \frac{1}{\frac{2}{a} \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) Y_{m0} + \frac{b}{a} \sum_{\substack{n=2 \\ n:\text{even}}}^{\infty} Y_{mn} \text{sinc}^2 \frac{n\pi c}{2b}} \right. \\
 & \left. \pm \frac{1}{\frac{a}{2c} Y_{m0} + \frac{b}{a} \sum_{\substack{n=1 \\ n:\text{odd}}}^{\infty} Y_{mn} \text{sinc}^2 \frac{n\pi c}{4b}} \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\text{ただし、} Y_{mn} = \frac{\left( \frac{2m\pi}{a} \right)^2 - k^2}{\omega \mu_0 \sqrt{\left( \frac{2m\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 - k^2}}$$

また、平行平板導波路端面におけるフリンジングサセプタンスは、

$$B_s = -\frac{a}{b} \sum_{\substack{n=1 \\ n:\text{odd}}}^{\infty} Y_{0n} \text{sinc}^2 \frac{n\pi c}{4b} \quad (6)$$

$$B_m = \frac{a}{b} \sum_{\substack{n=1 \\ n:\text{odd}}}^{\infty} Y_{0n} \text{sinc}^2 \frac{n\pi c}{4b} - \frac{a}{2b} \sum_{\substack{n=2 \\ n:\text{even}}}^{\infty} Y_{0n} \text{sinc}^2 \frac{n\pi c}{2b} \quad (7)$$

となる。さらに、導波路の伝送モードをTEMモードのみとすると、 $Z_{WG}$ 、 $\theta_{WG}$  は平行平板導波路の特性イ

ンピーダンスおよび電気長であり、

$$Z_{WG} = \frac{c}{a} \eta \quad (8)$$

$$\theta_{WG} = \frac{2\pi}{\lambda} L_{WG} \quad (9)$$

で与えられる。ただし、 $\eta$  は自由空間インピーダンスで約 $377\Omega$ である。また、破線部内はHEMTの等価回路を示す。

次に、等価回路をもとに発振器の自励発振条件を求める。自由空間から発振器を見たアドミタンス  $Y_L$  および短絡板側を見たアドミタンス  $Y_{Xr}$  は、

$$Y_L = \frac{i_1}{V_1} = \frac{i_2}{V_2} \quad (10)$$

$$Y_{Xr} = \frac{i_{11}}{V_3} = \frac{i_{12}}{V_4} \quad (11)$$

となり、平行平板導波路の電圧電流関係は、

$$\begin{bmatrix} i_5 \\ i_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{WG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} i_6 \\ i_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{WG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{ただし、} \begin{bmatrix} Y_{WG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j \frac{1}{Z_{WG}} \cot \theta_{WG} & j \frac{1}{Z_{WG}} \text{cosec} \theta_{WG} \\ -j \frac{1}{Z_{WG}} \text{cosec} \theta_{WG} & j \frac{1}{Z_{WG}} \cot \theta_{WG} \end{bmatrix}$$

となる。HEMTの特性は通常Sパラメータを用いて表されるが、ここでは解析の容易さからSパラメータをYパラメータに変換し、周辺のリードインダクタンスを加えたうえで  $\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$  と表すことにする。

式(10)～式(13)を用いると、 $Y_L$  は次式のようにになる。

$$\begin{aligned}
 Y_L = & \left[ Y_{11}^{WG} \left\{ Y_{12}^{WG} Y_{22}^{WG} - Y_{21}^{WG} (Y_{11} + Y_{22} - 2Y_B) \right\} + Y_{11} (Y_{22} - Y_B + Y_{Xr}) \right. \\
 & - Y_{12} (Y_{21} - Y_{Bm} - Y_{Xr}) + Y_{21} (Y_{Bm} - Y_{Xr}) - Y_{22} (Y_B + Y_{Xr}) \\
 & + Y_{Bs} (2Y_{Bs} + Y_{Bs}) \left. \right\} + Y_{11}^{WG} \left\{ Y_{12}^{WG} Y_{22}^{WG} (2Y_{12}^{WG} - Y_{11} - Y_{22} \right. \\
 & + 2Y_B) + 2Y_B \left\{ Y_{12}^{WG} Y_{22}^{WG} - Y_{21}^{WG} (Y_{11} + Y_{22} - 2Y_B) + Y_{11} (Y_{22} \right. \\
 & - Y_B + Y_{Xr}) - Y_{12} (Y_{21} - Y_{Bm} - Y_{Xr}) + Y_{21} (Y_{Bm} - Y_{Xr}) \\
 & - Y_{22} (Y_B - Y_{Xr}) + Y_{Bs} (2Y_{Bm} + Y_{Bs}) \left. \right\} \left. \right\} + Y_{11}^{WG} Y_{22}^{WG} \\
 & + Y_{12}^{WG} Y_{21}^{WG} \left\{ 2Y_{12}^{WG} Y_B - Y_{11} Y_B - Y_{Bm} (Y_{12} + Y_{21}) \right. \\
 & - Y_{22} Y_B + 2(2Y_{Bm}^2 + 2Y_{Bm} Y_{Bs} + Y_{Bs}^2) \left. \right\} + Y_{Bs} (2Y_{Bm} \\
 & + Y_{Bs}) \left\{ Y_{12}^{WG} Y_{22}^{WG} - Y_{21}^{WG} (Y_{11} + Y_{22} - 2Y_B) + Y_{11} (Y_{22} \right. \\
 & - Y_B + Y_{Xr}) - Y_{12} (Y_{21} - Y_{Bm} - Y_{Xr}) + Y_{21} (Y_{Bm} - Y_{Xr}) \\
 & - Y_{22} (Y_B + Y_{Xr}) + Y_{Bs} (2Y_{Bm} + Y_{Bs}) \left. \right\} \left. \right\} / \left\{ Y_{12}^{WG} Y_{22}^{WG} (Y_{11} \right. \\
 & + Y_{12} - Y_{21} - Y_{22}) \left. \right\} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\text{ただし、} Y_B = Y_{Bs} + Y_{Bm}$$

したがって、出力端子から発振器を見たときの反射係数 $\Gamma$ は、

$$\Gamma = \left( \frac{1}{Y_L} - 377 \right) / \left( \frac{1}{Y_L} + 377 \right) \quad (15)$$

また、発振器が発振動作を行うときの条件は $Re(\Gamma) > 1$ および $Im(\Gamma) = 0$ を満たさなければならない。なお、反射係数 $Re(\Gamma)$ の周波数特性の数値解析例を図5に示す。図は、次節に示す試作器の構造パラメータおよび装荷したHEMTの小信号パラメータを用いており、発振の立ち上がり時の条件を与えることとなる。

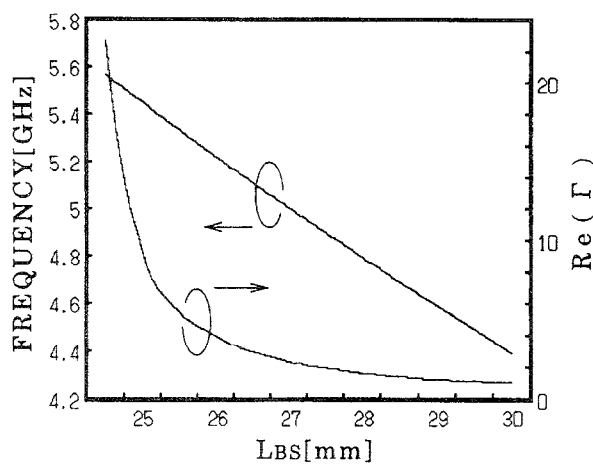


図5  $L_{BS}$  可変時の発振周波数および $Re(\Gamma)$  (計算値)

### III 実験

図6に試作した発振器の構造を示す。今回の実験では、HEMTは富士通社製FHX35LGを用い、過電圧からの保護やバイアス点設定の容易さなどを考慮して、 $V_{DS} = 2.16V$ 、 $V_{GS} = 0V$ を印加した。ゲートおよびドレインリード部にはリアクタンスを低減するため幅(=  $w_{gd}$ ) 0.5mm、厚み $30\mu m$ の銅箔を使用した。また、平行平板導波路を構成する3枚の金属板は、サイズがそれぞれ全長150mm、幅(=  $L_{wg}$ ) 4.5mm、厚み2.0mmの真鍮板を使用している。また、3枚の金属板間にはマイクロ波の側方への漏れを防止するためにテフロンブロックを装荷し、バイアスラインには低周波のうなりを電源側に送り込まない目的からチョークコイルを挿入している。

次に、発振器の出力特性について述べる。測定系は図7に示すようにターンテーブル上に発振器を設置し、発振器から距離(=  $L_{mej}$ ) 1.5m離れた位置に角すいホーンアンテナを配置した構成である。測定には、まず $L_{BS}$ およびホーンアンテナに取り付けたスタブを最大

電力が得られるように調節し、次に、 $L_{BS}$ を可変させ周波数および受信電力を測定した(図8)。希望モードの単独発振は、 $L_{BS}$ が16mmから38mmのときに認められ、 $L_{BS}$ が15mm以下および39mm以上のときは、希望モードと3GHzおよび他の周波数成分が混在する不要モード発振が認められた。

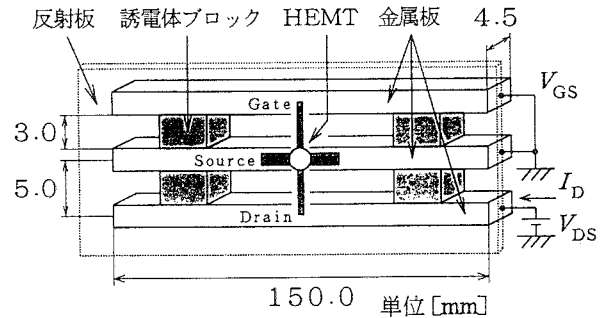


図6 発振器の構造

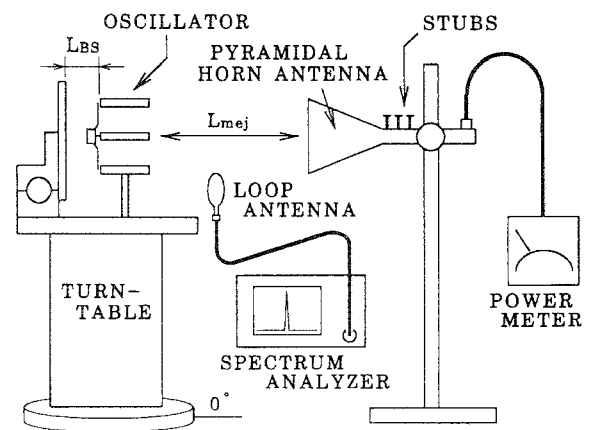


図7 測定系

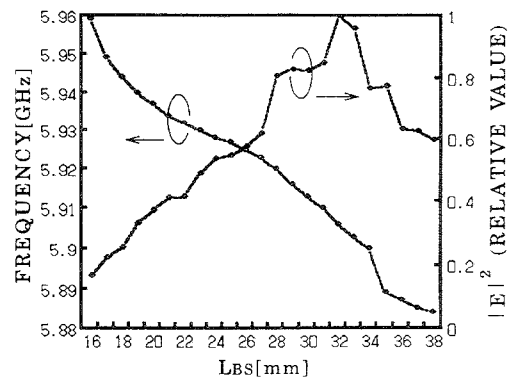


図8 発振周波数および出力特性

### III まとめ

二重平板導波路型マイクロ波発振器において、多素子発振器の構成単位であるFET発振セルを単一素子発振器に適用し、その動作特性を等価回路を用いて周波

数領域解析した。次に、試作発振器の出力測定を行った結果、Cバンドでの安定な発振が認められるとともに、理論結果とほぼ一致した値を得ることができた。また、今後はさらに高い周波数領域での動作実験を行う予定である。

#### 参考文献

- (1) K.Chang and C.Sun : “Millimeter-wave power combining techniques”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT - 31, pp.91 - 107(Feb.1983)
- (2) J. W. Mink : “Quasi-optical power combining of solid-state millimeter-wave sources”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-34, pp. 273 - 279 (Feb. 1986)
- (3) H. Kondo et al. : “Millimeter and Submillimeter Wave Quasi-Optical Oscillator with Multi-Elements”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.40, pp.857 - 863 (May.1992)
- (4) Z. B. Popovic, R. M. Weikle, II, M. Kim, K. A. Potter, and D. B. Rutledge : “Bar-grid oscillators”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.38, pp. 225 - 230 (Mar.1990)
- (5) Z. B. Popovic, R. M. Weikle, II, M. Kim, and D. B. Rutledge : “A 100-MESFET planar grid oscillator”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.39, pp.193 - 200 (Feb.1991)
- (6) R. M. Weikle, II et al. : “Planar MESFET grid oscillators using gate feedback”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.40, pp.1997 - 2003 (Nov.1992)
- (7) 平島, 木山, 田中 : “格子状に結合されたFET発振セルの動作特性の検討”, 1992信学春期全大, C - 65.
- (8) 平島, 木山, 田中 : “直線状に結合されたFET発振セルによるマイクロ波出力合成”, 平4 中国連大, 050914.
- (9) 平島, 田中 : “HEMTを用いたマイクロ波平面型発振器”, 1993実践教育研究発表会, II - 31.
- (10) 平島, 田中 : “格子状反射器構成を用いたマイクロ波平面型発振器”, 福山大学工学部紀要, 第17号, No.1, pp.1 - 7 (1993 - 09).