

導波管型ミリ波検波器

田中 聡^{*} 因来 利行^{**} 岡本修次^{**}

Design of the Waveguide Millimeter Wave Diode Detector

Satoshi TANAKA^{*} Toshiyuki INAKI^{*†} Syuji OKAMOTO^{**††}

ABSTRACT

This report shows the performance of the waveguide millimeter wave detector. The structure of the detector are designed by the FEM field analysis. The GaAs Schottky Barrier Diodes are put to use as the device for the millimeter wave detection. The diode mounts are newly developed to fix the extremely small diodes packages on. The measurements of the detector shows that operate on several bandwidth in Ka band range.

キーワード：ミリ波，検波器，ショットキバリアダイオード，導波管

Keywords: Millimeter Wave, Detector, Schottky Barrier Diode, Waveguide

1. まえがき

ミリ波 (30GHz ~ 300GHz) の電波は広帯域で雑音が少ないという利点から，大容量情報を送受信する次世代の宇宙通信や衛星放送に向けて利用研究や実用化試験が積極的に進められている [1]。また，ミリ波は直進性が高くビームを細く絞ることもできるので自動車の走行制御や衝突防止用のレーダ [2] への実用化が進められてきている。

ミリ波は自由空間波長が波長が数ミリ以下であり，それを取り扱う半導体素子はおよそその十分の 1 以下のものを使うことが望ましい。微細加工技術と半導体製造技術が発達したため，ミリ波帯においてモノリシックまたはハイブリッドのミリ波用の IC (MMIC) を作ることはそれほど困難ではなくなった [3]。しかし，半導体素子中を伝搬するミリ波は減衰が極めて大きく微少な信号の取り扱いには向かない。このため，ミリ波の回路網は導波管もしくはビームとして空間を伝搬させるなどの光学的手法が用いられる。

また，長距離で高減衰な宇宙通信では 10W から数 KW といった大電力を取り扱える機器が求めら

れる。そのときは，回路の結合にオーバーサイズの導波管を用いたり，素子間に適当な間隔を置いて保護し，放熱やグロー放電などの障害に対処する必要がある。このように導波管系を利用する技術は今後とも重要な位置にある [4]。

そこで，ミリ波の導波管を用いた回路の一つとして Ka バンド (33GHz ~ 50GHz) の検波器の試作実験をおこなった。検波素子としてミリ波用の GaAs ショットキ・バリア・ダイオード [5] を用い，これを導波管内部に固定するためのダイオードマウントを開発した。ショットキ・バリア・ダイオードは高周波特性に優れ，検出感度が高いという特徴がある。検波器の設計には有限要素法 (FEM) 解析を用いて導波管内の電界パターン (定在波) を計算し，マウント位置を決定している。試作実験では，ネットワークアナライザを用いて検波器の共振周波数を調べ，また，検波器の周波数応答および振幅応答も測定した。

2. 構造

導波管型ミリ波検波器の構造を図 1 に示す。

*電子・電気工学科

†現在 (株)セキュリティハウス

††現在 中国パール化成(株)

WRJ-40 (5.7 × 2.85mm)規格の導波管に検波用ダイオードを取り付けたダイオードマウントを同軸ケーブルに接続して挿入する。周波数調整のために導波管の一方からマイクロメータ付きのショートプランジャを挿入してある。この構造では導波路とダイオードマウントとの結合が重要になる。そこで、FEM解析を用いて導波管内の電磁界を解析した。導波管内では電界成分が導波管の短辺方向に向くTEモードが主体となるので、2次元解析が可能になる。解析モデルを図2に示す。ダイオードマウントは完全な円柱状で近似しショートプランジャも直方体で近似した。また、図の点線に沿って対称構造なので点線の下半分のみを解析することとし、点線部および入力端には完全磁気壁を置いた。それ以外の境界は完全電気壁である。

ダイオードマウントとショートプランジャの距離を d とするとき、後に4. の測定実験により示すが $d=9.5\text{mm}$ のとき最大の検波出力が得られたことから、この場合の導波管内に励起される固有モードと電界パターンの解析結果を図3に示す。実際に測定を行った 33 ~ 50GHz の帯域においては 36.8, 42.8,

44.5GHz の共振モードがみられる。44.5GHz のモードはダイオードマウント位置が電界の零点にあるため出力が得られないと考えられる。36.8GHz の場合は電界パターンとうまく結合しているが、ダイオードマウントとショートプランジャの間に形成される空洞部での電界強度は低くなっている。それに対して 42.8GHz では空洞内の電界強度も強く Q が高いため効率のよい動作が期待される。

3. 検波器の製作

ダイオードマウントの構造は図4に示すように、同軸線路の先端に幅 0.8mm 厚さ 0.4mm の片面銅張り積層板（以下プリント基板）を取り付け、その先端近くに約 0.2mm 幅のスリットを形成しダイオ-

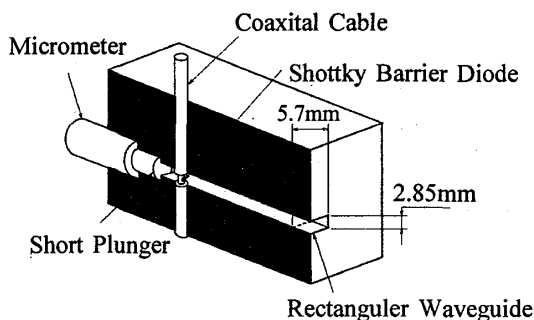


図1 ミリ波検波器の構造
Fig.1 Millimeter wave detector.

ドを置いた。プリント基板は比誘電率 $\epsilon_r=2.6$ のガラスフッ素樹脂製のものを切削加工し、先端を導波管と接続するために半田を用いて球状のコンタクトパンプを形成してある。ダイオードはHP社製 GaAs BEAM LEAD SHOTTKY BARRIER DIODE HSCH-9251 を用いたが、このダイオードはリード間距離が約 0.6mm と小さいため、リードをプリント基板上に半田付けする際は、(1) 拡大鏡の下で作業する。(2) まず、ダイオードパッケージをテープなどにより固

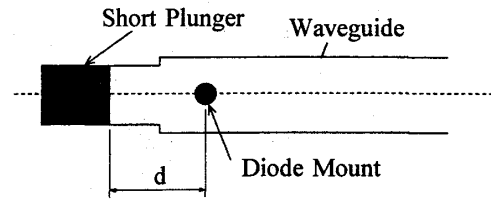


図2 導波路の構造
Fig.2 Structure in the waveguide.

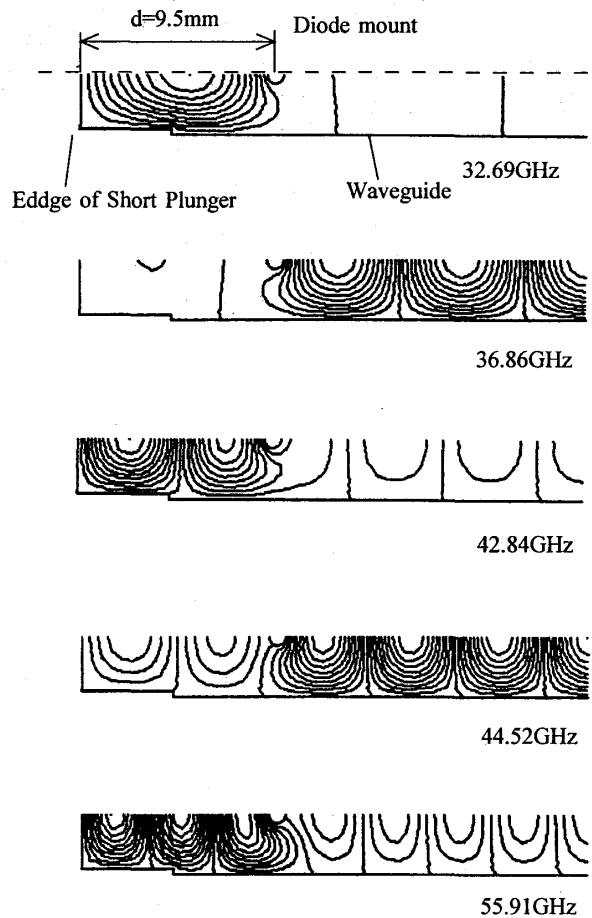


図3 導波管内モードパターン
Fig.3 Electrical field patterns in the waveguide detector.

定する。(3) はんだゴテをダイオードに直接当てない。(4) 両側から同時にはんだを流す。などの注意が必要であった。特にプリント基板とダイオードパッケージの膨張率が異なるため、はんだ付け時の加熱から冷却の過程でダイオードパッケージに無理な応力がかかり、パッケージの破損につながる事が最大の難点である。対策としては低融点のはんだを用いることにより加熱時間を下げることや、プリント基板上の汚れを事前にフラックス等で除去しておくなどの準備が必要である。

導波路は2つの真鍮ブロックを切削加工により溝を作り合わせたものを用いる。TEモードの伝搬には導波路の短辺側には高周波電流が少ないため、張り合わせのギャップによる影響は少なく、逆にTMモードではギャップを横切る電流が多くなるためこれを抑圧することができるのがこの構造の利点である。

4. 測定実験

図5のような測定系を用いて検波器の入力端からみた反射係数を測定した。測定にはミリ波用のネットワークアナライザ HP8511B を用いている。ミリ波ソース(HP83555A)より出力したミリ波は、パワースプリッタにより2方向に分けられ、一方はテストセットの A₁ 端子に入力されリファレンスとなる。

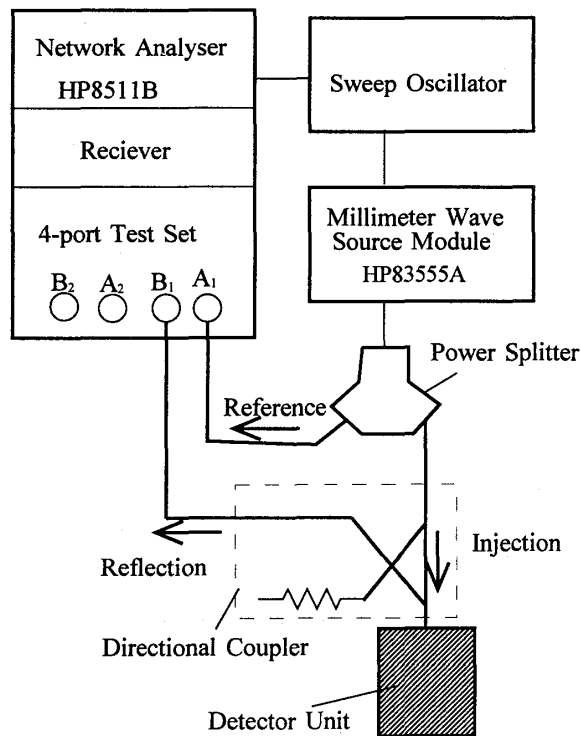


図5 反射測定系

Fig.5 Reflection measurement system.

他方は方向性結合器を経て検波器に入力される。検波器からの反射波は方向性結合器の分岐出力からテストセットの B₁ 端子に入力される。A₁, B₁ の二つの信号の振幅比と位相差を求め、これを完全反射の金属板の場合と比較することにより検波器の反射係数を求めることができる。すなわち短絡時の反射係数を Γ_s 、負荷時の反射係数を Γ_L とすると、真の反射係数 $\Gamma = \Gamma_L / \Gamma_s$ となる。

図6はダイオードマウントを置かない場合の反射

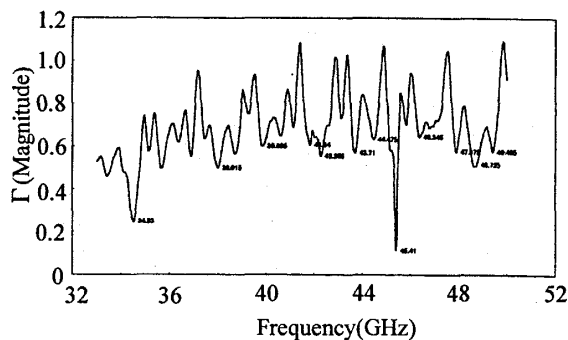


図6 反射特性 (ダイオードマウント未挿入, d=10.0mm)

Fig.6 Magnitude of reflection coefficient at d=10.0mm. The diode is not loaded

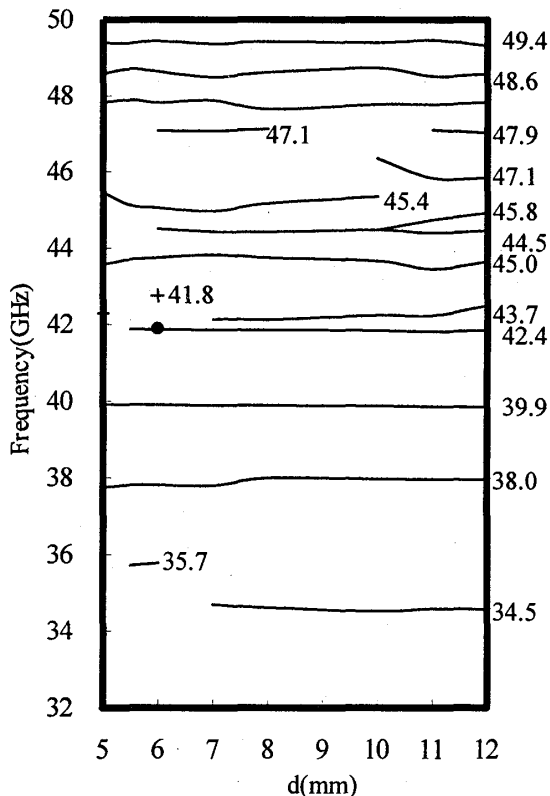


図7 共振モード分布図(ダイオード無装荷時)

Fig.7 Resonant mode map in the diode unmounted.

係数の測定結果の一例である。33 ~ 50GHz の帯域には多数の共振点が存在することが分かる。反射係数が1を越える場合があるが、これは基準となる短絡板の特性が不完全なためである。残念ながらこの帯域に対応した基準器を保有していないのでこうした問題が起きているが共振周波数の測定には問題がないと考えている。

測定した結果からそれぞれの共振点を拾い出し、それを横軸を d とするモードマップにまとめたものが図7である。ダイオードマウントが無い場合は導波路のみであるため導波路長に応じた周期的な共振モードが見られる。このモード周波数は d の値によってもあまり変化しないが、 d が大きくなるとショートプランジャ部分の複雑な構造の影響でモード分岐が始まる。

図8はダイオードマウントを装着した場合の $d=9.5\text{mm}$ のときの測定結果である。37.8GHz および42.4GHz の反射が最も小さくダイオードとの結合が大きいことが分かる。この周波数はそれぞれ2. の電磁界の有限要素解析の結果から36.8,42.8GHz のモードに対応しているものと考えられる。

ダイオード挿入時のモードマップを図9に示す。 d が短い間は共振周波数にほとんど変化がないが $d=9\text{mm}$ あたりから周波数変化を生じるモードがある。これは検波器の空洞部でマイクロ波が共振したことを示すものと考えられる。ダイオードマウントの挿入時と未挿入時のモードマップを比較すると35 ~ 38GHz において未挿入時の場合よりもモードが増加している。ダイオードポストとショートプランジャ間にできた空洞により共振するモードはダイオードマウントが無い導波管での共振モードに非常に近い周波数になるはずであるため、このように増加したモードはダイオードマウントの挿入により擾乱を生じて分岐したモードと考えられる。これらの

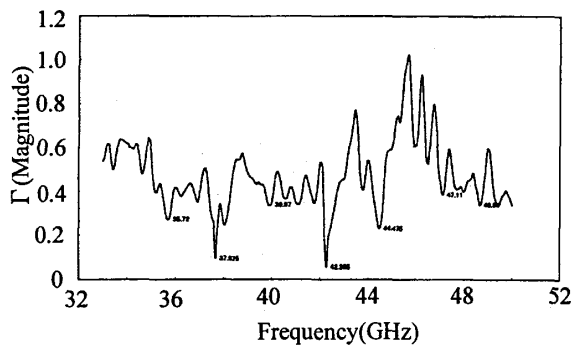


図8 反射特性
(ダイオードマウント挿入時, $d=9.5\text{mm}$)

Fig.8 Magnitude of refrection coefficient at $d=9.5\text{mm}$.
The diode is loaded.

モードは2次元の有限要素解析では見つけることができない。

次に、ミリ波検波器の検波出力特性の測定を図10の測定系を用いて行った。ミリ波ソースモジュールの出力を直接検波器に入力し、ダイオード出力をオシロスコープで観測する。33 ~ 50GHz までの帯域を3つに区分して測定した。それぞれの区分帯域では、ミリ波ソースモジュールからのミリ波出力は約20Hzでのこぎり波状に時間掃引されており、検波出力は掃引周波数で変調された形で取り出される。そこで、オシロスコープでスイープオシレータから出力される発振周波数に対応した電圧信号を同時に記録することにより、おのおのの周波数での検波出力を特定することができる。

この実験では検波器の感度を最大にするために、図10のような回路構成でダイオードに約1mAの直流バイアス電流を印加している。ただし、検波出力を取り出すために電源側に13mHのインダクタンスを挿入して交流信号の漏れを防止している。

$d=9.5\text{mm}$ の場合の測定結果の一例を図11に示す。ダイオード出力は負極性であるため図の下方にいくほど出力が大きいことになる。35.5 ~ 36.5GHz のところに比較的幅の広い出力が得られている。さ

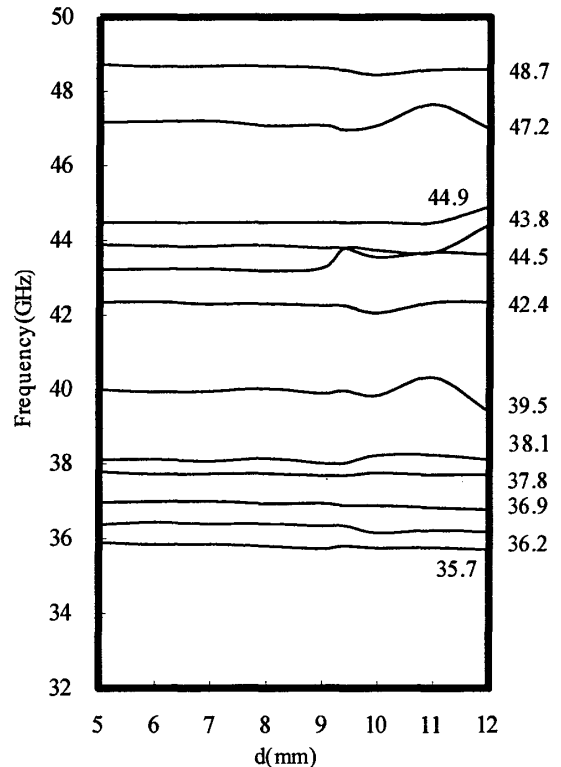


図9 共振モード分布図(ダイオード装荷時)

Fig.9 Resonant mode map in the diode mounted.

らに 43GHz あたりには 2本の鋭いピークが見られる。前者はダイオード挿入時に複数の共振点が現れたところであり、後者は検波器の空洞部に強い定在波を励起する部分である。

次に、主要な周波数において入力電力を -3 ~ 9dBm まで変化させた場合のダイオード出力の変化を図示している。d の値によっても異なるが 36GHz, 43GHz 帯が最も感度が高い。また、直線性も良好で、この程度の入力ではまだ出力が飽和しない。

5. まとめ

方形導波管を用いた Ka 帯の導波路型ミリ波検波器を試作し、その周波数応答を測定した。検波器の特性はショートプランジャとダイオードマウントの

間に形成される空洞内の電界の強度に依存する。空洞内電界が大きい 42.8GHz の場合は効率のよい検波出力が得られるが逆に帯域が狭くなっている。一方、36.8GHz の共振点には空洞内電界が小さく検波効率が低くなる代わりに広帯域の検波ができる、といった特徴があることがわかった。また、この共振点の周辺にはダイオードに関係すると考えられる新しい共振点が多数現れその結果広帯域化をはかることができている。

d の可変により共振周波数を可変することは可能であるが今回の実験ではその幅は 500MHz 程度にとどまっている。逆に共振点をあまり可変しないようにしても広帯域化を図ることができていることが示唆された。

今回の試作ミリ波検波器では検波特性が必ずしも

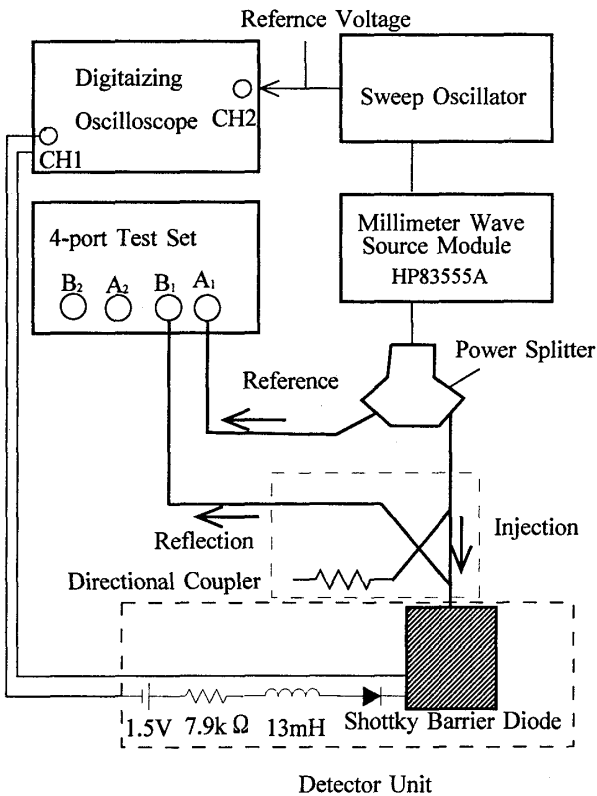


図10 検波出力特性の測定系
Fig.10 Measurement system for the output of Detector.

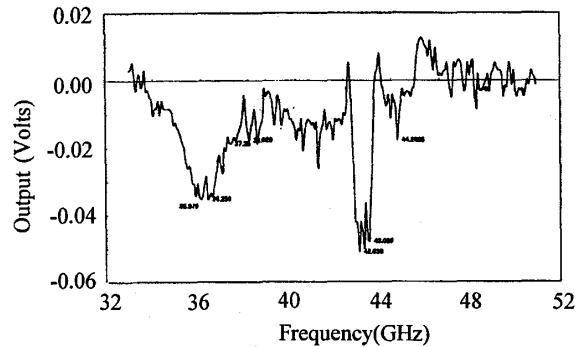


図 1 1 検波出力特性
(d=9.5mm, 入力電力 0dBm)

Fig.11 The output voltage of the detector versus input frequency .(d=9.5mm and input power is 0dBm.)

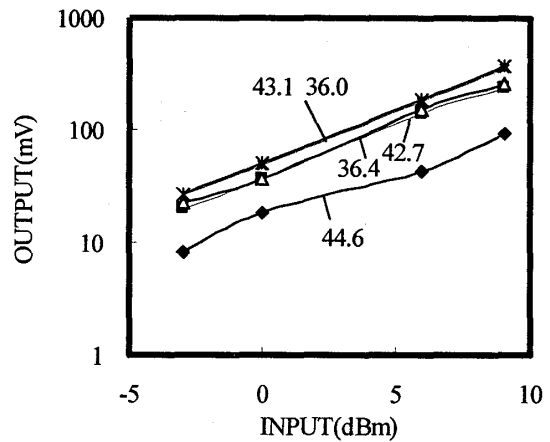


図12 入出力特性(d=9.5mm)

Fig.12 Diode output vs. millimeter wave input voltage at d=9.5mm.

最適化されているとはいえない。しかしながら、広帯域かと高出力化について重要な知見が得られた。今後、この検波器を利用したレーダ装置の実験を進めていく予定である。

参考文献

[1]竹田， 稲田：“宇宙通信周波数の現状と動向，”信学誌， Vol.79, No.4, pp.339-343, 1996/4/25.

[2]所：“自動車用レーダとその応用，”信学誌， Vol.80, No.9, pp.919-924, 1997/9/25.

[3]本城：“マイクロ波ミリ波デバイス，”信学誌， Vol.80, No.7, pp.697-703, 1997/7/25.

[4]Stephen A. Maas, "Microwave Mixers," Chapter 6, Artech House, 1986.

[5] B.L.Smith and M.H.Carpentier: "The Microwave engineering Hand Book Volume 1," PART TWO 11, CHAPMAN&HALL, 1993.