

1 目的

今回の実験では、物理学において最も基本的な定数のひとつである光速度を、半導体レーザーからのナノ秒光パルスとオシロスコープを用いて直接測定する。また、同軸ケーブルを信号が伝わる速度の測定も行う。

2 原理

2.1 屈折率

真空中の光速度は自然界における最大速度である。透明な物質中では光の速さは真空中よりも遅い。真空中の光速度 c を物質中の光速度 v で割った値を物質の屈折率という。すなわち屈折率 n は次式で定義される。

$$n = \frac{c}{v}$$

屈折率は光の波長で少し変化する。可視光領域では波長が長くなると屈折率は小さくなる。

表 1 波長 589 nm における物質の屈折率

物質	屈折率
空気 (15°C、1 atm)	1.000277
水 (20°C)	1.3330
石英	1.4585
光学ガラス (BK7)	1.5168
ダイヤモンド	2.4195

2.2 本実験の原理

半導体レーザーからの繰り返し周波数約 15MHz の光パルス列を数メートル離れたプリズム反射器で反射させて光検出器に導く。また半導体のレーザー近くで光を反射させて同じ光検出器に導く。

光検出器の出力信号をオシロスコープに導き 2 つの光パルスの時間間隔 T を測定する。次にレーザー近くで反射させた光とプリズム反射器で反射させた光の光路差 L を測定する。このとき光速度 c は次式で計算される。

$$c = \frac{L}{T}$$

3 実験方法

以下のような手順で実験を行った。

3.1 光速度の測定

- テキストの図 10.8 のように装置を配線した。

- 装置の電源を入れ半導体レーザーから連続光を出した。
- 各装置の位置や角度を調整した。
- 半導体レーザーの出力を短い光パルスにした。
- オシロスコープで2つのパルスが観測できるようになったら、その間の時間間隔 T を測定した。
- 光路の長さを以下の手順で測定した。
 - － 半透明鏡からプリズム反射器のプリズム面までの距離 d_1 、光検出器からプリズム面までの距離 d_2 、半透明鏡から光検出器までの距離 d_3 およびプリズム間の距離 l_0 、 l_1 を巻き尺を使って測定した。
 - － 光路差 L を次式にガラスの屈折率 $n = 1.5$ を代入して求めた。 $L = d_1 + d_2 - d_3 + n(l_0 - l_1) + l_1$
- 光速 c を $c = \frac{L}{T}$ より求めた。
- この操作をプリズム台の位置を変えて合計2回行った。

3.2 同軸ケーブルを伝わる信号速度の測定

- テキストの図 10.10 の通りになるように配線をした。
- オシロスコープ、パルス発生器の電源を入れた。
- 直接来たパルスと終端の反射によって生じたパルスとの時間間隔 T をオシロスコープにより波形を観測することで測定した。
- 同軸ケーブルを取り外してその長さ L を測定した。
- 信号の速さ v を $v = \frac{2L}{T}$ より求めた。

4 実験結果

4.1 光速度の測定

パルスの時間間隔 T 、透明鏡からプリズム反射器のプリズム面までの距離 d_1 、光検出器からプリズム面までの距離 d_2 、半透明鏡から光検出器までの距離 d_3 およびプリズム間の距離 l_0 、 l_1 を測定した結果は上の表の通りであった。

表 2 光速度の測定

T/ns	d_1/cm	d_2/cm	d_3/cm	l_0/cm	l_1/cm
15.6	229.8	304.1	76.6	17.8	12.8
7.90	106.2	180.3	75.3	17.8	12.8

4.2 1 回目のデータによる計算

したがって、光路差 $L = d_1 + d_2 - d_3 + n(l_0 - l_1) + l_1$ から

$$L = 229.8 + 304.1 - 76.6 + 1.5 \times (17.8 - 12.8) + 12.8 = 477.6 \text{ cm}$$

よって光速度は $c = \frac{L}{T}$ より、

$$c = \frac{477.6 \times 10^{-2}}{15.6 \times 10^{-9}} = 306153846.1 \cong 3.06 \times 10^8 \text{ m/s}$$

光路差の不確かさを ΔL 、パルスの時間間隔の不確かさを ΔT とすると、光速度 c の不確かさ Δc は次式で求められる。

$$\Delta c = c \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}$$

$\Delta L = 1.0 \text{ cm}$ 、 $\Delta T = 0.5 \text{ ns}$ として代入すると、

$$\Delta c = 3.06 \times 10^8 \times \sqrt{\left(\frac{1.0}{477.6}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{15.6}\right)^2} = 1171498.73 \cong 0.01 \times 10^8 \text{ m/s}$$

したがって光速度は $c = (3.06 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ m/s}$ と求められた。

4.3 2 回目のデータによる計算

したがって、光路差 $L = d_1 + d_2 - d_3 + n(l_0 - l_1) + l_1$ から

$$L = 106.2 + 180.3 - 75.3 + 1.5 \times (17.8 - 12.8) + 12.8 = 231.5 \text{ cm}$$

よって光速度は $c = \frac{L}{T}$ より、

$$c = \frac{231.5 \times 10^{-2}}{7.9 \times 10^{-9}} = 293037974 \cong 2.93 \times 10^8 \text{ m/s}$$

光路差の不確かさを ΔL 、パルスの時間間隔の不確かさを ΔT とすると、光速 c の不確かさ Δc は次式で求められる。

$$\Delta c = c \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}$$

$\Delta L = 1.0 \text{ cm}$ 、 $\Delta T = 0.5 \text{ ns}$ として代入すると、

$$\Delta c = 2.93 \times 10^8 \times \sqrt{\left(\frac{1.0}{231.5}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{7.90}\right)^2} = 18587444.56 \cong 0.19 \times 10^8 \text{ m/s}$$

したがって光速は $c = (2.93 \pm 0.19) \times 10^8 \text{ m/s}$ と求められた。

4.4 同軸ケーブルを伝わる信号速度の測定

同軸ケーブルの長さ L と信号の遅延した時間 T の関係は以下ようになった。また、描いたグラフは末尾に添付した。

表 3 同軸ケーブルを伝わる信号速度の測定

L / cm	T / ns
154.2	15.8
154.3	15.8
505.1	51.4
597.9	60.8
896.9	91.1
990	99.8
1000	101.4

グラフの傾きから求めた信号速度 v の値は

$$\frac{896.9 \times 10^{-2} \times 2}{91.1 \times 10^{-9}} = 196904500.54... \cong 1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$$

グラフからでは測定値のばらつきを確認することができなかったため、不確かさを金尺やオシロスコープによるものとする、同軸ケーブルを伝わる信号速度の不確かさ Δv は次式で求められる。

$$\Delta v = v \sqrt{\left(\frac{\Delta X}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y}{T}\right)^2}$$

$\Delta L = 0.1 \text{ cm}$ 、 $\Delta T = 0.1 \text{ ns}$ として代入すると、

$$\Delta v = 1.97 \times 10^8 \times \sqrt{\left(\frac{0.1}{896.9}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{15.4}\right)^2} = 1279409.33... \cong 0.013 \times 10^8 \text{ m/s}$$

したがって同軸ケーブルを伝わる信号速度は $v = (1.97 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ m/s}$ と求められた。

5 考察

5.1 光速度の測定

真空中の光速度の文献値は 299792458 m/s である。それに対して今回の測定によって得られた値は $(3.06 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ m/s}$ と $(2.93 \pm 0.19) \times 10^8 \text{ m/s}$ であり、一回目の実験では一致していないが二回目では一致している。これは、プリズムとの距離が短ければ測定の実験値が減少することや、あるいは光路差の実験値を少なく見積もったためだと考えられる。

大気圧、室温における空気の屈折率は $n = 1.00028$ であるが、今回の実験において空気中であって真空中ではないことを問題にする必要はあるかについて考える。今回の実験で得られた値は有効数字 3 桁であり、空気の屈折率の有効数字 5 桁以下を無視して $n = 1.000$ と近似して考えても問題はない。すなわち今回の実験に限っては空気中と真空中の違いを考慮する必要はないと言って良い。

5.2 同軸ケーブルを伝わる信号速度の測定

今回の測定で得られた同軸ケーブルを伝わる信号速度の値は $v = (1.97 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ m/s}$ であり光速度のおよそ $2/3$ 倍となっていることが確認できる。

6 参考文献

- 理科年表 (2019)
- 基礎科学実験 A(物理学実験) 平成 29 年度版

② 電圧ゲート 電圧増幅率の増大に伴ってゲートの電圧

