

JAERI - M
87-208

電子サイクロトロン加熱用
120GHz ミリ波コンポーネントの設計

1988年1月

後藤 正治*・坂本 慶司・永島 孝

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 総高野高速印刷

電子サイクロトロン加熱用
120GHz ミリ波コンポーネントの設計

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部
後藤 正治*・坂本 慶司・永島 孝

(1987年12月10日受理)

電子サイクロトロン加熱用コンポーネントの開発の一環として、120GHz帯ミリ波の測定用 TE_{01} - TE_{04} モード変換器と200kW TE_{04} モード方向性結合器の設計の為に計算を行い、各部の寸法及び精度を決定した。測定用 TE_{01} - TE_{04} モード変換器は、一般化された電信方程式を解く計算機コードを使用して各モードの発生量を求め、モード変換率96%以上となる解を得た。又、200kW TE_{04} モード方向性結合器は、同一形状の結合孔を多数あけた構造をしており、結合度38dB、方向性60dB以上、モード弁別度は TE_{24} モードを除いて~15dB以上となった。

Design of Millimeter-Wave Components at 120GHz
for Electron Cyclotron Heating

Masaharu GOTO^{*}, Keishi SAKAMOTO and Takashi NAGASHIMA

Division of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 10, 1987)

As a part of developments on microwave circuits for electron cyclotron heating on large tokamaks, a TE_{01} - TE_{04} mode converter (120GHz) and a TE_{04} mode directional coupler (120GHz) are designed. Mode distribution in the mode converter is determined by solving the generalized telegraphist's equations. The mode conversion ratio is more than 96%.

The TE_{04} mode directional coupler is a multi hole type one and coupling coefficient of 38dB, the directivity of more than 60dB, and the mode selectivities of more than about 15dB except TE_{24} mode are obtained.

Keywords: Electron Cyclotron Heating, Millimeter-Wave, Mode Converter,
Directional Coupler, 120GHz Band

* Mitsubishi Electric Corporation

目 次

1. 序 論	1
2. TE_{01} - TE_{04} モード変換器	1
2.1 計算方法	1
2.2 計算結果	1
3. TE_{04} モード方向性結合器	3
3.1 計算方法	3
3.2 計算結果	6
4. 今後の課題	8
謝 辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. TE_{01} - TE_{04} Mode Converter	1
2.1 Calculation Methods	1
2.2 Computation Results	1
3. TE_{04} Mode Directional Coupler	3
3.1 Calculation Methods	3
3.2 Computation Results	6
4. Future Subjects	8
Acknowledgements	8
References	8

1. 序 論

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) 用コンポーネントとしては、大電力用の方向性結合器、モード変換器、バンド、テーパ導波管、RF窓、アンテナ、ダミーロード等、及びこれらの性能を試験する為に、測定用の種々の立体回路部品が必要である。今回、120GHz帯ミリ波の測定用 $TE_{01} - TE_{04}$ モード変換器、及び大電力用 TE_{04} モード方向性結合器について設計計算を行ったのでその結果を報告する。

2. $TE_{01} - TE_{04}$ モード変換器

核融合実験装置に於ける ECRH システムでは、大電力ミリ波発振器であるジャイロトロンからの TE_{0n}^0 モードのミリ波を、伝送損失の少ない TE_{01}^0 モードに変換し、プラズマの近傍まで伝送する方法が行われている。この伝送システムの性能を調べるため、システムを構成している立体回路部品の、 TE_{0n}^0 モードに対する挿入損失及び VSWR 等の測定を行う必要がある。このため測定系用として TE_{0n}^0 モードのミリ波が必要となる。掃引発振器の出力モード TE_{10}^0 の TE_{0n}^0 モードへの変換を、 $TE_{10}^0 - TE_{01}^0$ モード変換器、テーパ管、 $TE_{01}^0 - TE_{0n}^0$ モード変換器の組合せで行うことができる。ジャイロトロンからの出力を120GHz TE_{04}^0 モードであるとし、測定用の $TE_{01}^0 - TE_{04}^0$ モード変換器の設計計算を行った。

2.1 計算方法

モード変換器のモード変換率を求めるためのモード結合方程式は、固有モード展開を用いてマックスウェルの方程式から導かれた一般化された電信方程式で表わされる⁽¹⁾これは、多元の複素連立微分方程式であるので、実数部と虚数部に分離すると実数の多元連立微分方程式となる。これを解く計算機コードが開発されているので、これを使用してモード変換率の計算を行った。

$TE_{01} - TE_{04}$ モード変換器は、Fig. 1に示す様に導波管の半径に周期的な摂動を加えた形状をしている。

2.2 計算結果

各パラメータの選択に当たって次の事を考慮した。

- ① 摂動の周期数 n は、モード変換率の周波数特性を良くするためにできるだけ小さな値であること。
- ② 摂動の波長 λ_b 及び摂動の大きさ a_1 は、 TE_{01} から TE_{04} へのモード変換率及び TE_{04} から TE_{01} へのモード変換率が共に大きな値となること。
- ③ 接続する導波管の半径 a_0 は、120GHzで TE_{04} モードがカットオフとなる5.30mmと

1. 序 論

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) 用コンポーネントとしては、大電力用の方向性結合器、モード変換器、バンド、テーパ導波管、RF窓、アンテナ、ダミーロード等、及びこれらの性能を試験する為に、測定用の種々の立体回路部品が必要である。今回、120GHz帯ミリ波の測定用 $TE_{01} - TE_{04}$ モード変換器、及び大電力用 TE_{04} モード方向性結合器について設計計算を行ったのでその結果を報告する。

2. $TE_{01} - TE_{04}$ モード変換器

核融合実験装置に於ける ECRH システムでは、大電力ミリ波発振器であるジャイロトロンからの TE_{0n}^0 モードのミリ波を、伝送損失の少ない TE_{01}^0 モードに変換し、プラズマの近傍まで伝送する方法が行われている。この伝送システムの性能を調べるため、システムを構成している立体回路部品の、 TE_{0n}^0 モードに対する挿入損失及び VSWR 等の測定を行う必要がある。このため測定系用として TE_{0n}^0 モードのミリ波が必要となる。掃引発振器の出力モード TE_{10}^0 の TE_{0n}^0 モードへの変換を、 $TE_{10}^0 - TE_{01}^0$ モード変換器、テーパ管、 $TE_{01}^0 - TE_{0n}^0$ モード変換器の組合せで行うことができる。ジャイロトロンからの出力を120GHz TE_{04}^0 モードであるとし、測定用の $TE_{01}^0 - TE_{04}^0$ モード変換器の設計計算を行った。

2.1 計算方法

モード変換器のモード変換率を求めるためのモード結合方程式は、固有モード展開を用いてマックスウェルの方程式から導かれた一般化された電信方程式で表わされる⁽¹⁾これは、多元の複素連立微分方程式であるので、実数部と虚数部に分離すると実数の多元連立微分方程式となる。これを解く計算機コードが開発されているので、これを使用してモード変換率の計算を行った。

$TE_{01} - TE_{04}$ モード変換器は、Fig. 1に示す様に導波管の半径に周期的な摂動を加えた形状をしている。

2.2 計算結果

各パラメータの選択に当たって次の事を考慮した。

- ① 摂動の周期数 n は、モード変換率の周波数特性を良くするためにできるだけ小さな値であること。
- ② 摂動の波長 λ_b 及び摂動の大きさ a_1 は、 TE_{01} から TE_{04} へのモード変換率及び TE_{04} から TE_{01} へのモード変換率が共に大きな値となること。
- ③ 接続する導波管の半径 a_0 は、120GHzで TE_{04} モードがカットオフとなる5.30mmと

TE₀₅モードがカットオフとなる6.55mmのほぼ中間の値であること。

計算の結果、測定用TE₀₁-TE₀₄モード変換器の各パラメータをTable 1に示す値に決めた。この時のモード変換率は次の値となった。

$$TE_{01} \rightarrow TE_{04} \text{ モード変換率 } 0.971$$

$$TE_{04} \rightarrow TE_{01} \text{ モード変換率 } 0.960$$

以下に各パラメータを選択するために行った計算の結果を示す。

2.2.1 各モードの発生量

TE₀₁-TE₀₄モード変換器ではTE_{0n}モードとの結合があり、TE₀₅モード以上の高次モードはカットオフとなっているので、TE₀₁, TE₀₂, TE₀₃, TE₀₄の4つのモードが存在する。Table 1に示した条件での伝搬方向zに対する各モードの発生量をFig. 2及びFig. 3に示す。n = 20 (z = 101mm)の時の各モードの電力比はTable 2に示す値となる。

2.2.2 周波数特性

摂動の周波数n (整数又は半整数)が20~18の時の周波数fに対するモード変換率f_cをFig. 4~Fig. 8に示す。摂動の波長λ_bと摂動の大きさa₁は、各々のnについて120GHzでのモード変換率が最大となる値を選んだ。計算の結果、TE₀₁→TE₀₄モード変換率が最大となるλ_bとa₁の値は、TE₀₄→TE₀₁モード変換率が最大となる時の値とほぼ等しくなる。又、2つのモード変換率は、nが整数の時TE₀₁→TE₀₄モード変換率の方が少し大きくなり、整数でない時はほぼ等しくなる。n = 20の時モード変換率が0.95以上及び0.9以上となる周波数範囲はTable 3に示す値となる。

2.2.3 精度

摂動の波長λ_b, 摂動の大きさa₁及び導波管の半径a₀の公差を求めるために、各々の値を変化させた時のモード変換率を計算した。結果をFig. 9~Fig. 11に示す。図からわかる様に、a₀に対する変化が最も大きくなっている。公差を±0.01mmとし、他のパラメータはTable 1に示した値とした時のモード変換率をTable 4~Table 6に示す。

2.2.4 方向性

Fig. 1でミリ波を左方向から入射する場合を正方向入射、右方向から入射する場合を逆方向入射と呼ぶことにする。逆方向入射の場合のモード変換器内の半径aは、nが整数でない時(n = 19.5, 18.5, ...)は、正方向入射の場合と同じく $a = a_0 + a_1 \sin(2\pi z / \lambda_b)$ と表わされるが、nが整数の時は $a = a_0 - a_1 \sin(2\pi z / \lambda_b)$ となり、モード変換率に違いが出てくる。即ち、摂動の周期数nが整数の時は、モード変換器に方向性が生じる。Fig. 12とFig. 13に、Table 1に示した条件で逆方向入射した場合の伝搬方向zに対する各モードの発生量を示す。TE₀₁→TE₀₄モード変換に対しての正方向入射(Fig. 2)と逆方向入射(Fig. 12), TE₀₄→TE₀₁モード変換に対しての正方向入射(Fig. 3)と逆方向入射(Fig. 13)を各々比較すると、モード変換率及びその曲線の形は共にほぼ等しくなっており、方向性は余り問題としないで良い事がわかる。n = 20の時の各モードの電力比を正方向入射と逆方向入射の両方についてTable 7に示す。

2.2.5 不要モードによる影響

実際のミリ波測定系では、モード変換器に入射してくるミリ波には不要モードが混じっている。不要モードとして TE_{02} モードを選び、変換しようとするモードに対して入射時の位相が各々 0° , 90° , 180° , 270° ずれた場合の、伝搬方向 z に対する各モードの発生量を Fig. 14~ Fig. 21 に示す。 TE_{02} モードの入射時の電力は 2% とした。これらの図より、不要モードの入射時の電力が同じでも、その位相によりモード変換率にかなりの差が出てくることがわかる。実際の測定に於てモード変換率が悪い場合、その原因が不要モードに因るのであれば、入射側に直線導波管を挿入し、各モードの位相速度の違いを利用してモード変換器入口での位相差を変えて、モード変換率を良くすることができる。 $n=20$ の時の各モードの電力比を Table 8 に示す。

3. TE_{04} モード方向性結合器

ジャイロトロンからの大電力ミリ波の出力及びモードの測定の為に、 TE_{0n} モード方向性結合器が必要である。この方向性結合器としては、結合孔を用いた導波管型と反射板を用いた準光学型の 2 種類がある。今回、周波数 120 GHz, 耐電力 200 kW の導波管型の TE_{04} モード方向性結合器の設計計算を行った。

3.1 計算方法

3.1.1 単一結合孔による結合係数

Fig. 22 に単一結合孔により結合された導波管の概略図を示す。このとき、円形導波管内の TE_{mn} モードから方形導波管内の TE_{10} モードへの結合係数は次式で表わされる。⁽²⁾

$$S_{[10][mn]}^{(3)(1)} = S_{[10][mn]}^{(4)(1)}$$

$$= j \frac{1}{3 \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{d_2^3}{d_1^2 \sqrt{a^3 b}} \cdot 1.0^{-1.60} \frac{t}{d_2} \sqrt{1 - \left(\frac{1.71 d_2}{\lambda} \right)^2}$$

$$\cdot \sqrt{\epsilon_m \lambda_{g2} \lambda_{gmn}} \cdot P'_{mn}$$

但し $S_{[10][mn]}^{(j)(i)}$: 円形導波管の (i) 方向より入射した TE_{mn} モードの、方形導波管の (j) 方向へ進む TE_{10} モードへの結合係数

P'_{mn} : $J'_m = 0$ の 0 でない n 番目の根

ϵ_m : $= 1$ ($m=0$), $= 2$ ($m \neq 0$)

λ : 自由空間波長

λ_{g2} : 方形導波管内の TE_{10} モードの管内波長

2.2.5 不要モードによる影響

実際のミリ波測定系では、モード変換器に入射してくるミリ波には不要モードが混じっている。不要モードとして TE_{02} モードを選び、変換しようとするモードに対して入射時の位相が各々 0° , 90° , 180° , 270° ずれた場合の、伝搬方向 z に対する各モードの発生量を Fig. 14 ~ Fig. 21 に示す。 TE_{02} モードの入射時の電力は 2% とした。これらの図より、不要モードの入射時の電力が同じでも、その位相によりモード変換率にかなりの差が出てくることがわかる。実際の測定に於てモード変換率が悪い場合、その原因が不要モードに因るのであれば、入射側に直線導波管を挿入し、各モードの位相速度の違いを利用してモード変換器入口での位相差を変えて、モード変換率を良くすることができる。 $n=20$ の時の各モードの電力比を Table 8 に示す。

3. TE_{04} モード方向性結合器

ジャイロトロンからの大電力ミリ波の出力及びモードの測定の為に、 TE_{0n} モード方向性結合器が必要である。この方向性結合器としては、結合孔を用いた導波管型と反射板を用いた準光学型の 2 種類がある。今回、周波数 120 GHz, 耐電力 200 kW の導波管型の TE_{04} モード方向性結合器の設計計算を行った。

3.1 計算方法

3.1.1 単一結合孔による結合係数

Fig. 22 に単一結合孔により結合された導波管の概略図を示す。このとき、円形導波管内の TE_{mn} モードから方形導波管内の TE_{10} モードへの結合係数は次式で表わされる。⁽²⁾

$$S_{[10]}^{(3)}{}^{(1)}[mn] = S_{[10]}^{(4)}{}^{(1)}[mn]$$

$$= j \frac{1}{3 \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{d_2^3}{d_1^2 \sqrt{a^3 b}} \cdot 1.0^{-1.60} \frac{t}{d_2} \sqrt{1 - \left(\frac{1.71 d_2}{\lambda} \right)^2}$$

$$\cdot \sqrt{\epsilon_m \lambda_{g2} \lambda_{gmn}} \cdot P'_{mn}$$

但し $S_{[10]}^{(j)}{}^{(i)}$: 円形導波管の (i) 方向より入射した TE_{mn} モードの、方形導波管の (j) 方向へ進む TE_{10} モードへの結合係数

P'_{mn} : $J'_m = 0$ の 0 でない n 番目の根

ϵ_m : $= 1$ ($m=0$), $= 2$ ($m \neq 0$)

λ : 自由空間波長

λ_{g2} : 方形導波管内の TE_{10} モードの管内波長

- λ_{gmn} : 円形導波管内のTE_{mn} モードの管内波長
- d_1 : 円形導波管の直径
- d_2 : 結合孔の直径
- t : 結合孔の厚さ
- a : 方形導波管の幅
- b : 方形導波管の高さ

3.1.2 多孔型方向性結合器

Fig. 22 に示した結合孔を z 方向に多数あけた多孔型方向性結合器について考える。結合孔の形状は総て同一とする。

Fig. 23 は、 z_1 間隔であけた n_1 個の結合孔の組を z_2 間隔で n_2 組、計 $n_1 \cdot n_2$ 個の結合孔をあけて方向性結合器としている。この時円形導波管の(1)より入射した(i)モードの、方形導波管の(4)方向及び(3)方向へ伝搬するTE₁₀モードへの結合係数は、導波管壁での損失を無視すると、 λ_{ei} 及び λ_{ei}^+ なる波長を用いて次の様に表わせる。⁽³⁾

$$V_{fi} = C_0 \sum_{k_2=1}^{n_2} \sum_{k_1=1}^{n_1} \exp \left[-j \frac{4\pi \{ (k_1-1) z_1 + (k_2-1) z_2 \}}{\lambda_{ei}} \right]$$

$$V_{bi} = C_0 \sum_{k_2=1}^{n_2} \sum_{k_1=1}^{n_1} \exp \left[-j \frac{4\pi \{ (k_1-1) z_1 + (k_2-1) z_2 \}}{\lambda_{ei}^+} \right]$$

$$\lambda_{ei} = \frac{2 \lambda_{g_2} \lambda_{g_1}^i}{\lambda_{g_2} - \lambda_{g_1}^i}$$

$$\lambda_{ei}^+ = \frac{2 \lambda_{g_2} \lambda_{g_1}^i}{\lambda_{g_2} + \lambda_{g_1}^i}$$

- 但し V_{fi} : 円形導波管内の(i)モードの(4)方向への結合係数
- V_{bi} : " (3)方向 "
- $\lambda_{g_1}^i$: 円形導波管内の(i)モードの管内波長
- λ_{g_2} : 方形導波管内のTE₁₀モードの管内波長
- C_0 : 単一結合孔による結合係数

特に、 z 間隔であけた2個の結合孔による結合係数は

$$V_{fi} = C_0 \left(1 + e^{-j \frac{4\pi z}{\lambda_{ei}}} \right) = 2C_0 \cos \frac{2\pi z}{\lambda_{ei}} \cdot e^{-j \frac{2\pi z}{\lambda_{ei}}}$$

$$V_{bi} = C_0 \left(1 + e^{-j \frac{4\pi z}{\lambda_{ei}^+}} \right) = 2C_0 \cos \frac{2\pi z}{\lambda_{ei}^+} \cdot e^{-j \frac{2\pi z}{\lambda_{ei}^+}}$$

となる。方向性結合器の出力を Fig. 2 3 の(3)方向から取出すとすると結合度の周波数特性が悪くなるので、(4)方向から取出すこととする。この場合方向性を良くする為には $|V_{bi}/C_0| = 0$ 即ち

$$Z = \frac{2m_1 - 1}{4} \lambda_{ei}^+ \quad m_1 = 1, 2, \dots$$

又、少ない結合孔で結合度を大きくする為には $|V_{fi}/C_0| = 2$ 即ち

$$Z = \frac{m_2}{2} \lambda_{ei} \quad m_2 = 1, 2, \dots$$

とすれば良い。よって Fig. 2 3 で $n_1 = 2$ の場合、 $Z_1 = (2m_1 - 1)/4 \cdot \lambda_{ei}^+$ 、 $Z_2 = m_2/2 \cdot \lambda_{ei}$ とすると(4)方向に方向性結合器の出力が得られ、しかも方向性が理想的には ∞ となる。

ところで、 Z 間隔であけた2個の結合孔による(4)方向への結合係数 $|V_{fi}|$ が1個の結合孔による結合度よりも小さくならない様にする為には、 $|\cos(2\pi Z/\lambda_{ei})| \geq \frac{1}{2}$ とする必要がある。よって Z_1 間隔であけられた n_1 個の結合孔がこの範囲にないと、同じ結合度を得るのに結合孔の組 n_2 を大きくしなければならず、周波数特性を悪くしてしまう。

$n_1 = 2$ とし Z_1 間隔であけた2個の結合孔を Z_2 間隔で n_2 組あけた方向性結合器の結合度 C 、方向性 D 、円形導波管中の(j)モードに対するモード弁別度 S_{fj} 、及び Fig. 2 3 の(2)方向から入射してきた(j)モードに対するモード弁別度 S_{bj} は次の様になる。

$$C = -20 \log_{10} |V_{fi}^{n_2}|$$

$$D = -20 \log_{10} \frac{|V_{bi}^{n_2}|}{|V_{fi}^{n_2}|}$$

$$S_{fj} = -20 \log_{10} \frac{|V_{fj}^{n_2}|}{|V_{fi}^{n_2}|}$$

$$S_{bj} = -20 \log_{10} \frac{|V_{bj}^{n_2}|}{|V_{fi}^{n_2}|}$$

$$V_{fi}^{n_2} = 2C_0 \cos \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ei}} \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ei}} \right) \sum_{k=1}^{n_2} \exp \left\{ -j \frac{4\pi(k-1)Z_2}{\lambda_{ei}} \right\}$$

$$V_{bi}^{n_2} = 2C_0 \cos \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ei}^+} \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ei}^+} \right) \sum_{k=1}^{n_2} \exp \left\{ -j \frac{4\pi(k-1)Z_2}{\lambda_{ei}^+} \right\}$$

$$V_{fj}^{n_2} = 2C_0 \cos \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ej}} \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ej}} \right) \sum_{k=1}^{n_2} \exp \left\{ -j \frac{4\pi(k-1)Z_2}{\lambda_{ej}} \right\}$$

$$V_{bj}^{n_2} = 2C_0 \cos \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ej}^+} \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi Z_1}{\lambda_{ej}^+} \right) \sum_{k=1}^{n_2} \exp \left\{ -j \frac{4\pi(k-1)Z_2}{\lambda_{ej}^+} \right\}$$

3.2 計算結果

各パラメータの選択に当って次の事を考慮した。

- ① 結合度及び方向性の周波数特性を良くするために余り長くならないこと。
- ② 10 dB程度以上の方向性を測定可能とするために
(結合度) $\leq \sim 38$ dB

であること。

この値は、測定系として用意する掃引発振器の出力、測定用モード変換器のモード変換率等から決まる値である。

- ③ モード弁別度が15 dB程度以上あること。

但し、TE₂₄モードについては円形導波管中の位相速度がTE₀₄モードとほぼ等しいためこの条件は除く。

- ④ 円形導波管の直径は、120 GHz 200 kW TE₀₄モードが伝送可能で、出来るだけ小さな値であること。

計算の結果200 kW TE₀₄モード方向性結合器の各パラメータをTable 9に示す値に決めた。

この時の結合度及び方向性は計算の結果次の値となった。以下の計算では管壁での損失は方形導波管でのみ考慮し、円形導波管での損失は無視した。銅の体積抵抗率は $\rho = 1.72 \times 10^{-8} \Omega m$ で計算した。又、円形導波管での結合孔による不要モードの発生量は非常に小さいので無視した。

結合度 37.99 dB

方向性 66.94 dB

3.2.1 円形導波管及び方形導波管の大きさ

円形導波管の直径は、伝送可能なモードの数を少なくする為に可能な限り小さくした方が良いが、

逆に管内での放電を起こさない為にある程度の大きさを必要とする。空気の絶縁破壊強度を $|E|_{\max} = 2.9 \text{ kV/cm}$ とし、200 kWの定格伝送電力に対し、1,600 kWの電力容量をとるものとして、円形導波管の直径を37 mmとした。Fig. 24に周波数120 GHzで最大電界強度が2.9 kV/cmとなる時の各モードの電力容量を示す。

方形導波管の大きさは、Fバンド用のWR-8とした。

3.2.2 結合孔の間隔

2個の結合孔の間隔は、方向性を良くするために $Z_1 = (2m_1 - 1) / 4 \cdot \lambda_{ei}^+$ と表わされる。(i)モードとして TE_{04} を選び、周波数を $f = 120 \text{ GHz}$ 、円形導波管の直径を $d_1 = 37 \text{ mm}$ 、方形導波管をWR-8とすると、 $m_1 = 1, 2, 3, \dots$ に対応して

$$Z_1 = 0.72 \text{ mm}, 2.15 \text{ mm}, 3.58 \text{ mm}, \dots$$

となる。同様に $Z_2 = m_2 / 2 \cdot \lambda_{ei}$ と表わされ、 $m_2 = 1, 2, 3, \dots$ に対応して

$$Z_2 = 1.475 \text{ mm}, 2.950 \text{ mm}, 4.425 \text{ mm}, \dots$$

となる。方向性結合器の全長を短くするために $Z_2 = 1.475 \text{ mm}$ とする。 Z_1 に関しては、2個の結合孔による結合度が1個の場合よりも小さくしないという条件 $|\cos(2\pi Z_1 / \lambda_{ei})| \geq \frac{1}{2}$ を用いると

$$|Z_1| \leq 4.92 \text{ mm}$$

となり、 $m_1 = 1, 2, 3$ の3通りの場合がこの条件を満足する。この3通りについて、仮想的に $Z_1 = 0$ とした場合と比較して結合度の数値の増加を求めると Table 10の様になる。尚この値は結合孔の組の数 n_2 には独立である。同一の結合度を得るためには、 $m_2 = 3$ の場合は $m_2 = 2$ の場合に比べて、 n_2 の値を1.24倍大きくする必要がある。 m_1 の値は、小さい方が全長を短くでき周波数特性が良くなるが、 $m_1 = 1$ の場合は結合孔の大きさに比べて Z_1 の値が小さいため除くこととする。よって $m_2 = 2$ 即ち $Z_2 = 2.950 \text{ mm}$ とする。

3.2.3 モード弁別度

Table 9に示した条件で、 n_2 をパラメータとして変化させた時の、結合度 C とモード弁別度 S_{fj} を Fig. 25(a)~Fig. 25(c)に示す。Fig. 25(a)の TE_{04} の折れ線が結合度を示している。これらの図から、(結合度) $\leq \sim 38 \text{ dB}$ で TE_{04} モードを除く各モードに対するモード弁別度が $\sim 15 \text{ dB}$ 以上となる様に $n_2 = 30$ とした。この時のモード弁別度 S_{fj} 及び逆方向のモード弁別度 S_{bj} を Table 11, Table 12に示す。 TE_{04} モードを除き総て $\sim 15 \text{ dB}$ 以上となっている。

3.2.4 周波数特性

2個の結合孔の組の数 n_2 が10, 20, 30, 60の時の周波数に対する TE_{04} モードの結合度を Fig. 26に、又 $n_2 = 30$ で結合孔の直径 d_2 と厚さ t を変えた時の結合度の周波数特性を Fig. 27に示す。又 Fig. 28に方向性の周波数特性を示す。方向性は、結合孔の直径 d_2 と厚さ t に対して独立であるので Fig. 28に d_2 と t の値は記入していない。結合度が1 dB変わる時の周波数範囲を Table 13に示す。

3.2.5 精度

円形導波管の直径 d_1 、結合孔の直径 d_2 及び厚さ t 、結合孔の間隔 Z_1 及び Z_2 、方形導波管の寸法 a 及び b の公差を求めるために、各々の値を変化させた時の結合度及び方向性を求めた。計算の結果を Fig. 29～Fig. 40 及び Table 14～Table 20 に示す。結果からわかる様に、方形導波管内の位相速度を決めている a に対する結合度と方向性の変化が最も大きくなっている。

4. 今後の課題

今回 120 GHz 帯のミリ波立体回路部品の内、測定用 TE₀₁-TE₀₄ モード変換器と 200 kW TE₀₄ モード方向性結合器の設計計算を行い、それに基づいて仕様書の作成を行った。今後出来上って来る立体回路部品の測定を行い、計算と実測値との違い等の解析からより性能の良い立体回路部品の開発及びより高い周波数への適用を進めて行く必要がある。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、有益な助言を頂いた今井 剛、三枝幹雄両氏に深く感謝致します。また白形弘文 JT-60 試験室長および田中正俊核融合研究部長には終始激励を頂いたことに深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) K. HOSHINO, H. KAWASHIMA, K. HATA, and T. YAMAMOTO : A Design of a Mode Converter for Electron Cyclotron Heating by the Method of Normal Mode Expansion ; JAERI-M 83-148, Aug. 1983.
- (2) 小口文一 ; マイクロ波およびミリ波回路 ; Feb. 1964.
- (3) H. ARAI, N. GOTO, and T. YAMAMOTO : An Analysis of Multislot Directional Coupler ; JAERI-M 86-061, Mar. 1986.

3.2.5 精度

円形導波管の直径 d_1 、結合孔の直径 d_2 及び厚さ t 、結合孔の間隔 Z_1 及び Z_2 、方形導波管の寸法 a 及び b の公差を求めるために、各々の値を変化させた時の結合度及び方向性を求めた。計算の結果を Fig. 29～Fig. 40 及び Table 14～Table 20 に示す。結果からわかる様に、方形導波管内の位相速度を決めている a に対する結合度と方向性の変化が最も大きくなっている。

4. 今後の課題

今回 120 GHz 帯のミリ波立体回路部品の内、測定用 TE₀₁-TE₀₄ モード変換器と 200 kW TE₀₄ モード方向性結合器の設計計算を行い、それに基づいて仕様書の作成を行った。今後出来上って来る立体回路部品の測定を行い、計算と実測値との違い等の解析からより性能の良い立体回路部品の開発及びより高い周波数への適用を進めて行く必要がある。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、有益な助言を頂いた今井 剛、三枝幹雄両氏に深く感謝致します。また白形弘文 JT-60 試験室長および田中正俊核融合研究部長には終始激励を頂いたことに深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) K. HOSHINO, H. KAWASHIMA, K. HATA, and T. YAMAMOTO : A Design of a Mode Converter for Electron Cyclotron Heating by the Method of Normal Mode Expansion ; JAERI-M 83-148, Aug. 1983.
- (2) 小口文一 ; マイクロ波およびミリ波回路 ; Feb. 1964.
- (3) H. ARAI, N. GOTO, and T. YAMAMOTO : An Analysis of Multislot Directional Coupler ; JAERI-M 86-061, Mar. 1986.

3.2.5 精度

円形導波管の直径 d_1 、結合孔の直径 d_2 及び厚さ t 、結合孔の間隔 Z_1 及び Z_2 、方形導波管の寸法 a 及び b の公差を求めるために、各々の値を変化させた時の結合度及び方向性を求めた。計算の結果を Fig. 29～Fig. 40 及び Table 14～Table 20 に示す。結果からわかる様に、方形導波管内の位相速度を決めている a に対する結合度と方向性の変化が最も大きくなっている。

4. 今後の課題

今回 120 GHz 帯のミリ波立体回路部品の内、測定用 TE₀₁-TE₀₄ モード変換器と 200 kW TE₀₄ モード方向性結合器の設計計算を行い、それに基づいて仕様書の作成を行った。今後出来上って来る立体回路部品の測定を行い、計算と実測値との違い等の解析からより性能の良い立体回路部品の開発及びより高い周波数への適用を進めて行く必要がある。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、有益な助言を頂いた今井 剛、三枝幹雄両氏に深く感謝致します。また白形弘文 JT-60 試験室長および田中正俊核融合研究部長には終始激励を頂いたことに深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) K. HOSHINO, H. KAWASHIMA, K. HATA, and T. YAMAMOTO : A Design of a Mode Converter for Electron Cyclotron Heating by the Method of Normal Mode Expansion ; JAERI-M 83-148, Aug. 1983.
- (2) 小口文一 ; マイクロ波およびミリ波回路 ; Feb. 1964.
- (3) H. ARAI, N. GOTO, and T. YAMAMOTO : An Analysis of Multislot Directional Coupler ; JAERI-M 86-061, Mar. 1986.

3.2.5 精度

円形導波管の直径 d_1 ，結合孔の直径 d_2 及び厚さ t ，結合孔の間隔 Z_1 及び Z_2 ，方形導波管の寸法 a 及び b の公差を求めるために，各々の値を変化させた時の結合度及び方向性を求めた。計算の結果を Fig. 29～Fig. 40 及び Table 14～Table 20 に示す。結果からわかる様に，方形導波管内の位相速度を決めている a に対する結合度と方向性の変化が最も大きくなっている。

4. 今後の課題

今回 120 GHz 帯のミリ波立体回路部品の内，測定用 TE₀₁-TE₀₄ モード変換器と 200 kW TE₀₄ モード方向性結合器の設計計算を行い，それに基づいて仕様書の作成を行った。今後出来上って来る立体回路部品の測定を行い，計算と実測値との違い等の解析からより性能の良い立体回路部品の開発及びより高い周波数への適用を進めて行く必要がある。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり，有益な助言を頂いた今井 剛，三枝幹雄両氏に深く感謝致します。また白形弘文 JT-60 試験室長および田中正俊核融合研究部長には終始激励を頂いたことに深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) K. HOSHINO, H. KAWASHIMA, K. HATA, and T. YAMAMOTO : A Design of a Mode Converter for Electron Cyclotron Heating by the Method of Normal Mode Expansion ; JAERI-M 83-148, Aug. 1983.
- (2) 小口文一 ; マイクロ波およびミリ波回路 ; Feb. 1964.
- (3) H. ARAI, N. GOTO, and T. YAMAMOTO : An Analysis of Multislot Directional Coupler ; JAERI-M 86-061, Mar. 1986.

Table 1 Parameters of the TE₀₁-TE₀₄ mode converter

Parameters		Designed value
Number of perturbation waves	n	20
Wave length of a perturbation	λ_b	5.05 mm
Amplitude of a perturbation	a_1	0.23 mm
Radius of a circular waveguide	a_0	6.00 mm
Total length of a TE ₀₁ -TE ₀₄ mode converter	L	101.0 mm
Frequency	f	120.0 GHz

Table 2 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave powers at z=L, in the case of TE₀₁ mode incident (TE₀₁→TE₀₄) and TE₀₄ mode incident (TE₀₄→TE₀₁), respectively.

Mode	TE ₀₁ → TE ₀₄	TE ₀₄ → TE ₀₁
TE ₀₁	0.001	0.960
TE ₀₂	0.020	0.025
TE ₀₃	0.008	0.012
TE ₀₄	0.971	0.003

Table 3 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Frequency characteristics, in the case of TE₀₁ mode incident (TE₀₁→TE₀₄) and TE₀₄ mode incident (TE₀₄→TE₀₁), respectively.

Conversion efficiency (f_c)	TE ₀₁ → TE ₀₄	TE ₀₄ → TE ₀₁
	Frequency range (width)	Frequency range (width)
$f_c \geq 0.95$	119.84~120.25GHz (0.41GHz)	119.90~120.18GHz (0.28GHz)
$f_c \geq 0.9$	119.67~120.43GHz (0.76GHz)	119.70~120.39GHz (0.69GHz)

Table 4 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Conversion efficiency as a function of the perturbation wave length (λ_b), in the case of TE₀₁ mode incident (TE₀₁→TE₀₄) and TE₀₄ mode incident (TE₀₄→TE₀₁), respectively.

λ_b (mm)	TE ₀₁ → TE ₀₄	TE ₀₄ → TE ₀₁
5.04	0.970	0.958
5.05	0.971	0.960
5.06	0.961	0.950

Table 5 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Conversion efficiency as a function of the perturbation amplitude (a_1), in the case of TE₀₁ mode incident (TE₀₁→TE₀₄) and TE₀₄ mode incident (TE₀₄→TE₀₁), respectively.

a_1 (mm)	TE ₀₁ → TE ₀₄	TE ₀₄ → TE ₀₁
0.22	0.968	0.958
0.23	0.971	0.960
0.24	0.965	0.953

Table 6 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Conversion efficiency as a function of the circular waveguide radius (a_0), in the case of TE₀₁ mode incident (TE₀₁→TE₀₄) and TE₀₄ mode incident (TE₀₄→TE₀₁), respectively.

a_0 (mm)	TE ₀₁ → TE ₀₄	TE ₀₄ → TE ₀₁
5.99	0.917	0.907
6.00	0.971	0.960
6.01	0.941	0.929

Table 7 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Conversion efficiency, in the case of TE₀₁ mode incident (TE₀₁→TE₀₄) and TE₀₄ mode incident (TE₀₄→TE₀₁), respectively. RF power is input from the normal side of the converter (Normal case) and from the reverse one (Reverse case).

Mode	TE ₀₁ → TE ₀₄		TE ₀₄ → TE ₀₁	
	Normal	Reverse	Normal	Reverse
TE ₀₁	0.001	0.001	0.960	0.978
TE ₀₂	0.020	0.026	0.025	0.015
TE ₀₃	0.008	0.013	0.012	0.002
TE ₀₄	0.971	0.960	0.003	0.005

Table 8 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave powers as a function of the difference between the initial phase of TE₀₁/TE₀₄ and that of TE₀₂ (ψ). Incident modes are TE₀₁ 98% and TE₀₂ 2% (TE₀₁→TE₀₄), and TE₀₄ 98% and TE₀₂ 2% (TE₀₄→TE₀₁), respectively.

ψ	Mode	TE ₀₁ → TE ₀₄		TE ₀₄ → TE ₀₁	
		Initial (z=0)	z=L	Initial (Z=0)	Z=L
0°	TE ₀₁	0.98	0.003	0	0.940
	TE ₀₂	0.02	0.023	0.02	0.046
	TE ₀₃	0	0.008	0	0.012
	TE ₀₄	0	0.966	0.98	0.002
90°	TE ₀₁	0.98	0.002	0	0.985
	TE ₀₂	0.02	0.074	0.02	0.000
	TE ₀₃	0	0.007	0	0.013
	TE ₀₄	0	0.917	0.98	0.002
180°	TE ₀₁	0.98	0.000	0	0.942
	TE ₀₂	0.02	0.055	0.02	0.041
	TE ₀₃	0	0.007	0	0.013
	TE ₀₄	0	0.938	0.98	0.004
270°	TE ₀₁	0.98	0.001	0	0.897
	TE ₀₂	0.02	0.003	0.02	0.087
	TE ₀₃	0	0.009	0	0.012
	TE ₀₄	0	0.987	0.98	0.004

Table 9 Parameters of the TE₀₄ mode directional coupler

Parameters		Designed value		Remarks
Frequency	f	120.0	GHz	
Diameter of a circular waveguide	d ₁	37.0	mm	
Diameter of a coupling hole	d ₂	0.9	mm	
Thickness of a coupling hole	t	0.4	mm	
Wide width of a rectangular waveguide	a	2.032	mm	} WR-8
Narrow width of a rectangular waveguide	b	1.016	mm	
Distance from one coupling hole to another	z ₁	2.15	mm	
Distance from one coupling hole group to another	z ₂	14.75	mm	
Number of coupling holes in one group	n ₁	2		} Number of total coupling holes is 60
Number of coupling hole groups	n ₂	30		

Table 10 TE₀₄ mode directional coupler: m₁ dependence of the coupling value, where $z_1 = (2m_1 - 1) / 4 \cdot \lambda_{ei}^+$, f=120GHz, d₁=37.0mm, a=2.032mm, and b=1.016mm.

m ₁	z ₁ (mm)	Decrease of the coupling value (dB)
—	0.0	0.0
1	0.72	0.10
2	2.15	0.94
3	3.58	2.82

Table 11 Mode selectivity (S_{fj}) of TE_{04} mode directional coupler: $S_{fj} = -20 \log_{10} (|V_{fj}^{n2}| / |V_{fi}^{n2}|)$, where i shows the TE_{04} mode, and j shows the unwanted mode.

Mode	S_{fj} (dB)	Mode	S_{fj} (dB)	Mode	S_{fj} (dB)
TE_{01}	42.59	TE_{11}	43.43	TE_{21}	53.13
TE_{02}	30.67	TE_{12}	33.67	TE_{22}	28.05
TE_{03}	29.94	TE_{13}	24.11	TE_{23}	21.66
—	—	TE_{14}	15.16	TE_{24}	-2.45
TE_{05}	34.54	TE_{15}	18.47	TE_{25}	24.33
TE_{06}	34.24	TE_{16}	19.67	—	—

Table 12 Mode selectivity (S_{bj}) for the unwanted mode propagating backward of TE_{04} mode directional coupler: $S_{bj} = -20 \log_{10} (|V_{bj}^{n2}| / |V_{fi}^{n2}|)$, where i shows the TE_{04} mode, and j shows the unwanted mode.

Mode	S_{bj} (dB)	Mode	S_{bj} (dB)	Mode	S_{bj} (dB)
TE_{01}	62.08	TE_{11}	62.70	TE_{21}	57.16
TE_{02}	59.50	TE_{12}	54.29	TE_{22}	70.66
TE_{03}	55.46	TE_{13}	56.95	TE_{23}	54.29
—	—	TE_{14}	62.65	TE_{24}	62.10
TE_{05}	47.85	TE_{15}	56.59	TE_{25}	44.76
TE_{06}	14.78	TE_{16}	54.22	—	—

Table 13 TE₀₄ mode directional coupler: Frequency range (1 dB down level) of the coupling value, as a function of the number (n₂) of coupling hole groups.

n ₂	Frequency range (width)
10	117.64 ~ 122.41 GHz (4.77 GHz)
20	118.83 ~ 121.20 (2.37)
30	119.22 ~ 120.80 (1.58)
60	119.61 ~ 120.40 (0.79)

Table 14 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value and directivity as a function of the circular waveguide diameter (d₁).

d ₁ (mm)	Coupling value (dB)	Directivity (dB)
36.98	37.98	67.10
36.99	37.98	67.02
37.00	37.99	66.94
37.01	37.99	66.85
37.02	38.00	66.77

Table 15 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value and directivity as a function of the coupling hole diameter (d₂).

d ₂ (mm)	Coupling value (dB)	Directivity (dB)
0.88	38.98	66.94
0.89	38.48	66.94
0.90	37.99	66.94
0.91	37.50	66.94
0.92	37.02	66.94

Table 16 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value and directivity as a function of the coupling hole thickness (t).

t (mm)	Coupling value (dB)	Directivity (dB)
0.38	37.42	66.94
0.39	37.71	66.94
0.40	37.99	66.94
0.41	38.27	66.94
0.42	38.55	66.94

Table 17 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value and directivity as a function of the distance (z_1) from one coupling hole to another.

z_1 (mm)	Coupling value (dB)	Directivity (dB)
2.13	37.97	56.89
2.14	37.98	66.16
2.15	37.99	66.94
2.16	37.99	57.12
2.17	38.00	52.63

Table 18 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value and directivity as a function of the distance (z_2) from one coupling hole group to another.

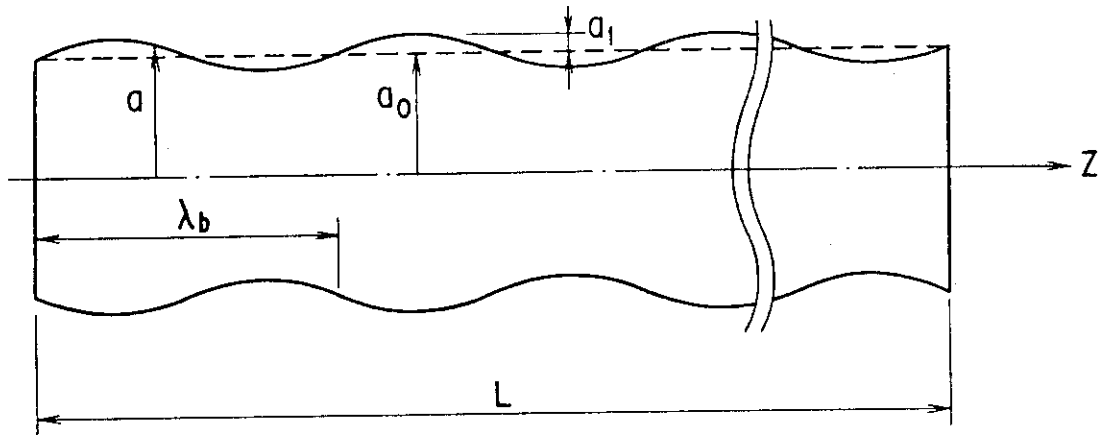
z_2 (mm)	Coupling value (dB)	Directivity (dB)
14.73	38.01	86.48
14.74	37.99	71.05
14.75	37.99	66.94
14.76	37.99	67.29
14.77	38.01	72.44

Table 19 TE_{04} mode directional coupler: Coupling value and directivity as a function of the wide width (a) of the rectangular waveguide.

a (mm)	Coupling value (dB)	Directivity (dB)
2.012	53.27	63.07
2.022	40.66	91.70
2.032	37.99	66.94
2.042	40.60	65.59
2.052	51.53	50.39

Table 20 TE_{04} mode directional coupler: Coupling value and directivity as a function of the narrow width (b) of the rectangular waveguide.

b (mm)	Coupling value (dB)	Directivity (dB)
0.996	37.91	66.93
1.006	37.95	66.94
1.016	37.99	66.94
1.026	38.02	66.94
1.036	38.06	66.94



$$a = a_0 + a_1 \sin \frac{2\pi z}{\lambda_b}$$

$$L = n\lambda_b$$

- n : number of perturbation waves (integer and half-integer)
- λ_b : wave length of a perturbation
- a_1 : amplitude of a perturbation
- a_0 : radius of a circular waveguide
- a : radius of a TE_{01} - TE_{04} mode converter
- L : total length of a TE_{01} - TE_{04} mode converter

Fig. 1 Shape of a TE_{01} - TE_{04} mode converter.

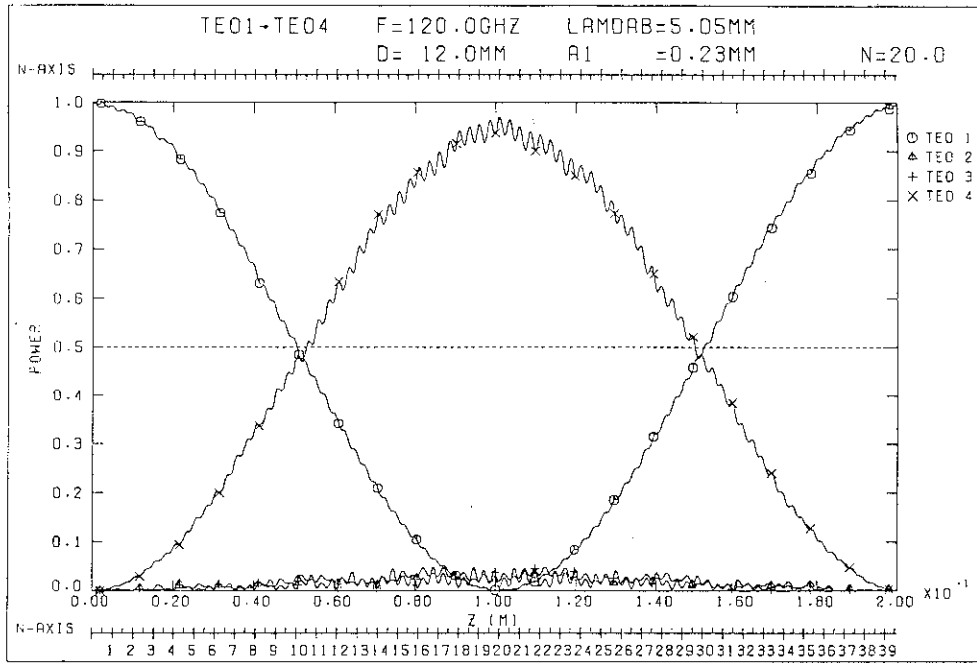


Fig. 2 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (TE₀₁ mode incident from the left side)

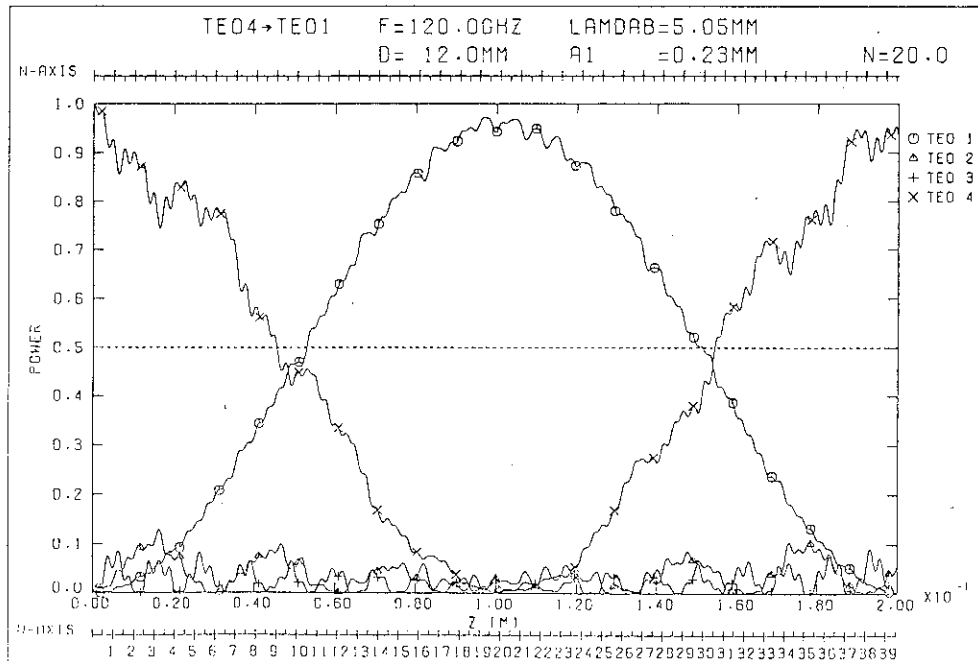


Fig. 3 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (TE₀₄ mode incident from the left side)

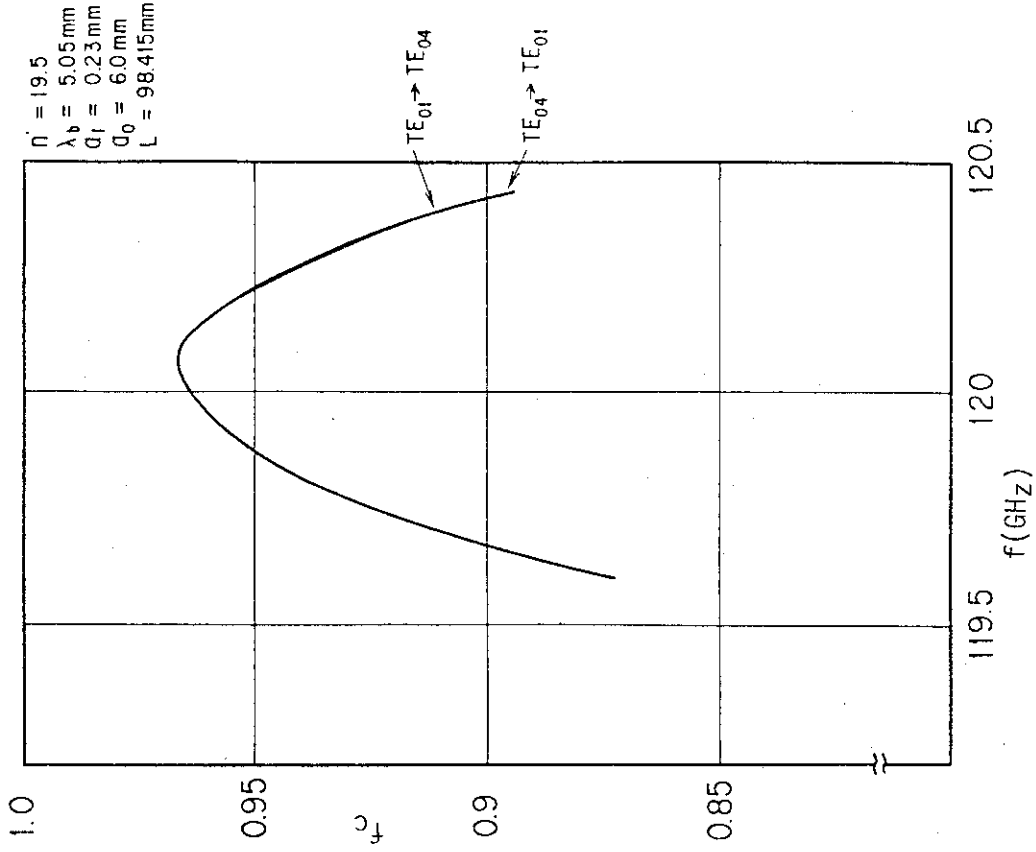


Fig. 5 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Frequency characteristics. (n=19.5)

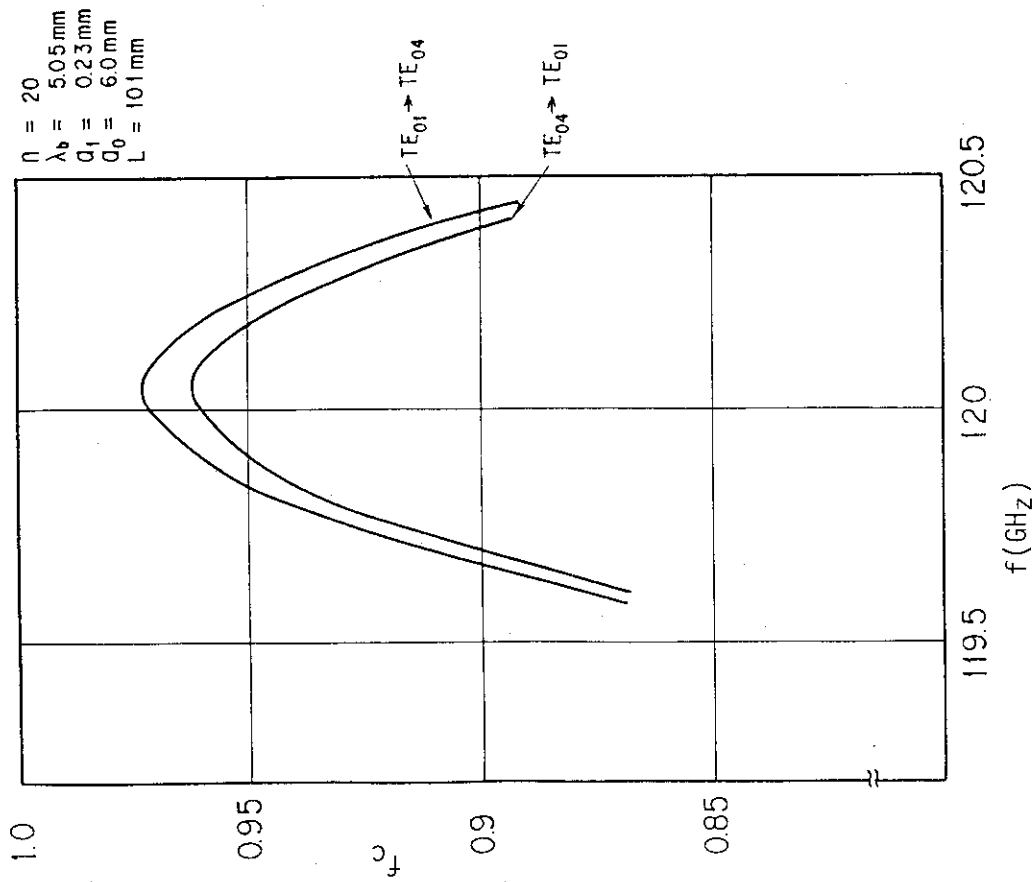


Fig. 4 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Frequency characteristics. (n=20)

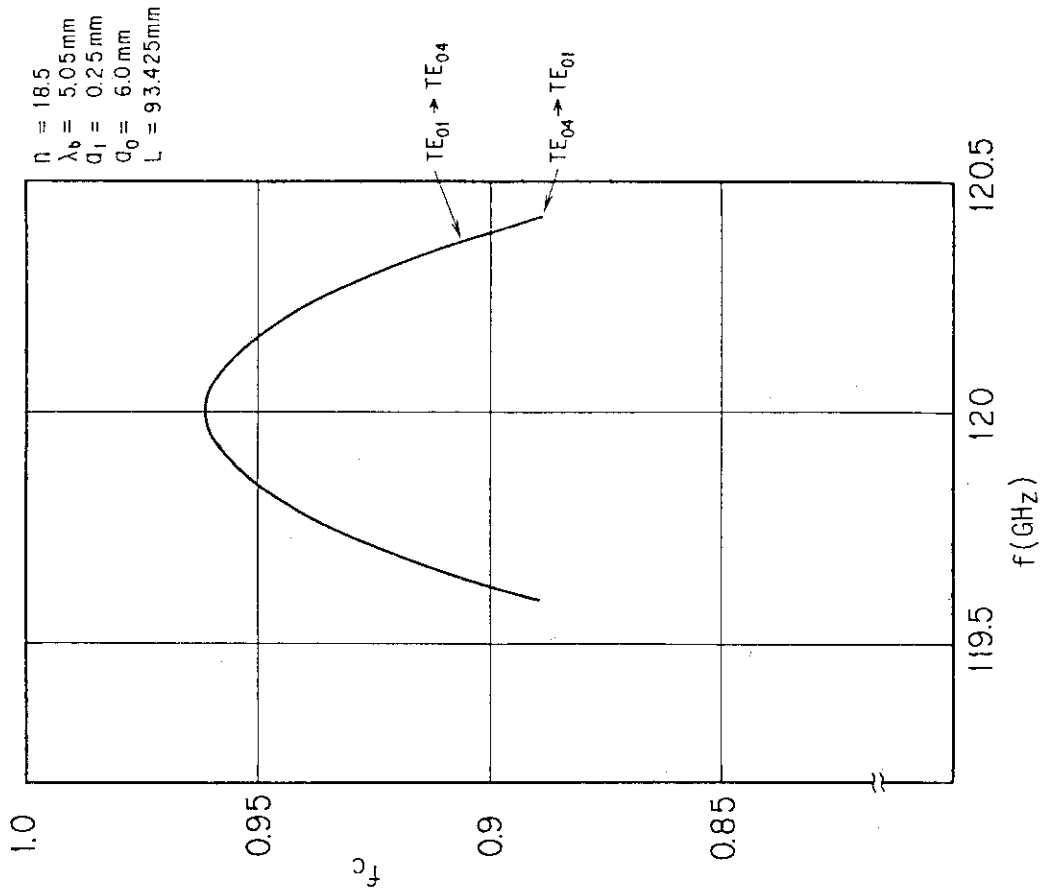


Fig. 7 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Frequency characteristics. (n=18.5)

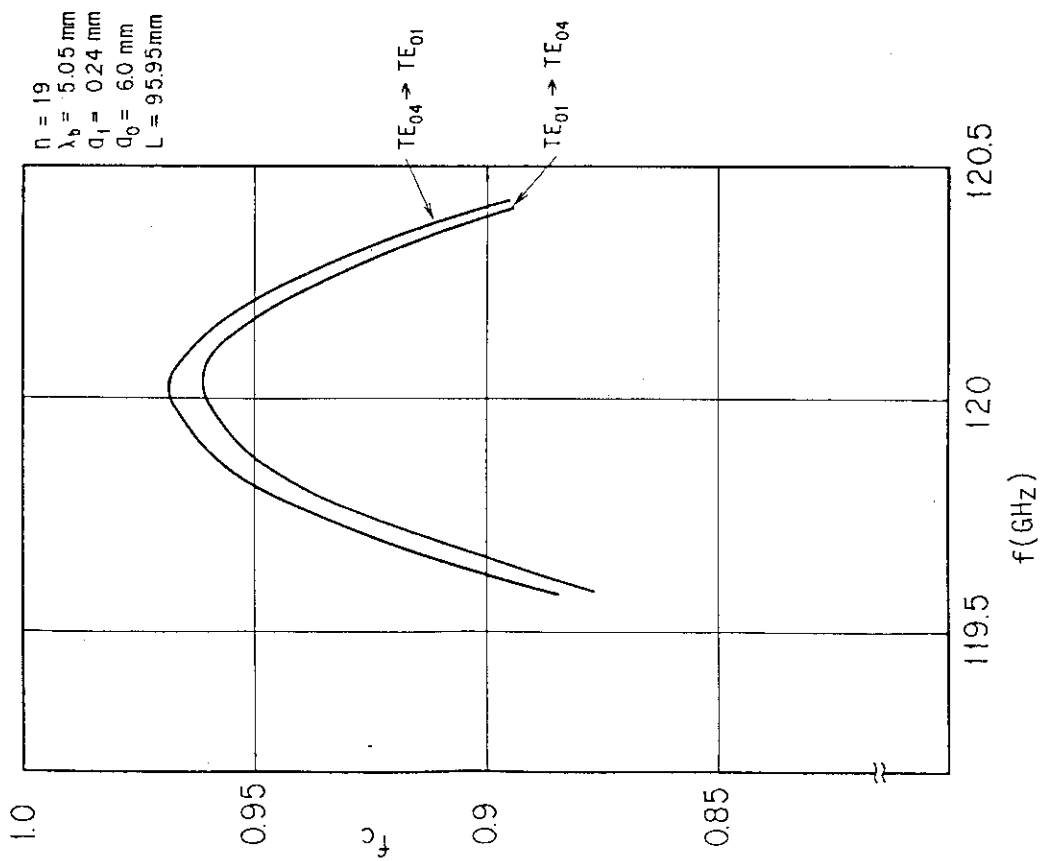


Fig. 6 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Frequency characteristics. (n=19)

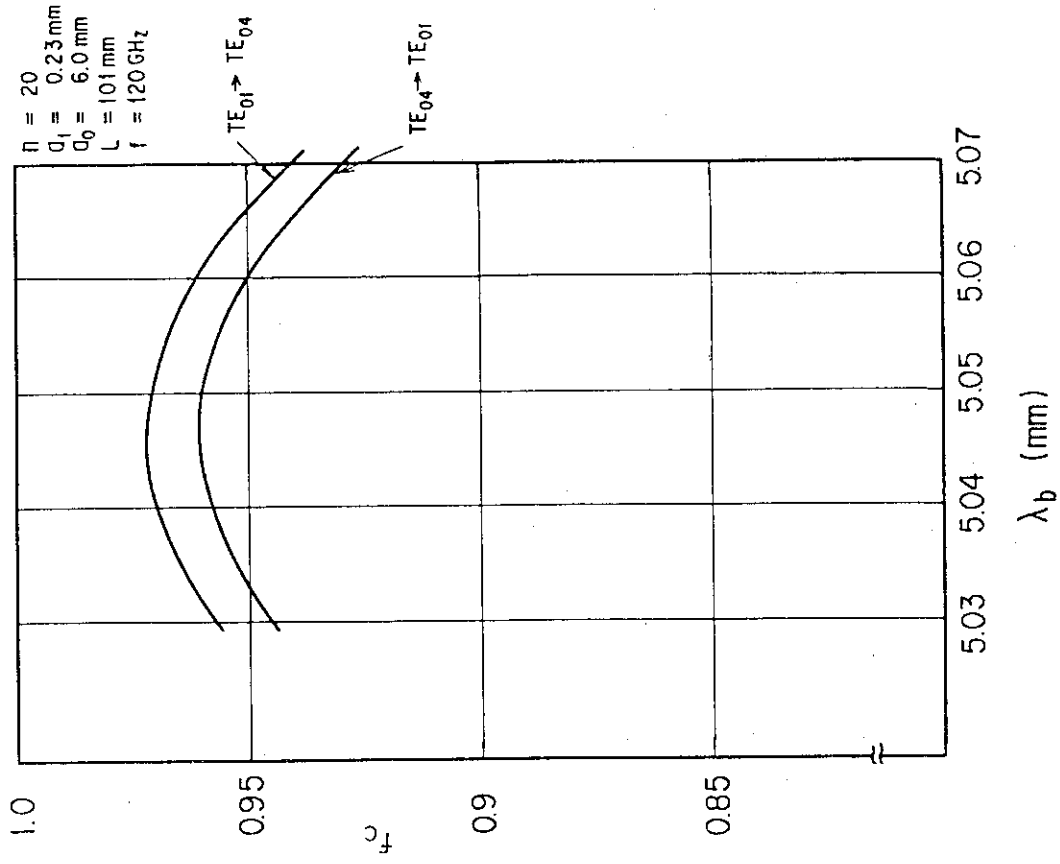


Fig. 9 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Conversion efficiency (f_c) as a function of the perturbation wave length (λ_b).

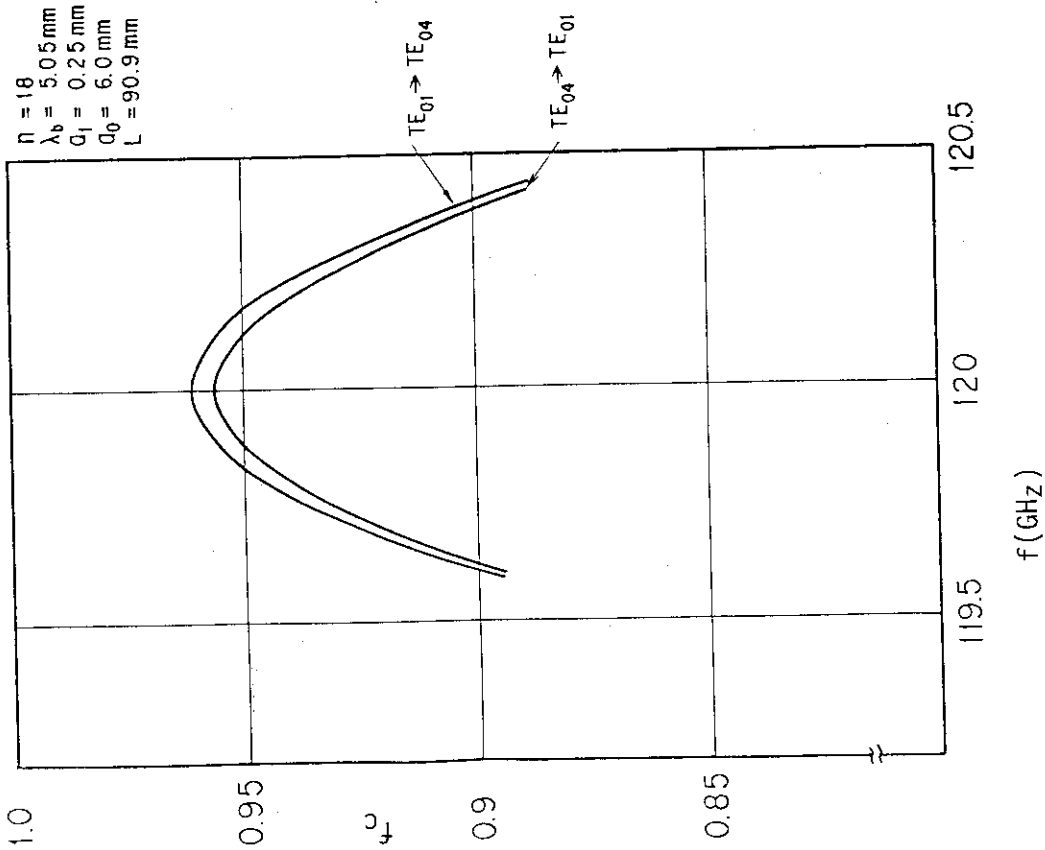


Fig. 8 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Frequency characteristics. ($n=18$)

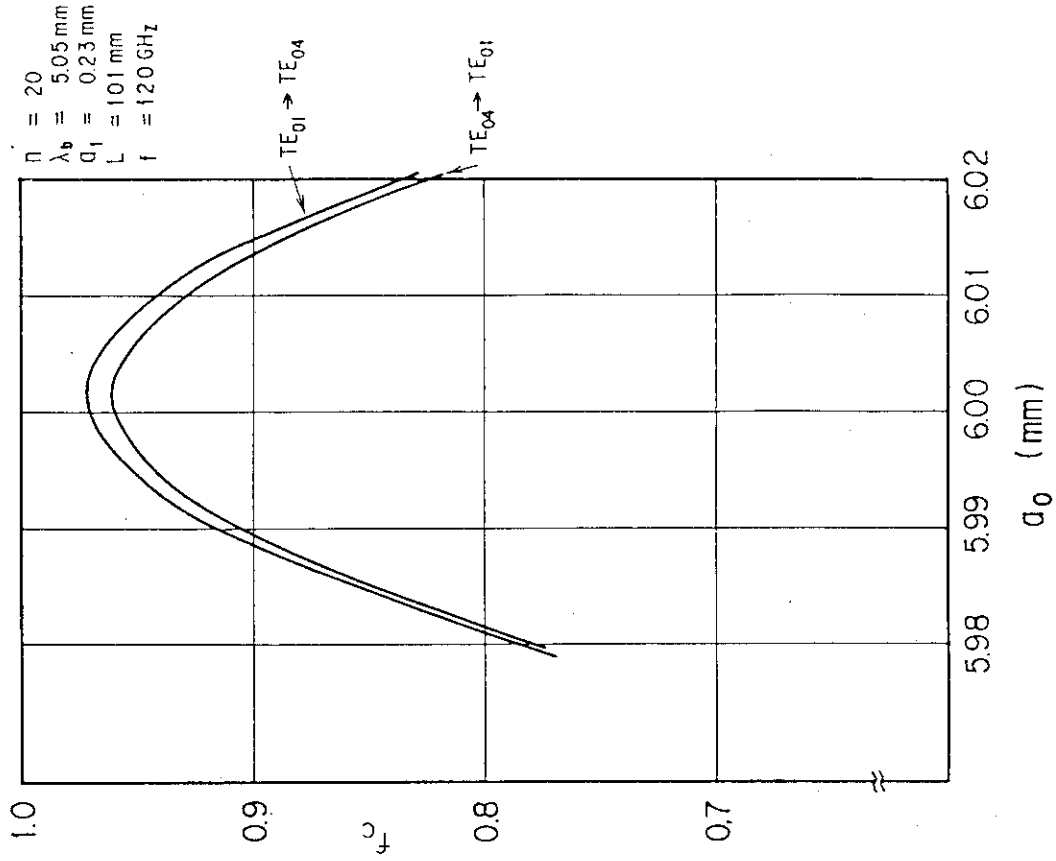


Fig. 11 TE_{01} - TE_{04} mode converter: Conversion efficiency (f_c) as a function of the circular waveguide radius (a_0).

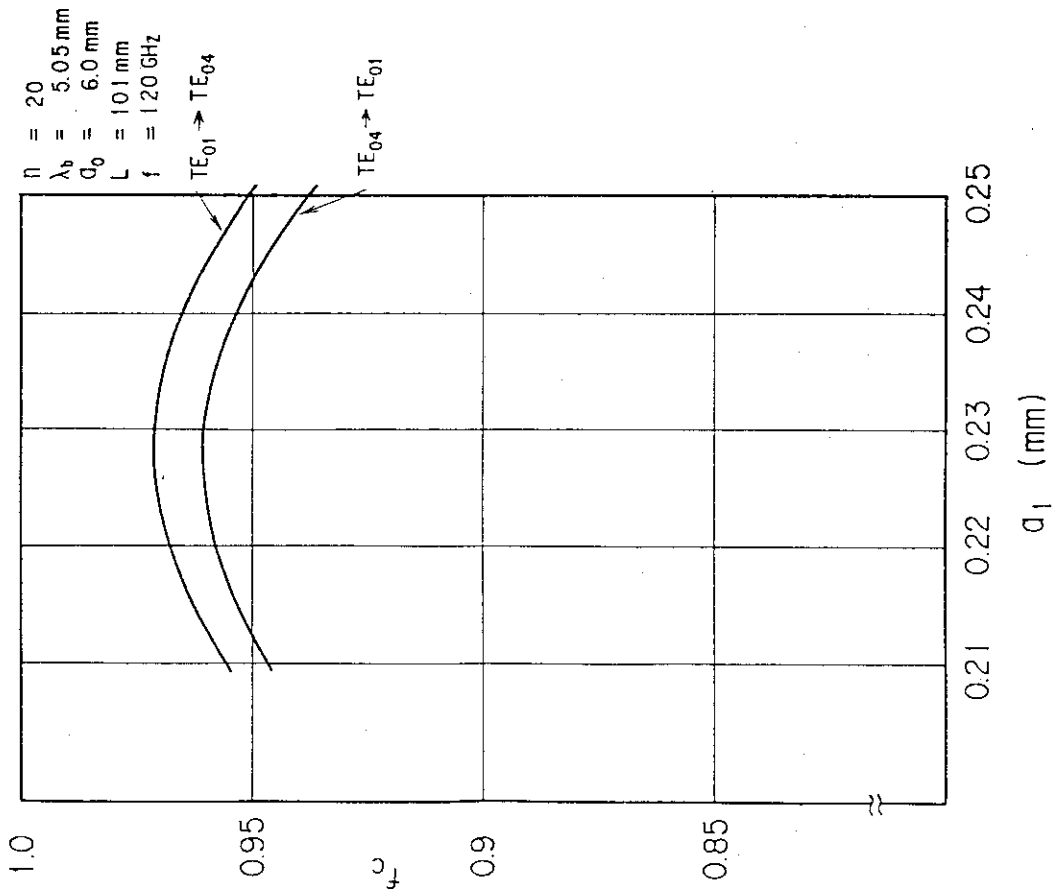


Fig. 10 TE_{01} - TE_{04} mode converter: Conversion efficiency (f_c) as a function of the perturbation amplitude (a_1).

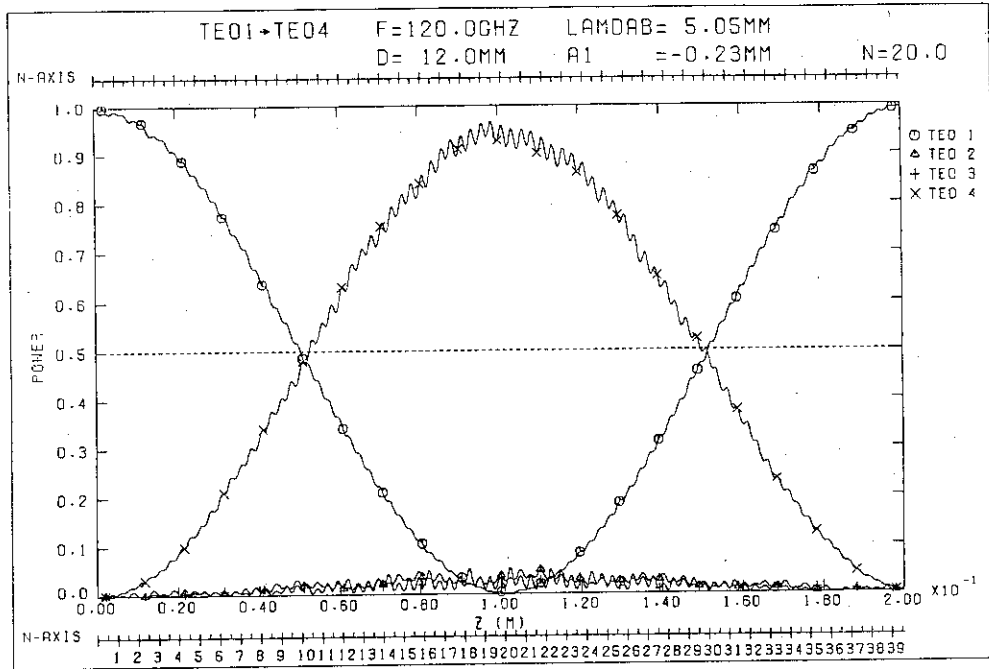


Fig. 12 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (TE₀₁ mode incident from the right side)

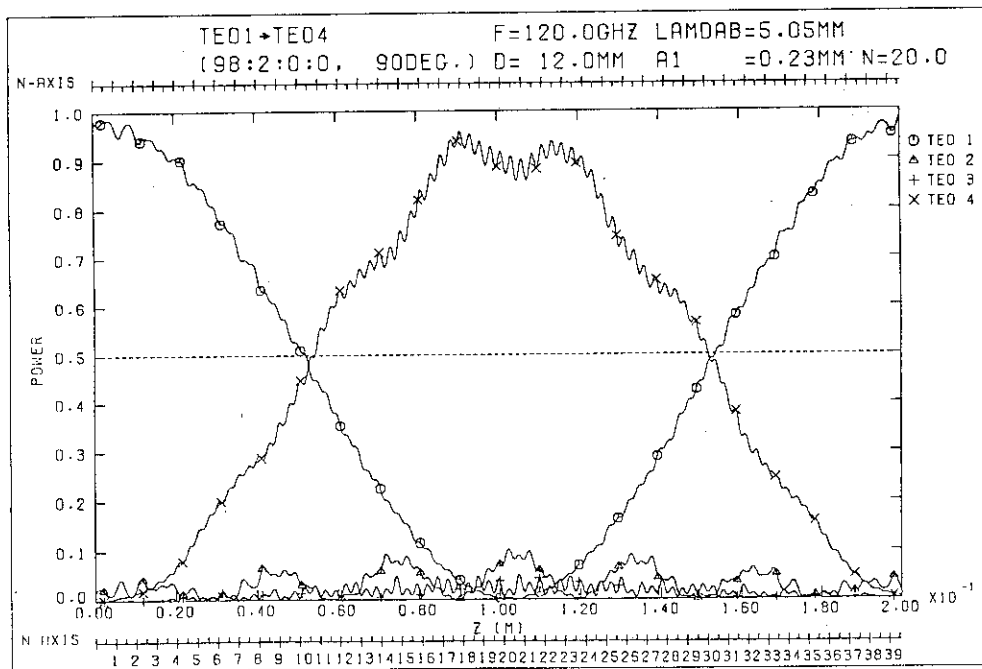


Fig. 13 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (TE₀₄ mode incident from the right side)

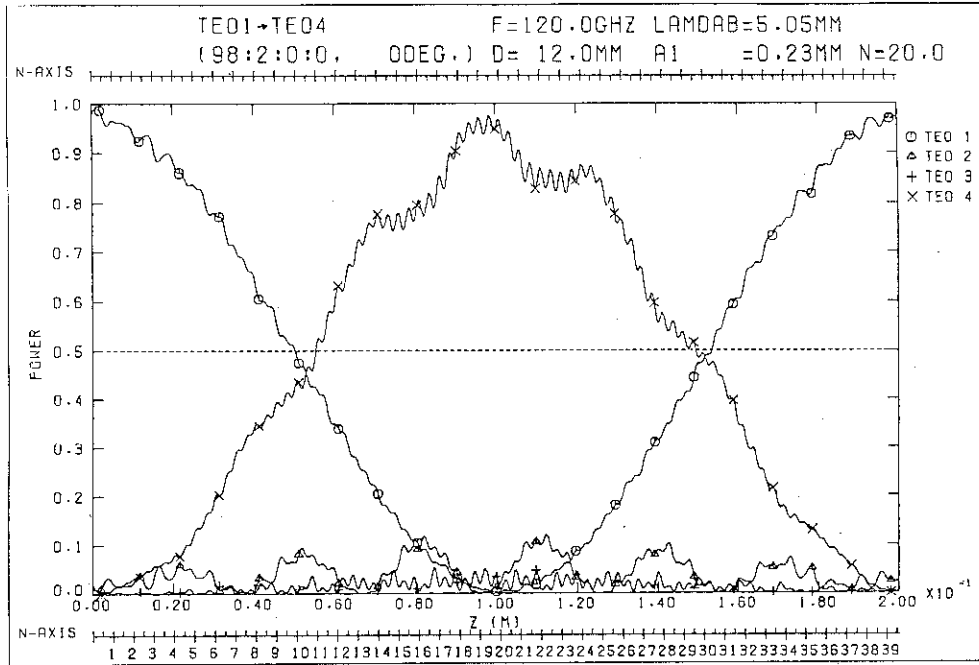


Fig. 14 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₁ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 0°.)

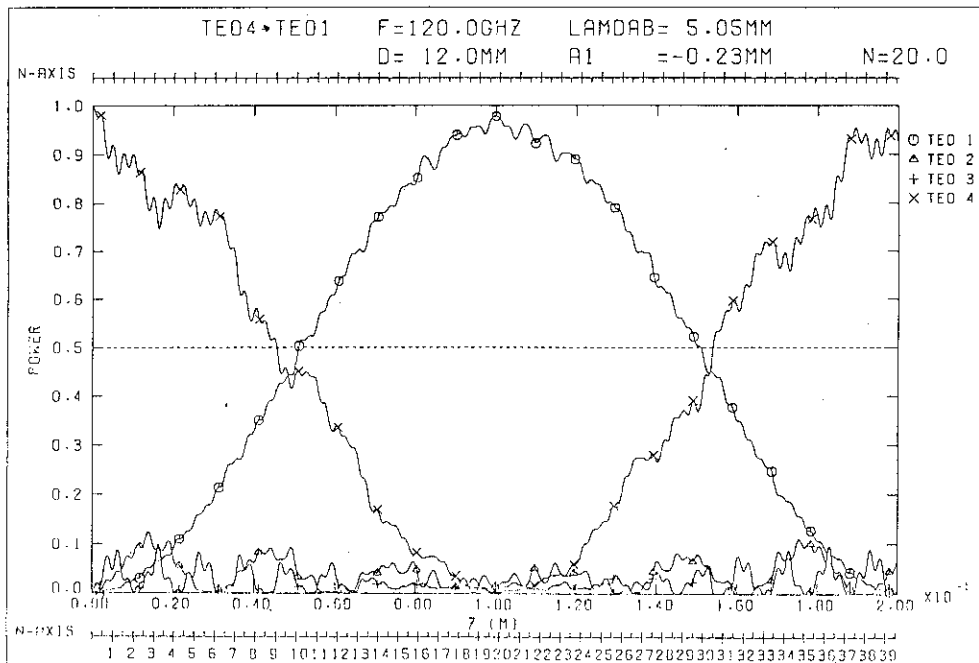


Fig. 15 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₁ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 90°.)

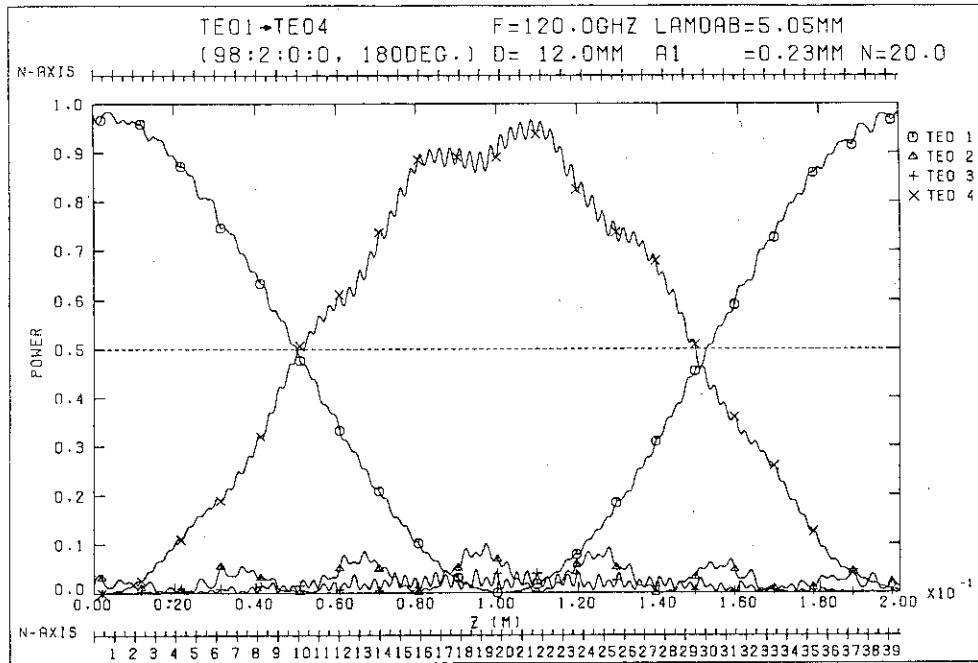


Fig. 16 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₁ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 180°.)

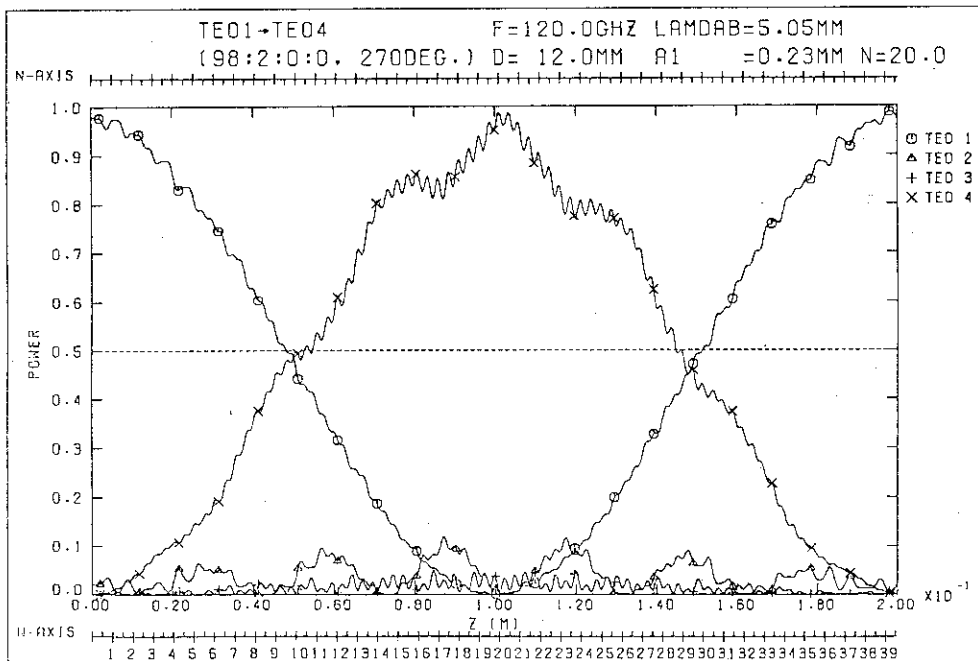


Fig. 17 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₁ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 270°.)

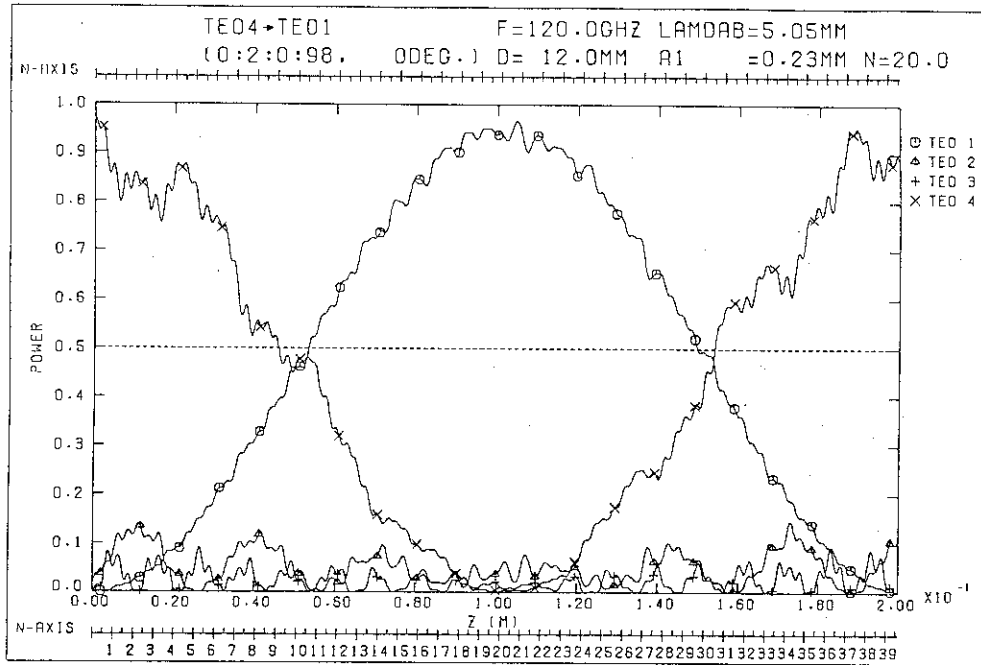


Fig. 18 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₄ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 0°.)

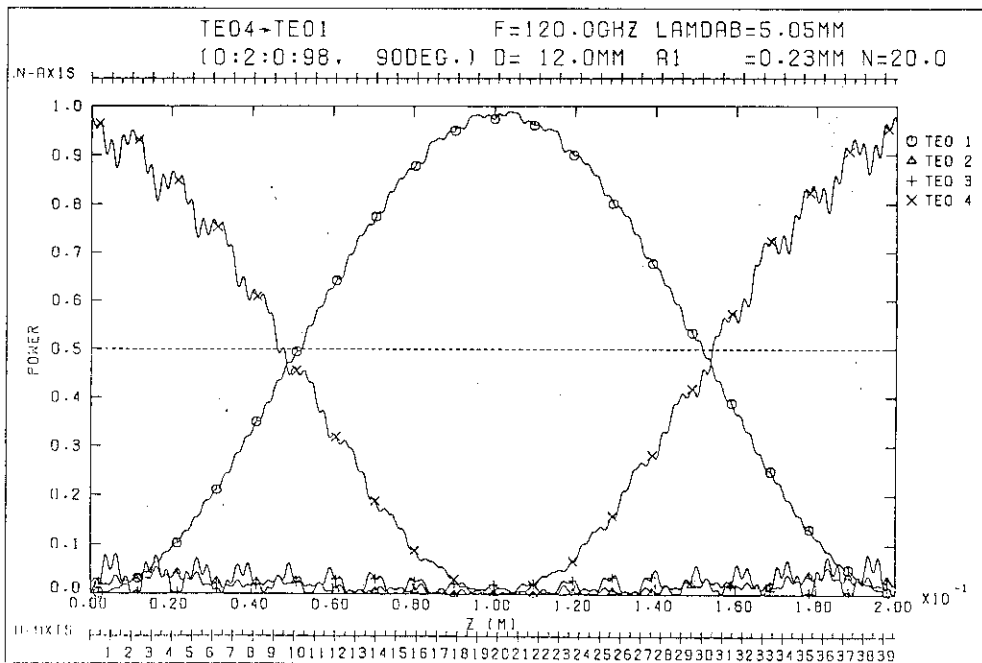


Fig. 19 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₄ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 90°.)

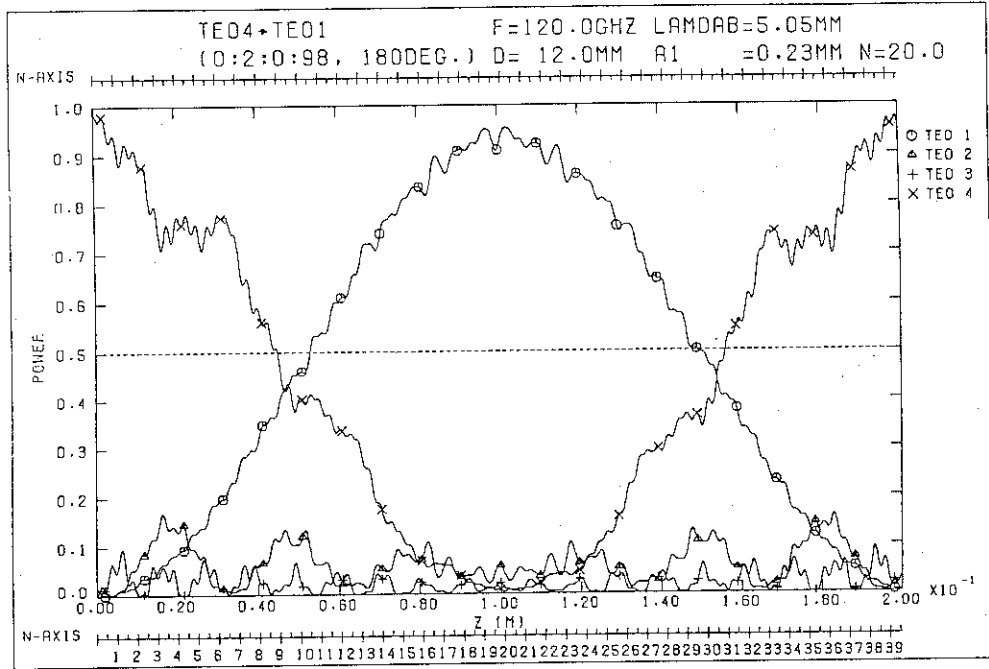


Fig. 20 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₄ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 180°.)

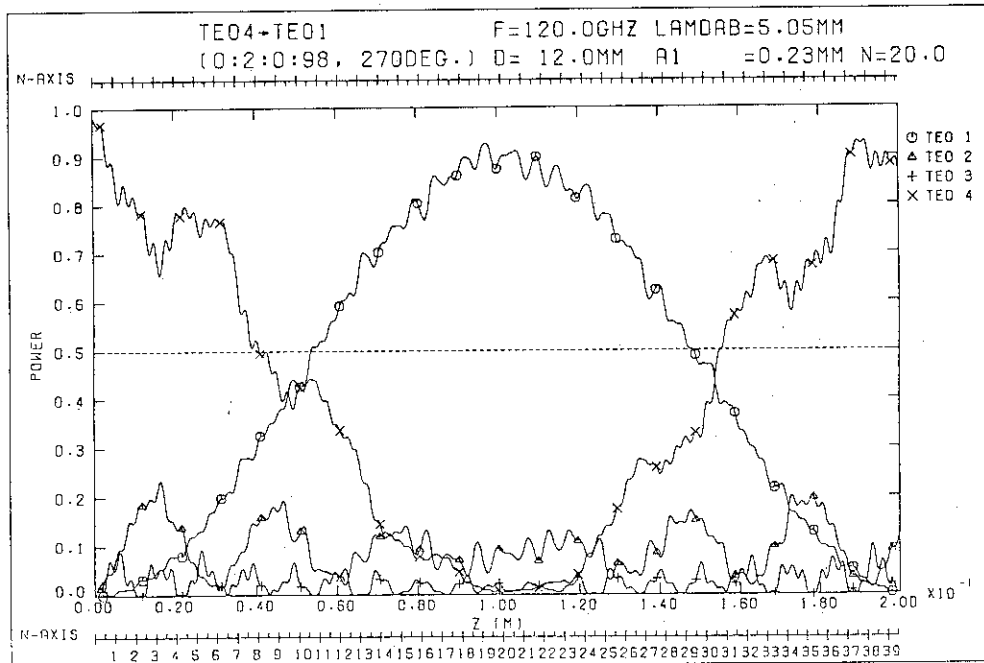


Fig. 21 TE₀₁-TE₀₄ mode converter: Wave power as a function of z. (Incident modes are TE₀₄ 98% and TE₀₂ 2%, the initial phase of TE₀₂ is 270°.)

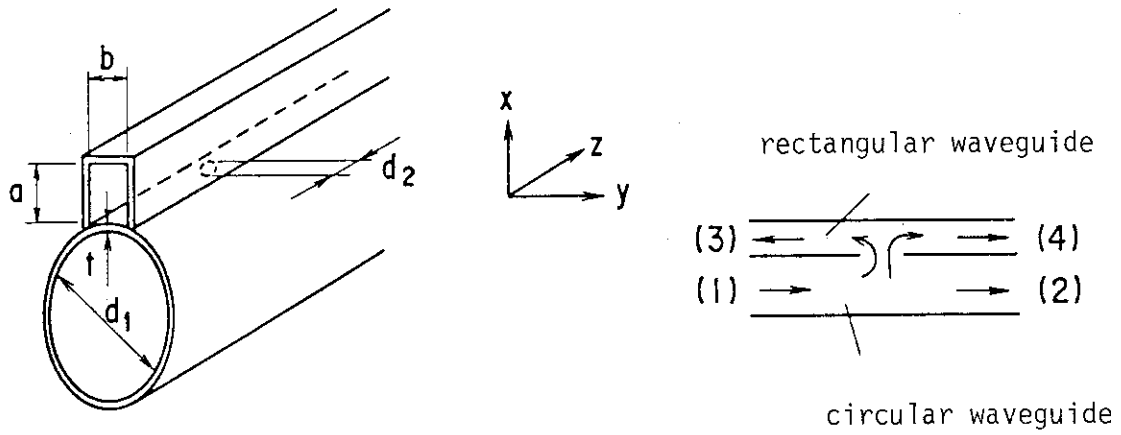


Fig. 22 Configuration of a coupler with a coupling hole.

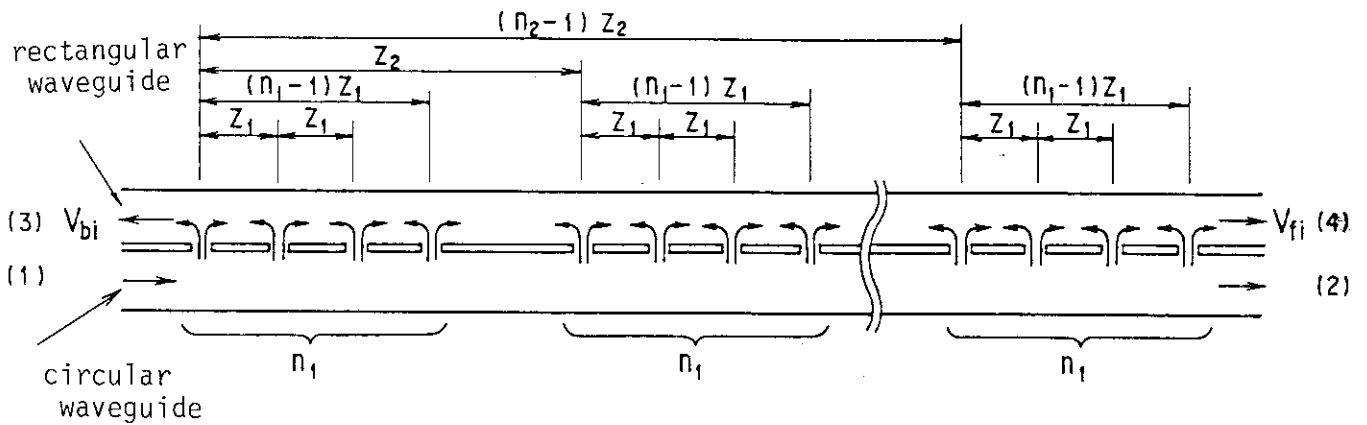


Fig. 23 Configuration of a multi-hole type directional coupler.

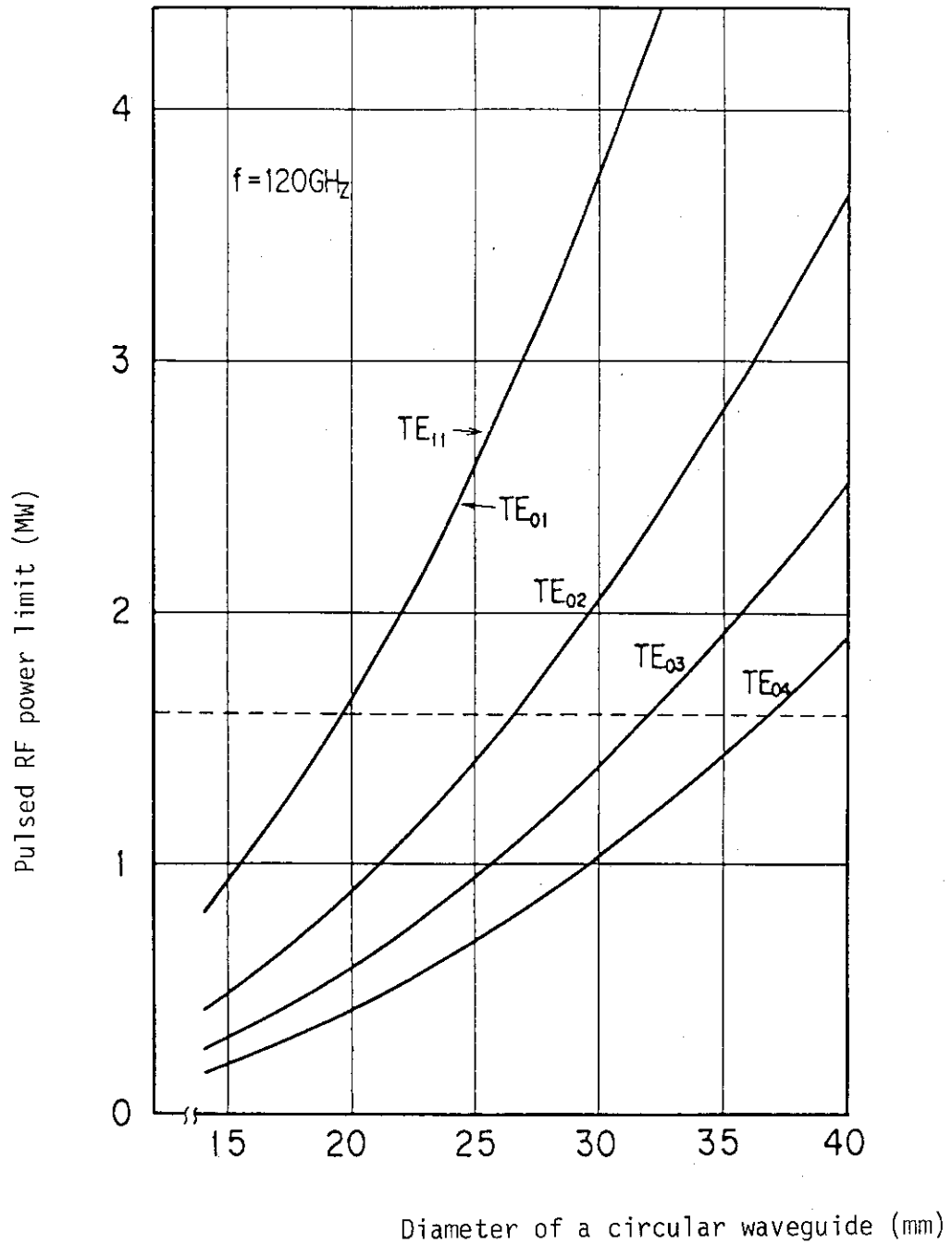


Fig. 24 Pulsed RF power limit in a circular waveguide.

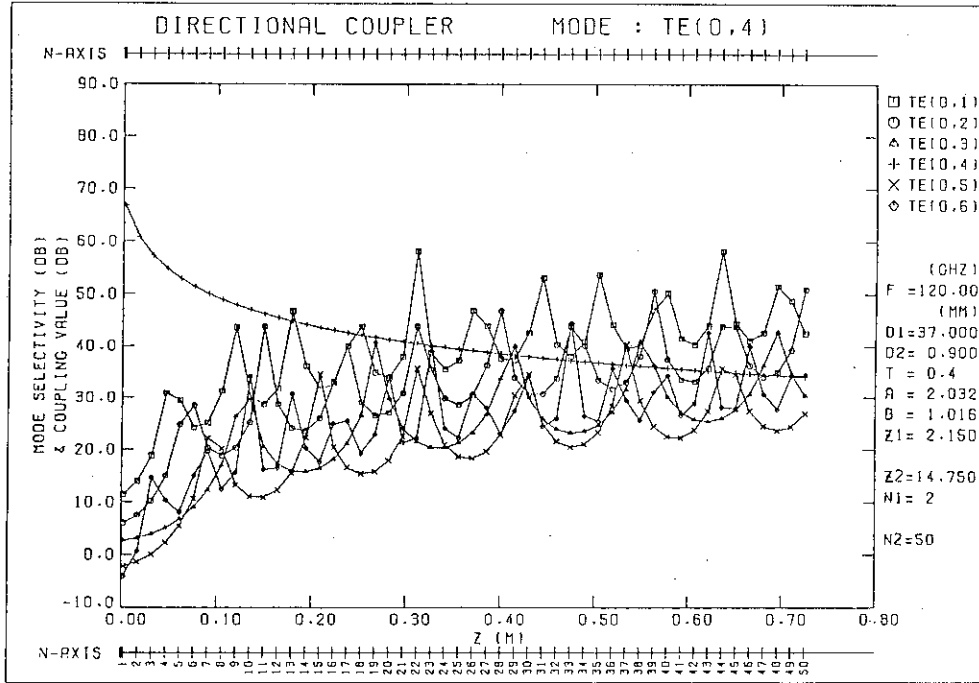


Fig. 25(a) TE_{04} mode directional coupler: Coupling value (+) and mode selectivity (others) of unwanted modes TE_{0n} ($n=1,2,3,5,6$) as a function of the hole number (N).

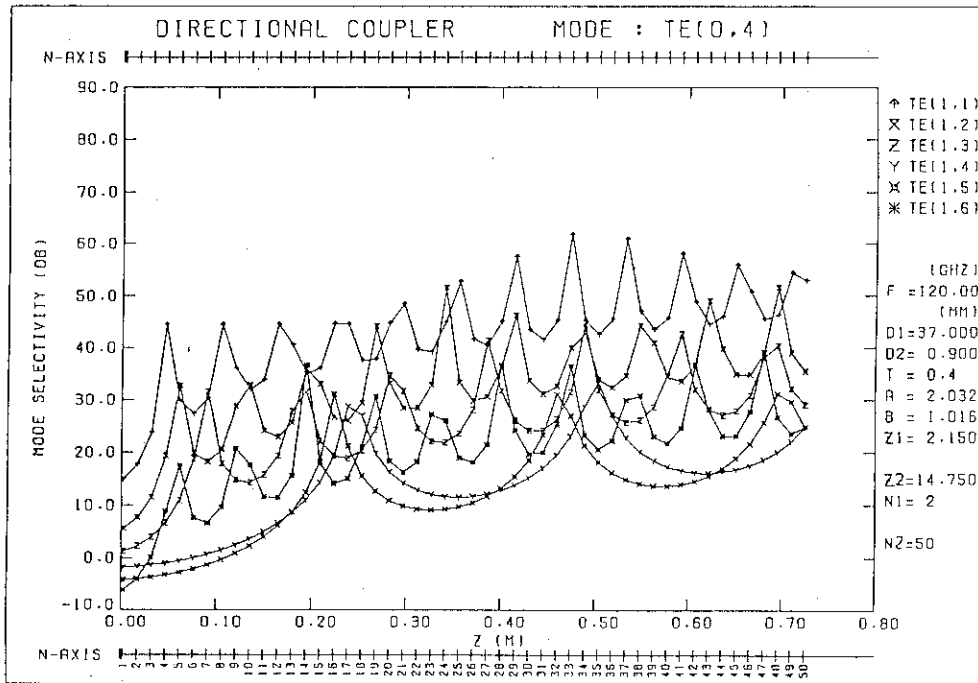


Fig. 25(b) TE_{04} mode directional coupler: Mode selectivity of unwanted modes TE_{1n} ($n=1, \dots, 6$) as a function of the hole number (N).

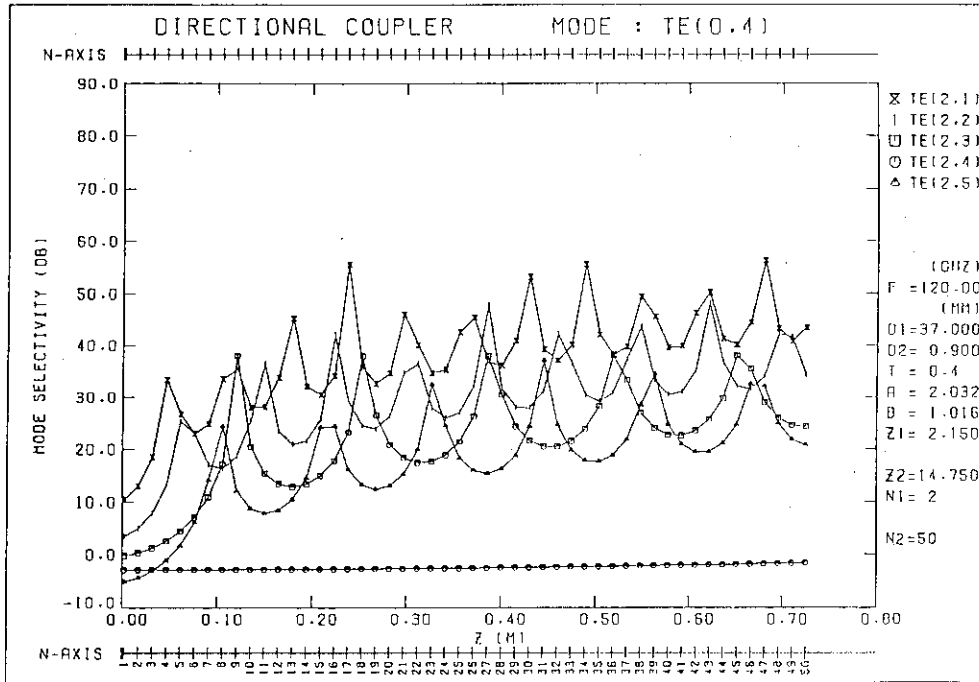


Fig. 25(c) TE_{04} mode directional coupler: Mode selectivity of unwanted modes TE_{2n} ($n=1, \dots, 5$) as a function of the hole number (N).

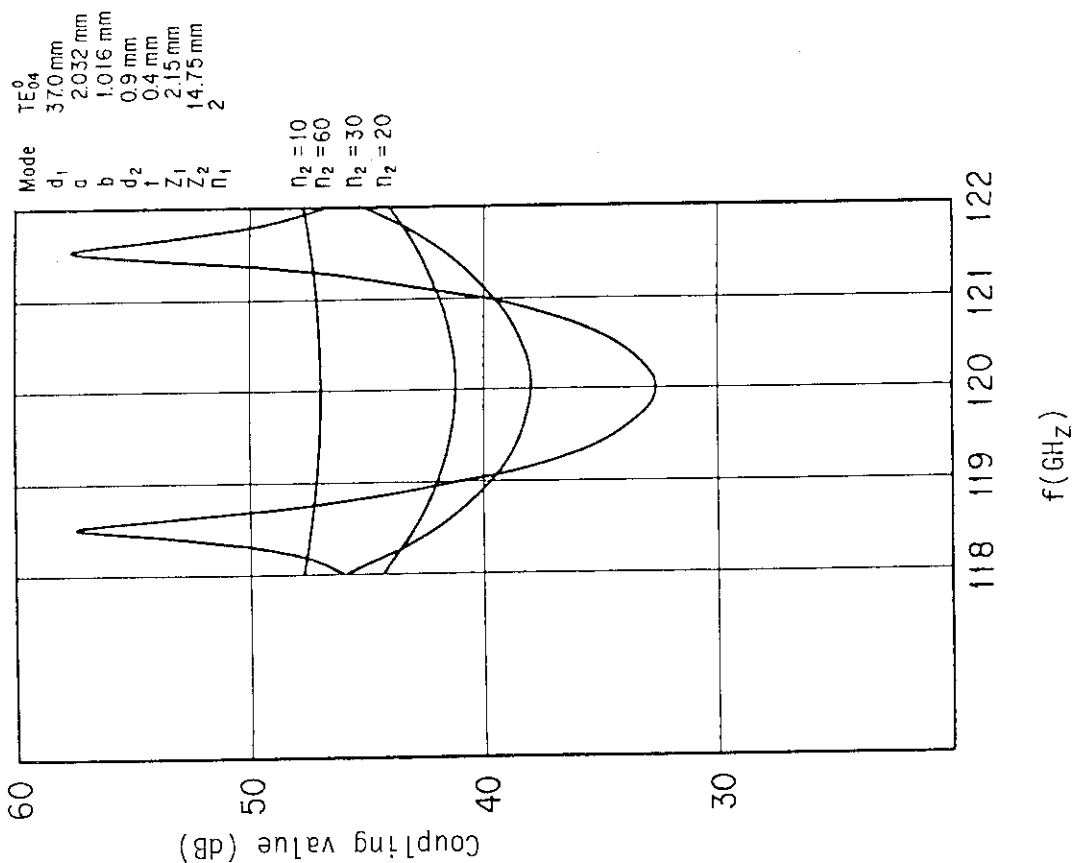


Fig. 26 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value as a function of frequency. Parameter (n_2) is a number of coupling hole groups.

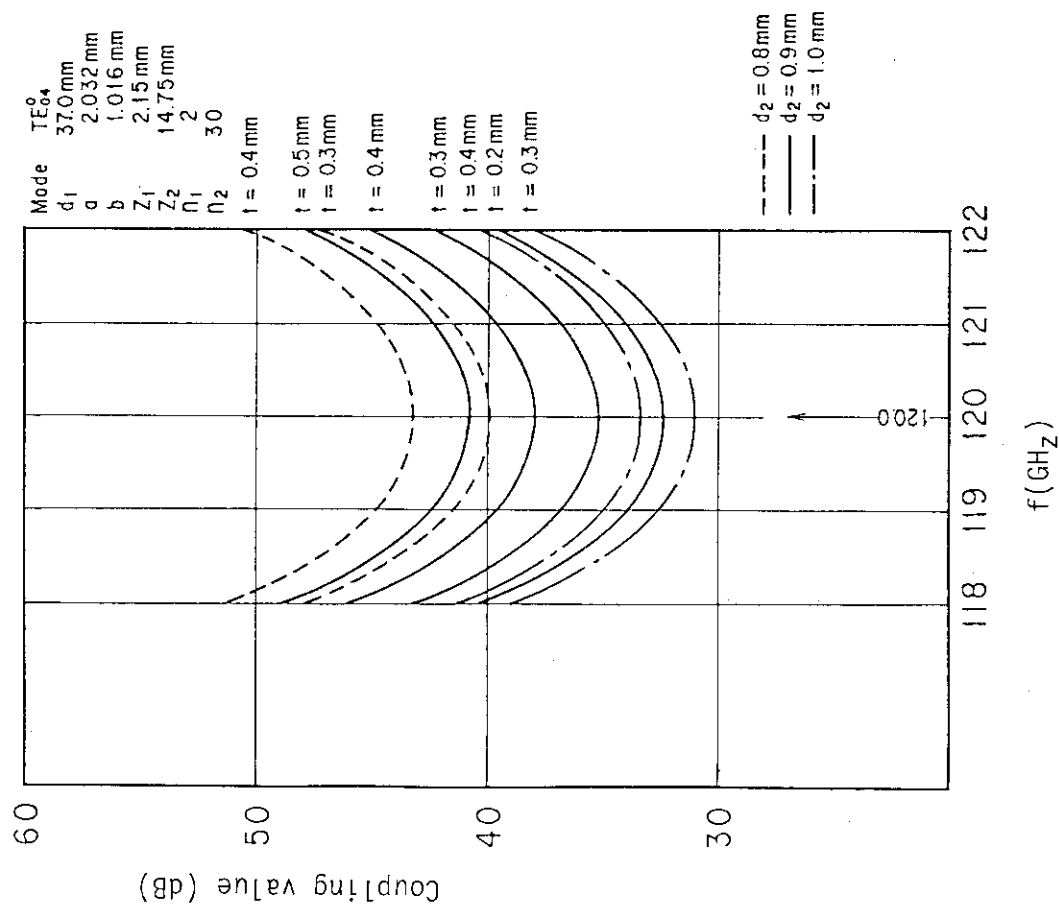


Fig. 27 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value as a function of frequency. Parameter (d_2) and (t) are the coupling hole diameter and thickness, respectively.

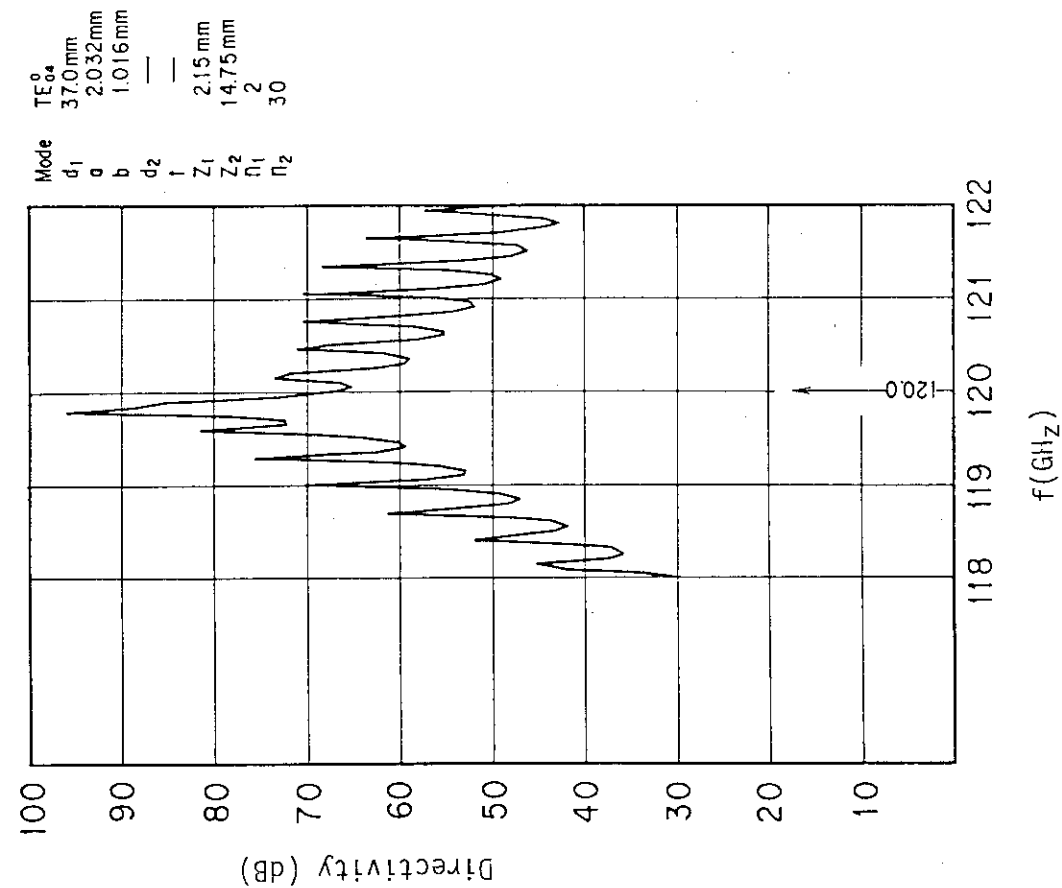


Fig. 28 TE_{04} mode directional coupler: Directivity as a function of frequency.

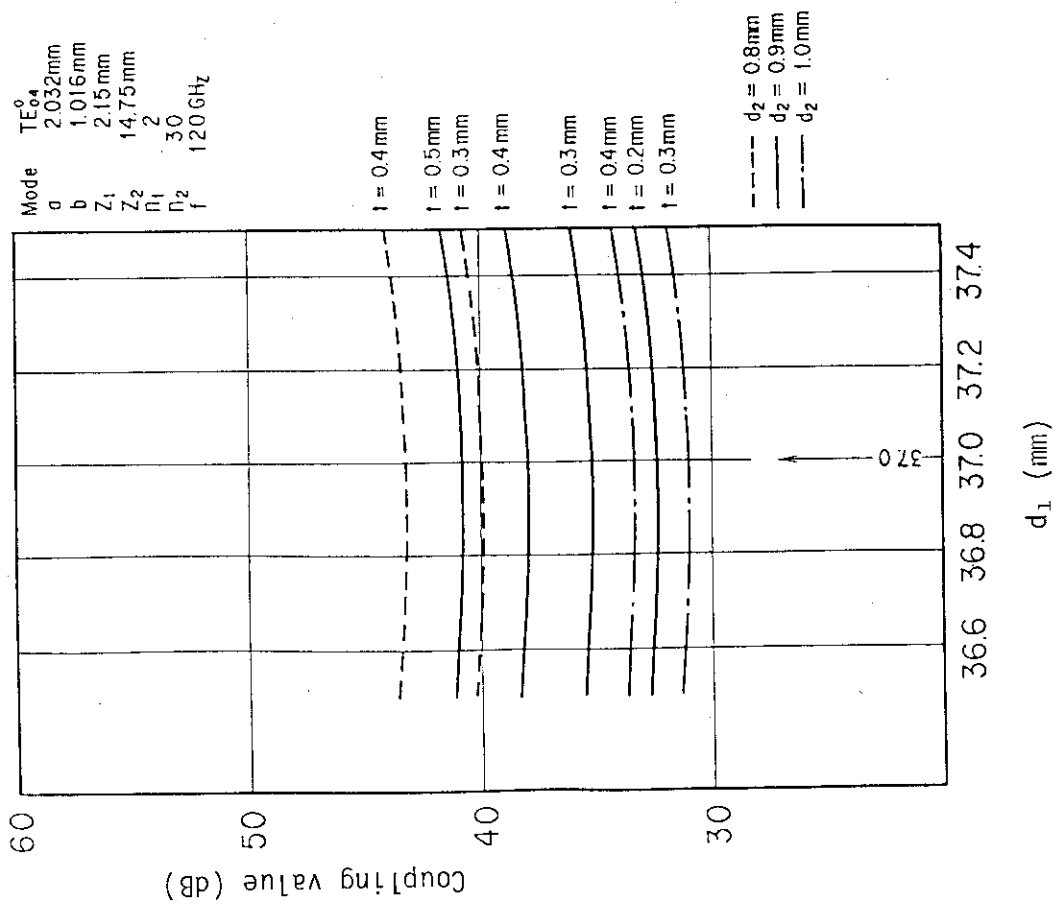


Fig. 29 TE_{04} mode directional coupler: Coupling value as a function of the circular waveguide diameter (d_1).

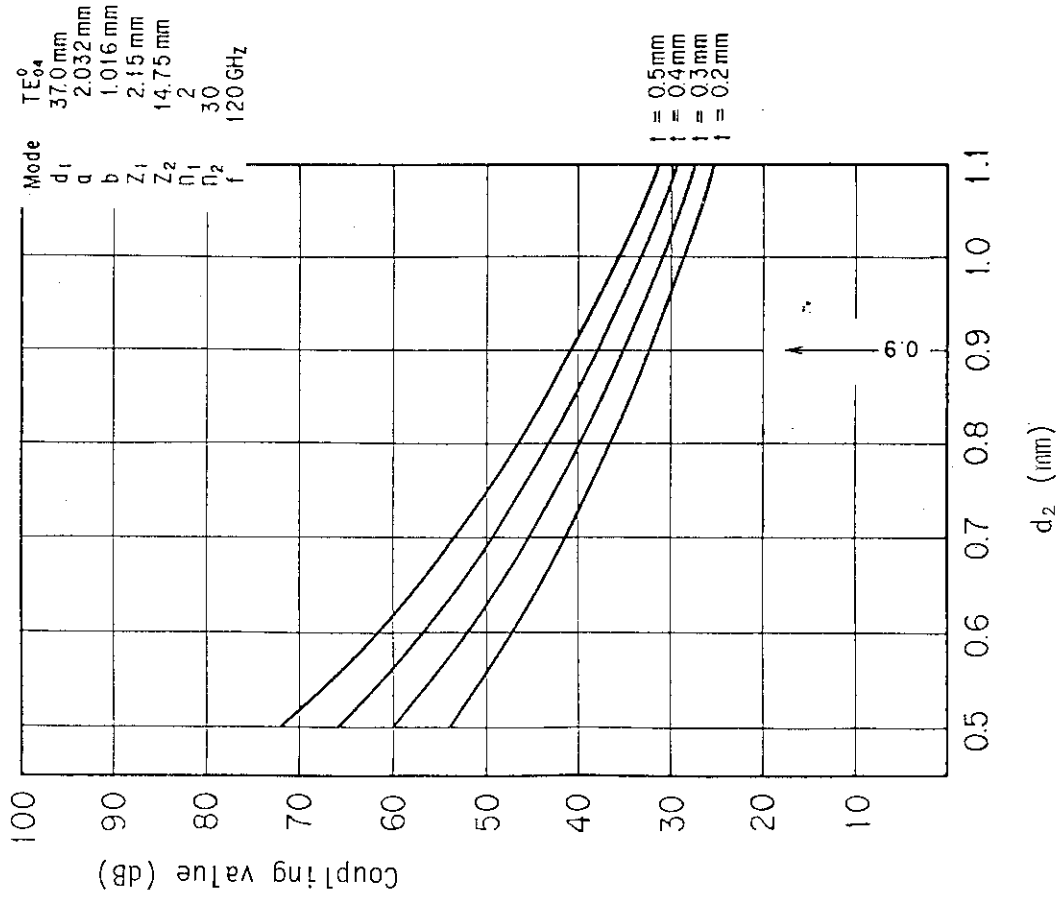


Fig. 31 TE_{04} mode directional coupler: Coupling value as a function of the coupling hole diameter (d_2).

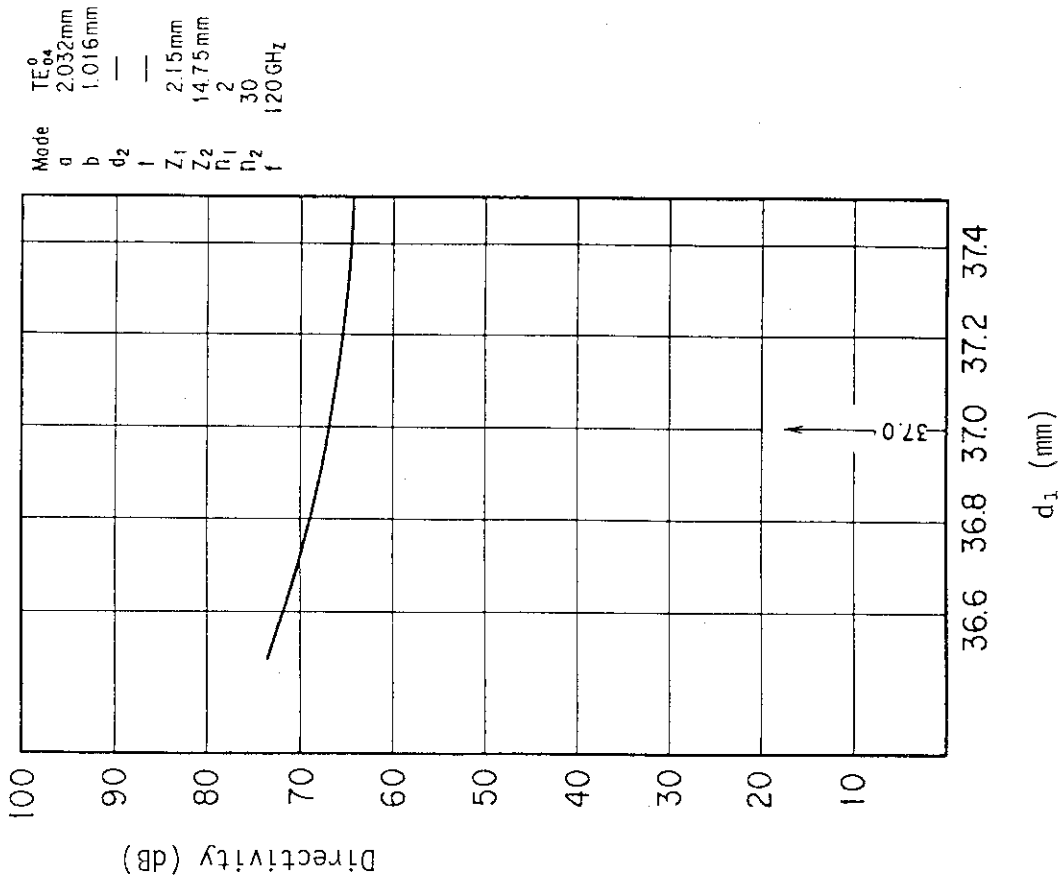


Fig. 30 TE_{04} mode directional coupler: Directivity as a function of the circular waveguide diameter (d_1).

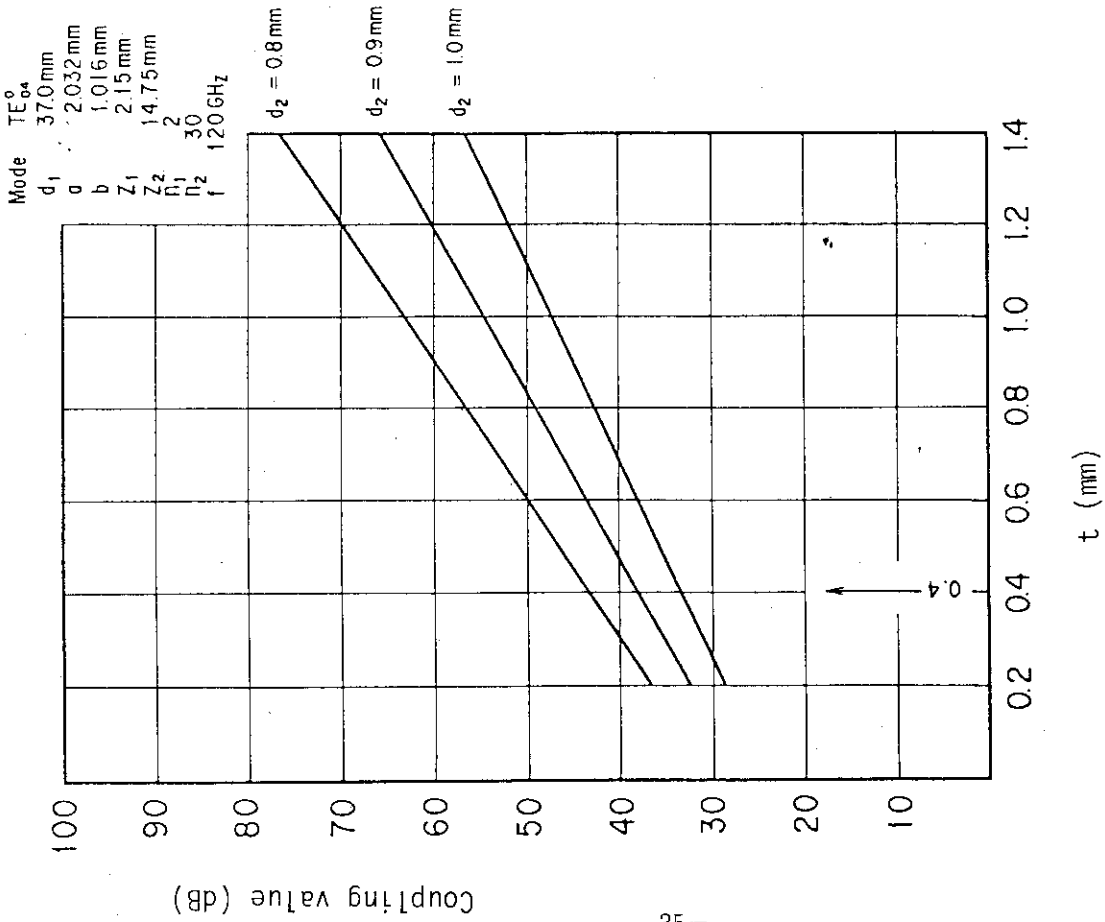


Fig. 32 TE_{04} mode directional coupler: Coupling value as a function of the coupling hole thickness (t).

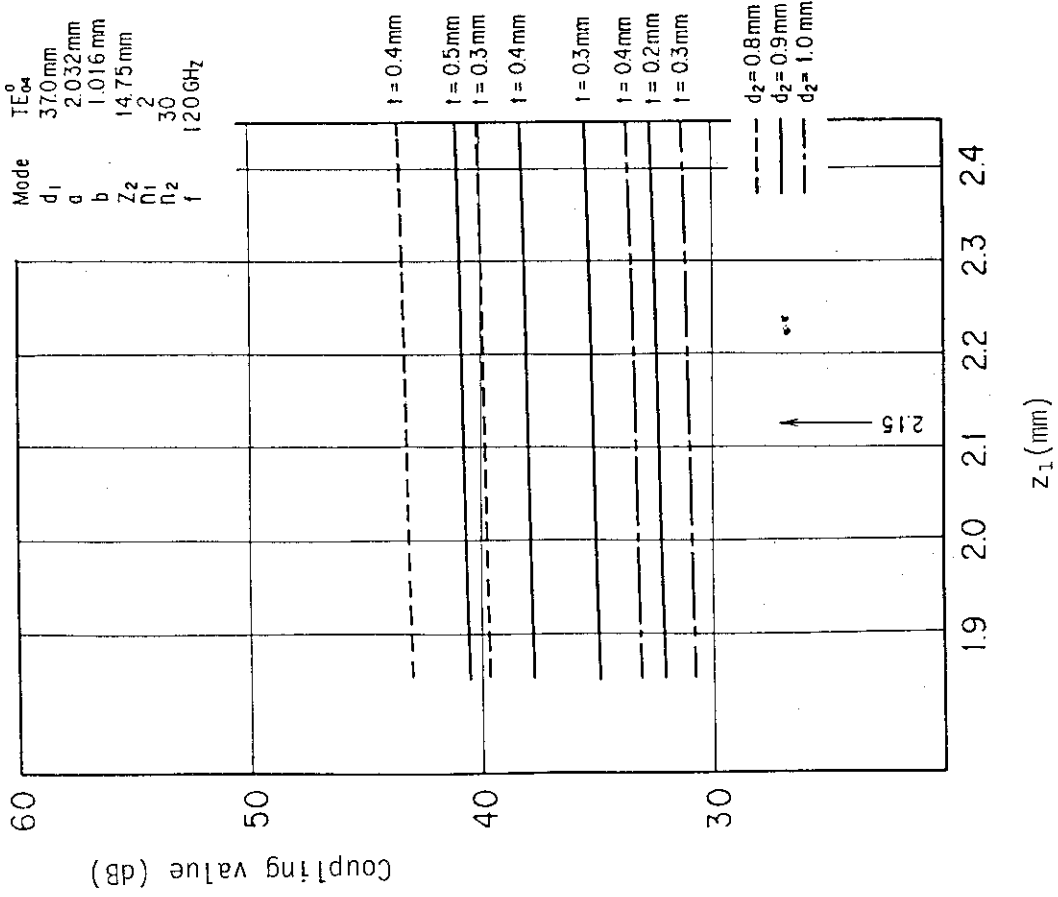


Fig. 33 TE_{04} mode directional coupler: Coupling value as a function of the distance (z_1) from one coupling hole to another.

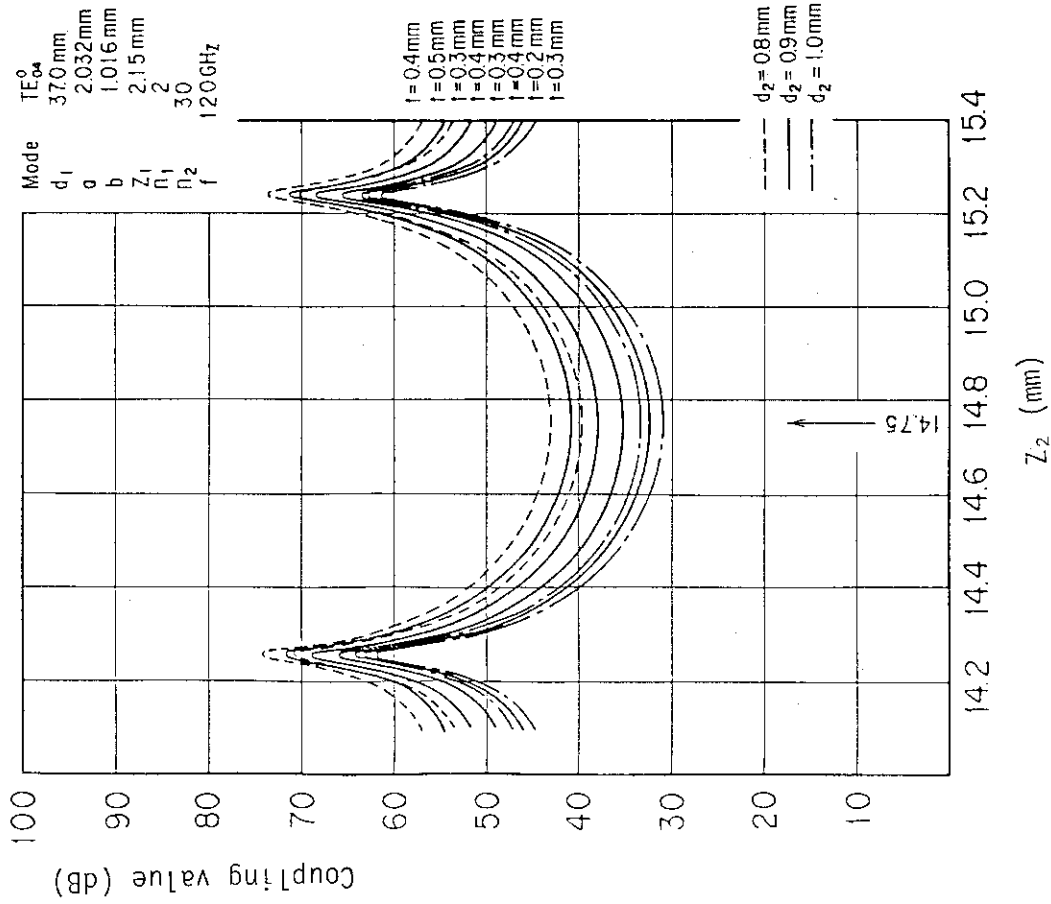


Fig. 35 TE₀₄ mode directional coupler: Coupling value as a function of the distance (z₂) from one coupling hole group to another.

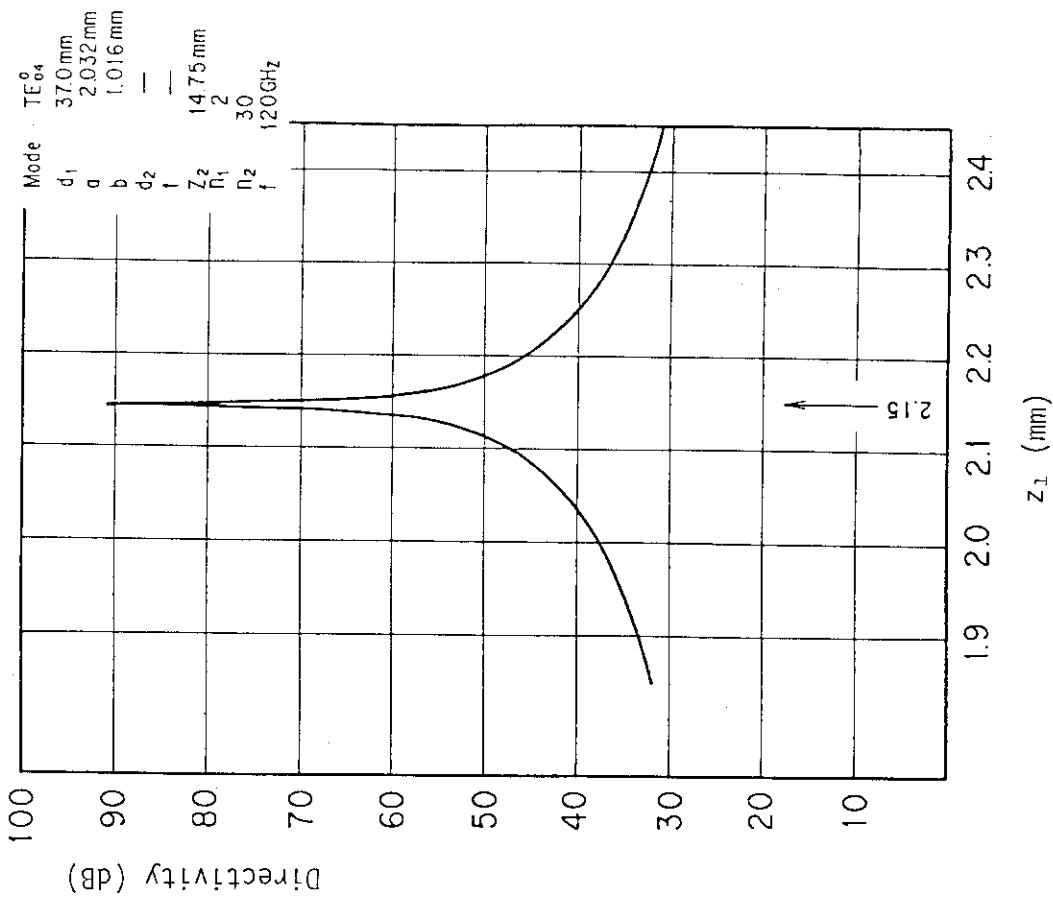


Fig. 34 TE₀₄ mode directional coupler: Directivity as a function of the distance (z₁) from one coupling hole to another.

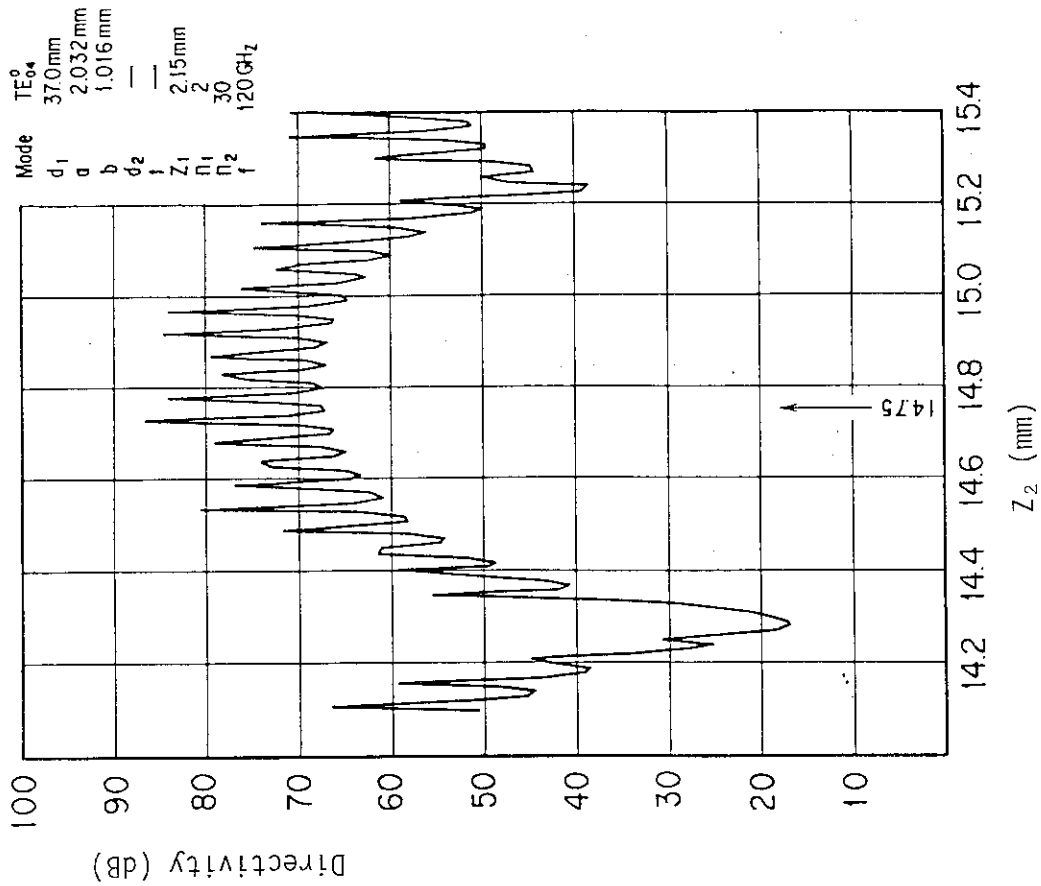


Fig. 36 TE_{04} mode directional coupler:
 Directivity as a function of the
 distance (Z_2) from one coupling hole
 group to another.

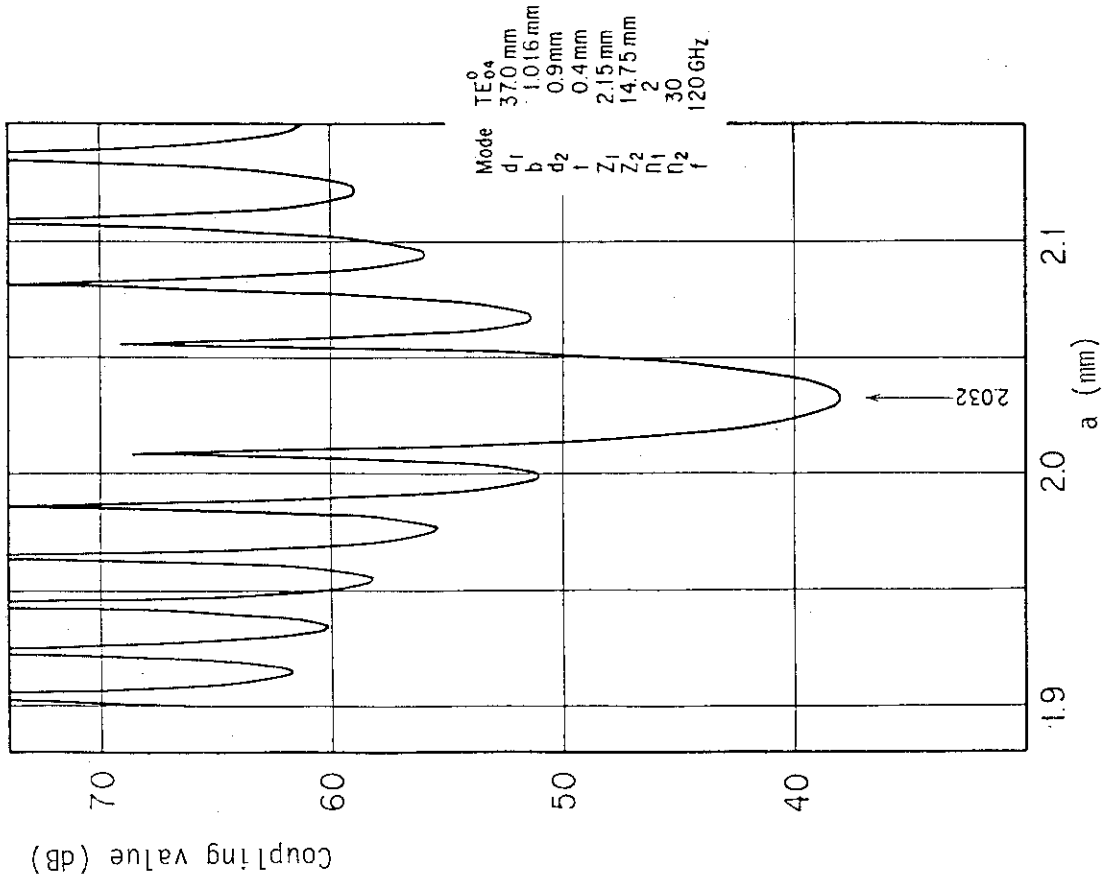


Fig. 37 TE_{04} mode directional coupler: Coupling
 value as a function of the wide width
 (a) of the rectangular waveguide.

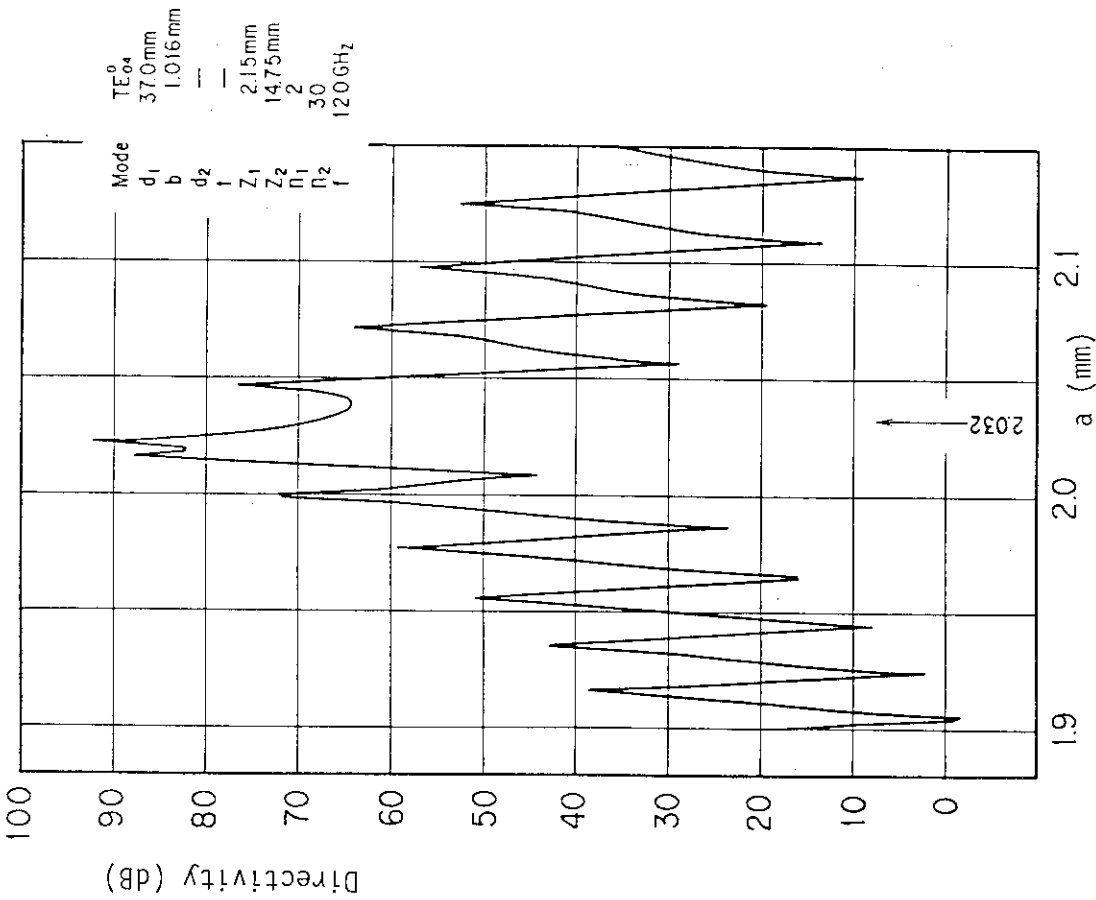


Fig. 38 TE_{04} mode directional coupler:
 Directivity as a function of the wide width (a) of the rectangular waveguide.

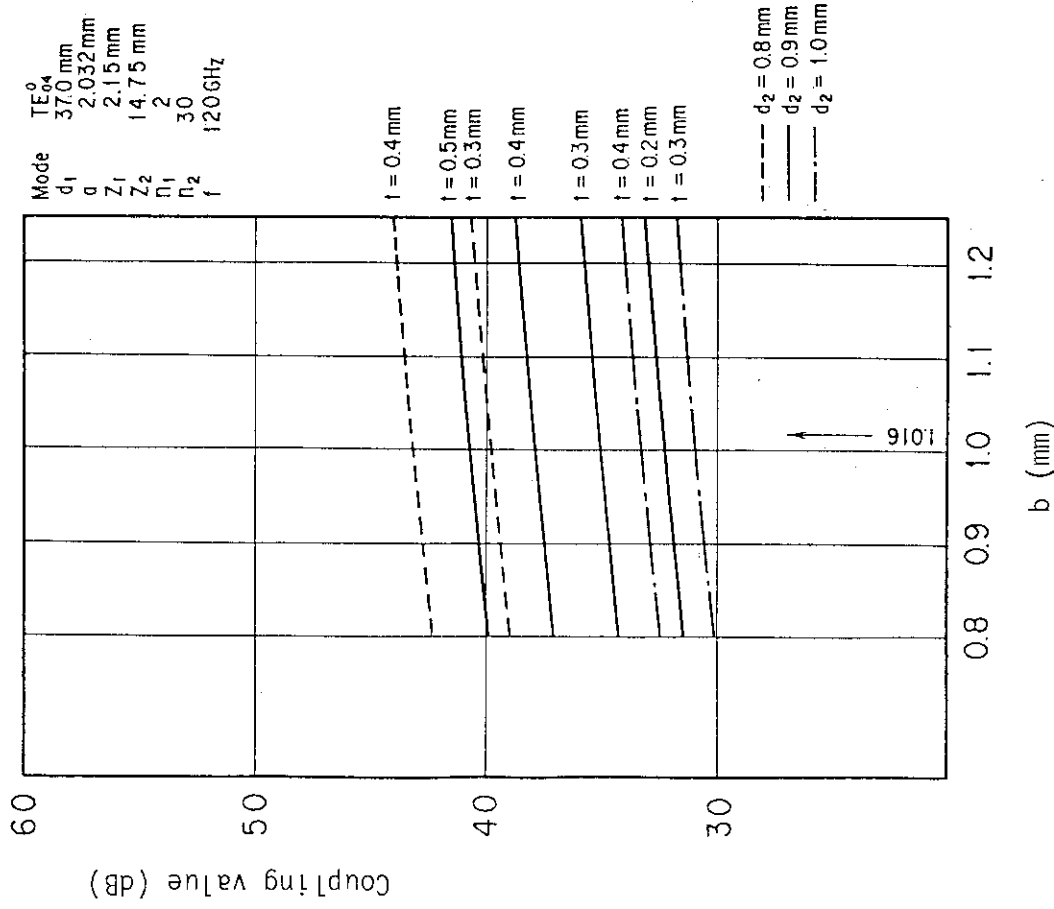


Fig. 39 TE_{04} mode directional coupler:
 Coupling value as a function of the narrow width (b) of the rectangular waveguide.

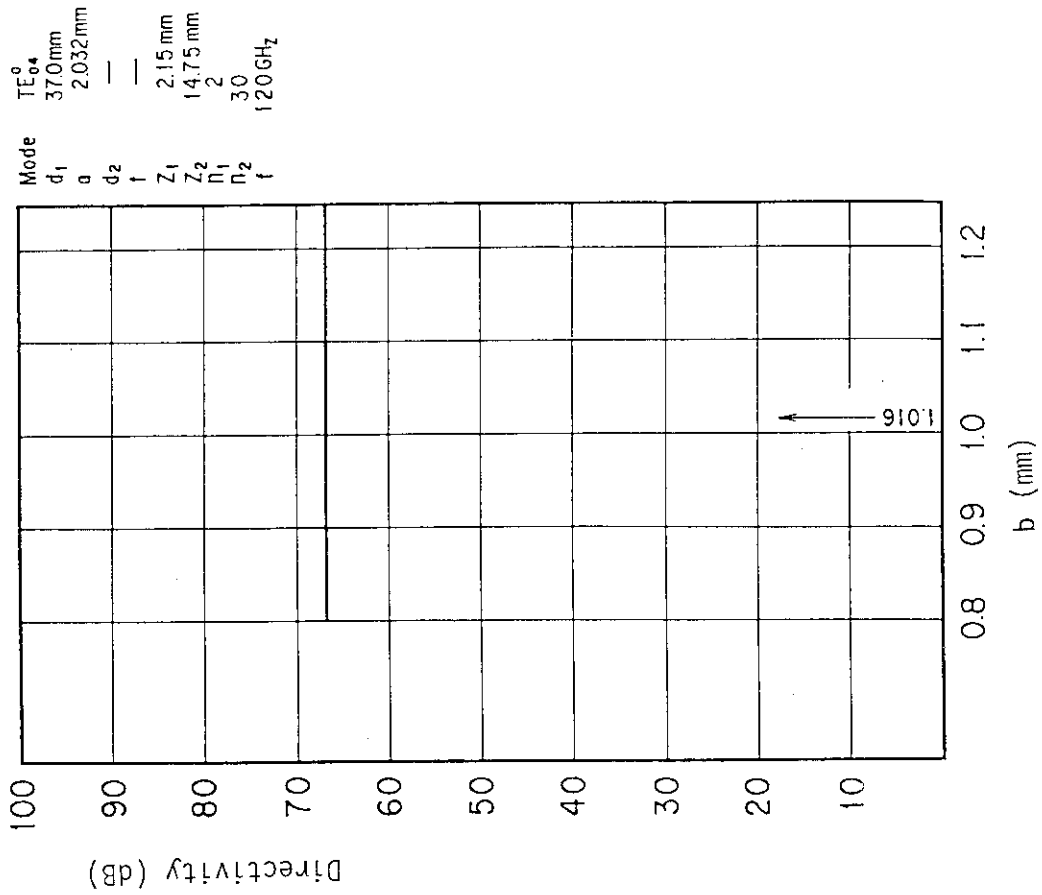


Fig. 40 TE_{04} mode directional coupler:
 Directivity as a function of the
 narrow width (b) of the rectangular
 waveguide.