

ガンダイオードの発振特性とその利用

小山久栄

この研究は、高等学校物理Ⅱの「電磁波の発生」の学習に、ガンダイオードを使ったマイクロ波の放射とその検出という実験的アプローチが教育的であるとする提案に基づいて、ガンダイオードの発振特性を調べ、さらに学習実験用に変調波発振装置を試作して、その発振特性を比較検討している。

また、その発振装置を用いて、電磁波の回折実験例にも触れている。

1 はじめに

高等学校物理で、「電磁波の発生」の学習では、電界を示す電気力線が変化していく速さが有限であると考え、電界の変化に伴う電気力線が、波状にうねることを理解させたのち、電束電流を導入して、電束電流の変化・磁界の変化・電界の変化という順序をたどって指導している。しかし、生徒にとっては、電束電流は具体性に乏しく、むずかしい概念であるように思われる。

一方、近年開発されたガンダイオードによって、高電界の繰り返し移動によるマイクロ波の発生が可能になってきた。これを教育に取り入れて、「電界の変化による電磁波の発生と検出」という実験の方法が教育的であるとした提案がある¹⁾。今回、この提案に基づいて、ガンダイオードによるマイクロ波の発生現象を調べて基礎資料を得、さらに、それを利用した回折実験の検討もあわせて行ったので報告する。

2 ガンダイオード発振器

(1) 発振理論の概要²⁾

ガンダイオード素子は n 形ひ化ガリウム GaAs の結晶からできており、バンド理論によれば、(100) 方向に運動する電子の取り得るエネルギーには、図1に示すように、2つの谷がある。

この2つの谷における電子の移動度 μ_1 、 μ_2 の大きさは異なり、 $\mu_1 \gg \mu_2$ である。したがって、印加電圧による伝導電子の速さは図2に示すように、最初は移動度 μ_1 に沿って速くなるが、電子遷移によって、微分移動度は負になり、遅くなる。その境界にあたる電界は臨界電界とよばれている。

ガンダイオード素子に印加する平均バイアス電界が、臨界電界を越えると、電荷の蓄積が起こり、印加電圧の大部分がそ

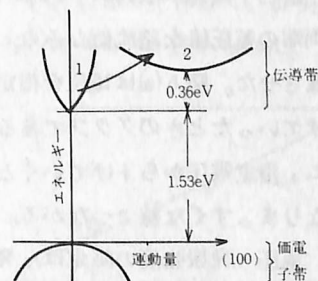


図1 GaAsのエネルギーバンド構造

に集中して、電気2重層が生成し、成長しながら移動する。

これをガン効果とよび、そのモードを図3に示す。

(2) ガンダイオード発振器の構造と特性

(a) 構造と特性の概略

ガンダイオード素子はエピタキシャル成長法によって作られたメサ形構造で、 n^+ 、 n 、 n^{++} の3層の両側に、接触抵抗の非常に小さい金属電極が蒸着されている。

ガン効果のあるのは n 層で、10 GHz用の厚さは約10 μm である。³⁾信頼性を高めるために、各結晶の境界における不純物分布状態が異なり、 n^+ 層側が陽極、 n^{++} 層側が陰極になっている。

したがって、逆方向で使用した場合には、臨界電圧が明りょうに得られず、破壊する恐れがある。

本実験では東芝製GX4を採用した。これは、放熱効果をよくするために、ガンダイオード素子のパッケージをアルミダイカストにマウントしたもので、終端にはXバンド用のフランジがついている。

(b) 特性測定

ガンダイオード発振器に印加する電圧に対する電流、発振強度、周波数などの関係を知るために、図4の回路を構成した。

電源には、電圧変動率が少なく、スイッチを投入したとき、過度特性による電圧スパイクが最大定格を越えないものが必要である。ここでは、高砂製作所製の安定化電源GPO50-2(出力電圧変動率0.005%±3mV)を使用した。

① 電圧-電流の測定は、ガンダイオードの両端の電圧値と、電源に直列に0.10 Ω の抵抗器を接続し、その両端の電圧値を電流値とみなして、XY記録計に記録させた。図5(a)は電圧を指定電圧(9V)まで上げていったときのグラフである。

逆に、指定電圧から下げていくと、図のB、C間がかなりまっすぐな線につながる。

② 電圧-発振強度の測定は、発振したマイクロ波を方向性結合器1から鉱石検波器1N23Cを通し、得た検波電流を1k Ω の抵抗器に流し、その両端にかかる電圧をXY記録計で記録した。この場合も、指定電圧から下げていくと、点線のようにB'まで発振が続く。なお、本装置を指定電圧ではたらか

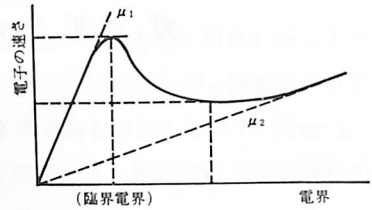


図2 電界-速度特性

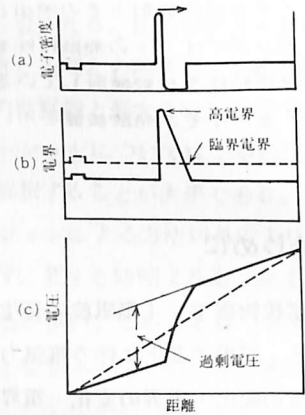


図3 電気2重層モード

表1 GX4(製造番号218)の検査成績表

	動作電圧(V)	動作電流(A)	出力(mW)
最大	12.8	0.50	
最小	8.0		20
指定	9.0	0.43	68

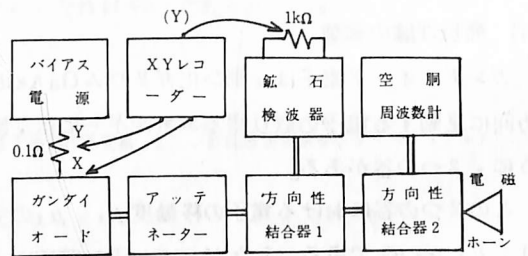


図4 特性測定回路

せたときの検波電流は、発信部をクライストロン 2K25 に代えて、2K25の指定電圧ではたらかせたときに比べて、約 1.5 倍大きかった。

③ 電圧一周波数の測定は、マイクロ波を方向性結合器 2 から空洞周波数計に導き、指定電圧を印加してから 30 分後に、各電圧ごとの周波数を測定した。(図 6)

(c) 測定結果と検討

① 電圧—電流

図 5(a)によると、最初、電流は印加電圧の増加に従って増加している。これは伝導電子のエネルギーが、バンド構造の下の谷にあって、移動度 μ_1 に依存した傾きで、速さを増しているものと考えられる。

3.2 V を過ぎると、電流は小さな変化をしながら減少し始める。したがって、印加電圧 3.2 V のときの電界が臨界電界であろう。いま、素子の厚さを $10 \mu\text{m}$ とすると、臨界電界は約 $3 \times 10^5 \text{ V/m}$ となる。

電流が減少し始めたのは、局所的な電子密度が大きくなって、高電界層による負性抵抗ができたと考えられる。

B 点で、いちだんと電流が減少している。しかし、印加電圧を高い方から下げたときには、この現象は現われない。この解釈については今後の課題である。

C 点で、突然電流が増加する。C 点の電圧値はかなり変動するが、6.3 V 付近であった。以下、指定電圧 (9 V) まで、電流はゆるやかに減少する。これは、電気 2 重層がより高電界になり、素子の抵抗が増加したためであろう。

② 電圧—発振特性

XY 記録計の感度を最大にして、マイクロ波検出器の検波電流を記録した結果が、図 5(d) である。すなわち、臨界電圧を越えてから C 点に至るまでの印加電圧の間に、きわめて小さい山が 2 つだけできている。この山は、非常に弱い電気 2 重層ができて、繰り返し移動していることを意味していよう。なお、シンクロスコープを用いた検波電圧の観察では、B' の山の部分には細かなゆらぎが認められた。

C 点で、突然検波電流が大きく流れ始め、本格的な発振状態になる。したがって、ここで始めて電気 2 重層がきちんと形成されたことになる。以下、検波電流はゆるやかに増加している。このことは、電気 2 重層が、より高電界に成長して、電界の変化が大きくなったことを意味している。

③ 電圧—発振周波数

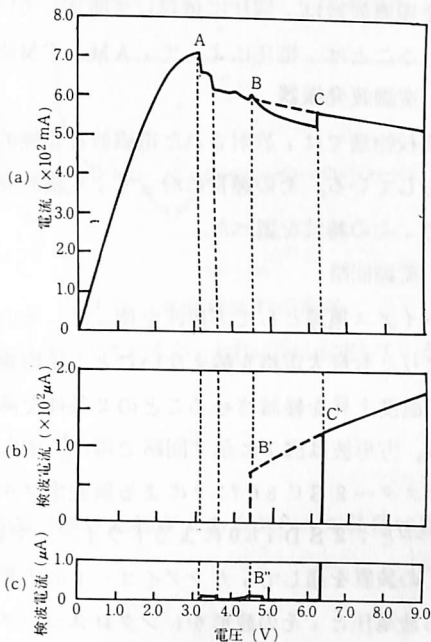


図 5 (a) 電圧—電流特性, (b), (c) 電圧—発振強度特性, (c)の感度は(b)の 100 倍

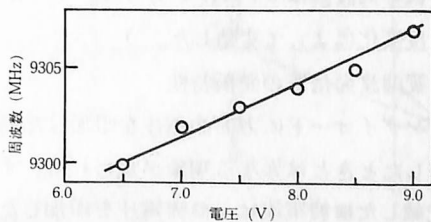


図 6 電圧—周波数特性

発振周波数は、電圧に依存して増加している。このことと、②の発振強度が、電圧に依存して増加していることは、電圧によって、AM、FM両方の変調をかけることが可能であることを示唆している。

(3) 変調波発振器

高校物理では、放射された電磁波を定性的に確認する方法として、変調波を受信して、スピーカーを鳴らしている。その趣旨に沿って、変調波発振器を試作して、その特性を調べた。

(a) 変調回路

バイアス電源として方形波を使った。その理由は、瞬時たりとも最大定格を越えないこと、平均電流を少なくして、温度上昇を軽減させることの2条件を満たすからである。方形波は図7に示す回路で得た¹⁾。すなわち、トランジスタ2SC367×2による無安定マルチバイブレーターと、2SD180によるドライバーで構成した。

この装置を通して、ガンダイオードに方形波を印加し方形波電圧と、その波形をシンクロスコープで観測した。

観測によれば、電圧が3.2, 5.4, 7.8~8.2V(図9

(b))の3か所で方形幅が細くなっている。図5(a)より、そこでは当然、電流が減少するはずであるから、電源電圧とガンダイオードに流れる電流の関係をXY記録計に記録させた。図8のA, B, Cが、方形幅が細くなる電圧である。

方形幅が細くなるのは、負荷であるガンダイオードの影響であろう。試みに、負荷として、ガンダイオードの代りに、16Ωの抵抗器を接続して、電源電圧を上げていったところ、方形波の周波数の変化はかなりあったが、幅の変化は認められなかった。この現象のメカニズムについては、ここでは言及しない。

この変調波発振器の電源電圧を11.7Vにした場合に、ガンダイオードに指定電圧を印加することができた。そのときの方形波の周波数は519Hzであった。(この周波数はパーツの温度変化によって変動した。)

(b) 変調波発信器の発振特性

ガンダイオードに方形波電圧を印加した場合、直流電圧を印加したときとは異なる現象が現われた。すなわち、図5(c)に記載した検波電流は、直流電圧を印加した場合であったが、この変調波発振器を用いた場合は、AC間のすべての範囲で

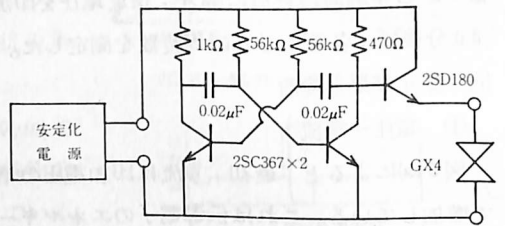


図7 変調回路

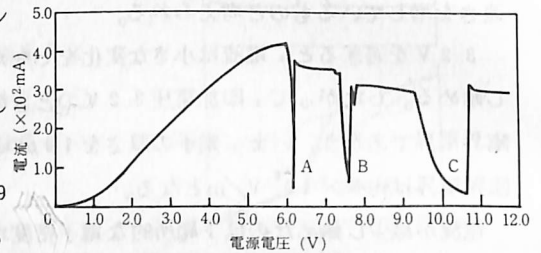


図8 変調波発振器の電源電圧-電流特性

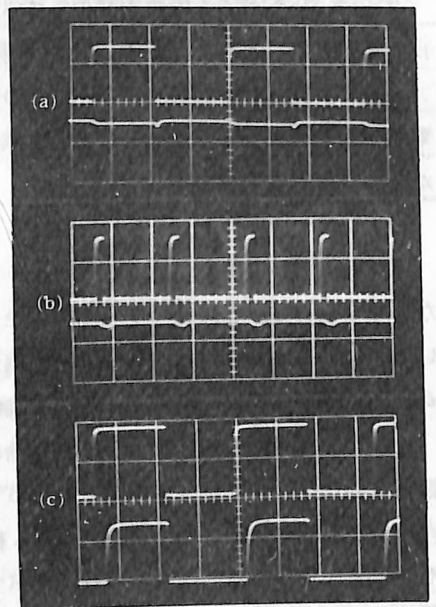


図9 バイアス電圧と検波電圧

2 現象波形上はバイアス電圧、1V/目盛り、下は検波電圧、(a), (b)は0.004V/目盛り、(c)は0.4V/目盛り、横軸は0.1ms/目盛り

発振がみられた。ただし，AC間で印加電圧を変えると，発振出力（検波電圧），波形（検波波形）は複雑に変化した。その例を図9に示した。

(c) 変調波発振器の周波数の変動

ガンダイオード発振器の効率は低く，Xバンドで2.5%程度である。また，GaAsの熱伝導率は0.5W/K・cmでSiに比べて1/3である。したがって，素子の温度上昇による発振周波数の変動が心配される。そこで，電源スイッチ投入後の周波数の変動を測定した。（図10）

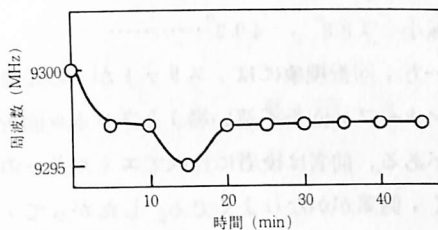


図10 発振周波数の変動

それによると，始めの20分間は有効数字4けたまでふらつきがでているが，それ以後は安定している。

3 ガンダイオードを利用した波動実験

(1) 実験装置

電磁波を使った波動実験は，寄与する波長の精度が，有効数字3けた程度であるから，本装置は波動源としてじゅうぶんである。

(a) 指向性の半値幅

光の場合，スリット幅や，ダブルスリットの間隔は，波長に比べてはるかに大きい。しかし，マイクロ波を使った場合は，ビームの幅に制限があるので，指向性の半値幅以内に収めることをめどにした。

指向性の半値幅は，偏波面に直角な面内では $\phi \doteq 70 \lambda / a$ 度⁽⁴⁾で与えられる。ただし， ϕ はビーム角， λ は波長， a は電磁ホーンの開口端とする。本装置では， $\lambda = 3.23 \text{ cm}$ ， $a = 10.0 \text{ cm}$ であるから， $\phi = 22.4$ 度になる。

(b) 受信装置

電波の強さを細かく調べるために，鉍石検波器をそのまま使用するのは目的外方向からの電磁波の干渉を受ける。それを防ぐため電磁ホーンを用いた。電磁ホーンの寸法は，発振器，受信器とも縦8.0cm，横10.0cm，奥行10.9cmである。

検波電流はマイクロアンペア計で読んだ。

(2) 回折実験

マイクロ波を使った波動実験のひとつに回折実験がある。回折実験に変調波発振器を利用して，実験結果を検討した。

(a) 原理

回折波の方向による振幅の極大，極小は，スリット幅を d とすると，

$$d \sin \theta = (n + \frac{1}{2}) \lambda \quad n = 1, 2 \dots \dots \dots \text{極大}$$

$$d \sin \theta = n \lambda \quad n = 1, 2 \dots \dots \dots \text{極小}$$

で表わされる。いま， $d = 10.0 \text{ cm}$ ， $\lambda = 3.23 \text{ cm}$ とす

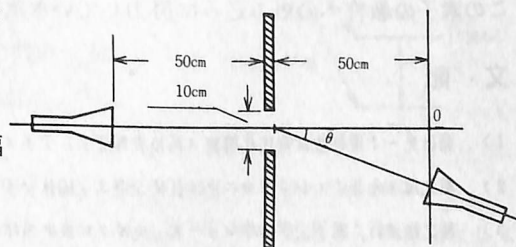


図11 マイクロ波による回折実験

ると、振幅の極大、極小は次のようになる。

極大： 29.0°

極小： 18.8° ， 40.2°

一方、回折現象には、スリットからの距離によってフランチー回折（遠い場）とフレネル回折（近い場）とがある。前者は後者に比べてエネルギーの広がりが大きく、側葉がかなりよくでる。したがって、ここでは前者に近いものをねらった。

(b) 測定法

図11に示したような配置で、電磁ホーンを移動させながら、 5° ごと（とくに極大、極小付近は細かく）に、検波電流をマイクロアンペア計で読み取った。

この測定では、光軸と中心線を一致させることが肝心で、ずれた場合に、左右の対称性が失われた。また、受信器の電磁ホーンがスリットの中心を指向したかどうかで、検波電流が大きく違った。

(c) 測定結果と検討

測定結果は図12に示すように、極大、極小点は理論値とかなりよく合っていた。ただ、主葉に比べて側葉の振幅が小さすぎた。このことは測定した場所がスリットから近かったからであろう。

受信器の移動中、ほかからの反射などによるノイズは少なかった。

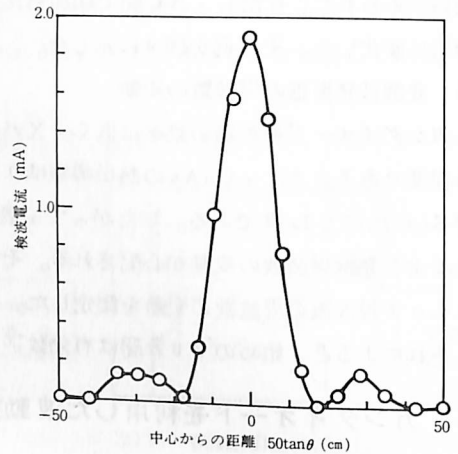


図12 マイクロ波の回折

4 おわりに

以上、ガンダイオードによるマイクロ波の発振特性についての基礎的研究と、その利用法の一例として、回折実験の検討結果を報告した。この素子によるマイクロ波の発生機構を、高校物理の「電磁波の発生」に、教材として取り入れるためには、高電界発生のおしくみなどの取り扱い方に問題が残る。

一方、「波動」教材の波動実験用電磁波源として、この素子は、印加電圧、極性、放熱に注意すれば、簡単な装置で安定な動作をしますのできわめて有効である。

最後に、波長わずか3 cmのマイクロ波を、このような簡単な装置であざやかに発生できるという驚くべき現象は、電磁波発生のおしくみを学習する生徒に、魅力を感じさせずにはおかないであろう。今後、この素子の教育への組み込みに努力していきたいと思う。

文 献

- 1) 霜田光一：理科教育現代化講座（高校物理部会）テキスト（1974）3，4
- 2) 植之原・今井：エレクトロニクス技術全書2，固体マイクロ波素子（1973）工業調査会79～81，89
- 3) 植之原道行：電子工学進歩シリーズ，マイクロ波半導体デバイス（1971）コロナ社120
- 4) 霜田光一：マイクロウェーブ（1967）共立出版151