

5 マイクロ波

マイクロ波とは、波長域 10 cm から 1 cm、周波数域 3 GHz から 30 GHz の電磁波を指す。通信はもちろん、種々の物理学実験においても極めて重要な波長域である。波長が数 cm と、身の周りにある物質のスケールと同程度なので、反射や回折など電磁波が示す現象が明確に現われる。ここでは、ガン発振器を用いたマイクロ波送信器と、ダイオードやコイルを用いた受信器とを用いて、マイクロ波の電磁界成分の検出、電磁波の反射、屈折等の実験を行い、電磁波の持つ波動としての基本的性質の把握を試みる。

1 原理

1.1 電磁波の性質

電磁波は、マクスウェルの 4 つの方程式で、電流の項を 0 とした場合に得られる波動解として理解される。マクスウェルの方程式では、電場（電束密度）の時間変化が磁場を誘起し、磁場（磁束密度）の時間変化が電場を誘起するのであった。電磁波は、電場と磁場が絡み合いながら、波動のエネルギーを伝えて進行する波であると言える。電磁波の進行方向と、電磁波に付随して生じる電場・磁場の振動方向は、図 5.1 のように、それぞれ直交している。

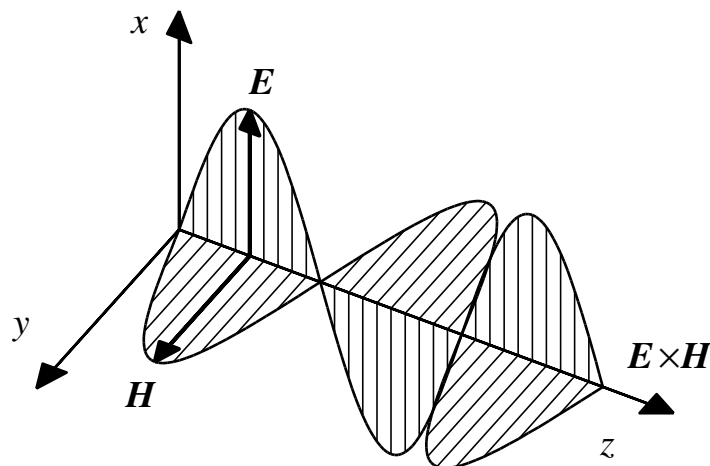


図 5.1: 電磁波の進行方向と電場・磁場

これまで学んできたように、電磁波の真空中での速度は、波長（振動数）によらず c で与えられる定数（約 3×10^8 m/s）となる。空気や物質などの媒質中ではこれよりも遅い速度 v となり、これより媒質の屈折率 $n = c/v$ が定義される。波の速度 v は振動数 ν と波長 λ の積で与えられるが、振動数は屈折率によっては変化せず、波長が変わる。

屈折率が異なる 2 つの媒質の境界面では、電磁波は反射・屈折を示す。このときの反射角・屈折角は、「入射波と反射波・屈折波の波数ベクトルの接線成

分が等しい」という条件から決まり、図 5.2 のような状況では、

$$\theta_0 = \theta_0' \quad (5.1)$$

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 \quad (5.2)$$

で与えられる。

屈折率の大きい媒質から小さい媒質に向かって電磁波が入射する（すなわち $n_0 > n_1$ ）ような場合には、角度 θ_0 によっては式 5.2 の $\sin \theta_1$ が 1 より大きくなってしまい、 θ_1 が解を持たないことがある。このような場合は「全反射」と呼ばれる現象が起こり、電磁波は屈折率 n_1 の媒質へは透過せず、すべて反射する。

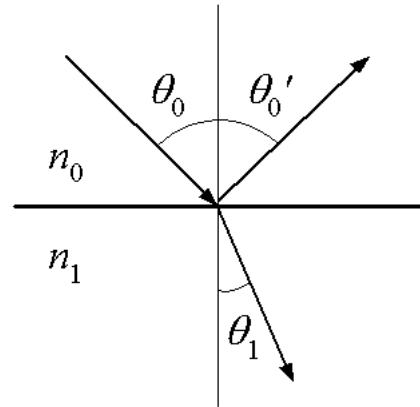


図 5.2: Snell の法則

1.2 マイクロ波の発生と受信

電子レンジやレーダーなどで用いるような、大電力のマイクロ波を発生させるには、クライストロンやマグネトロンといった特殊な電子管が利用される。これに対し、今回の実験では半導体であるガンダイオードを用いる。小電力のマイクロ波には、こちらが良く利用されている。

ガンダイオードは、n 型の GaAs が示すガン効果（発見者である Gunn の名をとってこう呼ばれる）を利用したものである。ガン効果は GaAs のバンド構造に由来するもので、3 kV/cm 程度以上の高い電界をかけると、負性抵抗が生じる（電界が大きくなると電流密度が減る）というものである。この素子を共振回路で用いると、回路に正のフィードバックをかけることができ、発振が生じる。この電流振動を空洞共振器と結合させれば、特定の周波数の電磁波を得ることができる。

マイクロ波の受信・検出には、一般にダイオードが用いられる。ダイオードは、自分の周囲に加わった交流振動電界を整流し、直流信号として出力する。つまりダイオードは、マイクロ波の電界を検出する素子である。

本実験ではもう一つ、エナメル線（外周を絶縁した導線）のループコイルを用いて、マイクロ波の振動磁界の検出も試みる。コイルのループ面を振動磁

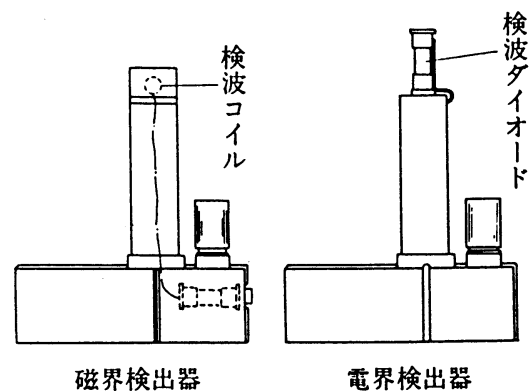


図 5.3: マイクロ波検出器

界と垂直に置くと、コイルを貫く磁束が増減するから、レンツの法則に従ってコイルには交流電流が生じる。本実験で用いる磁界検出器では、この交流電流をダイオードで整流し、直流電流信号として取出している。

2 実験

2.1 使用器具と利用上の注意

マイクロ波送信器 ガンダイオードを用いた X バンド (3 cm 帯) 発振器とホーンアンテナを組み合わせたものである。出力波として、無変調の連続波 (Continuous Wave: CW 波) と 1 kHz のパルス変調波との 2 種類を背面のスイッチで選択できるようになっている。本実験では、すべてパルスモードで実験する。定格などは以下の通り。

- 発振器: ガンダイオード発振器 (LD4326)
- 動作電圧 8 V (最大定格 12 V)
- 動作電流 150 mA (最大定格 150 mA)
- 発振周波数 10.4 ~ 10.6 GHz

電界検出型検波器・磁界検出型検波器 上述のように、電界検出型検波器はダイオードを、磁界検出型検波器はエナメル線のループアンテナを利用したものである。ダイオードには 1N23C を用いている。

磁界検出器を用いるときには、整流用のダイオードで電界を拾わないように注意すること。

信号増幅器 増幅度 50 dB (約 200 倍)、メーター出力 0 ~ 100 μ A。ボリュームつまみで増幅率を変更できる。時定数が数秒程度と長いことに注意する。電源の電池が弱まっている場合は、交換するので実験の担当教員に申し出ること。

100 μ A 電流計 アナログの電流計。電流のレンジは接続する端子で決める。測定時には、パネル面を上にして、水平に置いて値を読み取ること。

アルミニウム製反射板

透過測定用の各種板

透過測定用金属すだれ

樹脂製プリズムと保持台 プリズムは塩化ビニルのパイプ保持台の上に載せると、ちょうど送信器ホーンの高さと合うようになる。

2.2 実験方法

検出器・増幅器・電流計を配線したら、送信器から 30～40 cm 離して置き、送信器のスイッチを入れてみよう。電流計の示度が安定するまでどのくらい時間がかかるかを見て、増幅器の時定数に関する感覚をつかんでおくこと。測定時には、少なくともこの程度の秒数を待つ必要がある。また、電流が安定したら、周囲に手をかざしてみたり、立ち位置を変えたりして、表示がどの程度影響されるか調べておこう。

実際の角度分布・位置分布などを測定するには、具体的な測定に入る前に、全体を大まかにスキャンしてみる。強度が最大となるところで、電流計の示度がフルスケールの 70～80 % となるよう、増幅器のつまみを調整する。また強度の位置や角度による変化の度合を見てみて、グラフにしたときにその変化の特徴が再現できるように、適切な測定間隔を選ぶようにする。

実際の測定は、電界検出器・磁界検出器の両方で行うことが望ましいが、時間的に難しいようなら電界検出器のみでも構わない。ただし、少なくとも 2.2.1～2.2.4 くらいまでは両方の検出器で行ってみて、両者での結果が同じ傾向を示すことを確認しておくように。

2.2.1 電界・磁界の振動方向

図 5.1 のように、送信器から電磁波が進行する方向を z 軸に、机の面に垂直上向き方向を x 軸にとろう。まず電界検出器を接続し、ホーンから 30～40 cm 程度離れた位置で、ダイオードを xy 面内や xz 面内で回転させてみよう。このときダイオードがホーンの正面に置かれるよう注意する。これによって、どの方向に電場が振動しているかを確認しよう。

次に磁界検出器につなぎ換え、 xy 面内で回転させて同様の測定をしてみよう。 xz 面内での回転は、整流用のダイオードが電界を拾ってしまうことになるので難しいと思うが、上手いやり方を思いついたら実行してみよ。

両者の結果を、3次元の方向を含めて再現できるよう、工夫してノートに記録すること。

2.2.2 放射角分布の測定

図 5.4 のように送信器と検出器を配置する。30～40 cm 程度の円周上を、検出器を移動させながら強度の変化を測定し、どの程度の角度に電磁波が放射されているかを確認しよう。結果はグラフにプロットしておく。

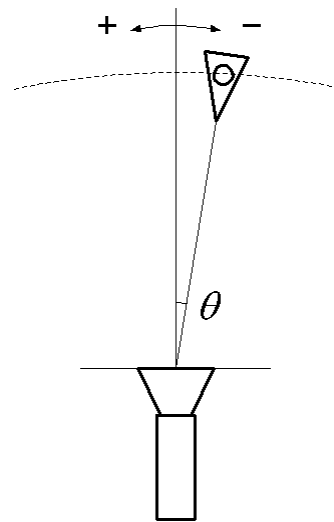


図 5.4: 放射分布の測定

2.2.3 種々の物質に対する透過

送信器と検出器を 40~50 cm 程度離して対向して配置し、間に金属・ガラス・プラスチック・発泡スチロール・ポリエチレン袋に入れた水などを挟んだ時の透過特性を調べる。挟む前後の信号出力を記録し、透過率を算出してみよう。

2.2.4 金属すだれに対する透過

同じ配置で送信器と受信器の間に金属すだれを置き、透過率を求める。図 5.5 に示すように、金属棒が水平である場合と垂直である場合の両方について行う。なぜ違いが生じるかを 2.2.1 で決定した電場の振動方向を考慮に入れて考察してみよ。

ヒント: 理想的な金属表面上は電位が一定であるから、金属表面に沿った方向では電場が 0 になる。つまり電場の振動が妨げられる。

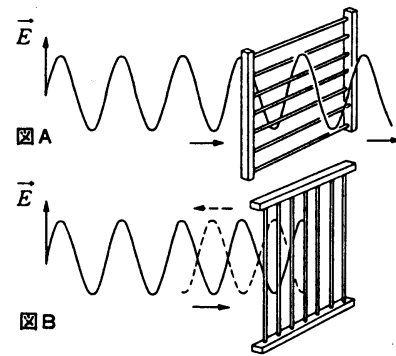


図 5.5: 金属すだれに対する電磁波の透過

2.2.5 定在波を用いた波長の決定

図 5.6 のように送信器と金属製反射板を対向して配置する。間隔は 60~80 cm 程度にすると良いだろう。このときの中心軸に沿って検出器を細かく移動して電界分布を求め、グラフにする。送信器からの進行波と、反射板からの反射波が合成されて、定在波が形成されていることを確認する。

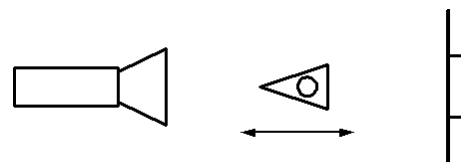


図 5.6: マイクロ波の波長測定

定在波の節 - 節 (腹 - 腹) の間隔は元の波長の $1/2$ であることを利用し、このマイクロ波の波長 λ を決定せよ。また空気中の屈折率を 1 とみなし、送信器の発振周波数 ν も求めよ。それぞれ誤差がどの程度になるかも考えよう。

なお送信器のスペックでは、送信波の波長は 3 cm 程度のはずだから、検出

器の移動間隔は 2~3 mm に取る必要があるだろう。さらに同様の測定を反射板がない状態で行ってみて同じくグラフにし、明確な定在波が生じていないことを確認しよう。

2.2.6 金属板による反射

送信器の電磁ホーンと検出器、反射板を図 5.7 のように配置する。送信器から反射中心までの距離は 20 cm 程度、検出器から反射中心までの距離は 30~40 cm に取ろう。この状態で、反射波の反射角を求める。最も信号強度が強くなる角度の周りの強度分布を測定し、グラフにする。角度 θ は自由に選んでよいが、2.2.2 で見たように送信器自体に広がりがあるので、あまり小さな角度にすると測定が難しくなる。おおよそ 40 度以上の値を目安にするとうい。

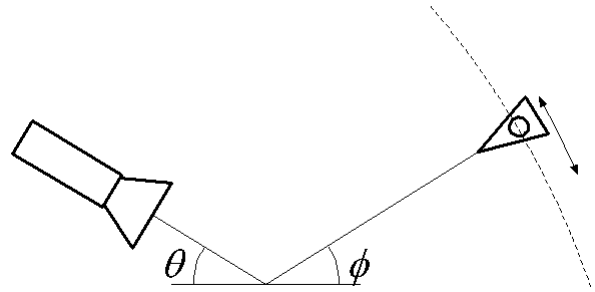


図 5.7: 反射波の角度分布の測定

2.2.7 プリズムの屈折率測定

プリズムを図 5.8 に示すように配置し、出力が最大になる角度 ϕ を求める。これまでと同じく、信号強度が最大となる角度の周りでの分布を記録し、グラフにすること。いまプリズムの屈折率を n とし、空気の屈折率は 1 とみなそう。プリズムの幾何学的な関係から、 $\gamma + \gamma' = \pi/4$ であることがわかる(確認してみよ)。

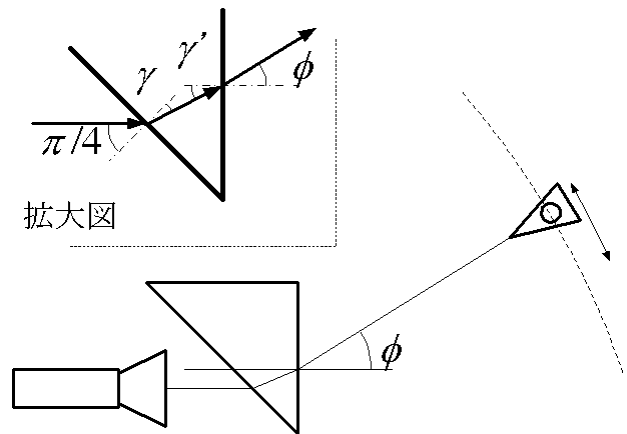


図 5.8: プリズムの屈折率測定

式 5.2 をそれぞれの屈折面に対して適用すれば、

$$\sin(\pi/4) = n \sin \gamma \tag{5.3}$$

$$n \sin \gamma' = \sin \phi \tag{5.4}$$

が得られる。これらをまとめると結局

$$\tan \gamma = \frac{1}{1 + 2 \sin \phi} \quad (5.5)$$

が得られる。これによって得られる γ を式 5.3 に戻せば、屈折率 n が決定できる。

2.2.8 プリズムによる全反射

図 5.9 の実線部分のように送信器・プリズム・検出器を配置し、信号強度を測定する。検出器を点線部の位置に移動し、プリズムの裏側に電磁波が透過してきているかどうか調べてみよう（正位置から適当に動かしてみても良い）。

さらに、プリズムを置かないときの点線位置での信号強度と、プリズムを置いたときの実線位置での信号強度を、送信器 - 検出器間の距離を等しくして比較し、電磁波のエネルギーがどのくらい反射されているか調べよう。

2.2.7 で得られたプリズムの屈折率 n を用いた場合に、この配置での全反射が可能であるかどうかを考え、結果と比較して考察してみよ。

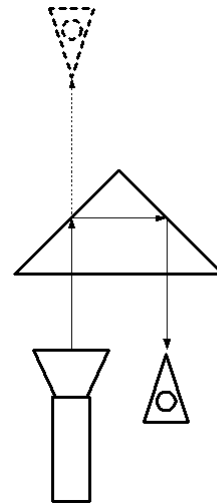


図 5.9: プリズムによる全反射

3 データ整理と考察

以上の実験課題の結果をグラフにし、実験中に気づいた点ともに報告せよ。レポートでは、この結果を含めて電磁波（電波）の性質を記述せよ。このような電磁波の性質は、マイクロ波に限らず、より長波長の電波や、より短波長の可視光・X 線などにも共通する。これらの性質の、他の波長域における具体例や、応用例についても調べたり考察したりしてみよ。

参考文献

- [1] 大石二郎、大場勇治郎、兵頭申一：「工学基礎物理実験」東大出版会（1978）
- [2] 渡辺正雄、石川孝夫、笠 耐：「プロジェクト物理 4 光と電気」コロナ社（1982）

[3] 阿部英太郎: 「物理工学実験 11 マイクロ波技術」 東大出版会 (1979)

[4] 鶴田匡夫: 「応用光学 I」 培風館 (1990)