

最適設計によるマイクロ波3段形PINダイオード減衰器

今 井 弘*

Microwave 3-PIN Diode Attenuator by Optimum Design

Hiroshi IMAI*

(Received September 14, 1978)

In a previous paper by the author, general equations for the microwave pin diode attenuator, consisting of a number of pin diodes mounted as shunt variable impedance elements in the rectangular waveguide, have been derived using the ABCD matrix, and numerical calculations have been carried out to obtain the optimum design at the center frequency for the 3- to 5-pin diode attenuator.

In this paper, experimental results of a microwave 3-pin diode attenuator in the 10 GHz range are discussed. Comparisons between theoretical and experimental results show the validity of the proposed optimum design at the center frequency. It is shown that the considerable improvement of the input VSWR over the frequency range of 9.1-9.6 GHz is accomplished by applying the condition of the optimum design at the center frequency. At the conductance ratio of 2.8 the attenuation deviation is less than 0.5 dB over the same frequency range.

1 まえがき

マイクロ波周波数領域でのダイオードの発展によって pin ダイオードを可変素子とした小形、軽量の電流制御形減衰器を構成できるようになってきた。

pin ダイオードを導波管に同軸形で並列装荷し、この pin ダイオードを n 個、間隔 l で接続して構成した n 段形 pin ダイオード減衰器の減衰量、入力インピーダンスなどの一般式はすでに四端子定数を用いて求め明らかにしてきた⁽¹⁾。さらに、これらの一般式の有効性を示すために4分の1波長接続2段形および3段形減衰器の諸特性を10GHz帯で測定し、計算値と測定値の比較検討を行なってきた^{(2), (3), (4)}。

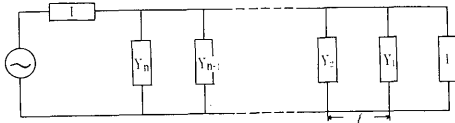
これらの減衰器に可変素子として用いられている pin ダイオードのインピーダンスは順バイアス電流が増加してその値が低下してもリアクタンス分はほぼ一定で、主として抵抗分のみが低下していく。このようなインピー

ダンス変化を利用して反射量または吸収量を制御して減衰量を得ている。しかし、これらの減衰器においては減衰量が増加していくにしたがって入出力定在波比特性が悪化していく欠点を持っている。この入出力定在波比特性悪化の欠点を改善するため、3段形、4段形および5段形減衰器の設計中心周波数での最適設計法を明らかにしてきた^{(1), (5)}。

本論文では、この最適設計法を適用した4分の1波長接続3段形 pin ダイオード減衰器について述べる。文献(4)でも述べたように、この減衰器において pin ダイオード(S-3023)は導波管(WRJ-10)内H面の中心に同軸の中心導体を金属ポストとし立て、そこに装荷されている。設計中心周波数9.4GHzでのpinダイオードのリアクタンスはこのポストによって打消されている。このように導波管内に同軸形で並列装荷した pin ダイオード3個をそれぞれ中心周波数9.4GHzでの導波管管内4分の1波長で接続して減衰器が構成されている。

*電子工学科(Department of Electronic Engineering)

2 最適設計法⁽¹⁾



図—1 多段形減衰器の等価回路

すでに明らかにした多段形 pin ダイオード減衰器の最適設計法は、図1に示した減衰器等価回路の各ダイオードの間隔 l を設計中心周波数における4分の1波長とし、各ダイオードの規格化アドミッタンス $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ の規格化サセプタンスは中心周波数において非常に小さい値にすることができるから、これらを無視し $B_1 = B_2 = \dots = B_n = 0$ として各ダイオードは規格化コンダクタンス $G_1, G_2, \dots, G_n$ のみからなるとした場合の設計法である。

4分の1波長接続3段形、4段形および5段形 pin ダイオード減衰器の設計中心周波数において、入出力定在波比が同じ値を持つように各ダイオードの規格化コンダクタンスを

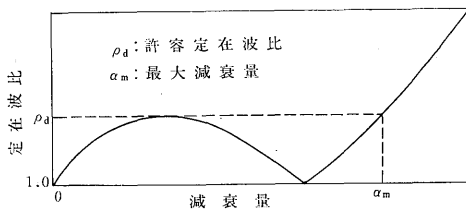
3段形では、 $G_1, G_2 = K_2 G_1, G_3 = G_1$

4段形では、 $G_1, G_2 = K_2 G_1, G_3 = K_2 G_1, G_4 = G_1$

5段形では、 $G_1, G_2 = K_2 G_1, G_3 = K_2 G_1,$

$G_4 = K_2 G_1, G_5 = G_1$

と配列し、規格化コンダクタンス比 K_2, K_3 の値および規格化コンダクタンスの値 G_1 は、図2に示した減衰量一定在波比特性図において許容定在波比 ρ_d 以下にある減衰量の最大値 α_m を最大にするように与えた。



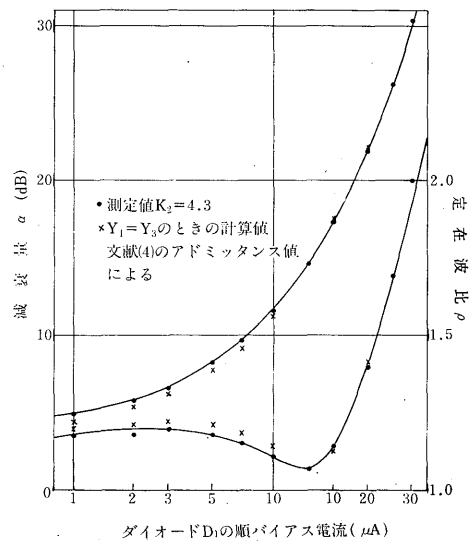
図—2 減衰量一定在波比特性

本論文で検討される4分の1波長接続3段形 pin ダイオード減衰器の各ダイオードの規格化サセプタンス B_1, B_2, B_3 が規格化コンダクタンス G_1, G_2, G_3 に比べて非常に小さい値を取るときには上記の最適設計法が適用できる。したがって、 G_1, G_2, G_3 がそれぞれ $G_1, K_2 G_1, G_1$ で $K_2 > 1$ なる値を取るときに、入力定在波比をある一定値 ρ_d 以下に保ちながら順バイアス電流によって変化していく減衰量の範囲を最大にすることができる。

図6に規格化サセプタンスを無視した場合の最適設計法によって得た4分の1波長接続3段形 pin ダイオード減衰器の許容定在波比に対する規格化コンダクタンス比 K_2 と減衰量最大値 α_m の理論値が示してある。

3 設計中心周波数における特性とその検討⁽⁶⁾

4分の1波長接続3段形 pin ダイオード減衰器において、設計中心周波数9.4GHzでpinダイオードの規格化アドミッタンスの値は一般的に $Y_1 \neq Y_3$ であるが、これらのダイオードにおいて規格化サセプタンスを無視し、規格化コンダクタンス G_1, G_3 のみが $G_1 = G_3$ となるようにダイオード D_1 (負荷側より D_1, D_2, D_3 の順) の順バイアス電流を定め、さらに規格化コンダクタンスの比 $K_2 = G_2/G_1$ が常に4.3となるようにダイオード D_2 の順バイアス電流を定める。このように規格化コンダクタンス G_1, G_2, G_3 の値が最適設計の $K_2 = 4.3$ の場合に一致するようにダイオード D_1, D_2, D_3 の順バイアス電流を順次変化させたときの減衰量および入力定在波比特性の測定結果が図3である。図3において×印は文献(1)の



図—3 ダイオードの順バイアス電流に対する減衰量 α と定在波比 ρ の変化

理論式において、pinダイオードの規格化アドミッタンスを $Y_1 = Y_3$ とし、また、 $K_2 = 4.3$ となるようにして文献(4)で示した規格化アドミッタンス値を代入して求めた計算値である。図4の×印は図3の測定結果を定在波比と減衰量の関係で示したもので、許容定在波比 $\rho_d = 1.2$ とした場合を表わしている。

図4において実線はpinダイオードの規格化サセプタンスを無視して求めた最適設計法において $K_2 = 3.7$ とし

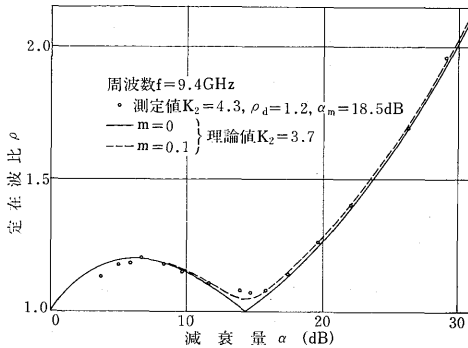


図-4 減衰量一定在波比特性の測定値と理論値の比較

た場合の理論曲線で、破線は規格化サセプタンスを考慮して、規格化アドミタンスを $Y=G(1+jB/G)=G(1+jm)$ とし、 $m=0.1$ 、 $K_2=3.7$ とした場合の理論曲線である。このように $K_2=4.3$ の測定値と $K_2=3.7$ 、 $m=0.1$ の場合の理論曲線が非常に良く一致している。図5に $K_2=3.4$ 、 4.3 、 5.2 、 6.1 、 7.9 と変化させ、許容定在波比を $\rho_d=1.1$ 、 1.2 、 1.3 、 1.4 、 1.5 としたときの定在波比と減衰量の関係の測定結果を示した。これらの K_2

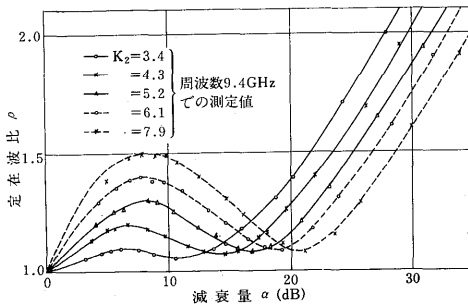


図-5 減衰量一定在波比特性の測定結果

$=4.3$ 以外の測定結果においても K_2 の値は理論的に求めた K_2 の値より $K_2=4.3$ の場合と同程度に大きくなっており、規格化サセプタンスを考慮して、 $m=0.1$ とした理論曲線に良く一致している。

以上の結果より、所要の定在波比 ρ_d に対する零から始まる減衰量域の最大値 α_m とそのときの規格化コンダクタンス比 K_2 を求めて見ると図6のようになる。図6の○印は測定結果であり、実線は規格化サセプタンスを無視し $B_1=B_2=B_3=0$ とし最適設計法が求めた理論曲線である。許容定在波比 ρ_d が 1.1 から 1.5 の範囲において最大減衰量域 α_m の理論値と K_2 の理論値の $15\sim 20\%$ 増の K_2 に対する測定値が非常に良く一致している。このように K_2 の値が理論値よりも大きくなる理由は、理論値を求めたときの規格化コンダクタンスの値と実験にお

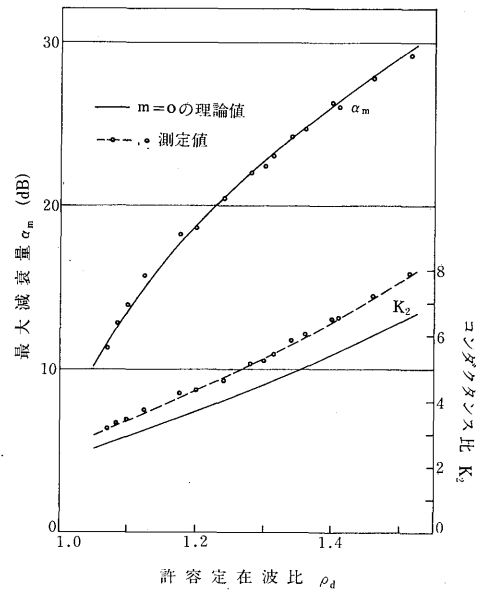


図-6 許容定在波比 ρ_d に対する規格化コンダクタンス比 K_2 と最大減衰量域 α_m の関係

いて用いた値が若干異なっていること、また、減衰量一定在波比特性において見られるように規格化サセプタンスの存在によって定在波比の山の $B=0$ の場合より大きくなることによって生ずるものと思われる。

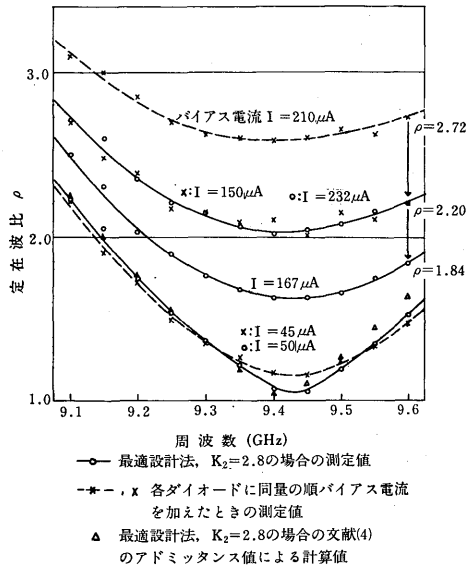
以上、中心周波数 9.4GHz での最適設計法による4分の1波長接続3段形pinダイオード減衰器の実験値と理論値の比較について述べてきた。本実験においてpinダイオードの規格化サセプタンスを完全に無視することはできなくて、規格化サセプタンスと規格化コンダクタンスの比 $m=B/G$ が $m=0.1$ 程度であったが、この場合でも $B=0$ とし求めた中心周波数での最適設計法より得られた K_2 の理論値より $15\sim 20\%$ 程度大きい K_2 の値を用いることによって許容定在波比に対する最大減衰量の理論値と測定値が一致し、この最適設計法が有効であることが判った。

4 周波数特性とその検討⁽⁷⁾

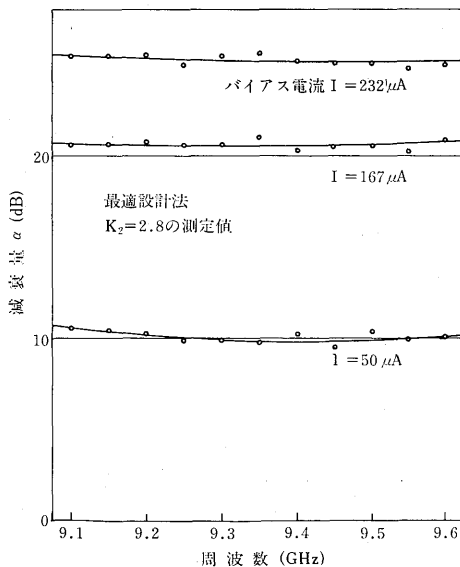
前章で述べたように、設計中心周波数における最適設計法を適用して、減衰器を構成しているpinダイオードに加える順バイアス電流によってダイオードの規格化コンダクタンスの比 K_2 を定めると、減衰量がある値になるまでは常に許容定在波比を満足し、その減衰量域を最大にすることができる。

この最適設計法を中心周波数以外においても適用して実験的に検討を加えた。中心周波数 9.4GHz での最適設計法の条件を周波数 9.1GHz から 9.6GHz の範囲で適用

した場合、すなわち、中心周波数において各ダイオードに加えた同じ順バイアス電流値、同じ規格化コンダクタンスの比 K_2 を適用した場合にも、特に入力定在波比特性が中心周波数の場合と同様に改善されることについて述べる。



図一七 定在波比周波数特性

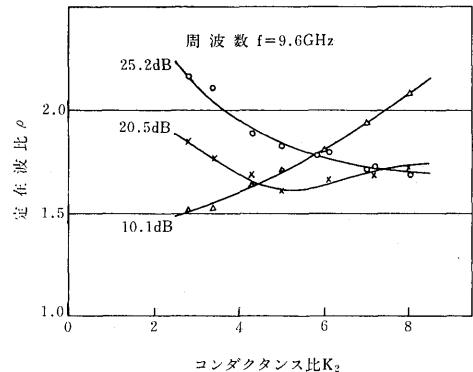


図一八 減衰量周波数特性

図7に定在波比周波数特性を示す。図7において。○印は最適設計法の条件を適用して $K_2=2.8$ とした測定値でこれらに対応する減衰量周波数特性測定値を図8に示

す。図8に示したように、9.1GHzから9.6GHzの周波数範囲でそれぞれの平均値は10.1dB、20.5dBそして25.2dBでこれらの変動はそれぞれ0.75dB、0.77dBそして0.78dBとなっており、周波数に対してかなり平坦な特性となっている。また、図7の定在波比周波数特性の×印は最適設計法の条件を適用しないで、各ダイオードに同量の順バイアス電流を加えた場合の測定値で、これらの定在波比特性は9.1GHzから9.6GHzの周波数範囲において減衰量の平均値が9.9dB、20.7dBそして25.4dBにそれぞれ対応している⁽⁴⁾。また、△印は $G_1=G_2$ として規格化アドミタンスの実測値をもとにした計算値である。最適設計法の条件を適用した場合とそうでない場合の定在波比特性を比較して見ると、約20dB約25dBのところでは著しく定在波比特性が改善されており、たとえば、周波数9.6GHzにおいて20dBでは定在波比 $\rho=2.20$ から $\rho=1.84$ に、25dBでは $\rho=2.72$ から $\rho=2.20$ と改善されている。しかし、10dBのところ、すなわち、図4の定在波比—減衰量特性の山付近では、中心周波数 $9.4\text{GHz} \pm 0.1\text{GHz}$ 以外では特性の改善は見られない。これは同軸形で装荷されているpinダイオードの規格化サセプタンスの値が設計中心周波数よりずれるにしたがって大きくなり、定在波比に大きく影響を与えているためである。

ここで、図8の減衰量10.1dB、20.5dBそして25.2dBの場合において周波数を9.6GHzとして規格化コンダクタンス比 K_2 を変化させたときの実験結果を見ると図9—aのようになる。また、図9—bに規格化アドミタンスの実測値をもとにして求めた計算結果も合わせて示した。この図9—aの10.1dBに対する変化は上記の山付近の変化を示しており、 K_2 を小さくすれば許容定在波比を小さくできることを示している。また、20.5dB、25.2dBに対する変化は K_2 の定め方によって、ある許容



図一九—a 規格化コンダクタンス比 K_2 に対する定在波比の変化、測定結果

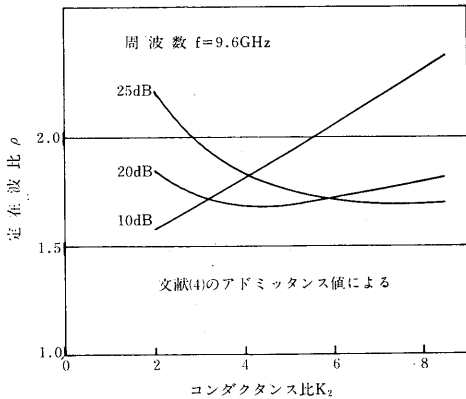


図9-1b 規格化コンダクタンス比 K_2 に対する定在波比の変化, 計算結果

定在波比において減衰量域を最大にできることを表わしている。

次に、以上のような定在波比特性を持つ4分の1波長接続3段形 pin ダイオード減衰器の順バイアス電流に対する減衰特性を図10に示す。図10の減衰特性は規格化コンダクタンス比が $K_2=2.8$, 3.4 の場合の周波数9.1GHzから9.6GHzまでの範囲での平均値を示したもので、この周波数範囲での減衰量の変動は $\pm 0.5\text{dB}$ となっている。なお、挿入損失は1dB程度にすることができる。

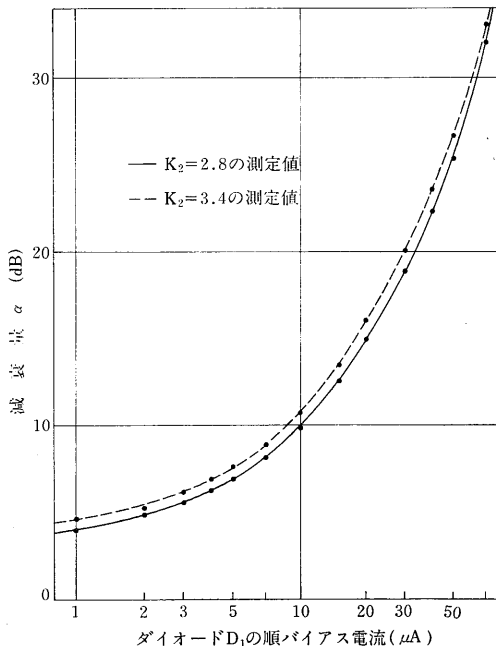


図10 順バイアス電流に対する減衰量の周波数9.1GHz~9.6GHzでの平均値

以上、中心周波数での設計条件を適用した場合の入力定在波比の改善について主に述べてきたが、同軸形で装荷された pin ダイオードのサセプタンス分の周波数特性の改善により、入力定在波比周波数特性の全体的な改善を行なわなければならない。

5 結 言

多段形 pin ダイオード減衰器の設計中心周波数においてある一定の許容定在波比を与えたとき、常にその許容定在波比以下の値を満足しながら減衰量を最大にする最適設計法を4分の1波長接続3段形 pin ダイオードで検討し、この最適設計法の有効性を明らかにした。この最適設計法では pin ダイオードの規格化サセプタンスを無視しているが、実際には考慮して規格化サセプタンスと規格化コンダクタンスの比を $m=0.1$ としなければならないことを理論値と実験値を比較検討して示した。この結果、規格化サセプタンスの存在によって規格化コンダクタンス比 K_2 はこの最適設計法の理論値よりも大きくなるが、この場合でも15~20%程度大きい K_2 の値を用いると許容定在波比に対する最大減衰量は最適設計法で与えた理論値と良く一致することを示した。

また、中心周波数での最適設計法を適用したときの周波数特性について実験的に検討し、定在波比周波数特性の改善がなされることを示した。さらに中心周波数以外の周波数において K_2 を変化させたときの定在波比の変化を調べ広帯域設計法の一つの資料を与えた。

今後の問題としては規格化サセプタンスを考慮したときの周波数特性の理論的検討を行ない、中心周波数での最適設計法を拡張した最適設計法、広帯域設計法を求めていかなければいけない。

本研究は本学特別研究費の援助によって行なったもので、関係各位に心から感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 今井 弘：中部工大紀要，第12巻A, pp.56~61, 1976年12月
- (2) 今井 弘：電気関係学会東海支部連合大会論文集，p.186, 1975年10月
- (3) 今井 弘：中部工大紀要，第11巻A, pp.113~117, 1975年12月
- (4) 今井 弘：中部工大紀要，第13巻A, pp.61~66, 1977年12月
- (5) 今井 弘：電気関係学会東海支部連合大会論文集，p.229, 1976年10月
- (6) 今井 弘：電気関係学会東海支部連合大会論文集，p.240, 1977年10月
- (7) 今井 弘：電気関係学会東海支部連合大会論文集，p.239, 1977年10月