

氏 名	ね 米	ざ 澤	ひろし 宏
授 与 学 位	工 学	博 士	
学位授与年月日	昭和 57 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)電子工学専攻		
学位論文題目	リーダトロンに関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授	小野 昭一	
論 文 審 査 委 員	東北大学教授	小野 昭一	東北大学教授 西田 茂穂
	東北大学教授	柴田 幸男	東北大学助教授 水野 皓司

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

近年短ミリ波，サブミリ波領域の研究は，核融合プラズマ診断等における需要の高まりとともに活発化している。その際まず所望の波長域における安定な光源が必要である。電子管は比較的小型で数 10 mW から数 W 程度の出力が得られ，発振波長も任意に設定でき，またそれを連続的に変えることもできるという大きな特徴をもっている。しかしながら短波長域の電子管を開発する場合，相互作用空間の寸法が波長に比例して小さくなるため機械加工が困難となり許容熱損失も小さくなる等の問題を解決しなければならない。リーダトロンは開構造光共振器（ファブリ・ペロ共振器）を用いることによって，このような問題の解決を意図した電子管である。しかし，これ迄の実験的研究において到達しえた最短発振波長は，リーダトロンのもつ 2 つの発振モード，即ちファブリ・ペロモード（FPM）及び表面波モード（SWM）に対して，それぞれ 4 mm，1.3 mm に止まっていた。また実用上有用な発振モードである FPM の短波長化が望まれていたが，その実現は容易ではなく，発振開始電流値も理論値よりは一桁以上大きな値であること等が問題となっていた。このような理論値と実測値との差異の原因は電子ビームの形状によるものであろうと定性的に説明されていたが，定量的な議論はなされていなかった。従って電子ビームに対しても大まかで定性的な指針が与えられていたに過ぎず，検討が十分ではなかった。実際これまで実験に用いられてきた電子

ビーム系については、その設計、製作技術に不十分な点が多く認められた。著者は本研究の開始にあたり、先ず上記の点に着目し、電子ビームに対する条件を明確にし、その条件を満たす良好な電子ビームを再現性良く得られる電子銃を製作することが不可欠であると考えた。このような電子銃を用いることによって発振開始電流値の正確な把握が可能となり、発振波長の短縮、出力の増大、更に連続波動作を実現するために重要な知見を与えらる。従って本研究の目的を厚さの薄い高電流密度電子ビームを再現性良く得ること、および発振開始電流値を正確に測定することにおき、理論的および実験的検討を行った。本論文はその成果をまとめたものである。

第2章 リーダトロン の ファブリ・ペロモード の 発振開始条件 に関する 理論的 検討

電子ビーム系の設計にあたっての指針を得ることを目的として、FPMの発振開始条件に関する理論的検討を行った。特にグレーティング表面からの距離によって動作に寄与する有効な電磁界強度が変化することを考慮し電子ビームの位置と発振開始電流値との関係を求めることによって電子ビームに必要な条件を明らかにした。またグレーティング表面の高周波電流分布を数値計算することによってグレーティングの抵抗損を求めファブリ・ペロ共振器の損失を求めた。Fig.1は電子ビームの位置をパラメータとした発振波長に対する発振開始電流値の変化を示すものである。これより当面の目標である波長 1mm までの発振を可能とする電子ビームの条件は厚さ $100\mu\text{m}$ 以内、電流値 1A 以上であることがわかった。

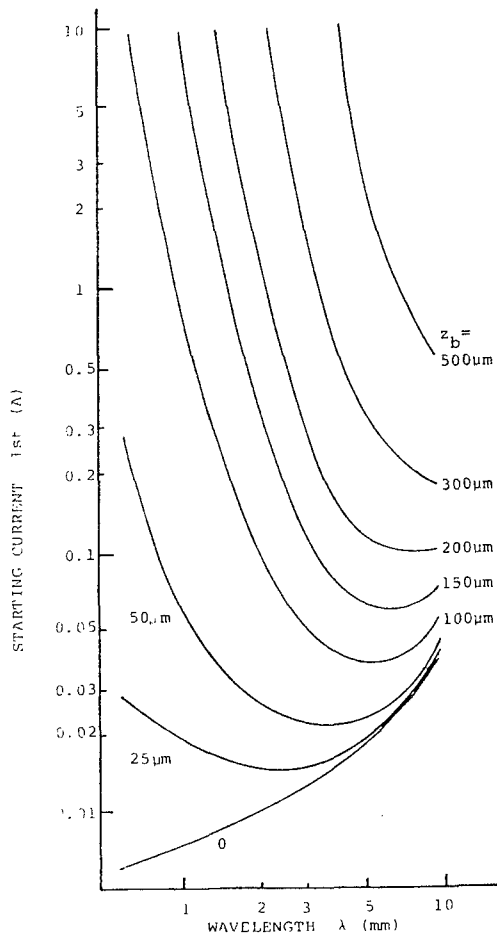


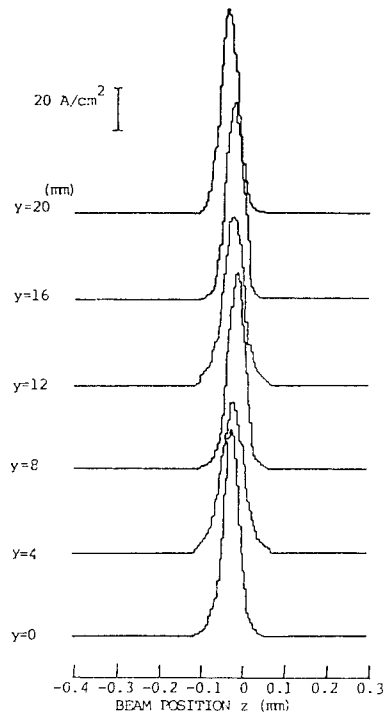
Fig.1 Calculated value of starting current vs oscillation wavelength for various beam position Z_b . Dimensions of grooves are $L=0.23\lambda$, $d=0.07\lambda$, $h=0.23\lambda$. Resonance mode of Fabry-Perot resonator is TEM_{00} .

第3章 電子ビーム系の設計

本研究で必要とする微細で高密度の電子ビームの場合、電子の熱速度や空間電荷効果によるビーム広がりを防ぐために必要な磁束密度は、いわゆるブリルアン磁界よりも数倍以上大きくなる。本章では熱速度分布や空間電荷効果を考慮にいれて必要な集束磁束密度について解析を行い、電子ビーム系を設計する上で基礎的な数値を明らかにした。更にこれを基に電子ビームの計算機シミュレーションを行い、電子銃の構造パラメータを決定した。

第4章 電子ビーム系の実験装置及び実験結果

第3章で設計した電子銃を実際に製作し、その特性を測定した。製作にあたっては、各電極、磁極、絶縁物等の形状や材質についても検討し、寸法精度の向上を図った。その結果得られた電子銃の特性はほぼ設計通りであり、電子銃よりのビーム透過率は最大85%と良好であることが確認された。次に電子ビームの電流密度分布の測定を行った。その結果をFig.2に示す。電子ビームの厚さは100 μm 以内であり、最大電流密度は70 A/cm^2 以上に達していることがわかる。さらにグレーティングを実装した状態では、電子ビームはグレーティング全面にわたってその表面から100 μm 以内を通過していることが実験的に確認された。このように新しく設計、製作された電子銃は、第2章で設定された条件を満足する電子ビームを生成することが明らかとなった。



第5章 発振実験の結果及び検討

第4章で述べたように形状、電流密度の両面で優れた電子ビームが得られたので、本研究の第2目的である発振開始電流値の測定実験を行った。Fig.3に発振開始電流値の発振波長に対する変化を示す。

波長4 mm 帯での実験では、発振開始電流値は波長3.9 mm から5.8 mm にわたって100 mA 以下であり、特定の波長では約40 mA と従来報告されていた値の $1/4 \sim 1/10$ であることが確認された。更により短波長域でのFPMの発振も観測され、発振波長を2.3 mm まで短縮することに成功した。しかも発振開始電流値はこの波長域までおよそ100 mA 以下であることも確認された。共振器系に

Fig.2 Current density profiles at various y plane. Origin of coordinate z is set at the designed deam position. $x=0$, $v_e=12\text{kv}$, $B_y=3000\text{GAUSS}$.

ついて、平面鏡と球面鏡を用いた場合の特性が比較され、両者の差異が明らかにされるとともに、平面鏡を用いた場合の回折損が理論値と同じ傾向を見せることが確認された。より短波長域では表面波モードが優勢であることが確認された。

第6章 結論

本研究では良好な電子ビーム状態、すなわち厚さの薄い高電流密度電子ビームを再現性良く得ること、及びこれを用いることによってリダトロンが発振開始電流値を正確に測定することを主要な目的とし、更にビーム状態の改善がリダトロンの動作特性にどのような改善をもたらすかを見ることを最終目的とした。

そのため、まず発振

開始条件に関する理論的検討から電子ビームの仕様を決定し、新しい電子銃を製作した。そして、得られた電子銃の特性は設計通りであることが確認され、著者の設計及び製作方法は妥当なものであることが証明されるとともに、良好な電子ビームを得るといふ本研究の第一目的が達成された。この電子銃を組み込んだリダトロンの発振実験の結果、発振開始電流値は従来報告されていた値の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}$ であり、理論的に説明し得る値であることが明らかとなった。これによってこれ迄の

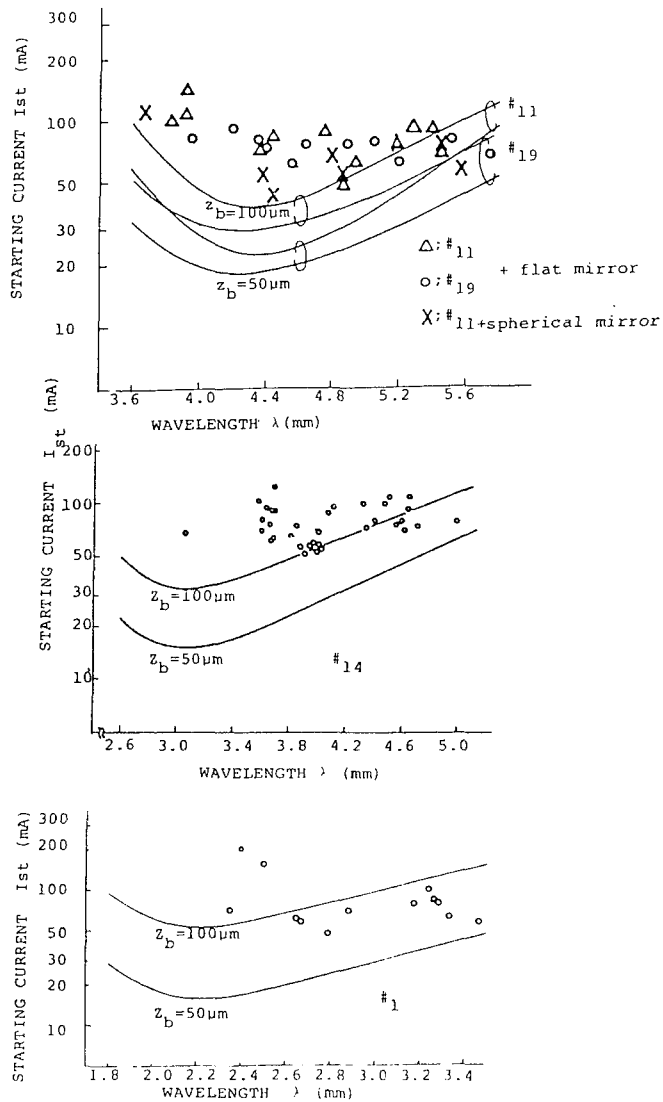


Fig.3. Starting current vs oscillating wavelength, z_b : beam position.

リーダトロンの実験的研究の結果に対する著者の考察が妥当なものであることが証明されるとともに、本研究の第2目的が達成された。更にFPMの発振波長を2.3mmまで短縮することに成功するとともに、その発振開始電流値は4mm帯に比べて顕著な増加を示さないことを明らかとした。このことはサブミリ波帯や連続波での動作を目的としたリーダトロンを設計する上で重要な知見を与えるものである。使用する共振器系に関しては本研究でも多くの知見を得ることができたが、今後一層の研究によってその最適形状を見出すことができれば、リーダトロンは実用化に向けて更に大きく前進するものと期待できる。

審査結果の要旨

近年、電波天文学、分子分光学、更には核融合を目指す高温プラズマ等の分野における短ミリ波、サブミリ波に対する急激な需要の高まりと共に、そのための光源として種々の電子管、レーザ、固体素子等の開発研究が非常に活発化している。このような状況の中にあつて、リーダトロンは取扱いや規模の点では従来のマイクロ波管と同程度のもので、数100 mW～数Wの出力と広い可変周波数帯域とをもつ光源となる可能性のあることから、その実用化が期待されている電子管である。しかし、これ迄の開発研究ではその期待にそいうる十分な結果はえられていない。

著者は、その主因がこれ迄の電子ビームの特性にあると推論し、その改善のために徹底した研究を行い優れた電子ビームを実現すると共に、それをを用いたリーダトロン動作実験によってその推論の正しさを実証した。

本論文は、それらの研究成果をまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、本電子管のもつ2つの動作モードの中、特に実用上有用なファブリペロモード(FPM)に関する発振開始条件の理論解析を行い、それによって本研究の当面の目標である、波長1 mm以下の発振をうるために必要な電子ビームの条件を明確にしている。

第3章では、その電子ビーム系の構造設計を行っている。ここで、電子銃や集束用磁極の構造、ドリフト領域における電子軌道等について詳細なシミュレーションを行い、所望のビームをうるための基本構造を決定し、その許容誤差等についても検討している。

第4章では、前章の電子ビーム系を実現するための具体的構造、材料について検討しその製作と実験とを行っている。ここで、えられたリボン状電子ビームは相互作用空間内で厚さ100 μm以内、最高電流密度70 A/cm²以上という所望の特性をもつことを確認しているが、このように極めて薄く高密度のリボン状電子ビームを実現した例はなく、この結果は高く評価できる。

第5章では、この電子ビームを用いた本電子管の動作実験の結果を述べている。発振開始電流の測定結果は、波長2～6 mmにわたりほぼ理論値に近い、従来の実験値の $\frac{1}{4}$ ～ $\frac{1}{10}$ の値となること、またFPMの最短発振波長も従来の約半分2.3 mmに短縮されたことを示して、著者の推論の正しさを実証している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は短ミリ波、サブミリ波用光源として実用化の望まれているリーダトロンについて詳細な理論的、実験的研究を行い、特に困難とされていた高密度リボン状電子ビームを作り上げ、本電子管の実用化に明るい見通しを与えたもので、電波工学、真空電子工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。