

氏 名	上 田 愛 彦
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和39年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学位論文題目	マイクロ波領域における固体メー ザ増巾器に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 内 田 英 成
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 内 田 英 成 東北大学教授 上 領 香 三 東北大学教授 吉 田 重 知 東北大学教授 大 原 儀 作 東北大学助教授 稲 場 文 男

論文内容要旨

1 緒言

工学的観点からマイクロ波固体メーザの設計を行う際に、常に要求されることは、いかにして最適動作条件を合理的に、しかも簡便に決定することができるかということであり、こうした動作設計法の確立は固体メーザの実用化を促進するためにもきわめて重要なことと考えられる。筆者は、この解決のため、固体メーザの基本的設計図表としてMaser Frequency Diagram(以下MFDと略す)を考案、作製し、実際に応用してメーザの動作実験を重ねることにより、この図表を基礎とする動作設計法がきわめて合理的で、かつ、有効なものであることを明らかにした。本論文は先ずこの設計図表の作製、および使用法について論述し、次にこれを基礎として各種固体メーザの装置設計、および動作実験を行い、増巾の基礎的諸特性を明らかにしたものである。

2 マイクロ波固体メーザの動作設計法

マイクロ波固体メーザの動作設計は、増巾する周波数帯に最も適した物理的性質を有し、かつ実用上の条件を満たすメーザ用結晶を使用し、信号、およびポンピングの両周波数に対する遷移を選んで両者が同時に共鳴吸収を起す点、すなわち2重磁気共鳴の条件を選び出すことに始まる。

常磁性結晶中の磁気イオンの電子のもつエネルギー準位に対する結晶内電場や外部印加磁界の影響は、波動方程式を解いて決定されるが、電子スピン磁気共鳴吸収やメーザ等の様にマイクロ波のエネルギーに関係するスピン・エネルギー準位のみを問題とする場合には、エネルギーの大きな電子の軌道運動からこれを切り放して取り扱う摂動論的方法が適用できる。したがって波動方程式に現われるハミルトニアンとしては、スピンのみの状態を記述するスピン・ハミルトニアンを考えればよい。結晶構造に伴うスピン・ハミルトニアンの形は種々調べられているが、例えばルビー中に含まれる Cr^{3+} イオンの様な3回対称性の結晶内電場中の磁気イオンに対しては

$$\mathcal{H} = \beta [g_{\parallel} S_z H_z + g_{\perp} (S_x H_x + S_y H_y)] + D [S_z^2 - \frac{1}{3} S(S+1)] \quad (1)$$

となる。¹⁾ ここで β はボーア磁子、 g_{\parallel} 、 g_{\perp} は外部磁界の方向により非等方な g 因子であり、 S_x 、 S_y 、 S_z は夫々の方向のスピン演算子である。また H_x 、 H_y 、 H_z は外部磁界 H の各方向成分で、座標軸は結晶内電場の3回対称軸の方向にとり、 Z 軸は結晶の C 軸に一致するものとする。

この様なエネルギー準位の計算は、数学的には量子力学の波動方程式を解くことにより求まる

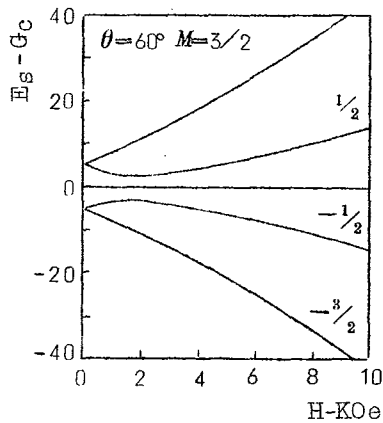
が、ルビー中の C_r^{+3} イオンに対してはスピン量子数が $3/2$ であるから、外部磁界の印加により4つのスピン単位を生じ、結局、次の永年方程式を解くことに帰着する。

$$\begin{aligned}
 E_s^4 - \left\{ 2D^2 + \frac{5}{2}\beta^2 H^2 (g_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + g_{\perp}^2 \sin^2 \theta) \right\} E_s^2 \\
 + 2D\beta^2 H^2 (g_{\perp}^2 \sin^2 \theta - 2g_{\parallel}^2 \cos^2 \theta) E_s \\
 + \left\{ D^4 + \frac{1}{2}D^2\beta^2 H^2 (g_{\perp}^2 \sin^2 \theta - 5g_{\parallel}^2 \cos^2 \theta) \right. \\
 \left. + \frac{9}{16}\beta^4 H^4 (g_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + g_{\perp}^2 \sin^2 \theta) \right\} = 0 \quad (2)
 \end{aligned}$$

上式で E_s はエネルギー固有値、 θ は外部磁界と結晶C軸とのなす角を表している。定数として

$$\left. \begin{aligned}
 g_{\parallel} &= 1.9840 \pm 0.0006 \text{ } ^2) \\
 g_{\perp} &= 1.9867 \pm 0.0006 \text{ } ^2) \\
 D &= -5.736 \pm 0.030 \text{ } G_c \text{ } ^3)
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

を用いて夫々の θ につき、(3)式を計算することにより、エネルギー単位を外部磁界 H の関数として求めることができる。第1図は一例として $\theta = 60^\circ$ の場合の単位図を示すもので、横軸に $H(KO_e)$ 、縦軸にエネルギー $E_s(G_c)$ をとっている。



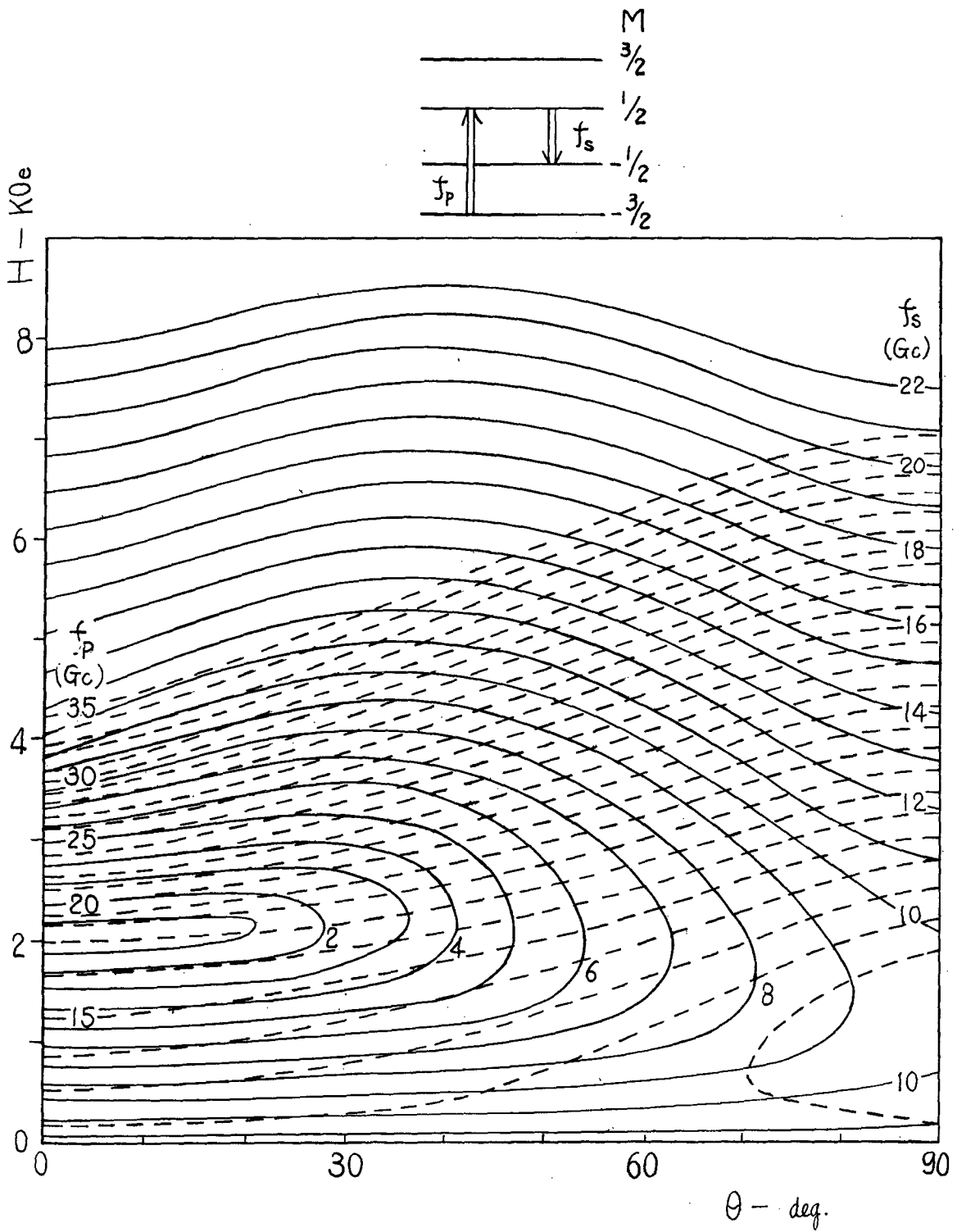
第1図 ルビー中の C_r^{+3} のスピン・エネルギー単位図

2重磁気共鳴の条件、すなわちメーザの動作条件は次の4つのパラメータにより定る。

- 1) 増巾周波数, f_s
- 2) ポンピング周波数, f_p
- 3) 外部印加磁界の強さ, H
- 4) 結晶軸に対する外部磁界の方向, 例えば
 θ (傾角), ϕ (方位角)

この内、 f_s は設計の当初に指定されるものであるが、 f_p および H については実用上の制約を伴うことが多い。こうした動作条件を能率良く、しかも種々の制約を考慮した上で、すべてを残らず選出するためには、エネルギー単位図を基礎として、新たに作製したMFDを用いることができる。

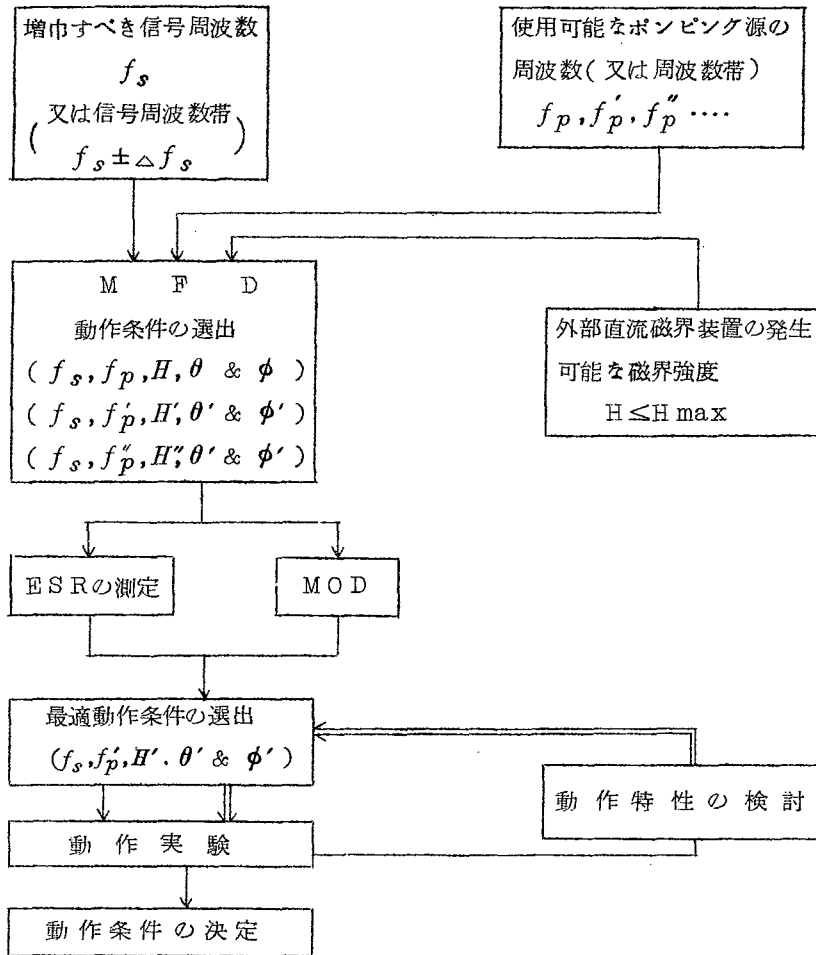
MFDはポンピング、および増巾を行う単位の組み合わせに従って作製されるが、ルビーについては4つのスピン単位に対し、ポンピングを $\Delta M = 2$ 、および $\Delta M = 3$ の遷移にとり、増巾を $\Delta M = 1$ の遷移で行うことにすると、合計6種類の図表を作製することができる。第2図は



第2図 ルビーの MFD の一例

MFDの一例を示すもので、横軸に角 θ 、縦軸に外部磁界の強さ H をとり、 f_s および f_p をパラメータとして、夫々共鳴条件を満たす点を連ねたもので、メーザの動作条件は所要の f_s, f_p の交点から、図上に直ちに求めることができる。

第3図にMFDを基礎とした固体メーザの動作条件の最も合理的な決定法を系統図により示した。

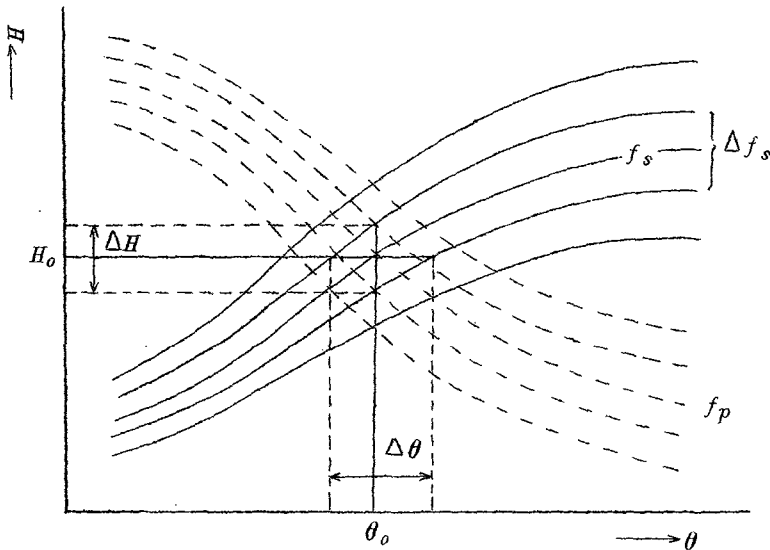


第3図 MFDを基礎とする固体メーザの合理的な動作設計法

すなわち、所要の f_s に対し、実際に使用することが可能な f_p を組み合せ、かつ H の使用範囲を限定した上ですべての動作条件を選出し、次にこの中から夫々の優劣を判定して選別するため、 f_s および f_p に対応する単位間の誘導遷移確率の値を比較して、その最も大きいものを選出するという方針に従うものである。このため、MFDと同じ座標系を用い、偏波の性質を考慮した誘導遷移確率の相対値を

等高線的に図示したMaser Operation Diagram (MOD)を用いるか、または電子スピン磁気共鳴吸収の測定から吸収強度を検討するか、あるいはこの両者を併用することにより最適動作条件を選出して動作実験を行い、その動作特性の比較検討を経て、最終的に動作条件が決定されることになる。

MFDの大きき特徴はすでに述べたごとく、固体メーザ設計上の動作条件をきわめて容易に求め、かつ合理的に検討を進めることができることであるが、この他、所要の帯域巾を得るための具体的な動作方法を容易に熟知することができる点にある。今第4図の様にMFD上の1点



第4図 MFDによる増巾帯域巾の検討

$(f_s, f_p, H_0, \theta_0)$ が上記の方法に従つて決定された動作条件とする。必要とする帯域巾 Δf_s が使用する結晶の電子スピン共鳴吸収の固有巾に比して大きい時には、

- 1) 外部磁界 H_0 とポンピング周波数 f_p とを一定にして、外部磁界の結晶軸に対する角度 θ_0 を $\Delta\theta$ の範囲にわたり変える。
- 2) ポンピング周波数 f_p と角 θ_0 を一定にして、外部磁界を H_0 を中心として ΔH だけ変化させる。

といういずれかの方法により、設計の際に要求される増巾帯域巾を得ることができる。

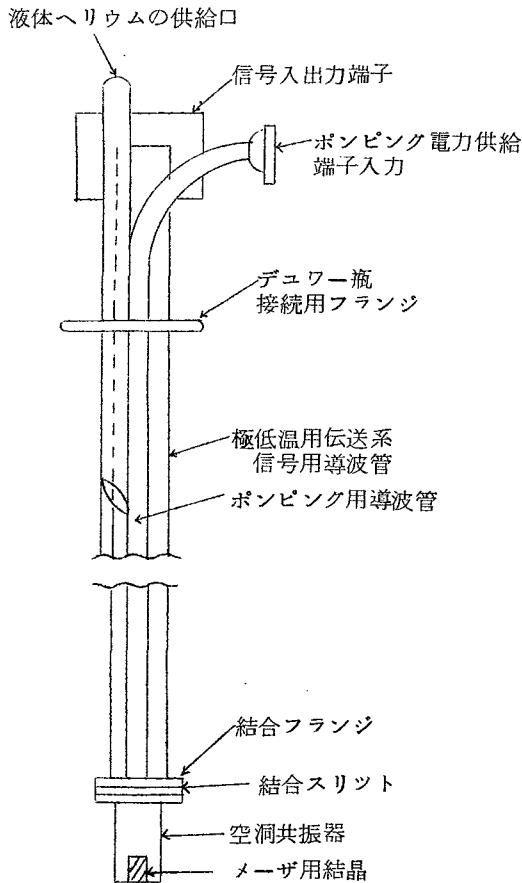
この様なメーザにおけるstagger tuningの方法は、MFDの使用によりはじめて的確に実現されるものである。

またMFDの精度については、ルビーを用いてXバンド、およびKバンドにおいて行つた広範囲な電子スピン磁気共鳴吸収の測定値と比較対照した結果、夫々Hの大きさに対する偏差は1/200程度であり、十分実用に供し得ることが検証されている。これはまた、ルビーのみならず、他の常磁性メーザ用結晶に対しても普遍的に適用し得る設計法であることは明らかである。

3 共振器型固体メーザ装置の設計

マイクロ波固体メーザでは、スピナー格子緩和時間を大きくするため、結晶の極低温への冷却、および外部印加磁界の使用が装置を実際に設計する上で常に考慮されるべき条件である。このため極低温用の伝送回路および空洞共振器をはじめとして、メーザ本体各部の金属材料の選択、並びに外部磁界発生装置、デューワー瓶の使用による各部寸法の制限等の諸問題を伴うことになる。

筆者はXバンドの増巾に用いるため、第5図のごとき共振器型固体メーザ装置を設計試作し



第5図 Xバンド共振器型固体メーザの本体略図

た。増巾部には円筒型空洞共振器を用い、 f_s を9Gc帯、 f_p を25Gc帯にとり、結晶を挿入した状態で夫々共振する様設計し、極低温用伝送系には洋銀製の導波管WRJ-12, WRJ-24を使用している。かくして、液体ヘリウム用デューワー瓶中に入るメーザ本体の長さを約70cmとすることにより、およそ0.8Lの液体ヘリウムを用いて約10時間の連続動作が可能である。

4 共振器型ルビー・メーザの動作実験

先に確立した動作設計法に基き、第5図の装置を用いて増巾の動作実験を行つた。 $f_s = 9.75 Gc$ とし、 f_p を25Gc帯に選んで、ルビーのMFDを使用すると、合計4組の動作条件が求まるが、更にMOD、および電子スピン共鳴の吸収強度の測定結果から次の最適動作条件を決定し、液体ヘリウ

△温度 (4.2°K) で実験を行った結果、容易に良好な増巾特性を実現した。

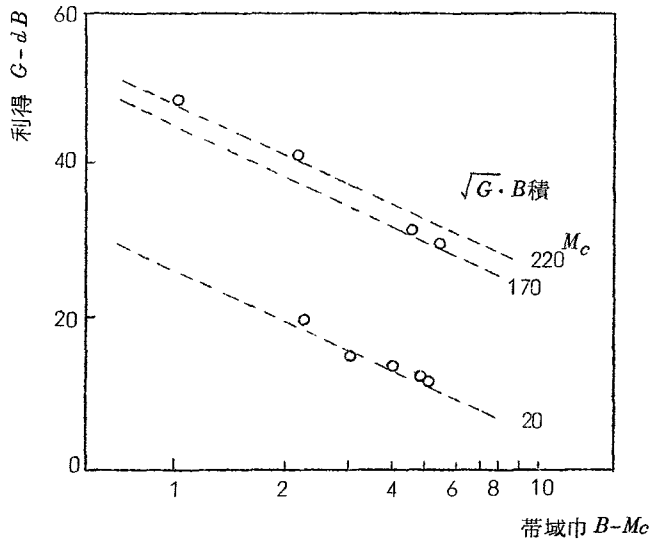
$$f_s = 9.75 Gc \quad (\text{遷移: } 1/2 \rightarrow -1/2)$$

$$f_p = 25.0 Gc \quad (\text{遷移: } -3/2 \rightarrow 1/2)$$

$$H = 4.19 KOe$$

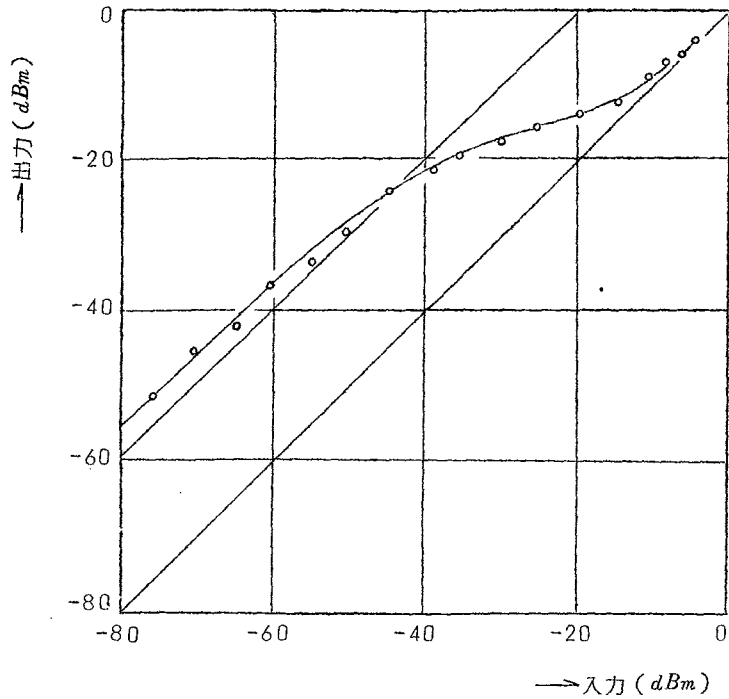
$$\theta = 53^\circ$$

実験の結果、共振器中に試料 (8×8×12mm) を入れた場合、 f_s に対する共振周波数は設計を行った空洞共振器の共振点以外にも見いだされ、上記の動作条件に準じて、各因子を僅かに変えた場合につき種々測定された $\sqrt{G} \cdot B$ 積をまとめて第6図に示した。この様な共振器型ルビー・メーザの動作に必要なポンピング電力は約60mWであり、また増巾利得が飽和をはじめる入力レベルは約-25dBm程度であることが明らかとされた。



第6図・共振器型ルビー・メーザの $\sqrt{G} \cdot B$ 積

次にルビー結晶は比較的大きい誘電率 ($\epsilon \sim 10$) をもつことから、結晶自体を共振器として用いることにより、マイクロ波磁界の充填率を高めるとともに、装置全体の小型化を促進することができる。第7図は前記直方体ルビー結晶を共振器として用いた場合、 $f_s = 8.8 Gc$ 、 $f_p = 24.7 Gc$ における実験結果であり、利得23dBに対し、増巾帯域巾約10Mcが得られ、飽和開始点は-45dBmに低下していることがわかる。



オ7図 結晶共振器型ルビー・メーザの増巾特性

5 共振器型ルチル・メーザの動作実験

新しいメーザ用結晶として、 C_r^{+8} イオンを添加したルチル結晶 ($TiO_2:Cr$) による動作実験を試みた。ルチルは零磁界分離が $4.3.3 Gc$ であり、長ミリ波、をいし中ミリ波帯の増巾に適するとともに、誘電率(液体ヘリウム温度で $\epsilon_{\perp} \sim 120$, $\epsilon_{\parallel} \sim 240$) が大きいことからメーザ本体の小型化が可能であつて、進行波型メーザ用材料としても有用なものと考えられる。ルビーの場合と同様に、ルチルについてのMFDを用いて、X-バンドにおける動作条件を求め、次に電子スピン共鳴吸収の測定結果から最適動作条件を選ぶと

$$f_s = 9.6 Gc \quad (\text{遷移: } 3/2 \rightarrow 1/2)$$

$$f_p = 35.9 Gc \quad (\text{遷移: } -1/2 \rightarrow 3/2)$$

$$H = 3.7 KOe$$

$$\theta = 90^\circ \quad (\text{傾角})$$

$$\phi = 69^\circ \quad (\text{方位角})$$

が得られる。

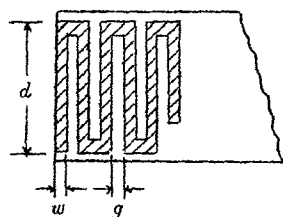
ルチル結晶の使用に当つては、これまで動作に最適な O_T^{+8} イオンの含有量が明らかにされていなかつたので、含有量の異なる3種類の試料(0.015%, 0.07%, 0.09%)を用いて比較検討を行つた結果、0.07%のものが最も良い増巾特性を与えることが確認された。液体ヘリウム温度において、利得11dBに対し帯域巾は約1Mcであるが、こゝではルチルのもつ高い誘電率から結晶自体を共振器として用いているので、外部回路との整合等の点で問題があり、動作特性としては更に改善されるものと考えられる。

6 進行波型メーザ用遅波回路

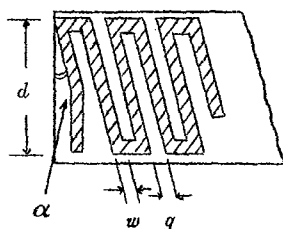
実用機器として用いられる進行波型固体メーザの性能は使用する遅波回路の特性に負うところがきわめて大きい。すなわち進行波型メーザ用遅波回路に要求される条件は次の諸点である。

- 1) 遅波率 S が成る可く大きいものであること。
- 2) 通過帯域巾を所要の大きさにできること。
- 3) 伝送損失が少ないこと。
- 4) アイソレータ用材料を挿入することによつて非可逆回路を構成し得ること。
- 5) 製作、および取り扱いが容易であり、かつ小型であること。

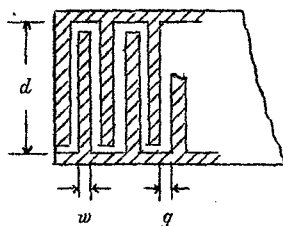
従来、米国においては主として進行波型メーザの遅波回路には楕円型構造⁴⁾のものが多く用いられ、この他、メーザ物質自身のもつ誘電率を利用して、それ自体を遅波回路として用いる方法等もあるが、筆者は第8図に示した様にマイクロストリップ・ラインを応用した各種の幾何学的



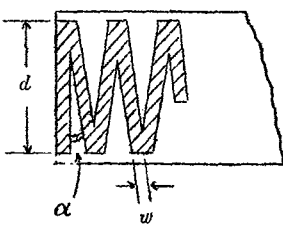
(a) Meander Line
(M.Line)



(b) 斜行 M.Line



(c) Interdigital Line
(I.Line)



(d) zigzag Line
(Z.Line)

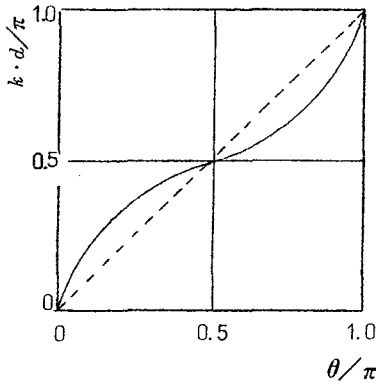
第8図 各種の曲折形遅波回路

形状を有する曲折形遅波回路を用いることを試みた。

第8図で曲折しているテープ状導体素子の巾を w 、長さを d 、隣接素子間の間隔を g とし、導体の厚さは無視し得るものとする。P.N. Butcherの取り扱い⁶⁾に従えば、これらの導体に沿ってTEM波が伝播するとした場合、 $w=g$ のM・ラインの分散特性は

$$\text{Cot}^2 \frac{k d}{2} = \text{Cot} \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

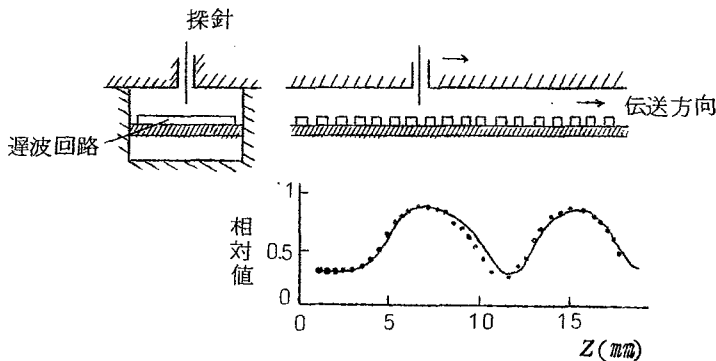
となる。ただし、 k は自由空間における伝播定数、 θ は1ピッチ($p=2(w+g)$)当りの移相量を表わし、遅波回路の位相定数を β とすると、 $\theta = \beta \cdot p$ である。これから理論的分散曲線は第9図の様になり、 $k \cdot d / \pi = 0.5$ における群速度 v_g の理論値は $v_g = (p/2d) \cdot C$ 、(C :光速)となる。



第9図 M・ラインの理論的分散曲線

実験に供した回路は市販の印刷回路用銅張積層板(基板:ガラス・エポキシ、厚さ1.6mm;銅箔:厚さ0.03mm)を用いて写真製版により作製したもので、簡易、小型で所期の特性を実現できる特長を有している。

この様な回路の分散特性の測定方法として、筆者は次の測定法を試みた。すなわち、第10図に示したように、測定すべき遅波回路を導波管(WRJ-15)中に置き、定在波測定法に準じて上面スリットより挿入した探針により、回路の



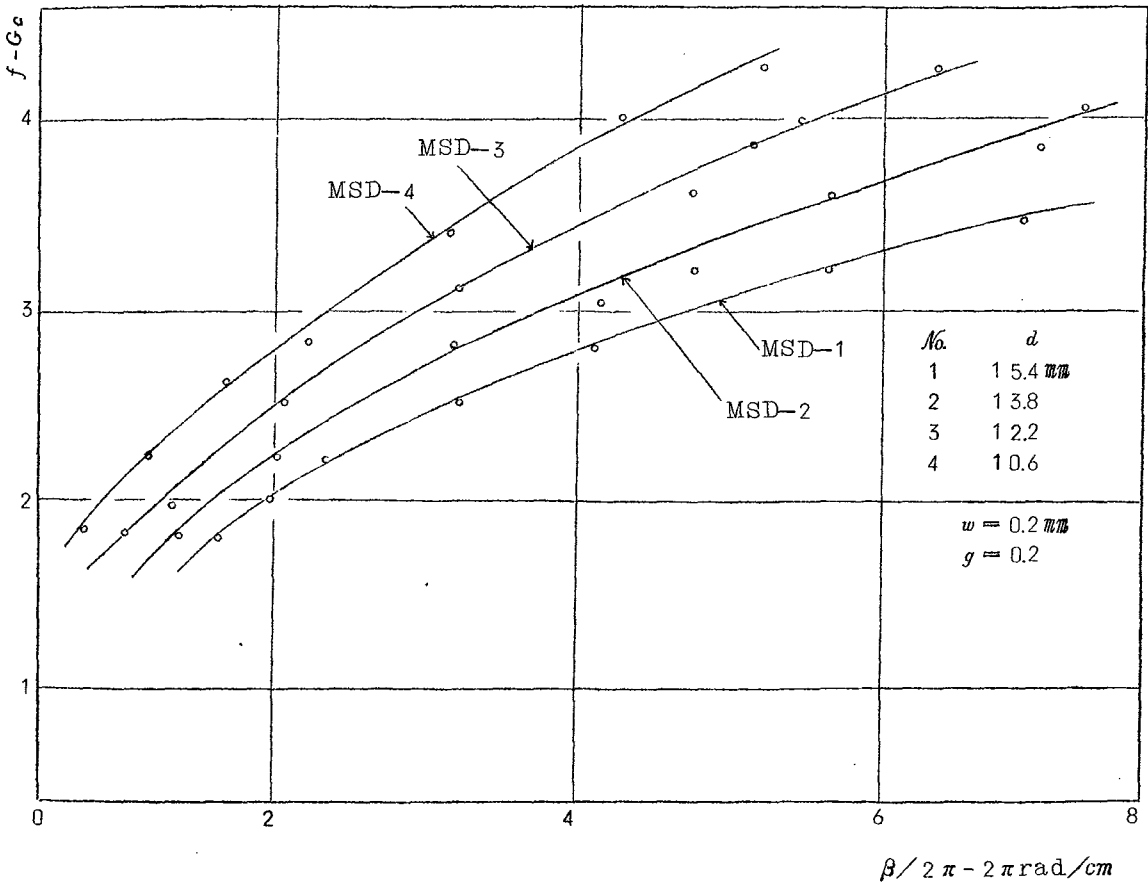
第10図 曲折形遅波回路の分散特性測定法

中心線上における伝送方向の電界分布を実測するもので、図の下側に示したように測定結果から回路の位相定数 β の周波数依存性、すなわち分散特性を求めることができる。

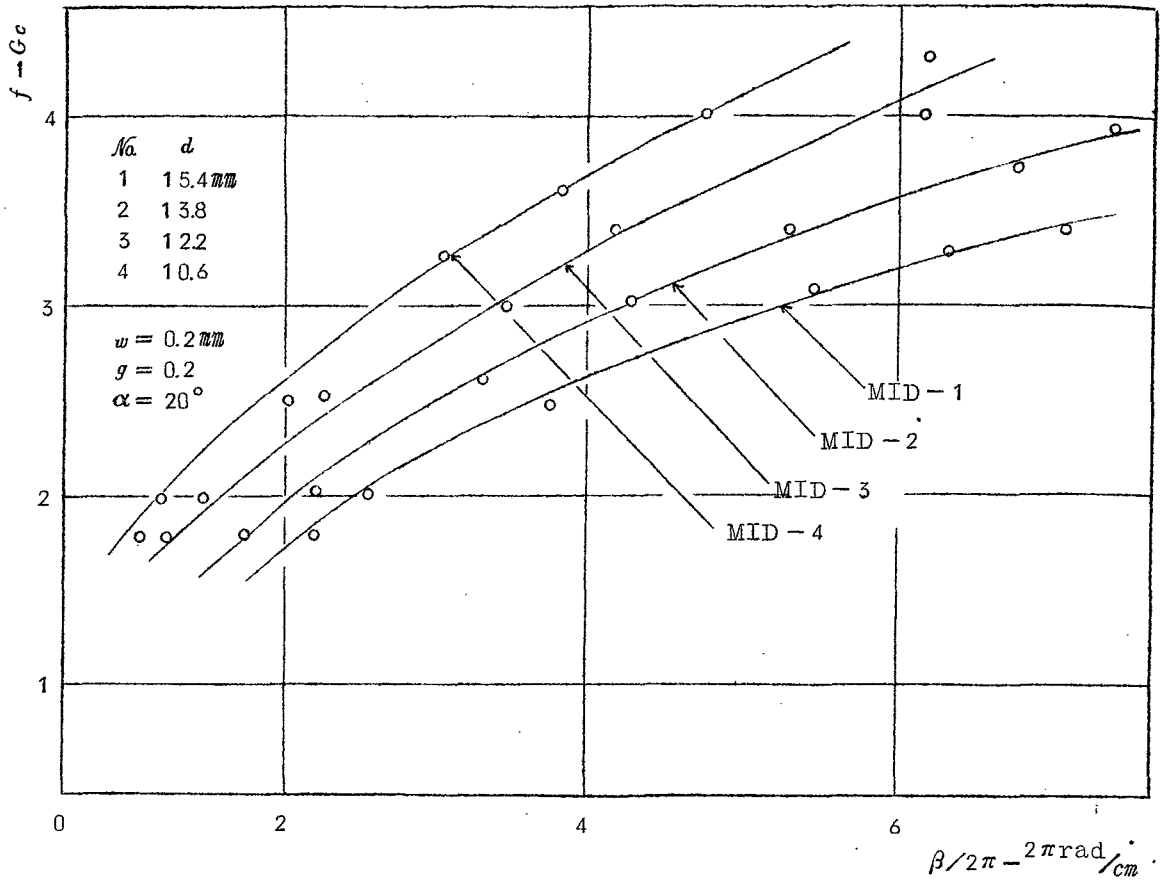
第11図、および第12図は多数の試作回路のうち、代表例として良好な特性をもつM.ライン(MSD-1~4)、および斜行M.ライン(MID-1~4)に対する分散特性の測定結果で、いずれも縦軸に測定周波数 $f(Gc)$ 、横軸にZ方向の位相定数 β (rad/cm)を 2π で除した値をとって示してある。群速度 v_g は $\omega = 2\pi f$ とすると曲線の勾配として

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (5)$$

で与えられるから、遅波率 S は



第11図 分散特性測定結果(遅波回路: MSD)



第12図 分散特性測定結果(遅波回路:MID)

$$S = \frac{C}{vg} = \frac{C}{\left(\frac{dw}{\alpha\beta}\right)} \quad (6)$$

として求めることができる。

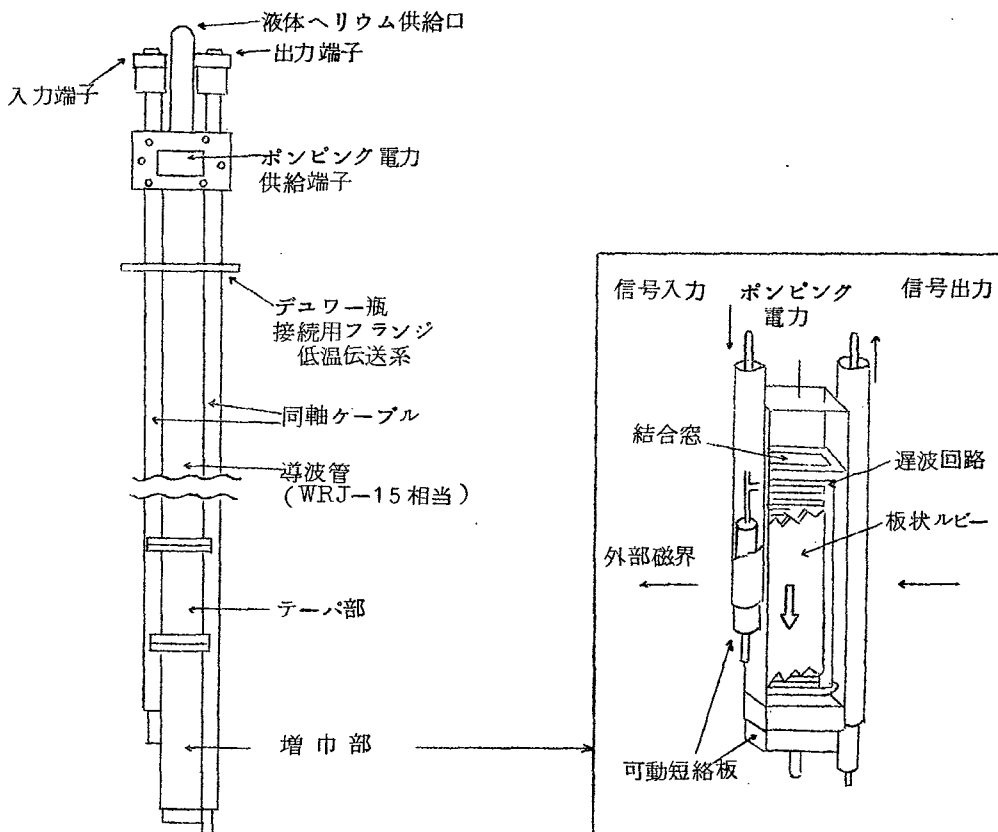
測定結果から4Gc帯の増巾に適する遅波回路として、MSD-2, およびMID-2が選ばれ、 $S=120\sim 140$ が得られている。M・ラインと斜行M・ラインとはマイクロ波磁界の偏波面が異なるため、夫々の回路を用いて電子スピン共鳴吸収の測定を行うと、各点の吸収強度の分布に差異が生ずることが明らかにされている。

7 進行波型ルビー・メーザの動作実験

宇宙通信等への応用を考慮して4Gc帯において広帯域増巾特性を有する進行波型メーザを設

計し、前述の遅波回路を用いて基礎的特性の測定を行った。

第13図はS-バンド進行波型メーザの本体の構造を示すもので、信号系は入出力とも同軸ケ



第13図 S-バンド進行波型メーザ本体略図

ーブルを用い、またポンピング系は導波管 (WRJ-15 相当) を使用したが、増巾部ではこの導波管のH面にテーパを付して高さ 6mm とし、その中心面内に板状ルビー (長さ 80mm 、巾 13mm 、厚さ 1.6mm) を重ねた遅波回路を固定して、夫々両端を入出力同軸ケーブルに接続してある。

先の遅波回路を用いて、MFDを基礎とする設計法に基き、動作実験を進めた結果、従来進行波型メーザに用いられてきた $\theta = 90^\circ$ の限定された動作点以外に更に良好な増巾特性を示す動作点が存在することを見だし、その場合の遅波回路には新たに提案した斜行M・ラインが適していることを明らかにした。

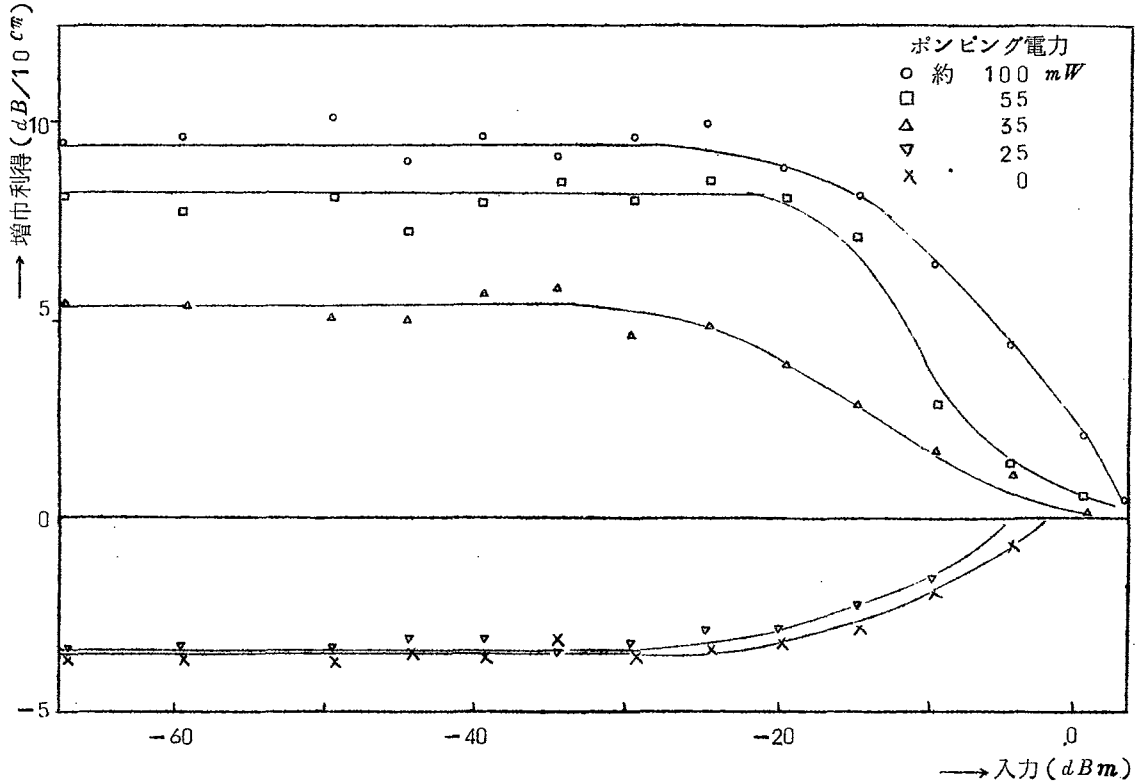
第14図は動作条件

$$f_s = 4.0 \text{ Gc} \quad (\text{遷移: } 1/2 \rightarrow -1/2)$$

$$f_p = 2.3.0 \text{ Gc} \quad (\text{遷移: } -3/2 \rightarrow 1/2)$$

$$H = 2.8.6 \text{ KOe}$$

$$\theta = 12^\circ$$



第14図 進行波型ルビー・メーザの増巾特性

に対して、液体ヘリウム温度(4.2°K)で実験を行つて得られた測定結果であり、回路長10 cm当りの増巾利得9.5 dB、帯域巾25 Mcの安定した増巾特性が実現された。

8 結 言

先に確立したマイクロ波固体メーザの動作設計法を駆使して、所要の最適動作条件の下で、いづれも容易にメーザ動作を実現することができ、本設計法の合理性および妥当性が実験的に明らかにされた。かくして、共振器型メーザについては、夫々の結晶の有する高い誘電率を利用して、結晶自体を共振器として、マイクロ波磁界の充填率を十分大きくとることにより、実用的要求に

応じ得る増巾特性を実現することが可能である。また進行波型メーザに対しては、前述のマイクロストリップ・ラインの遅波回路を直接板状ルビー結晶の表面に適當な方法で作製し、これらの素子を多数折り返して層状に配置することにより、装置の小型化をはかると同時に、動作特性の向上が行われるものと考えられる。

最後に終始御指導を頂いた、東北大学電気通信研究所内田英成教授、稲場文男助教授、ならびに上領香三教授に厚く感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) K. D. Bowers and J. Owen: Rep. Prog. Phys., 18, p. 304, (1955)
- 2) A. A. Manenkov and A. M. Prokhorov: J. E. T. P., (USSR), 28, p. 762 (1955)
- 3) G. M. Zverev and A. M. Prokhorov: J. E. T. P., 34, p. 513, (1958)
- 4) R. W. De Grasse, E. O. Schulz-Du Bois and H. E. D. Scovil: B. S. T. J., 38, p. 305, (1959); W. J. Tabör and J. T. Sibilialia: B. S. T. J., 42 p. 1863 (1963)
- 5) P. N. Butcher: Proc. IEE, 104B, p. 177, (1957)

審 査 結 果 要 旨

現在、レーザーの原理にもとづく量子エレクトロニクスの発展にはきわめて目ざましいものがあり、マイクロ波から光波に至る広範囲の周波数領域で一貫した同一原理のもとに、コヒーレントな電磁波の発振、増巾が実現され、自然科学の多方面にわたりその応用面を開拓しつつある。

本論文は、衛星通信やレーダー、電波天文学の観測等に活躍する低雑音受信装置としての固体レーザー増巾器の設計および動作における基礎的諸問題の総括的研究を収めたものであり、全文は4編より成っている。

第1編では、固体レーザー用材料としての常磁性結晶の基本的特性を理論的に解明し、その結果にもとづいて工学的観点から考案したMaser Frequency Diagramを基本とする固体レーザーの独自の動作設計法を確立している。しかも、この設計法は次編以下の動作実験によつて十分綿密に検討され、その合理性および有効性が確実に立証されたことは、顕著な業績と認められる。

次に、第2編では上記の設計法に従いXバンドにおける共振器型ルビー・レーザーの動作実験を行なつて、増巾器としての基本的諸特性を明らかにしている。また、レーザー用結晶の誘電率が一般に大きい点に着目して、結晶そのものを共振器として実用し得ることを実験的に示すとともに、増巾特性の向上と装置の小型化を推進できることをたしかめている。

第3編では、電磁界分離の大きいためにミリ波帯でも動作が可能な Cr^{3+} イオンを含むルチル結晶について、第1編で明らかにした動作設計に従い、装置を試作してXバンドにおいて動作実験を行なっている。さらに、従来ルチル結晶では動作に最適な Cr^{3+} イオンの含有量が明らかにされていなかったが、本研究によつてこの点についても新たな知見が得られている。

さらに、第4編では、固体レーザーの広帯域増巾特性を実現するために必要な進行波型固体レーザーの基礎的研究を行ない、Sバンドにおいて動作実験を試みている。すなわち、遅波回路としては、小型で、動作および取扱いの容易なマイクロストリップ・ラインを応用した各種の形状のものを試作し、それらの分散特性を測定している。その結果、新規に考案した斜行型メアンダーラインを用いると、従来使用されている固体レーザーの動作点とは異つた点において良好な増巾特性を実現できることを見いだしている。

以上を要するに、本論文はマイクロ波固体レーザーの多岐にわたる実用化を促進するために欠くことのできない基礎的な研究結果をまとめたもので、動作設計法に独自の方法を樹立し、種々の動作実験によつてその妥当性を実証するとともに、増巾器としての動作特性を広く明らかにするなど、電子工学特に量子エレクトロニクスに貢献するところ多大と判断される。

よつて、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。