5-4　シリコンインパットダイオードの接合面積効果

日本電気中央研究所　近藤元基、松村正清、奥戸雄二、長島功夫

序論　インパットダイオードにおいて、接合面積が小さいときは入力が小さくなるので、出力が減少する。また、面接の増大は接合容量増大に伴う効率低下を招くので、出力が減少する。よつて、出力を最大にする接合直径d_0が存在し、ダイオードと放熱体の温度差が250(℃)のとき、その理論値d_0=160(μ)となる。d=150(μ)を有するダイオードで、Xバンドにおいて出力185(W)を得た。

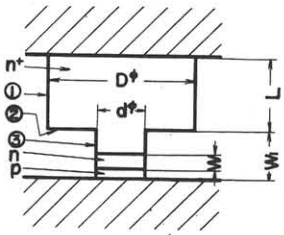

Fig.1 ダイオードモデル

理論　本報告で使用する記号をTable 1に示す。パンチスルー型・p-n-n^+シリコンダイオードをマウントしたモデルを図1に示す。図1の①②③はそれぞれn^+の側表面、底面及びメサ部を示す。n^+を流れる高周波電流は表皮効果のためn^+表面近傍に限られる。表皮厚みによる残留抵抗を考慮したダイオードの等価回路は第2図のように表わされ、さらに簡単化すると第3図のようになる。ここで、n^+各部の残留抵抗と電気容量の表示式はTable 2に示され、数値例はD=400(μ), d=150(μ), W=4(μ), W_1=25(μ), ρ=5×10^{-3}(Ω·cm), f=11(GHz)の場合である。ここで、$C_2 \ll C_4$, $R_1+R_2 \gg R_2', R_3, R_4$, であるから、$R_S \doteqdot R_1+R_2$が成立し、次式が成立する。

$$G_S = R_S \omega^2 C_4^2 \qquad (1)$$

上式で、R_Sのdに対する依存性は、C_4^2のdに対する依存性に較べて非常に小さいので、G_Sはd^4に比例する。

一方、接合部の温度上昇ΔTをある一定値に選んだときダイオードへの入力は放熱体の拡がり熱抵抗によつて決まるとすれば、小信号負性コンダクタンは次式のようになる。

Table 1. 使用記号

C_0	単位面積当りの空乏層容量	L	第1図に示す
C_2	stray容量	R_0	ρ/δ
C_4	空乏層容量	R_3	残留抵抗
C	C_2+C_4	R_1	n^+側表面の抵抗
d	接合直径	R_2	I_4に対する底面の抵抗
d_0	最適接合直径	R_2'	I_2に対する底面の抵抗
D	第1図に示す	R_3	底面からメサ部と径方向へ流れる電流に対する抵抗
f	発振周波数		
G	大信号負性コンダクタンス	R_4	メサ部の抵抗
G_S	残留抵抗による等価コンダクタンス	Tj	動作温度
G_m	小信号負性コンダクタンス	ΔT	ダイオードと放熱体の温度差
G_{m0}	J_0における単位面積当りの小信号負性コンダクタンス	V_b	ブレイクダウン電圧
		ΔV	ブレイクダウン電圧の上昇分
I	電流	W	空乏層巾
I_2	stray容量に流れる電流	W_1	第1図に示す
I_4	空乏層を流れる電流	σ	銅の熱伝導率
J	直流電流密度	ε	比誘電率
δ	表皮厚み	ϵ_0	真空の誘電率
ρ	n^+の比抵抗	ω	2πf

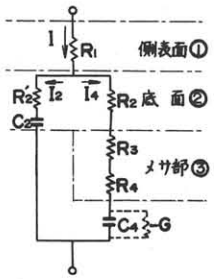

Fig.2 等価回路

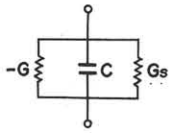

Fig.3 並列等価回路

Table 2. 残留抵抗

Symbol	表示式	計算値
R_1	$R_0 \frac{L}{\pi D}$	0.3 Ω
R_2	$\frac{R_0}{2\pi} \log_e \frac{D}{d}$	0.2 Ω
R_2'	$\frac{R_0}{8\pi} r \quad (r \doteqdot 1)$	0.05Ω
R_3	$\frac{R_0}{8\pi}$	0.05Ω
R_4	$R_0 \frac{4\delta}{\pi d^2}(\frac{\delta}{2}+W'-W)$	0.08Ω
C_2	$\frac{\epsilon_0}{W'} \frac{\pi}{4}(D^2-d^2)$	0.08pF
C_4	$\frac{\epsilon\epsilon_0}{W} \frac{\pi}{4} d^2$	0.47pF
C	C_2+C_4	0.55pF
G_S	$\omega^2[R_1C^2+(R_2+R_3+R_4)C_4^2+R_2'C_2^2]$	1.3m℧

$$G_m=(G_{mo}/J_o)(2\sigma/V_b)\Delta T_d \qquad (2)$$

ところで、負荷に消費される出力 Pout は、active 領域で発生する出力 $\frac{1}{2}|G|V^2$〔但し、G；大信号負性コンダクタス，V；交流振巾，$G=|G_m|(1-\frac{V}{1.66})\sqrt{\frac{|G_m|}{P_{in}}}$〕から n^+領域で消費される出力 $\frac{1}{2}G_SV^2$ を差し引いたものであるから出力最大にする最適接合直径 d_0 は

$$d_0=\{(1.6/\pi^2)(G_{mo}/J_o)(2\sigma/V_b)(R_S\omega^2C_0^2)^{-1}\Delta T\}^{1/3} \qquad (3)$$

で与えられる。(3)式より d_0 は ΔT の $1/3$ 乗に比例し、$\Delta T=250$(℃) のとき、$d_0=160$(μ) が得られる。d_0 と ΔT の計算結果は第5図に実線として示される。この計算に用いた例は、$R_S=0.7(\Omega)$, $f=11$(GHz), $C_0=2.7\times10^{3}$(pF/cm²), $G_{mo}/J_0=2.5\times10^{-2}(V^{-1})$, $\sigma=4$(W/cm·℃), $V_b=80$(V) の場合である。

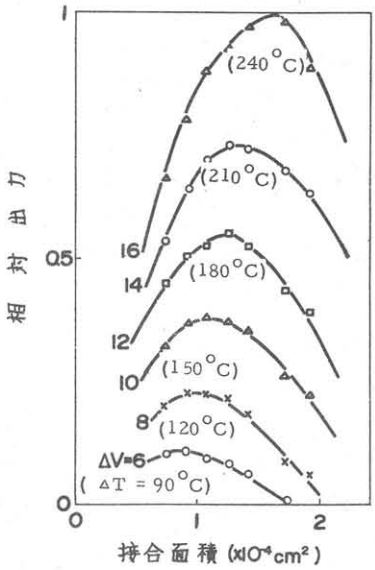

Fig.4 出力の接合面積依存性

実験結果及び考察　エッチングによりダイオードの接合面積を変えて、測定して得られた出力の接合面積依存性を図4に示す。同図から、ΔV，すなわち、ダイオードの動作温度が一定のときは出力最大値をとる最適接合面積が存在することがわかる。ここで、パンチスルー型・Xバンド用シリコンインパットダイオードにおいては、実験的に ΔV と ΔT の間に次の関係式が成立する。

$$\Delta T=5\times10^{-3}(\Delta V/W) \quad (℃) \qquad (4)$$

上式を用いて、第4図の出力最大を示す接合直径と動作温度との関係をプロットしたのが第5図で、実験値は理論と同じ傾向を示し、定量的にも、10(%)の誤差で一致していることがわかる。さらに、同図から ΔT が 250(℃) のときの最適接合直径は 150(μ) であるので、その直径を有するように作られたダイオードの出力特性を第6図に示す。予測通り、出力飽和のおこる入力で 1.85(W) の高出力を得た。

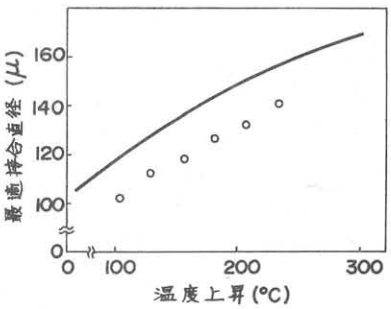

Fig.5 最適接合直径と動作温度の関係

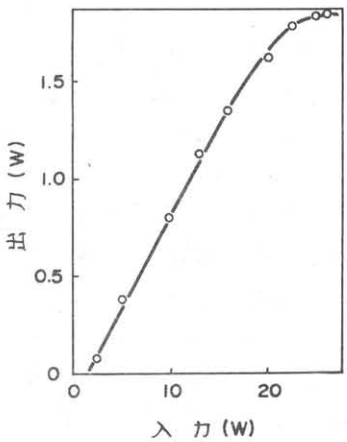

Fig.6 出力特性の1例

結論　パンチスルー型シリコンインパットダイオードでは、入力及び接合容量の接合直径に対する依存性から、最適接合直径が存在し、ΔT=250(C) に選べば理論値 $d_0=160$(μφ)、実験値 $d_0=150$(μφ) となりほぼ一致した。また、d=150(μφ)を有するダイオードを用いてXバンドで出力 1.85(W) を得。残留抵抗をさらに減少させれば、さらに大出力を期待しうる。

謝辞　本研究を遂行するにあたり、御助言及び御激励を載いた植之原、内田両工博に深く感謝します。