

光回折実験による光の波長測定

町田 光男*

Determination of Wavelength of Light by Optical Diffraction

by

Mitsuo MACHIDA *

要 旨

物理学実験で実施している「光の波長測定」の改善を試みた。従来の実験では、回折格子の格子定数の値を既知として与えて、半導体レーザー光の波長を決定していた。今回の改定では、最初に、He-Ne レーザーを用いて波長測定に用いる回折格子の格子定数を決定して、次に格子定数を決定した回折格子を用いて半導体レーザー光の波長を決定するようにした。また、実験で用いる回折格子の格子定数と半導体レーザー光の誤差の評価を行った。

Key Words : optical diffraction, wavelength, grating, laser

1. はじめに

古典物理学が確立した19世紀末、光は電場と磁場の振動が空間を伝わる電磁波とよばれる波動であることが分かっていた。その後、原子や分子を対象としたミクロな世界を探っていくと、これまでの古典物理学では説明できない現象が幾つも観測された。その中で最も有名なものとして、黒体放射と光電効果を挙げることができる。これらの現象は電磁波を量子化して離散的な粒子として捉え直すことで説明できることが分かった。一方、粒子とされていた電子が波動性を示すというド・ブロイ仮説が提唱された後、電子が回折を起こすことが実験により確かめられ、電子が波動として振舞うことも示された。このようにして、光（電磁波）や電子は粒子性と波動性の両方を併せ持つことが分かり、これを2重性とよんだ。2重性の概念は量子力学の誕生の礎を築き、現代物理学における

最も重要な発見の1つである。光回折や光電効果の実験は光の2重性を体現できる実験として数多くの大学の低年次教育で実施されている。

光電効果の実験が物理学実験テーマとして多数の大学で採用される理由は、これが光の粒子性を証明した有名な実験であると同時に、測定原理が明快で、初等物理学程度の知識で理解できるからである。本学物理教室でも、2016年に光電効果の実験の検討を行い、2017年から2年次の物理学実験で「光電効果によるプランク定数の決定」という名称で光電効果の実験を実施している¹⁾。

光が示す回折・干渉を利用してその波長を決定する光回折実験は、光の波動性を視覚により捉えることができる点で、物理教育の場では有用な実験である。また、高度な物理学の知識を必要としないことから、2017年度から本学の物理学実験で「光の波長測定」という名称で実施している。実験としては、3種類の半導体レーザー（ポインター）の光（赤、緑、青）を回折格子に照射して、生じた回折パターンから

*崇城大学総合教育センター教授

レーザー光の波長を決定するというものである。実験操作としては、レーザーと回折格子を光学台上にセットして、回折斑点の位置を読み取り波長計算するだけなので、実験は1時間程度の所要時間で終了してしまう。また、実験に用いられる回折格子はレプリカ法で作成（付録を参照せよ）されたものであるにもかかわらず、その格子定数の値を既知として波長決定に用いている。以上のように、光の波長測定には改善が必要な点が幾つかあると考えられるので、実験内容の見直しを行った。

2. 光回折の原理

レーザー光などの可干渉な光を近接したスリットからなる回折格子に通すと、スリットの後方に置かれたスクリーンに明暗の縞模様が現れる（図1 (a)）。光の波長を λ 、スリットの間隔を d 、スリットとスクリーンの距離を R として、スクリーン上の点Pに明線が現れる条件を考えよう。光回折実験は R が d より十分大きい条件で行うので、 S_0P 、 S_1P 、 S_2P は互いに平行と見なせる（図1 (b)）。光線 S_1P 、 S_2P の回折角を θ とすると、 θ が

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (1)$$

の条件を満たすとき、スリットからの光線は、互いに波長の整数倍の光路差があるので、干渉により強め合い点Pに明線が現れる。また、スクリーンの原点Oと点Pの距離を x_m とすると、 $\sin \theta$ は

$$\sin \theta = \frac{x_m}{\sqrt{R^2 + x_m^2}} \quad (2)$$

となる。したがって、 d と λ はそれぞれ次のように表される。

$$d = \frac{m \lambda \sqrt{R^2 + x_m^2}}{x_m} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{d x_m}{m \sqrt{R^2 + x_m^2}} \quad (4)$$

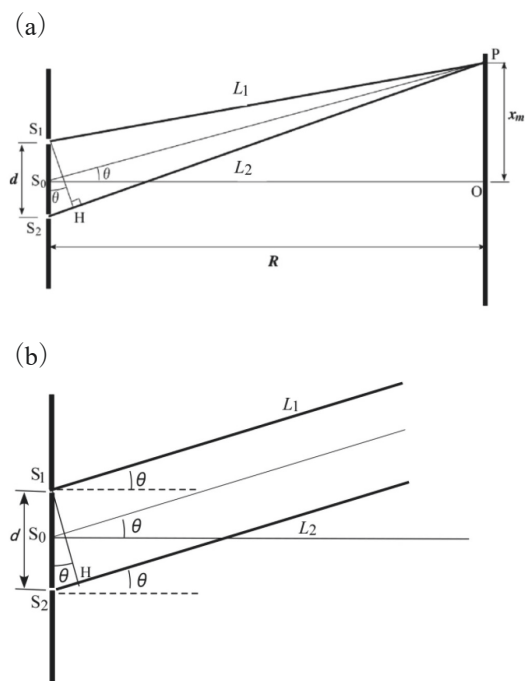


図1 光回折の原理

3. 実験の改善点

従来の実験では、1 mm 当たり 500 本の溝を持つ回折格子の格子定数を厳密な値 2×10^{-6} m として、3 種類の半導体レーザー光の波長を決定していた。今回の改定では、回折格子がレプリカ法で作成されたものであることを考慮して、まず He-Ne レーザー（波長の公称値 632.8 nm）を用いて波長決定に用いる回折格子の格子定数を決定することにした。図 2 (a) に、He-Ne レーザー、格子定数を決定する回折格子、スクリーンとしてのものさしの配置を示す。物差し上でのレーザー回折光の輝点の大きさが 1 mm 程度あるので、輝点の位置を読み取る際、最大で 1 mm 程度の誤差を生じる。また、構造的に光学台上の回折格子の位置を正確に読み取ることが困難で、 R に 1 mm 程度の誤差を生じる。これらの誤差を低減するために、可能な限り回折格子と物差しを離して、0 次回折光の斑点と 1 次回折光の斑点の距離 x_1 を測定して、格子定数の決定を行った。

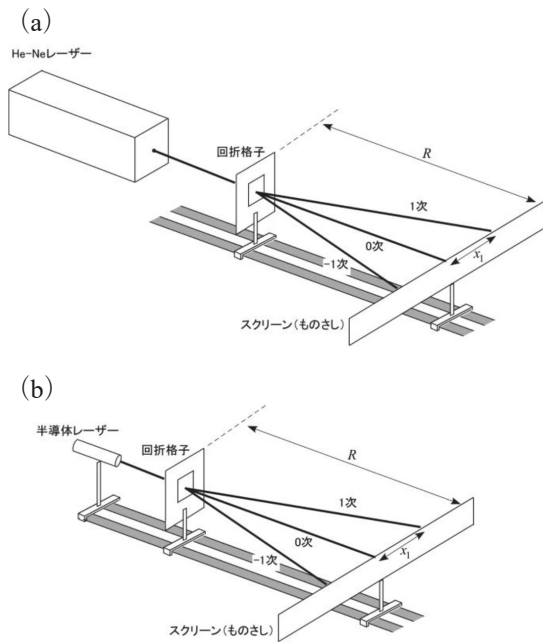


図2 光回折の実験装置

表1に実験から得られた3つの回折格子(1mm当たり500本の溝)の格子定数を示す。 d_1 は物理学実験の受講生が測定した格子定数, d_2 は筆者が測定した格子定数物である。ここで, d_1 のカッコ内の数字は標準偏差を表す(d_2 の測定回数は1回なので標準偏差はない)。

全ての回折格子に対して, d_1 と d_2 はほぼ一致しており,計測は正確に行われていることを表す。また,全ての値は1.99から2.03の範囲内にあることから,回折格子の格子定数は公称値 $2\mu\text{m}$ にほぼ一致していると考えて良い。したがって,精度をそれほど必要としない場合には, $d=2\mu\text{m}$ として用いてもかまわないと考えられる。しかし,もう少し厳格な見方をすると,格子定数の値には明確なばらつきが存在することが分かる。回折格子1と2については, d_1 と d_2 は $2.00\mu\text{m}$ 付近の値になっている。一方,回折格子3は, $d_1=2.02\mu\text{m}$, $d_2=2.03\mu\text{m}$ となっており, $2.00\mu\text{m}$ から有意に大きくなっている。これはレプリカ回折格子の格子定数には,マスターの型や製造法に起因したばらつきがあると考えられる。

表1 波長測定に用いる回折格子の格子定数

No	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$
1	1.99(1)	2.00
2	2.01(1)	1.99
3	2.02(2)	2.03

半導体レーザー光の波長は,格子定数が決定された回折格子を用いて決定する(図2(b))。格子定数決定の場合と同様に,可能な限り回折格子と物差しを離して, x_1 を測定することにした。

最後に,実験から得られる半導体レーザー光の波長の誤差の評価をする。 λ の誤差(確率誤差)を $\delta\lambda$, R の誤差を δR , x_1 の誤差を δx_1 とすると,式(4)から,これらの誤差の間に次の関係が成立する。

$$\delta\lambda^2 = \left(\frac{\partial\lambda}{\partial R}\right)^2 \delta R^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial x_1}\right)^2 \delta x_1^2 \quad (5)$$

$\lambda=671\text{nm}$ (赤色光), $R=0.600\text{m}$ のとき $x_1=0.215\text{m}$ となる。誤差の最大値を $\delta R=1\text{mm}$, $\delta x_1=1\text{mm}$ とする。これらの値を式(5)に代入すると, $\delta\lambda=3\text{nm}$ が得られる。したがって, $\delta R=1\text{mm}$, $\delta x_1=1\text{mm}$ 程度の場合には, λ の有効数字は3桁になることが分かる。

参考文献

- 1) 天本徳浩,上野賢仁,町田光男:崇城大学紀要,41,179(2016).

付録

回折格子は平行平面のガラス板に1mm当たり数百本の細い等間隔の溝を平行に刻み込んだもので,溝の部分は光を遮断し,溝と溝の間のスリットが光を通過させる。等間隔に並んだスリットとスリットの間を回折格子の格子定数という。このようなガラス板の回折格子は極めて高価であるので,学生実験に用いられることは殆どない。本学の実験でもガラス製の回折格子は使用しておらず,レプリカ法で作成した透過型回折格子を用いている。

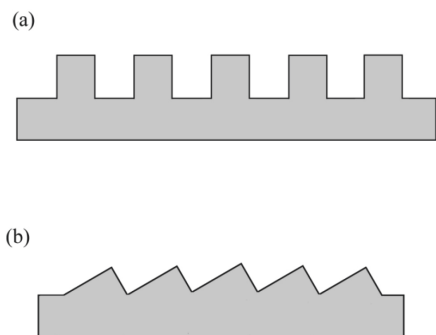


図3 レプリカ回折格子 ((a)：ラミナー回折格子), (b)：ブレード回折格子)

レプリカ回折計は、リソグラフィで作成したマスターと呼ばれる型の上に形成したプラスチック膜（回折格子）を剥離して作成される。図3に示すように、凹凸により行路差をつけるタイプ（ラミナー回折格子）、鋸歯状断面での反射により行路差をつけるタイプ（ブレード回折格子）などがある。図4に光回折実験に用いられることが多い透過型ブレード回折格子を示す。

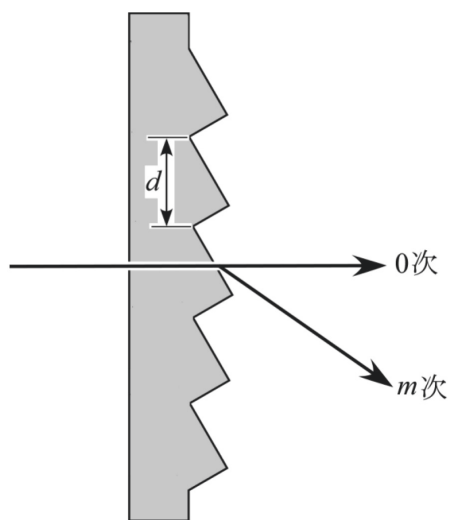


図4 透過型ブレード回折格子