

マイクロ波 PIN ダイオード減衰器

今 井 弘*

Microwave PIN Diode Attenuator

Hiroshi IMAI*

(Received September 20, 1974)

This paper describes the characteristics of a microwave attenuator which employs the pin diode as a variable element. When the single pin diode is connected across the waveguide transmission line, in shunt, the attenuation can be obtained by changing the pin diode resistance at forward bias current.

The insertion loss is approximately 1.0 dB and VSWR is less than 2.0 at zero bias, in the 9.0—9.6 GHz frequency band. The attenuation of 35.5 dB was achieved at 9.35 GHz under application of the forward bias current of 150 mA. The measured results of the attenuation curve with the bias current agree well with the calculated results.

1. まえがき

マイクロ波周波数領域において、種々のダイオードが急速に発展してきた結果、これらのダイオードを用いたマイクロ波デバイスが最近さかんに論じられるようになってきた。このマイクロ波デバイス技術は、これまでのマイクロ波技術にくらべて、高信頼性、小形軽量性および経済性などの特質を持っている。

本論文では、pin ダイオードを可変素子とした減衰器について述べる。これをマイクロ波領域で実現するためには、伝送回路として導波管回路、同軸回路そしてマイクロ波ストリップ回路などの利用が考えられる。また、この回路方式として、抵抗線路形、橋絡T形、単結合形そして複結合形があるが、今回は導波管回路でpin ダイオードを1個並列装荷した抵抗線路形で減衰器を構成し、そのインピーダンス特性、減衰特性および位相特性などの理論的、実験的検討を行なった。

2. PIN ダイオードの性質⁽¹⁾⁽²⁾

pin ダイオードは、 p^+ 領域、 n^+ 領域とそれらにはさまれている高抵抗の領域からなっており、少数キャリアの応答にくらべて、マイクロ波は十分周波数が高く、少数キャリアは応答できないことを利用し、周波数特性のよい、高調波ひずみの少ない抵抗減衰器、スイッチ、

振幅変調用可変抵抗などに用いることができる。また、 i 領域は pin ダイオードに、点接触マイクロ波ダイオード、バラクターダイオードなどよりも高い破壊電圧を与え電力容量を増大させている。

pin ダイオードの簡単化した等価回路を図1に示す。

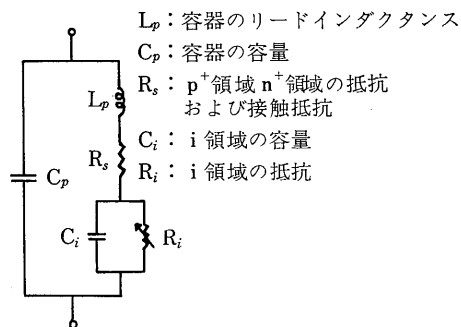


図1 pin ダイオード等価回路

ここで、 C_i はバイアスに依存しない容量で、 L_p はほぼ一定と考えてよく、 R_s は非常に小さい値で、 1Ω 前後である。この pin ダイオードに順バイアスを加えると、 p と n 層の間にある i 層に少数キャリアが注入され、伝導度変調によって R_i が減少し、逆バイアスを加えた場合には i 層は障壁となって R_i は無限大になる。した

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

がって, pin ダイオードは順バイアス状態では, バイアス電流の増加にともなってインピーダンスが低下し, 逆バイアス状態では高インピーダンスを示す。

たとえば, pin ダイオード (S-3023) を導波管に並列に同軸形で装荷して, 電圧電流特性より抵抗変化を求めて見ると図2に示すようになる。順バイアス電流 $1\mu\text{A}$ では $472\text{k}\Omega$, 100mA では 10.7Ω に変化している。このようなインピーダンス変化を利用して, 電流制御の減衰器を構成することができる。

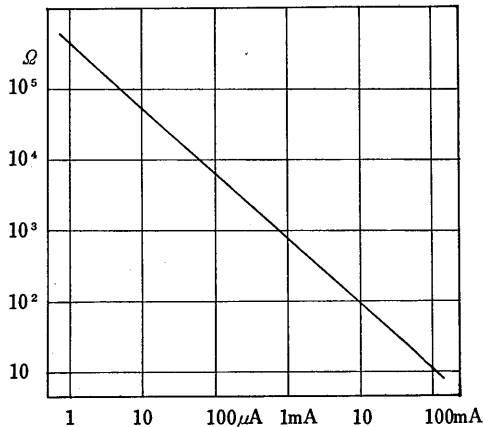


図2 順バイアス電流—抵抗特性

3. 減衰量および位相量

pin ダイオードを導波管に並列装荷したときの等価回路を図3に示す。ここで, Z は pin ダイオードのインピーダンスで, 全てのインピーダンスは導波管の特性インピーダンス Z_0 で規格化してある。

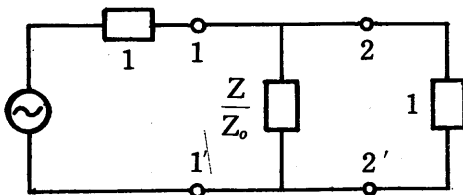


図3 ダイオード並列接続等価回路

回路網 1—1', 2—2' 端子の四端子定数を $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ で表わすと, 負荷の最大有効電力 P_{max} と負荷の電力 P_L との比は

$$\frac{P_{max}}{P_L} = \left(\frac{A+B+C+D}{2} \right)^2 \quad (1)$$

によって表わせるから, 動作伝送量は

$$\frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_{max}}{P_L} \right) = \ln \left(\frac{A+B+C+D}{2} \right) \quad (2)$$

よって, 減衰量 α , 位相量 β は次のように表わせる。

$$\alpha = \ln \left| \frac{A+B+C+D}{2} \right| \quad (\text{neper}) \quad (3)$$

$$\beta = \angle(A+B+C+D) \quad (\text{rad}) \quad (4)$$

また, 規格化入力インピーダンスを四端子定数で表わすと

$$Z_{in} = \frac{A+B}{C+D} \quad (5)$$

ここで, $Z_0/Z = G+jB$ とおくと, G, B はそれぞれ規格化コンダクタンス, 規格化サセプタンスである。

(3), (4)式より減衰量 L , 位相量 θ は次のようになる。

$$L = 10 \log_{10} \left\{ \left(1 + \frac{G}{2} \right)^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right\} \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{B}{2+G} \quad (\text{rad}) \quad (7)$$

直列装荷の場合には

$$L = 10 \log_{10} \left\{ \left(1 + \frac{R}{2} \right)^2 + \left(\frac{X}{2} \right)^2 \right\} \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{2+R} \quad (\text{rad}) \quad (9)$$

ただし, R, X は pin ダイオードの規格化抵抗, 規格化リアクタンスである。

4. 減衰器の諸特性および検討

pin ダイオード (S-3023) 1個を導波管 WRJ-10 に並列装荷して, pin ダイオード可変抵抗減衰器を構成した。その中心周波数を 9.4GHz に設定してある。これを図4に示す。

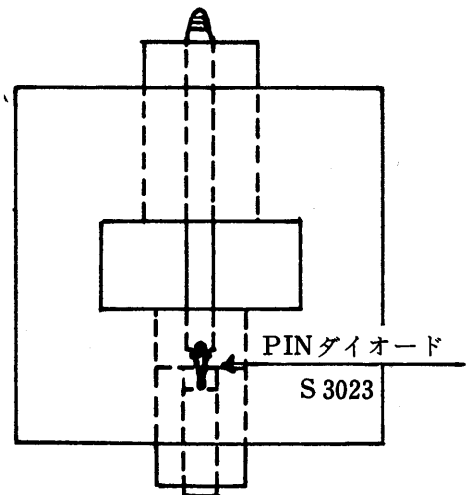


図4 pin ダイオード装荷導波管

ここで, pin ダイオードのリアクタンス分を打ち消すために, ダイオードを同軸形で導波管に並列に接続した。この章では, この pin ダイオード減衰器の減衰特性およびその減衰特性を改善するためのインピーダンス特性との関連, さらに位相特性などについて述べ, それらに対

して検討を加えた。

図1に示した pin ダイオードの等価回路は、前述したようにバイアス電流による障壁抵抗 R_i の変化によって次の2通りに分けることができる。すなわち、(i) バイアス電流が大きくて、障壁抵抗が無視しうる場合、 $R_i \ll 1$ (ii) バイアス電流が小さくて、障壁抵抗が非常に大である場合、 $R_i \gg 1$ 。これを図5に示す。

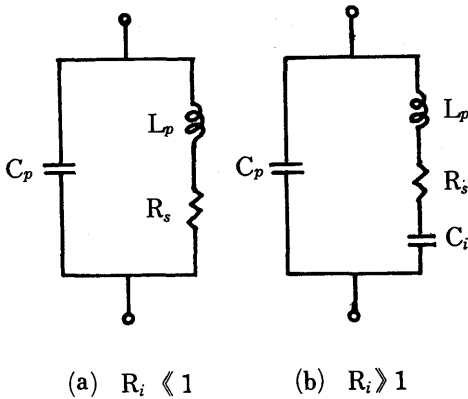


図5 pinダイオード等価回路

図5に示されるダイオードが実際には、導波管に同軸形で並列接続されているから、その等価回路として、図6のように表わすことができる。ここで、 Z_p はダイオードのインピーダンスで、 X_1 、 X_2 は同軸形で導波管にダイオードを装荷したために入るリアクタンスである。

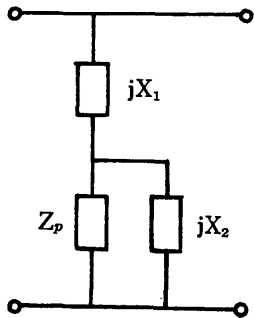


図6 ダイオード装荷等価回路

通常 R_s は非常に小さい値を示すから、これを無視してダイオードのインピーダンス Z_p は

$R_i \ll 1$ の場合

$$Z_p = \frac{j\omega L_p}{1 - \omega^2 C_p L_p} = jX_{ps} \quad (10)$$

$R_i \gg 1$ の場合

$$Z_p = \frac{\omega^2 L_p C_i - 1}{\omega(C_i + C_p - \omega^2 C_i C_p L_p)} = jX_{po} \quad (11)$$

Z_p 、 jX_1 、 jX_2 よりなる全体のインピーダンスを Z_w とすると、 $R_i \gg 1$ の場合には、バイアス電流零で電力は全て伝送される条件より、 Z_w は無限大でなければいけない。

したがって

$$X_2 = -X_{po} \quad (12)$$

また、 $R_i \ll 1$ の場合には、電力はダイオードで反射され一部はダイオードに吸収されるという条件より、 Z_w は零でなければいけない。

したがって

$$X_1 = \frac{X_{po} X_{ps}}{X_{ps} - X_{po}} \quad (13)$$

付加リアクタンス X_1 、 X_2 が(12)(13)式の値をとる時、すなわち、 $R_i \gg 1$ の場合には、同軸形で装荷されたダイオードが並列共振を起し、 $R_i \ll 1$ の場合に直列共振を起せば、理想的な減衰器として働くことになる。

V. S. W. R

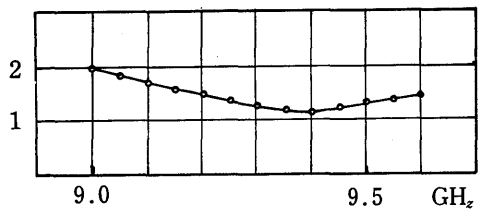


図7 ダイオード減衰器の定在波比

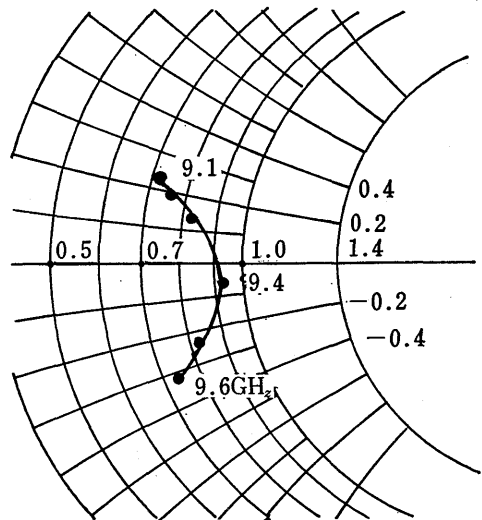


図8 規格化入力インピーダンスの周波数特性

図7に入力定在波比を示した。図7に示すように、9.2 GHz から 9.6 GHz の周波数範囲で定在波比1.5以下におさえることができ、中心周波数で1.19である。

図8、図9に規格化入力インピーダンスの周波特性およびバイアス電流に対する変化をスミス図表にして示してある。図8に示したように、零バイアスにおいて、中心周波数よりはずれるにしたがって、リアクタンス分の増加を示すが、これは同軸形で pin ダイオードを装荷し

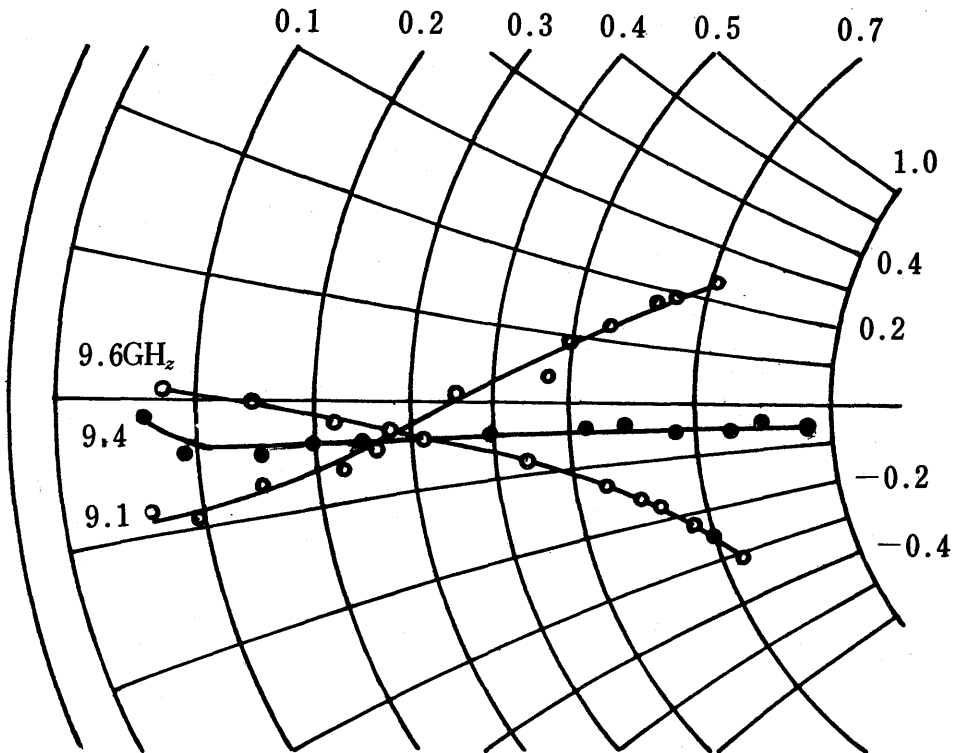


図9 バイアス電流に対する規格化入力インピーダンスの変化

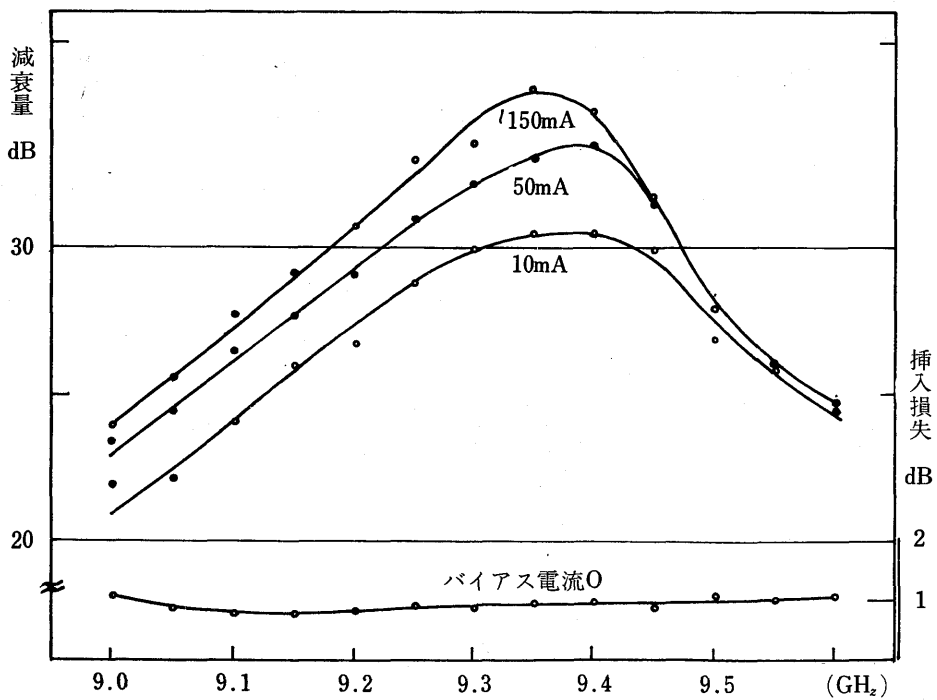


図10 挿入損失と減衰量

ているため、その同軸装荷が、ほぼ設計周波数を中心として、中心周波数より低い周波数で誘導性を示し、高い周波数で容量性を示す特性のためである。また、図9に示してあるように、規格化入力インピーダンスは周波数9.4GHzにおいて、リアクタンス分は容量性を示すが、零バイアスより500 μ Aの範囲で、ほぼ0.05以下におさまっており、抵抗分は0.92より0.056の範囲で変化している。理想的にはリアクタンス分が零で、抵抗分が1より零まで変化すれば、位相変化のない減衰器を構成することができる。

図10にバイアス電流を10mA、50mAそして150mAにしたときの減衰量と零バイアスにおける挿入損失を周

波数を9.0から9.6GHzまで変化させて示してある。バイアス電流を増加させていくと、設計中心周波数で最大減衰量を得ている。この章で前述したように、零バイアスのとき並列共振を起し、順バイアス、大電流のとき直列共振を起せば、その共振周波数において、図10の零バイアス状態の挿入損失と順バイアス状態の減衰量の差を最大にすることができる。すなわち、このような状態をスイッチングに用いれば、最大切換比を得ることができる。また、図8からも中心周波数が設定周波数9.4GHzより少し低くなっていることが判る。

図11にこれまで述べてきたような諸特性を持つpinダイオード可変抵抗減衰器の減衰特性を、周波数9.0、9.2

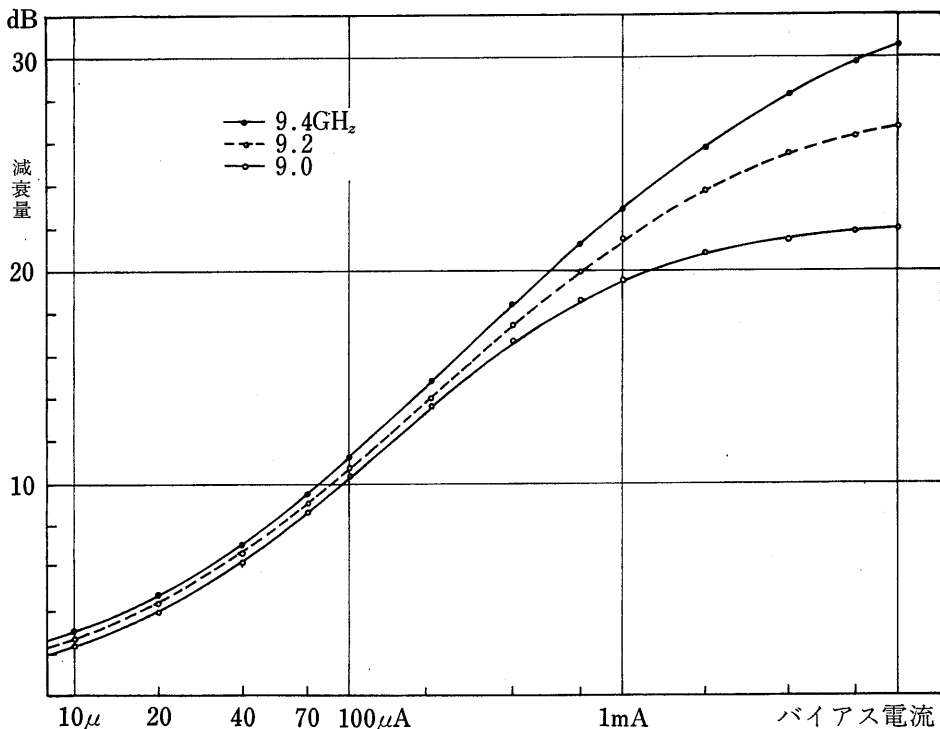


図11 9.0、9.2、9.4GHzにおける減衰特性

そして9.4GHzにおいて、バイアス電流が10 μ Aから10mAまでの範囲で示した。ここで、中心周波数よりはずれるにしたがって減衰量の低下を示すが、これも前述した共振周波数からのずれによって起るものである。また図12に(6)式に図9のスミス図表より求めたpinダイオードの規格化コンダクタンス、規格化サセプタンスの値を代入して求めた減衰特性曲線と図11の測定値とを、周波数9.4GHzにおいて、比較して示した。図に示すように両者の値は非常によく一致している。周波数9.2、9.4、9.6GHzにおける位相変化量の実測値を図13に示す。こ

こで、(7)式に上記の規格化コンダクタンス、規格化サセプタンスを代入して求めた位相変化量と図13の値とは、バイアス電流が数10 μ Aまではよく一致している。図13に示すように、周波数9.4GHzでは、零バイアスから500 μ Aまでの範囲で位相変化量は1.4°で、ほぼ一定となっている。

以上述べてきたように、中心周波数において位相変化がなく、減衰量と挿入損失の差を最大にした減衰器を構成することができるが、広い周波帯域において位相変化のない減衰器を構成するために、pinダイオードのリア

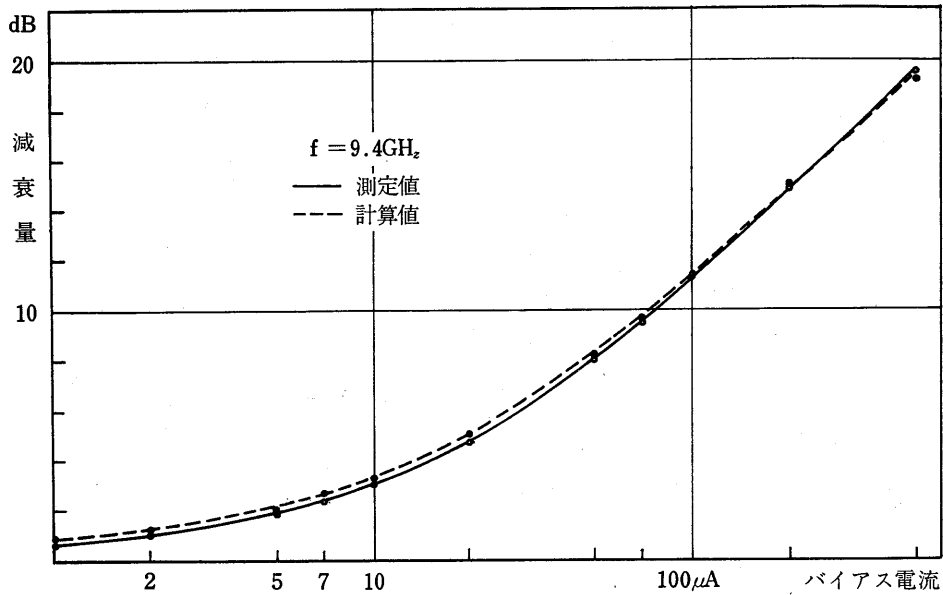


図12 9.4GHz における減衰量の比較

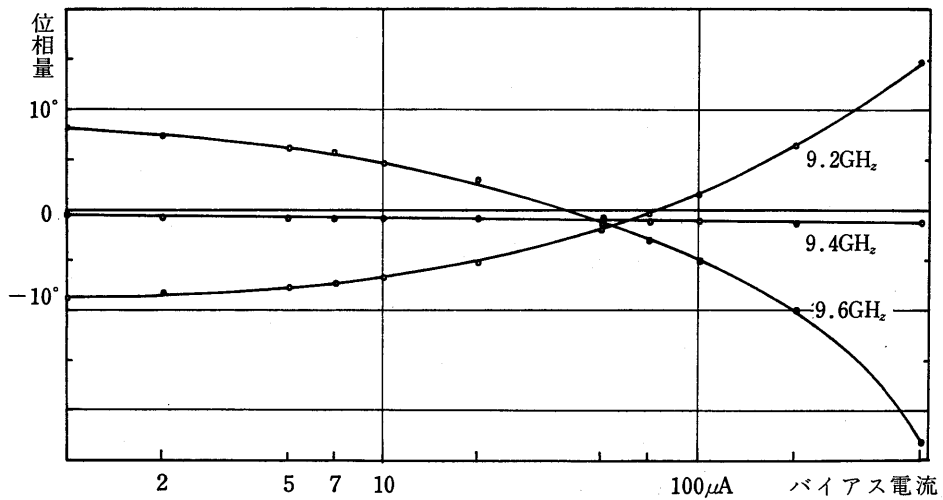


図13 9.2, 9.4, 9.6GHz における位相変化

クタンス分を打ち消す同軸装荷の周波数特性を改善しなければいけない。

5. 結 言

電流制御のできる減衰器のインピーダンス特性、減衰特性およびそれらの相互の関連について述べ、さらに、零バイアス、順バイアスにおける減衰量の差、すなわち

両者の最大切換比を与える条件を示した。pin ダイオードは同軸形で導波管に並列装荷されているために、それ自体が周波数特性を持ち、中心周波数からはずれるにしたがって、減衰特性、位相特性に大きく影響を及ぼしている。この周波数特性の改善が今後の問題として残っている。この抵抗線路形を2段接続したとき、さらに、一

一般的に n 段接続の場合の解析や実験的検討を今後行なっていきたい。

終りに、日頃御指導いただく金原淳主任教授，実験に協力下さった48年度卒研究生，亀井，江夏，井上の諸君に感謝致します。

文 献

- (1) R.J. Chaffin, Microwave Semiconductor Devices; Fundamentals and Radiation Effects, John Wiley & Sons, New York, 1973, p182~p192
- (2) M. E. Hines, "Fundamental Limitations in RF Switching and Phase Shifting Using Semiconductor", Proc. IEEE, Vol.52, p697~708 ; June, 1964