

氏名(本籍)	やまのうちに かずひと 山之内 和 彦 (宮城県)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 6 9 号
学位授与年月日	昭和40年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	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	サイクロトロン波を用いたマイクロ 波電子管に関する研究
論文審査委員	教授(主査) 和 田 正 信 教 授 上 領 香 三 教 授 高 橋 正 教 授 内 田 英 戒 助 教 授 小 野 昭 一

## 論 文 内 容 の 要 旨

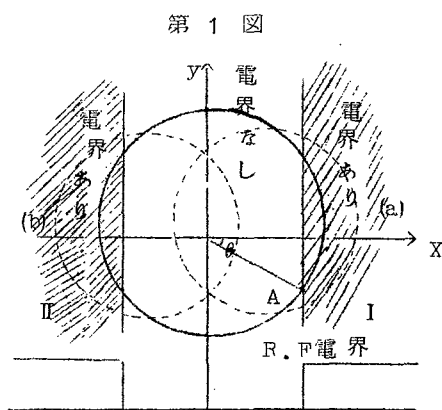
### 1 諸 言

マイクロ波電子管としては従来より進行波管 クライストロン等が用いられているが、いずれも波長の短縮にともないその遅波回路、空洞共振器等の構造が微細となり製作が困難になるのみならず直流入力電力を大きくとることが出来ず出力の点でも制限される。従つてこれらの電子管より短ミリ波、又はサブミリ波の領域に於て十分な出力を得ることは困難である。この様な観点より遅波回路を使用しない進行波管即ち通常の導波管と、一様磁界中で線運動をする電子流とを用いたサイクロトロン高速波管が種々提案された。しかしながらこの様な管に於てはその動作上使用周波数と磁界強度により与えられるサイクロトロン周波数とが殆んど等しいと云う条件が

必要となる。このためその動作周波数の上限は磁界強度により定まり、短ミリ波以下の波長に於ける動作は実用的な状態では不可能となる。この点を考慮しサイクロトロン高速波を使用しながらも空間高調波動作を採り入れ必要磁界強度を低減し得る進行波型ペニオトロンが提案され、修士課程に於ける筆者の実験によりその動作を確認した。これによりサイクロトロン高速波管に於て周波数の上限を与える最大要素は取り除かれたが、次の様な欠点も明らかにされた。即ち進行波型ペニオトロンには、その速度による電子の撰択作用が動作機構に含まれているので、加速位相の電子は、ただちに取り除かねばならない。従つて電子流の入射位置はきびしく制御されねばならない。又この速度撰択作用は管の能率にも制限を与えるのみならず、雑音特性をも劣化させている。筆者は、これらの難点の解決策を検討し、進行波型ペニオトロンによつて確認したサイクロトロン空間高調波動作を保持しつつ、これらの難点を除去し更に高能率動作の期待出来る動作機構を見出し、実験によつて確認することが出来た。又、一様磁界中から線運動する電子流を得る方法についても種々検討し、それぞれの特長ある2つの方法を見出すことが出来た。

## 2 動作原理及び動作解析

一様磁界中で円運動する電子流が第1図の如く、その軌道の両端にのみ高周波電界の存在する作用空間に入射したものとし、それらの相互作用を考える。その時サイクロトロン角周波数 $\omega_c$ と

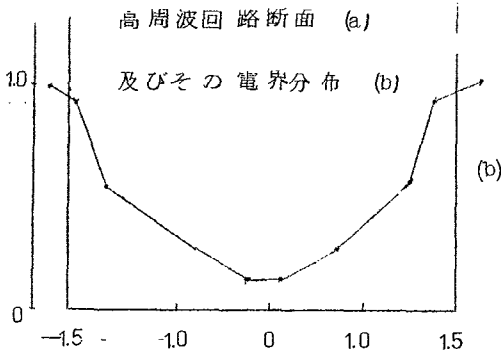
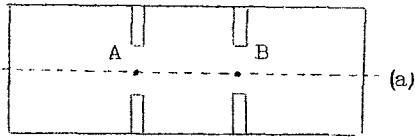


高周波電界の角周波数 $\omega$ との間に $\omega = P\omega_c$  ( $P=2, 4, \dots$  正の偶数) の関係が成立しているものとする。この様な条件のもとで今入射時の円軌道が第1図の実線で与えられるような直流電子流の挙動を考えれば、ある回転数を経た後には、(i)図のIの電界に減速位相を見て入つた電子は点線(a)の様に、又(ii)加速位相を見て入つた電子は点線(b)の様にそれぞれ一方の高周波電界を見る様な軌道となりしかもそこに於ける位相関係は共に減速位相を見

て、その運動エネルギーを高周波のエネルギーに変換して行く。この様な動作は円軌道を線軌道にまた高周波回路を進行波回路に置換することによつても全く同様に達成される。

第1図のような動作系に於ては、電子の運動を1つの方程式により解析的に解くことは出来ないで増巾機構を数式的に解析することは不可能である。そこで電子軌道を数値計算から求め、その運動エネルギーの変化からその動作を考察し、増巾の存在を確認した。又実現性のある回路としてこの管の実験に用いた第2図の様な普通の導波管にダブルリッチを付した回路の高周波電界

第2図

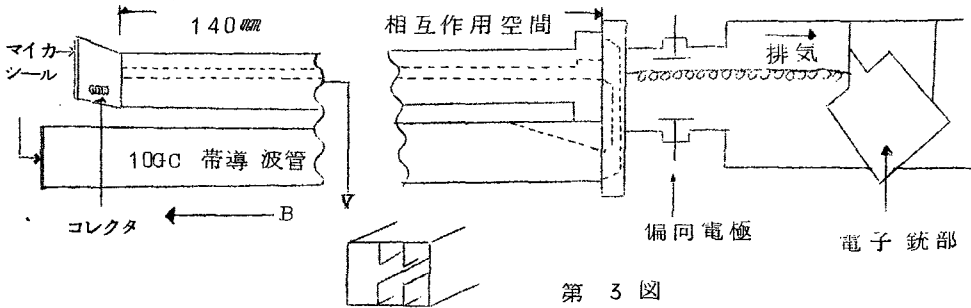


分布を測定した結果、下図の様に両リッチの間では、ほぼ2乗分布となることが判つた。そこで高周波電界分布を  $kx^2$  とし、電子の運動を漸近展開法を用いて解き、電子のエネルギーの変化を求め同様に増巾の存在を確認した。

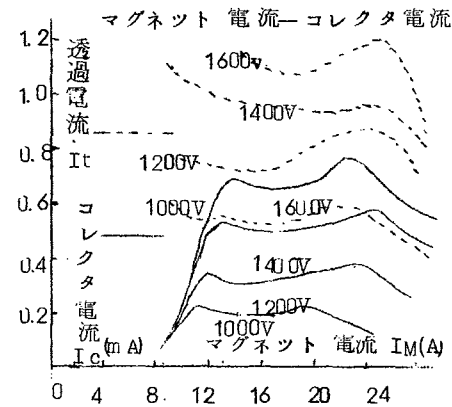
### 3 実験結果及び検討

試作管は2ヶ作りそれぞれ実験を行つた。試作管1は第3図の様に入出力回路部を持ち増巾及び発振特性を実験出来る様になつている。又試作管2はコレクター側に減衰器を挿入した後進波管である。実験周波数は10GC帯とした。

電子銃部は鉄シールドケースの中に納められ磁界軸と60°の角度を持つ。動作実験は最大約2000ガウスのソレノイドコイル内に実験管を挿入して行つた。電子流の透過実験は、ソレノイドコイル軸を上下及び左右に動かし、且つ偏向電極の電圧を変えて実験し、最適条件に於て第4図を得た。しかし加速電圧を20000V以上と上げると放電を起した。このことと、回路部の両リッチの間隔



第3図



第4図

が3mmであることを考慮すれば、10GC帯の実験での最適相互作用直径を得るためのサイクロトロン周波数は2.5GC、従つて第4空間高調波動作が適当と考えられる。

動作実験は測定を容易にするためにソレノイド直流入力に5000の変調電流を加え、高周波出力をクリスタルで検波し、オシロスコープ上に図を描かせた。

(1) 試作管1の実験結果

写真1に増巾特性を示す。この時高周波入力はコレクター側から入れた後進波特性である。上部に出てるのが増巾である。この時の加速電圧1600V、コレクター電流0.11(mA)である。

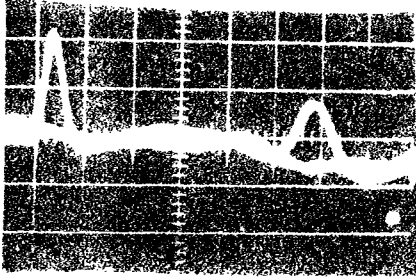


写真1

者の雑音特性の改善されたことを示している。又この時の直流入力は150mW、高周波出力は約10mWで約6%の能率を得ている。これは最初の動作確認のみを目的とした簡単な実験管としては十分な能率で今後電子銃部及び

回路構造の検討により目的とする高能率大出力動作が広い周波数帯に於て可能と思はれる。

(2) 試作管2の実験結果

この管は前述の様に相互作用空間終端部に減衰器を内蔵した後進波型のものであるが、その出力端より見た高周波特性は十分でなく、実験は次の様になつた。即ちサイクロトロン周波数を2.5GC附近で変調した結果、写真3の様に10.8GC及び11.2~11.5GC迄の発振、及び他の条件で10.9GC及び11.0GCの発振を観測した。これは目的とした第4空間高調波動作による発振であるが、これ以外の周波数では発振を観測し得なかつた事から、後進波管動作による発振とは考えられず内部反射による共振器効果によつて生じたものと思はれる。これは流入電子流を後進波発振管と

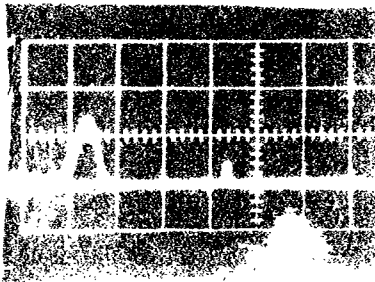


写真3

しての発振開始電流に到達しなかつたためであり、もしこれを超える流入電子流があれば、Q値とは無関係に磁界変調範囲によつて定まる相互作用周波数の全帯域にわたつて発振が起るはずである。しかしこの発振開始電流については、目下理論的に明らかにすることは出来ない。

次に試作管2のコレクター部にネサコーティングをほどこしその上に螢光物質を塗布したガラス板を附し、これを

コレクターとして直接電子流の軌道変化の様子を観測した。この時の相互作用の無い状態での写真4はきれいな円を描いた。もし測定電源に変動分が無く、且つ電子流の軸方向速度が一樣ならば、蛍光面上に生ずるパターンは円ではなく点となる筈である。そこで軸方向速度を逆磁界法により測定した結果予想外にその速度分布の大きいことが判つた。この原因は磁気遮蔽用円筒鉄ケースのため一様磁界分布が乱されることによるものと思われる。

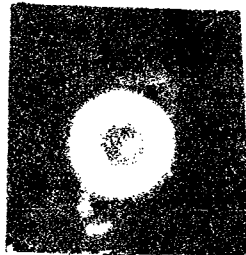
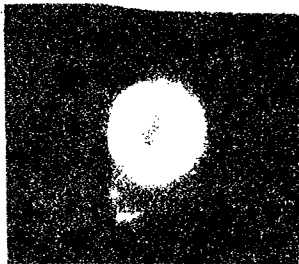


写真4

次に発振状態に於ける先と同様な観測結果を写真5に示す。この写真より、動作原理で説明した如く入射位相に応じて各



電子はその軌道の大きさを減じ、回路波にエネルギーを与えている事が判る。又この減少はかなり大きいことから、高能率動作の行われている事を示している。

#### 4 結 言

以上述べた様に、ミリ波サブミリ波管の実現を目的とした新しいサイクロトロン高速波管の動作を実験的にも確認することが出来た。前述した様に、この動作機構は、先に同じ目的を持つて提案された進行波型ベニオトロンの動作機構を改善することから生み出されたものであり、そのためこれには実用し得るにたる特性をもつことが前条件として与えられていた。従つてこの動作機構の確認されたことは、実用管としてのミリ波サブミリ波管の実現に大きな可能性を与えたものと思う。勿論この実験的裏づけは、1000帯の基礎実験に於て成されたものであり、直ちにミリ波サブミリ波管が作り得るものとは考えられないが、原理的には動作周波数の上限を与える要素が見当らず、又構造的にも非常に簡単なものであるから遠からず所期の目的であるミリ波サブミリ波管が実現出来るものと思う。

最後にこの研究に当り御指導御援助を頂いた東北大学名誉教授、小池男二郎、教授、和田正信教授、上領香三、教授、高橋正、助教授、柴田幸男、助教授、小野昭一の諸先生に心から感謝の意を表す。又、管の製作に御協力頂いた大内氏、及び卒業研究として御協力頂いた方々に厚く感謝する。

文 献

- (1) 小野昭一 ; 週期的に運動する電子ビームに関する研究 東北大学大学院工学  
研究科 博士論文
- (2) 山之内, 堀籠, 小野 ; Cyclotron Fast Wave Interaction の一方法  
について  
マイクロ波真空管研究会資料
- (3) ミトロポリスキー, ポリユーポフ ; 非線型振動論 ; 共立出版
- (4) J. B. Cohn ; Properties of Ridge Wave Guide ; Proc  
I. R. E '47

## 審査結果の要旨

コヒーレントな電磁波の発生については長い間真空管がもつぱら用いられてきており、 $\text{mm}$ 波までの発生、実用を可能にしている。一方、最近のレーザーの展開は遙かに波長の短い遠赤外線から可視光線に及ぶ電磁波の発生を可能にし、新しい実用の可能性を提示している。

これら二つの技術の流れの谷間として $\text{mm}$ 波と遠赤外線の間電磁波が未開の宝庫として残されており、この開拓が上記の二つの技術の孤張、展開の形でとりあげられている。

本論文は $\text{mm}$ 波以下の電磁波の発生を目的として新しい形式の真空管を考案し、その可能性を追求するために行なわれた研究結果をとりまとめたもので、本文8章および附録2章とからなる。

第1章は総論である。従来真空管では $\text{mm}$ 波以下の短波長の電磁波の発生が困難なることを説き、このためこの種の目的に沿って提案されている真空管の概費について説明している。

この説明過程から先に提案されている進行波型ベニオトロンと呼ばれる真空管の根本的改良を図つて、全く新しい動作原理に基づくダブルリッジ型ベニオトロンを創案し、実験的にも有用性が確認されるに至つた思考過程が説明されている。

第2章では著者の考案したダブルリッジ型ベニオトロンの動作原理、第3章ではその動作の理論的な解析がそれぞれ論じられている。

ダブルリッジ型ベニオトロンではらせん運動をする電子流とこの進行方向に垂直な面のなかで特異な高周波電界分布をもつた進行波回路とを用いる。これでサイクロトロン空間高調波動作を可能にすると同時に、入射電子流を電界に入射する位相によつて二つの群にわけてとも増幅動作に寄与するようにしている。このように高周波減速位相に電子を集積させることを可能にする動作系を考え、必要とされる特異な高周波電界分布を明らかにし、位相分離効果を見出し、実験的にその動作を確認したことは著者の卓抜な業績である。

これらの動作を理論的に解くことは難しい。ここではじめに電子の円軌道の両端にだけ高周波電界が存在するという理想化したモデルを考え、数値計算で電子軌道を求め、電子の運動エネルギーの变化から動作を考察している。この解析で電子流の回路部への入射位置が動作にあまり影響を与えないことを明らかにしているが、この現象は電子流の入射部の構成がそれほど精緻である必要がないことを意味し、入射部にある程度の面積が許容できることになり、入射電子流が大きくとれ大電力動作が可能であることになる。さらに実際に近いモデルとしてダブルリッジ導波管内に生ずる高周波電界分布をとりあげ、近似的な解析を試み、著者の提案するダブルリッジ型ベニオトロンが増幅動作を示すことを確認し、設計の基礎資料を得ている。

第4章ではダブルリッジ型ベニオトロンの能動回路部の設計方針を示し、それにもとづいて試作を試みている。試作管は二種類で、その一つは入出力回路をもつ増幅管、もう一つは後進波発振管型式のものである。

前者の実験で、目的とする第4空間高調波動作を確認するとともに、ある動作条件で発振現象が観測され、その波形と能率から、先の進行波型ベニオトロンよりも雑音と能率の点で著しく改善されていることを示している。

後者の実験では内部反射による共振の影響を受けた種々の周波数における発振を観測し、理論値との対応からそれらが空間高調波動作によるものであることを明らかにしている。

また、後者の実験で入射電子流が不足して後進波発振が生じなかつたと考えられるので、その人

射電子流の増加および調整を容易にする二つの電子の入射方式を考案し、解析的、実験的にその有用性を確認している。これらの結果は付録 1, 2 章に示されている。

第 7 章ではこれらの試作管と同じ目的をもつて提案されているサイクロイド管との比較検討を試み、著者の提唱する方式の有用性を示している。

以上要するに、本研究は従来マイクロ波管の動作周波数の上限を凌駕できる可能性をもつ新しい真空管の動作機構を創案し、 $mm$ 波およびそれ以下の短波長の電磁波の発生、増幅に可能性を与えたもので、電子工学、通信工学その他に寄与するところが少なくない。

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。