

氏名(本籍)	よこ 横	お 尾	くに 邦	よし 義	(新潟県)		
学位の種類	工	学	博	士			
学位記番号	工	博	第	4	3	1	号
学位授与年月日	昭和49年3月26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)電子工学専攻						
学位論文題目	分布定数型マイクロ波半導体装置に関する研究						
論文審査委員	(主査) 教授 小野 昭一 教授 西沢 潤一 教授 柴田 幸男						

論文内容要旨

第1章 序

ガンダイオード、インパットダイオード等のマイクロ波発振器の出現以来、これら半導体素子を用いたマイクロ発振器は、従来のマイクロ波電子管に代わるものとして、その研究が精力的に進められ、現在では、両者ともそれぞれの特徴を生かした用途に実用化される段階に達していると云える。

しかし、前述の2つの発振素子は、いずれもマイクロ波共振器中で動作させているので、発振周波数は共振器の共振周波数でほぼ決定され、マイクロ波発振器として実用上重要な要素である広範な電子同調をうることは困難である。このために、可変周波数発振器を構成する場合には、共振器内にバラクターやYIGを挿入し、電気的あるいは磁氣的に共振器の共振周波数を変化さ

せるのが一般的な方法で、素子の端子電圧を変化させることにより、直接広範な電子同調を可能にする発振器は、これ迄に殆んどその例を見ない。

筆者は、この点に着目し、マイクロストリップ線路に細長いガンドイオードを装荷して分布定数型の能動線路とし、この部分が半波長もしくは、その整数倍の共振器を構成している、いわゆる半導体レーザと類似の機構の発振器を考案した。本素子の発振周波数は、素子長と線路の位相定数とで定まるが、この位相定数が端子電圧によって大きく変化することから、広範な電子同調が期待できる。筆者は、この素子の実現のために、理論的・実験的研究を行ない、試作した本素子の実験結果が、解析結果と良い一致を示すことを明らかにし、本素子設計のための重要な知見を得た。

第2章 一様静電界を仮定した電子同調発振器の動作解析

図1のようなマイクロストリップ線路の一部にn-GaAsを用いたガンドイオードが装荷されたモデルを考える。解析を簡単化するために、素子内の静電界とキャリア密度の分布を一様と仮定し、伝搬定数の電圧依存性、および、電子同調範囲の解析を行なった。基礎方程式として、慣用的な記号を用いれば次式で書き表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tilde{V}}{dz} + j\omega\tilde{I} &= 0 \\ \frac{d\tilde{I}}{dz} + t\cdot\tilde{K} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial\tilde{E}}{\partial x} &= \frac{\tilde{\rho}}{\epsilon} \\ \frac{\partial\tilde{J}}{\partial x} + \frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t} &= 0 \\ \tilde{J} &= \rho_0\tilde{v} + \tilde{\rho}v_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

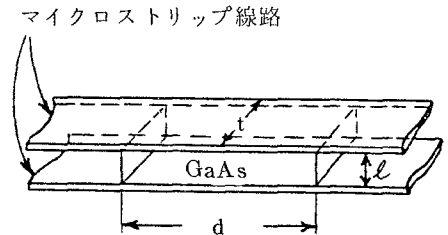


図1. モデル

(1)・(2)式を用いて、伝搬定数を求めれば次式を得る。

$$\beta^2 = - \frac{\omega\epsilon\mu_0 \frac{v_0}{l} [-2\theta d\theta_0 + j(\theta_d^2 - \theta_0^2)]}{\theta d - 1 + e^{-\theta d} \cos\theta_0 + j(\theta_0 - e^{-\theta d} \sin\theta_0)} \quad (3)$$

ここで、 θ_0 、 θd はそれぞれ信号角周波数(ω)、および誘電緩和角周波数($\rho_0 v_0 / \epsilon$ 、 ζ : 微分移動度)をキャリアの平均走行時間で規格化したものである。(3)式より、伝搬定数を計算した結果、次のような特徴のあることがわかった。

(1) この種の相互作用系では、伝搬定数は伝搬方向によらない。

(2) 回路波の増大は、キャリアの平均走行時間が動作周波数周期の整数倍となる付近にかなり

広く現われる。

(3) 位相定数もバイアス電圧によって著しく変化する。

これらの特徴を利用して、ダイオードの長さを適当に選んでやれば、ダイオード両端での回路との不整合により共振器が形成され、位相定数とダイオードの長さで周波数が決まり、かつ広範な電子同調可能な発振器を作ることができる。この場合の発振条件は、利得条件および位相条件として、それぞれ次式で与えられる。

$$r \cdot r^* e^{-2\beta_{id}} \geq 1 \quad (4)$$
$$\beta_{rd} - \theta = n\pi \quad (n = \pm 1, 2, 3, \dots)$$

ここで、 r 、 θ はそれぞれダイオード端での反射係数、および位相角、 β_r 、 β_i はそれぞれ能動線路の位相定数および減衰定数 ($\beta_i < 0$ に対して回路波が増大) である。一方、ダイオード端での反射係数は回路構成によって、比較的自由に選ぶことができるから、ダイオード端での反射係数を 1 とした場合には、長さ 4 ~ 5 mm の素子を用いて、Xバンドでおよそ 15% の電子同調が可能となる。

第 3 章 静電界分布を考慮した電子同調発振器の動作解析

前章では、解析を簡単にするためにダイオード内の静電界を一様と仮定した。しかし、ダイオード内の静電界分布は、オーミック電極、ショットキー電極等、カソード面での電極構造によっても著しく影響を受けるが、いずれにしてもダイオード内に静電界分布のあることはまぬがれ得ない。そこで本章では、ガンダイオードを用いたマイクロ波素子として最も一般的なオーミック電極を仮定し、その結果生ずるダイオード内の静電界分布も考慮したより実際的な場合について、伝搬定数および電子同調範囲の解析を行なった。

その結果を前章の一様静電界を仮定した場合の結果と比較して、位相定数が著しい電圧依存性を持つこと、回路波の増大はキャリアの平均走行時間が動作周波数周期の整数倍となる付近に表われること等、定性的には大きな差のないことがわかった。従って、長さ 5 ~ 4 mm のダイオード自身で半波長共振器を構成した場合には、Xバンド付近でやはり十数%の電子同調が得られる。一方、一様静電界を仮定した場合に比べて平均走行時間が動作周波数周期の 2 倍 3 倍といった高次の回路波の増大域の利得係数が小さくなることがわかった。従って、この高次の増大域を利用して発振器を作るとは、本素子の動作機構の本質にはかかわりないが、利得係数の低減という点で、余り素子を厚くすることは得策でないことがわかった。

第 4 章 半導体装荷マイクロストリップ線路の伝搬定数の測定

前章までの解析で使用した半導体を装荷したマイクロ・ストリップ線路が通常の誘電体を装荷

したストリップ線路と同様に取り扱えるかどうかを検討するために、Si および GaAs 半導体を装荷したストリップ線路を試作し、定在波法によりこの線路の伝搬定数を詳細に測定した。この定在波法による伝搬定数の測定は最も直接的な方法ではあるが、装荷した半導体結晶のキャリア密度が大きくなると回路波の減衰が大きくなり、位相定数の測定は困難となる。従って、キャリア密度が $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 以下の試料を使用して測定を行なった。その結果、測定結果は理論解析から良く説明でき、このような半導体を装荷した線路は、半導体中の自由電荷の運動に起因する損失のある線路と見なし得ることを確認した。

第 5 章 電子同調発振器の実験と検討

第 2 章、第 3 章で解析した電子同調発振器の動作を実験的に確認することを目的として、キャリア密度が $7 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ のポートブロン n 型 GaAs 結晶から本素子を試作し、実験を行なった。図 2 に試作した種々の素子について、ダイオードの長ささと発振周波数の関係を示した。

ダイオード長が長くなるにつれて解析結果の電子同調範囲からずれていく傾向にあるが、これは、ダイオードの外への張り出し電磁界の増加から説明ができ、本素子の動作を実験的に確認できたものといえる。これらの結果より、約 10 ~ 20 % の電子同調が可能であることが確認できた。

一方、この素子の動作を安定に行なわせるためには、伝送線路の回路構成を工夫して、ダイオードの構成する共振器の Q 値を高くする必要のあることがわかった。また、ダイオードの厚さの厚い素子で、すなわち回路波の高次の増大域を利用して本素子の動作を行なわせる場合には、低次の増大域による発振を防ぐために、より Q 値が高くなるような回路構成にする必要がある。この回路構成ができれば、ダイオードの厚さの厚い素子でも、高次の増大域を利用して高い周波数の発振が可能である。

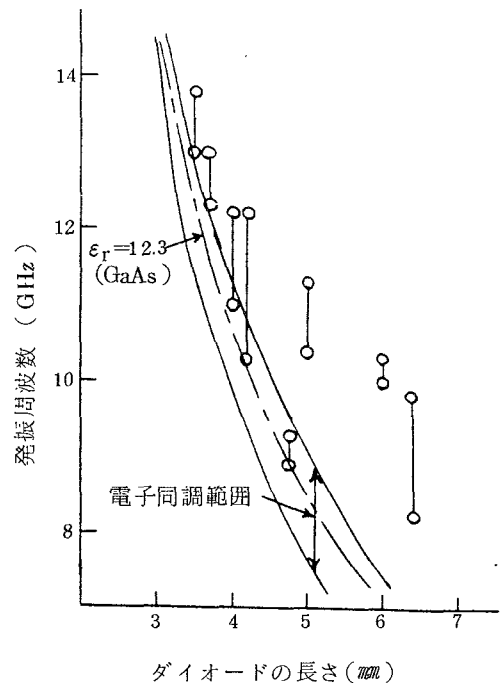


図 2. ダイオードの長ささと発振周波数の関係

第6章 結 言

筆者の提案したガンダイオードを用いた電子同調発振器の動作を確認するために、理論的、実験的研究を行ない、これらに対比することによって、本素子の設計のための基礎的なデータを得た。すなわち、本素子は、電子走行角に対して繰り返す回路波の増大域のうち、最低次で動作させることが広範な電子同調が可能で、発振効率が良いこと、および高次の増大域の動作では、現われ易いより低次での発振がない等の利点がある。従って、本素子をXバンドで動作させるための最適寸法は、長さが4～6mm、厚さ15～20μmと考えられる。この寸法の素子を本研究で使用したボートロン結晶から作製することは著しく困難であるが、気相成長法により作られた結晶を使用すれば、ダイオード電極、ストリップ線路、本素子を安定に動作させるための回路構成も、全て低抵抗GaAs基板の上に容易に作製することが可能である。このような方法で製作可能な本素子の形状は、最近の動向であるマイクロストリップ線路用、あるいはマイクロ波IC回路用の発振器として、ダイオード自身が共振器を構成していることと合わせて適していると考えられる。

一方、本素子を使用し、非常に高い周波数の発振器を作ろうとする場合、回路構成を厳密に設計して、不用な発振を防止しなければならないが、高次の増大域を利用すれば、ダイオードの厚さによる周波数限界が取り除かれ、本素子は高い周波数の発振器としても有望である。また、筆者の実験ではまだ十分な発振出力を得ていないが、発振素子の高出力化にあたっては、最終的には、素子の面積を大きくせざるを得ず、むしろ、このような細長い形状の素子は熱放散の点からも有利と考えられる。

従って、上述のような種々の利点を持つ本素子は、今後、製作方法の改善、回路構成の改良を待って、ガンダイオードを用いたマイクロ波発振器の実用化にあたって有望な発振器となるものと考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

ガン・ダイオード、インパット・ダイオードの出現以来、固体マイクロ波発振素子の研究は急速に進展し、既に、その実用化の段階に到達している。しかし、発振器としては、実用上広い電子同調特性をもつことを要求される場合も多く、従来の素子でこの要求を満たすことは困難であった。著者はこの点に着目し、広範囲の電子同調が可能な新しい構造の素子を考案し、理論的、実験的研究によってその動作を確認した。本素子は、ストリップ線路に細長いガン・ダイオードを装荷して分布定数型の能動線路とし、また、その両端に不整合部を設けて半導体レーザーと同様、素子自体により共振器を形成するようにしたものである。その発振波長は、素子長と線路の位相定数とで定まり、通常のガン・ダイオードで動作の厚みで波長の定まる動作とは全く異なったものとなる。更に、この位相定数がバイアス電圧に大きく依存するため、本素子では広い電子同調が可能となっている。

本論文は、その研究成果をとりまとめたもので全文6章よりなる。第1章は序論である。第2章では、簡単化のため素子内の直流電界とキャリア密度との分布を一様と仮定し、伝搬定数の電圧依存性、および、電子同調範囲の解析を行い、第3章では、それらの分布を考慮したより実際的なモデルについて解析している。その結果、キャリアの平均走行時間が動作周波数周期の整数倍となる近くで、この線路は能動線路となり、位相定数はバイアス電圧に大きく依存し、また、素子長4~5mmの素子では、Xバンドで10数%の電子同調が可能であることを明らかにしている。これらは本素子設計のための重要な知見である。第4章では、半導体装荷の線路が、通常の誘電体装荷の線路と同様に取扱えるかを実験的に検討し、その可能なことを示している。第5章では、試作した本素子の製作方法、および、その動作特性の実測結果を述べ、それが解析結果と良い一致を示すことを明らかにしている。これは本素子の動作を実験的にも確認したもので注目すべき成果である。第6章は結論である。

以上、要するに本論文は、筆者の考案した電子同調型の新しい固体マイクロ波発振素子の動作を検証し、固体発振素子の応用面に新たな可能性を加えたもので、マイクロ波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。