

電子情報工学実験報告

実験 1 電磁波基礎実験

報告者：5D-25 永安 佑希允
共同実験者：林直輝，吉澤泰士
指導教官：柴田教官

実験日：2000年09月11日
提出日：2000年09月18日

1 目的

電磁波の伝搬を理解する上で基礎となる反射，屈折，偏光，干渉などの事項について実験を行い，その概要を学ぶ。

2 実験装置

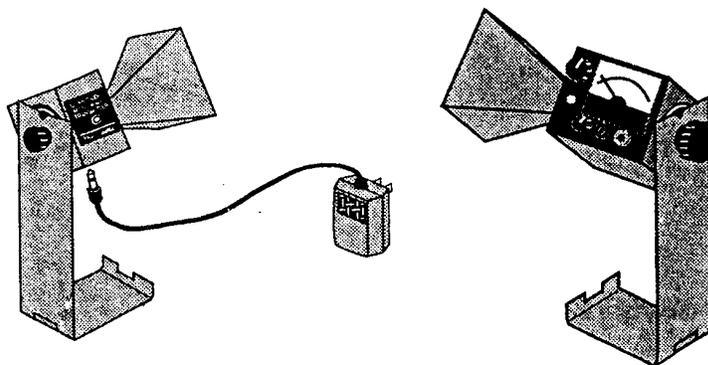


図 1: マイクロ波送信器(左)・受信器(右)

2.1 ガンダイオード マイクロ波送信器

- この装置は，周波数 10.525 GHz (波長 2.85 cm)，出力 15 mW の直線偏光したマイクロ波を出力する。出力された電磁波はほぼ平面波である。
- ガンダイオードはマイクロ波帯域で振動する非線形素子として動作する。出力波形はダイオードの軸に沿って直線偏光され，接続されたホーンからその軸に沿ってマイクロ波が放出される。
- DC 9V で動作する。図のように付属の AC アダプタを電源に接続すると動作し，LED ランプの点灯で動作が確認できる。

2.2 マイクロ波受信機

- 送信機と全く同じ形をしたホーンにマイクロ波信号を集め，10.525GHz の共振器内にあるショットキーダイオードに導く。このダイオードはその軸に沿って偏光されたマイクロ波信号の成分のみに反応する。
- 受信機についているメータは信号の強さと関係する直流電流を示すものであるが，マイクロ波信号の強さを直接示すものではない。従って，その値そのものに意味はなく，一定間隔のときに条件を変えてマイクロ波の強さを比較するときなど相対的な意味を持つものである。(参考) 電磁波の電界の強さは距離に反比例し，電磁波の強さは距離の 2 乗に反比例する。

- 受信機には 4 種類の増幅レンジ INTENSITY と微調整用感度調整つまみ VARIABLE SENSITIVITY がついている。
- 受信機は内蔵電池で動作し，INTENSITY つまみを OFF から最も増幅レベルの低い 30 に合わせたとき，LED ランプが点灯すれば動作状態にある。

3 実験

3.1 反射

物質に電磁波が入射すると一部は反射し，一部は透過する。物質が金属であると，電磁波のほとんどは反射される。これらの物質への入射，反射，透過において，入射角と反射角は常に等しい。このことを本実験で確かめる。（透過，屈折については実験 3 で説明する。）

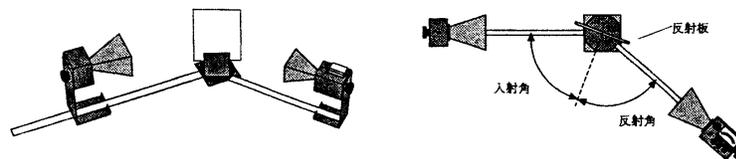


図 2: 構成品の組立 (左)・入射角と反射角 (右)

1. 図 2 のように，送信器と受信器の間に金属反射板を置き，受信器の INTENSITY を 30× レンジにし，送信器の電源を入れる。
2. 図の入射角を適当な値にし，送信器と金属反射板は動かさないで，受信器の可動アームを回転させ，メータの値が最大になる点を探す。このとき，受信器のホーン軸と金属反射板に直角な垂線となす角が反射角である。
3. 入射角を 20° から 80° まで変化させ，そのときの反射角を測定し表にまとめる。
4. 金属反射板の代わりに半反射板を用いて同様の実験を行う。

3.2 定在波と波長

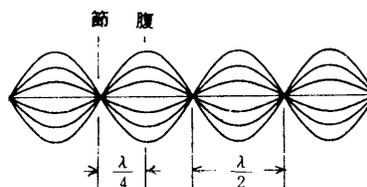


図 3: 定在波の概念

空間内で 2 つの電磁波が存在すると，ある点における電磁波の電界は 2 つの電磁波の電界の重ね合わせで

得られる。例えば，次式のような同じ周波数で進行方向が互いに逆な 2 つの電界波の合成を考えてみる。

$$E_1(z, t) = E_0 \sin(\omega t - \beta z) \qquad E_2(z, t) = E_0 \sin(\omega t + \beta z)$$

この場合の合成電界は，

$$E(z, t) = 2E_0 \sin(\omega t) \cos(\beta z)$$

となり，これは図 3 のように，空間に固定した $\cos(\beta z)$ という波の振幅が $2E_0 \sin(\omega t)$ で振動していることを示す。図からも明らかなように， E が最大となる位置及び最小となる位置は，時間によって変化しない。このような波を定在波という。

金属板に電磁波を入射させた場合など，空間にはこれらの入射波と反射波が同時に存在し，その合成波は定在波となる。図から，定在波の波長は 2 つの波の波長 λ の $1/2$ となる。

この実験では，定在波より波長を測定し，定在波の概念を理解する。

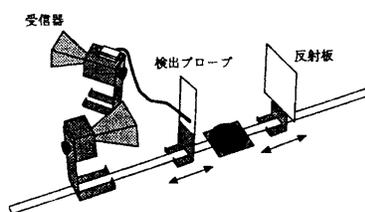


図 4: 構成品の組立

1. 図 4 のように装置を構成する代わりに，反射板の代わりに受信器を置き，その間に検出プローブを置く。
2. 受信器側面のコネクタに検出プローブのプラグを差し込み，送信器の電源を入れて，受信器のメータが半分程度振れるように感度を調整する。
3. メータの振れが最大となる点を，受信器を 2cm 以内の範囲で少しずつ移動させ，その度，検出プローブの位置も 2cm 位の範囲で移動させ，繰り返しながら見つける。
4. プローブを少し移動させメータの振れが最小となる点を見つけ，その点の位置をアームの目盛り読みとり，記録する。
5. メータを見ながらプローブの位置を移動させ， n 回，節の位置を通過させる。 $i = (1, 2, \dots, n)$ 番目の節の位置を x_n とすると，その距離間には波の腹が i 越えるので波長 λ とそれらの間には

$$|x_i - x_0| = i \frac{\lambda}{2}$$

の関係が成り立つ。

6. 上式より， $i = (1, 2, \dots, n)$ に対する波長を計算し，平均値を求める。
7. 得られた波長の平均値 λ より，本器のマイクロ波の周波数を計算する。

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

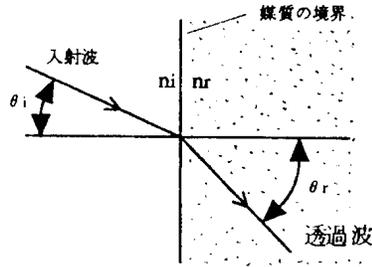


図 5: 屈折の概念

3.3 屈折

電磁波が異なった物質の境界を通過すると屈折が起きる。図 5 のように，入射角を θ_i ，透過波の方向と垂線の角を θ_r とすると，

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$$

の関係が成り立つ。 n_1 及び n_2 は相接する媒質の屈折率であり，上式はスネルの法則と呼ばれる。^{注1}

1. プリズムモデル枠の中にスチレンペレット (styrene pellets) を満たし，送信器側のプリズム面を入射波に対して垂直に設定する。
2. 測定器の可動アームを回転させ，メータの振れが最大になる角を測定する。
3. プリズム枠の面に対する入射角を $\theta_i = 22^\circ$ とする。屈折角は $\theta_r = \theta_i + \theta$ であるので，スネルの法則より，空気の屈折率を 1 として，スチレンペレットの屈折率を求める。

3.4 偏光

本器のマイクロ波は送信器のダイオード軸に沿って偏光されている。従って，受信器のダイオード軸の角度が送信器のダイオード軸のに対して θ であるとするとき，受信器のダイオードはその軸方向成分 $\cos \theta$ を検出する。

ここでは，電磁波の偏光現象を理解し，また偏光板がどのような作用をするのが実験する。

3.5 複スリットでの干渉

電磁波が 2 つのスリットを通過すると，これらの波は重なり，空間内に波の強さが最大となる点と最小となる点が現れる。すなわち，干渉が起こる。図 6 において受信器の角度を θ とすると，スリットを通過した波の強さが最大となる点は

$$d \sin \theta = n\lambda$$

を満たす角のところで生じる。ここで， d はスリット間距離， λ は波長， n は任意の整数である。

^{注1} 屈折の法則とも呼ばれる。

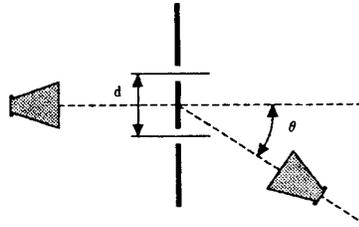


図 6: 干渉の概念

1. 実験装置を構成し，スリット用アームにスリットスペーサ，金属反射板をスリット幅が 1.5cm になるように取り付ける。
2. 受信器と送信機が一直線上にあるとき，できるだけ低い増幅度でメータの値が 1 になるようつまみを調整する。
3. 測角器の可動アームをゆっくりと動かし， 5° くらいずつ変化させたときのメータの値を記録し，グラフにプロットする。変化が急激な場合は，角度を細かくして測定する。
4. 最大となる角，最小となる角の理論値はそれぞれ次式で与えられる。

$$d \sin \theta_{\max} = n\lambda$$

$$d \sin \theta_{\min} = \left(n + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

実験データから得られる最大点・最小点と比較する。

3.6 マイケルソン干渉計

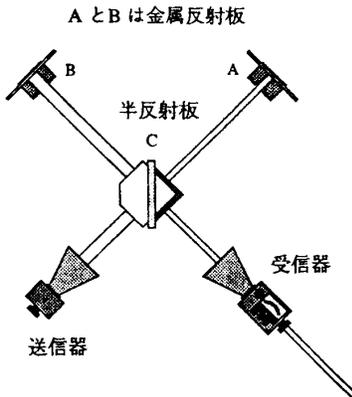


図 7: マイケルソン干渉計

図 7 のように送信器から出た電磁波を半反射板 C で互いに垂直の方向に分け，これらをそれぞれ金属反射板 A, B で反射させ，再び会合させて干渉縞を作らせ受信器で観測する装置をマイケルソン干渉計という。

すなわち，この場合 1 つの波は C を通過し，A で反射され，更に C で反射され受信器に届くものであり，

もう1つの波はCで反射されBに行き，Bで反射されCを通過して受信器に届くものである。この装置において，今CA=CBとすると両方の波は同じ位相で会合するので最大信号を受信できる。ところが，一方の金属反射板を $\lambda/4$ だけ動かすと電磁波の受信器での位相が変わり，最大信号は受信されない。さらに金属反射板を $\lambda/4$ だけ同じ方向に動かすと，受信器での両波の位相は一致する。

このように，どちらかの金属反射板を $\lambda/2$ ずつ移動させると，受信器での波の強さは大きくなる。従って，一方の金属反射板をスライドさせたとき，メータの値が最大となる回数が n で，金属反射板を動かした距離が x であるとするとき，波長 λ との間には次式が成り立つ。

$$x = n \frac{\lambda}{2}$$

1. 図7のように実験装置を構成し，金属反射板Aをアームに沿って動かし，メータの最大と最小の間隔を見る。
2. できるだけ金属反射板Aが半反射板に近く，メータの振れが最大となる位置を探し，その時の金属反射板Aの位置をアームの上の目盛り読みとる。それを x_0 とする。
3. メータを見ながら金属反射板Aの位置を半反射板からゆっくりと遠ざけ， n 回メータの値が最大となる点を通り過ぎ，その位置を記録する。メータの振れが $i = (1, 2, \dots, n)$ 番目に最大となる位置を x_i とすると，次の関係が成り立つ。

$$|x_i - x_0| = i \frac{c}{\lambda}$$

4. 上式より， $i = (1, 2, \dots, n)$ に対する波長を計算し，平均値を求める。
5. メータが最大となる回数 n を横軸に，最大となる点の位置を縦軸にグラフ化すると，その直線の勾配が波長の $1/2$ となる。

3.7 マイクロ波通信システム

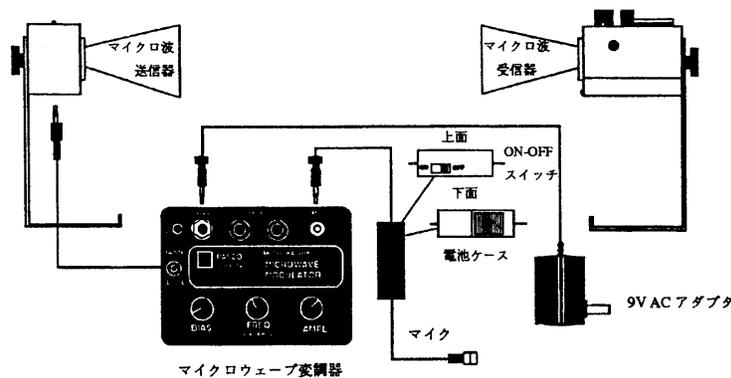


図8: マイクロ波通信システム

マイクロ波変調器を送信器，受信器に付加すると，マイクを通して入力された音声信号が，振幅変調され，空間を伝わって受信器に送られスピーカを通して音声として聞くことができる。本実験ではそのことを確かめるとともに，その時の音声信号をオシロスコープで観察する。

1. 図8のように実験装置を構成する。
2. マイクロ波送信器に、変調器を通して音声を入力し、マイクロ波受信器に交流増幅器を接続して、スピーカより音声を確認する。また、オシロスコープを用いて、音声の入力信号・出力信号を観察する。
3. 送受信器間に金属反射板や半反射板などを挿入し、スピーカからの音声やオシロスコープ上での波形かどうなるか調べる。

4 結果と考察

4.1 反射

実験結果は、表1のようになった。入射角 80° に対する反射角は、機材の制約で測定不能であった。

入射角	金属板の反射角	半反射板の反射角
20°	20°	22°
30°	30°	24°
40°	40°	40°
50°	50°	46°
60°	60°	60°
70°	68°	68°
80°	—	—

表1: 反射に関するデータ

入射角と反射角は、金属板の場合はかなり正確に一致するが、半反射板の場合はばらつきが見られた。これは、半反射板は金属板よりも乱反射が多く起きるために、入射波が色々な方向に散乱し、結果として入射角とは違う角度に反射波が集まったものと考えられる。

4.2 定在波と波長

表2のようなデータがとれた。

節の位置	520 mm
腹の位置	527 mm
	515 mm
	500 mm
	487 mm
	472 mm
	460 mm

表2: 定在波に関するデータ

データから、腹の間隔の平均は 13.4 mm となる。よって波長は $\lambda = 26.8$ mm となり、周波数は

$$\begin{aligned} f &= \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{3.00 \times 10^8}{2.68 \times 10^{-2}} \\ &= 1.11 \times 10^{10} \end{aligned}$$

約 11.1 GHz となる。

ガンダイオードマイクロ波送信器の仕様は、周波数 10.525 GHz (波長 2.85 cm) なので、+5% 程度の誤差があるものの、まずまず正確な値が出たと言える。

4.3 屈折

スチレンペレットを満たしたプリズムモデル枠の直角三角形に対して光を入射させると、入射光に対して 11° の方向で、受信器のメーターの振れが最大となった。スチレンペレットの形状より、屈折が起きたのはスチレンペレットから空気中へと光が出たときであり、そのときの入射角は $\theta_i = 22^\circ$ となり、屈折角は $\theta_2 = 33^\circ$ となる。スネルの法則より、スチレンペレットの屈折率 n を計算すると、

$$\begin{aligned} n \sin \theta_i &= \sin \theta_2 \\ n &= \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_i} \\ &= 1.45 \end{aligned}$$

となる。

4.4 偏光

送信器と受信器のなす角を変更した場合の結果を表 3 および図 9 に、送信器と受信器の間に偏光版を挟んでそれを回転させた場合の結果を表 4 に示す。

図 9 より、受信器を回転させた場合、その角度によってメーターの値が変化することがわかった。この現象は、

$$M_2 = M_0 \cos^2 \theta$$

で近似することができそうである。

また偏光版を挟んでそれを回転された場合も、受信器のメーターの値が変化することがわかる。偏光版のスリットがマイクロ波の偏光面に対して水平な場合は、ほとんどのマイクロ波を透過するが、角度が大きくなるごとに減衰していき、垂直になるとほとんど遮断してしまう。

4.5 複スリットでの干渉

実験結果を、表 5 に示す。また、試験的に結果をグラフ化し、図 10 にも示す。

受信器の角度	受信器の示す値
0	2.2
10°	2.0
20°	1.8
30°	1.4
40°	0.9
50°	0.6
60°	0.4
70°	0.2
80°	0.1
90°	0.0
100°	0.0
110°	0.1
120°	0.2
130°	0.5
140°	1.0
150°	1.4
160°	1.8
170°	2.0
180°	2.2
190°	2.0
200°	1.8
210°	1.5
220°	1.0
230°	0.6
240°	0.3
250°	0.2
260°	0.1
270°	0.0
280°	0.0
290°	0.1
300°	0.2
310°	0.6
320°	1.0
330°	1.4
340°	1.7
350°	1.9
360°	2.0

表 3: 受信機の回転による偏光の影響

偏光版の角度	受信器の示す値
0.0°	2.2
22.5°	1.9
45.0°	0.9
67.5°	0.2
90.0°	0.0

表 4: 偏光板の回転による偏光の影響

また，理論から得られる最大値と最小値は，

$$\theta_{\max} = 0^\circ, 11.0^\circ, 22.3^\circ, 34.8^\circ, \dots$$

$$\theta_{\min} = 5.5^\circ, 16.6^\circ, 28.4^\circ, 41.7^\circ, \dots$$

となる。実験値と比較してみると，最初の最大値と最小値は問題ないものの，次に最大値があるはずの 11.0° では最小値のようにになっている。その後最小値があるはずの 16.6° では上昇中で，さらに次の最大値の 22.3° では問題なく最大値になっている。

この結果からすると，最大値と最小値が訪れる周期がずれているのではないかと感じられる。

受信器の角度	受信器の示す値
0°	0.85
5°	0.02
6°	0.60
7°	0.34
8°	0.14
9°	0.05
11°	0.04
15°	0.14
20°	0.54
21°	0.54
22°	0.50
25°	0.40
30°	0.20
35°	0.03
40°	0.04
45°	0.14

表 5: 複スリットによる干渉

4.6 マイケルソン干渉計

実験結果を，表 6 および図 11 に示す。メーターが最大となる間隔はほぼ一定であることがわかる。波長の平均値は 2.86 cm となった。なかなか精度が高い。

x_0	91.6
x_1	90.3
x_2	88.7
x_3	87.1
x_4	85.9
x_5	84.3
x_6	83.0

表 6: マイケルソン干渉計でメーターが最大となった位置

4.7 マイクロ波通信システム

実験では、マイクロ波送信器にマイクロフォンを繋いで音声信号を送信し、受信器側でそれを受けた。

音声はあまりクリアではないものの、マイクロ波を使った通信が成り立っていることがわかった。また、今までの実験で受信器のメーターのレベルが落ちるような状態（例えば送信器と受信器の偏光面が一致しないようにしたり、間に偏光版を挟んだりという状態）にすると、音声信号のレベルは落ち、ほとんど聞こえない状態になることもあった。

オシロスコープで波形を観測してみると、音声信号の波形は非常に複雑であったが、受信レベルが落ちると波形全体のレベルが落ちることがわかった。あまり詳細には分析していないので、周波数成分ごとのレベルの落ち方の違いなどはわからない。

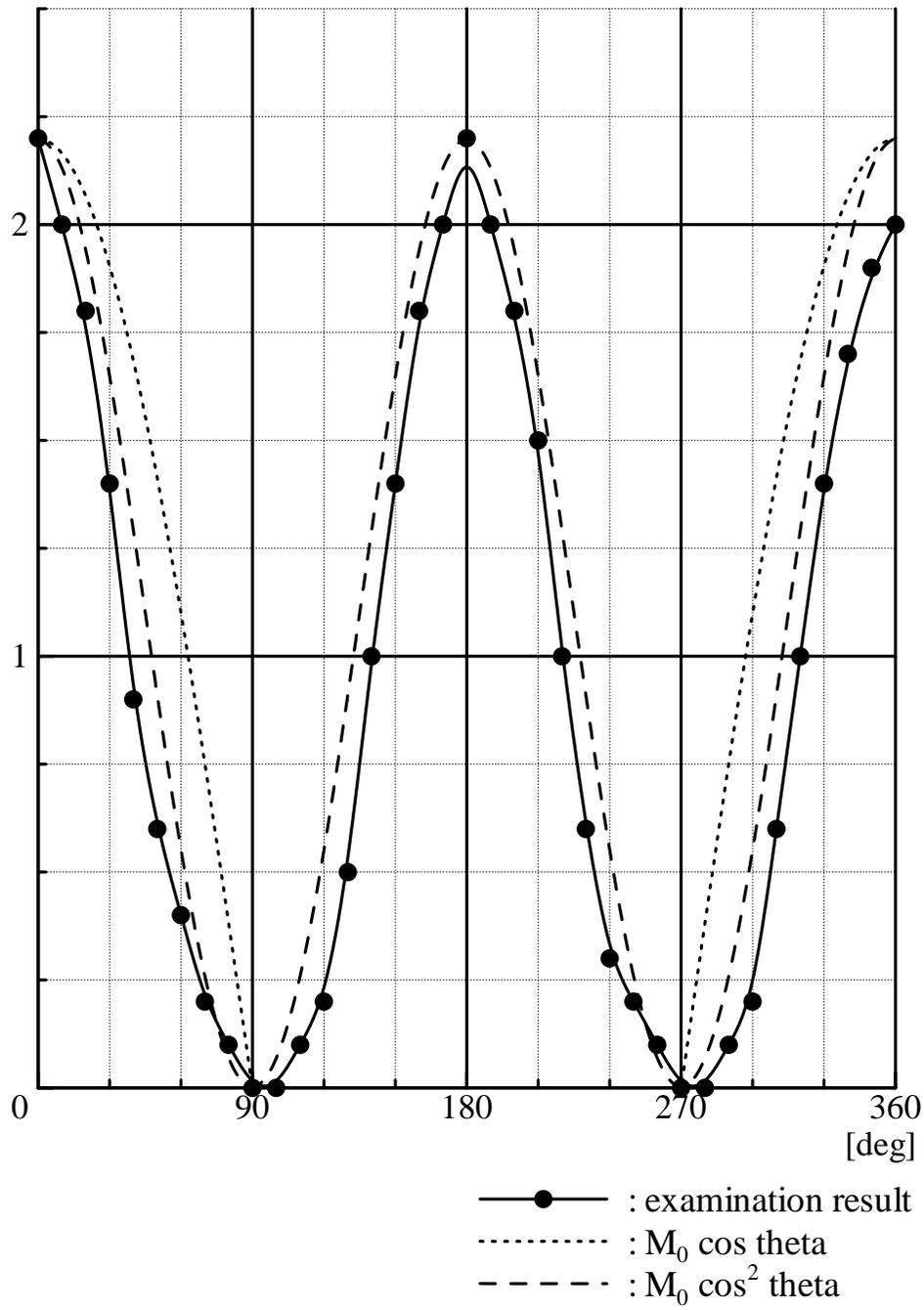


図 9: 受信機の回転による偏光の影響

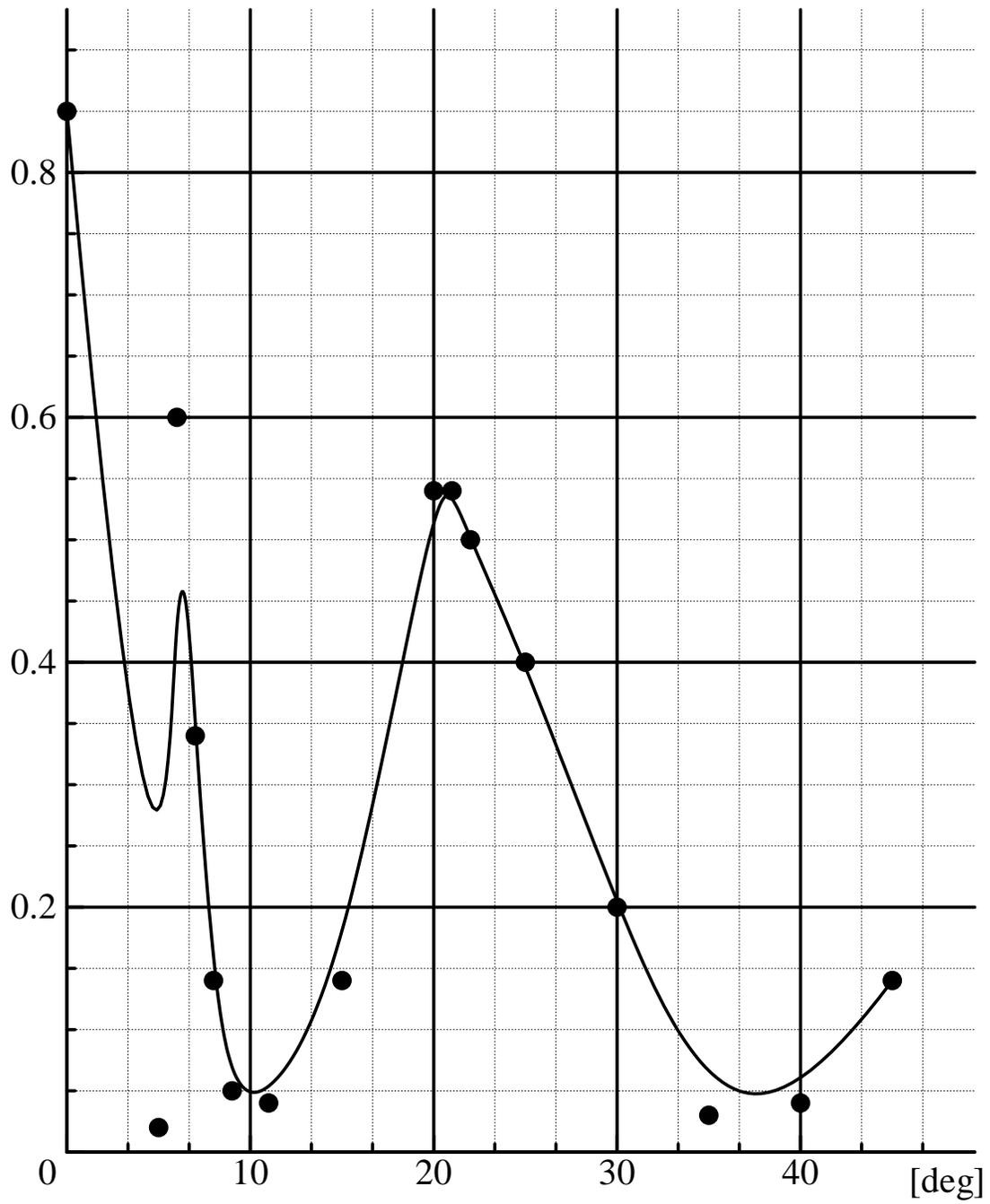


図 10: 複スリットによる干渉

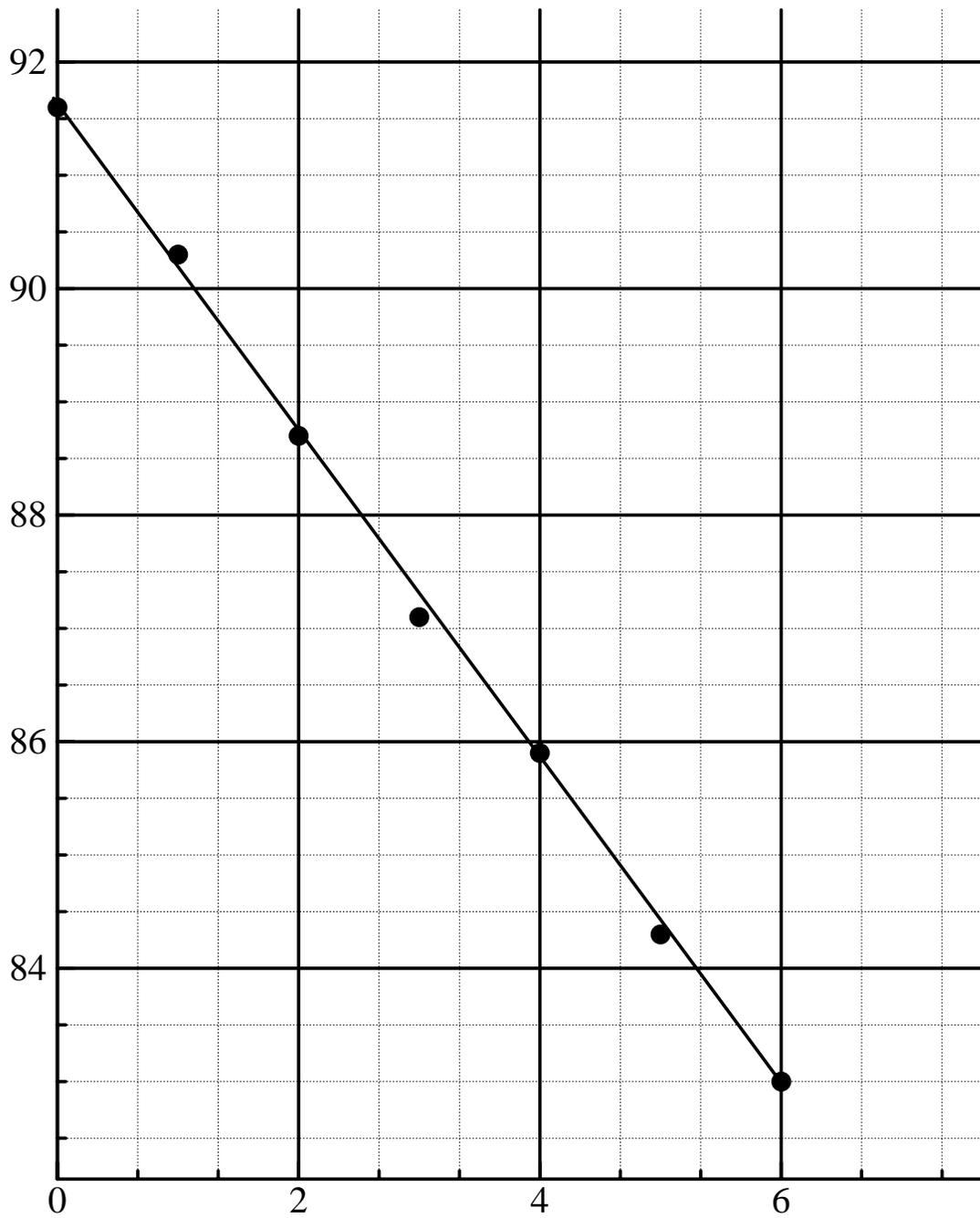


図 11: マイケルソン干渉計でメーターが最大となった位置とその回数の関係