

1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 6 月 3 日木曜日 午後 1 時～午後 6 時

天気 曇時々雨

気圧・気温・湿度 省略

2 実験の目的

コヒーレント光を発生する代表的なデバイスである半導体レーザの原理を理解し、コヒーレント光の性質として知られる光の回折を確認する。また半導体レーザの光出力特性や光ファイバー通信の原理、発光スペクトルの解析も行う。

3 実験の原理

省略

4 使用器具及び装置

- AlGaInP 半導体レーザ
- ファイバピグテール DFB 半導体レーザ
- 半導体レーザ駆動電源
- 液晶ディスプレイ
- CCD イメージセンサ
- スクリーン
- 回転式アッテネータ
- オシロスコープ
- 光スペクトルアナライザ
- 光ファイバー
- 回折格子
- レンズ
- ファンクションジェネレータ
- 筆記用具・グラフ用紙・実験ノート・カメラ

5 実験結果

- (1) 半導体レーザ CAN パッケージを観察したところ、表面中央に金色でコーティングされたレーザ基板とそれを載せたヒートシンクが確認できた。そこからリード線が本体に伸び、本体表面にはモニタ用のフォトダイオードが観察できた。本体裏側には 3 本足の端子が伸びていた。
- (2) 手順に従って回路を組み立てレーザ発振を行ったところ、5cm 離れたところに置いたスクリーンに、赤

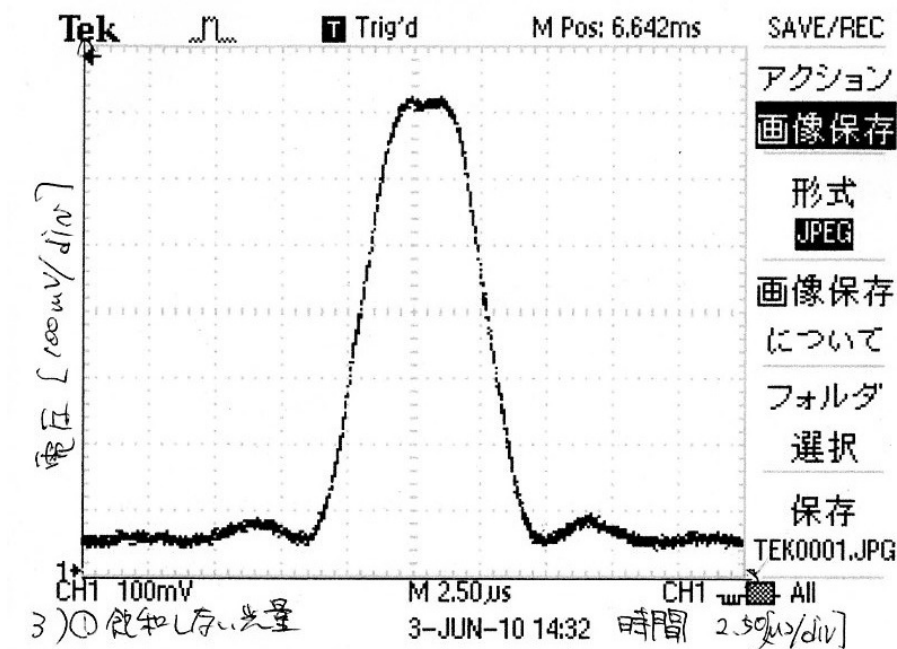


図 1 回折実験の光強度分布（ピーク飽和なし）

色光が上下に広がる様子が観察できた。光が広がっている範囲を計測すると、高さ 47mm、幅 10mm であった。中心部ほど明るさが強く人間の目では識別できないほどであったが、外周に向かうにつれ光は弱くなっていた。

- (3) 手順に従って機器を設置し、回折実験を行った。CCD イメージセンサで感知した走査線 1 本分の光強度分布をオシロスコープに映し観察した。まず中心付近で光量が飽和しないように強度分布をとったものを図 1 に示す。

また、暗転間隔をはっきり観察できるように光量を調節したものを図 2 に示す。

- (4) 省略
- (5) 半導体レーザに入力する電源出力電流を 40mA から 0mA まで変化させた時の端子間電圧と光パワーを表 1 にまとめる。
- (6) 約 1 時間かけて光学系をセッティングしたところ、出力光パワーは 2.282mW となった。レーザー出力が 3.66mW であるので、光ファイバーへの入力結合効率は

$$\frac{2.282}{3.66} \times 100 = 62.3\% \quad (1)$$

となった。

- (7) 半導体レーザの駆動電流 22mA に 1MHz・± 100mV の正弦波信号を入力したときの光出力をオシロスコープで観察した時の波形を図 3 に示す。上段が駆動電流、下段が光出力である。
- (8) 光ファイバーから出力される光の波長がレーザの駆動電流によってどう変わるかをまとめたのが表 2 である。また、駆動電流を 42mA とした時の単一縦モード発振スペクトルを図 4 に、駆動電流を 31mA に設定した時の多縦モード発振スペクトルを図 5 に示す。
- (9) DFB 半導体レーザの発振ピーク波長が駆動電流によってどう変化するのをまとめたのが表 3 である。

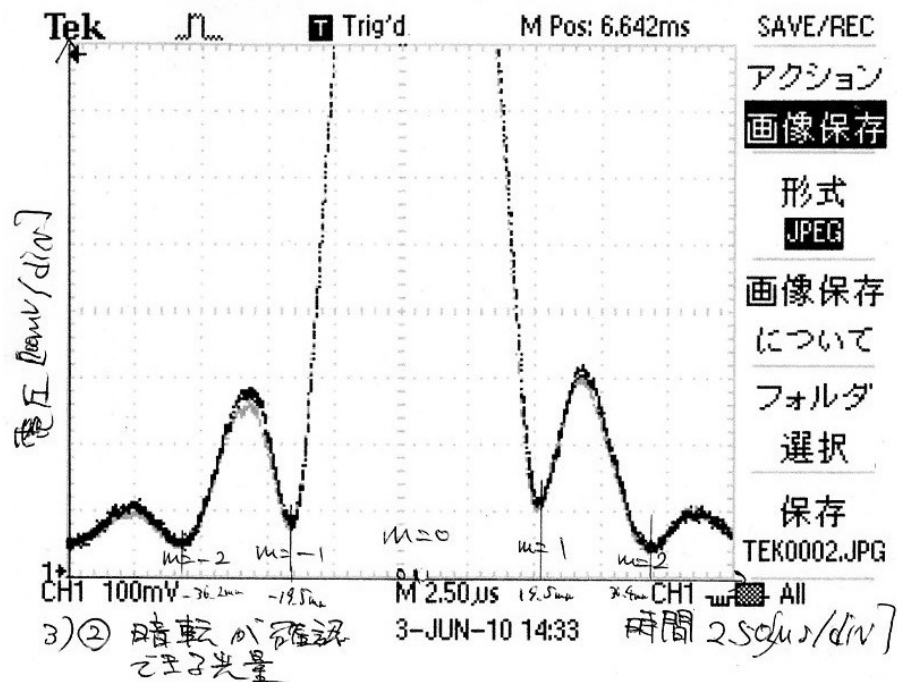


図2 回折実験の光強度分布（ピーク飽和あり）

表1 電流－光出力特性

電源出力電流[mA]	端子間電圧[V]	出力光パワー[mW]
0.0	1.61	1.08.E-03
2.0	1.76	1.23.E-03
4.0	1.82	1.47.E-03
6.0	1.87	1.61.E-03
8.0	1.96	1.70.E-03
10	1.95	1.84.E-03
12	2.00	2.07.E-03
14	2.04	2.30.E-03
16	2.06	2.58.E-03
18	2.10	2.88.E-03
20	2.15	3.25.E-03
22	2.17	3.69.E-03
24	2.20	4.21.E-03
26	2.25	4.91.E-03
28	2.28	6.36.E-03
30	2.30	1.16.E-01
32	2.34	6.93.E-01
34	2.37	1.45
36	2.40	2.22
38	2.43	2.96
40	2.45	3.72

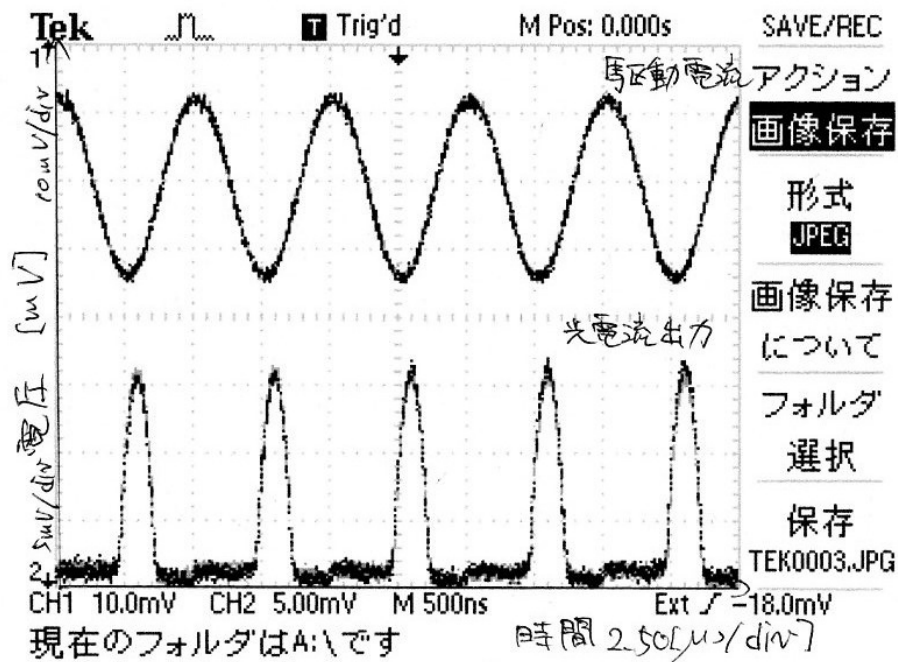


図3 電源出力電流とフォトダイオード光電流の時間変化

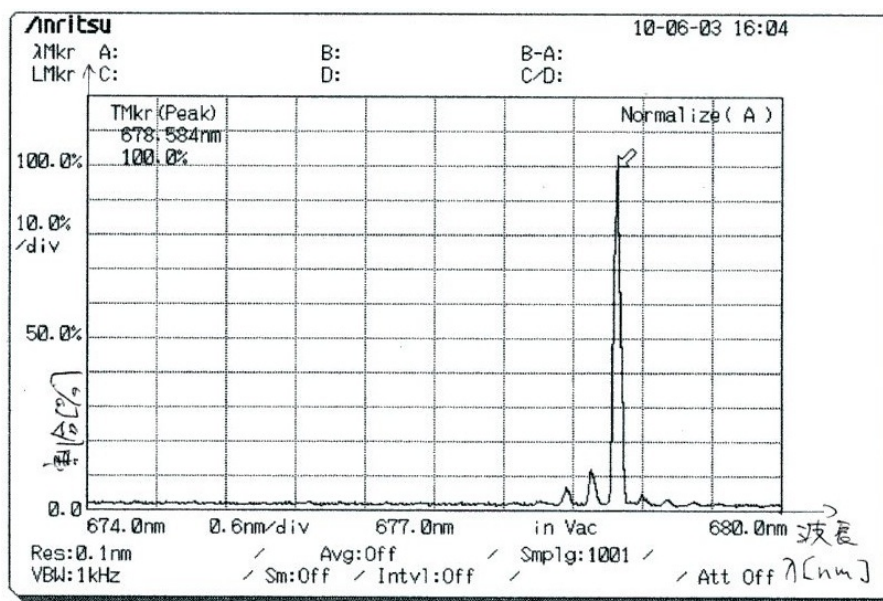
表2 各電流における発振ピーク波長

電源出力電流[mA]	発振ピーク波長[nm]
42	678.57
41	678.54
40	678.53
39	678.08
38	677.84
37	677.82
36	677.81
35	677.79
34	677.75
33	677.74
32	677.73
31	677.70
30	677.92

また駆動電流を 40mA として単一縦モード発振スペクトルを観察したものが図6である。

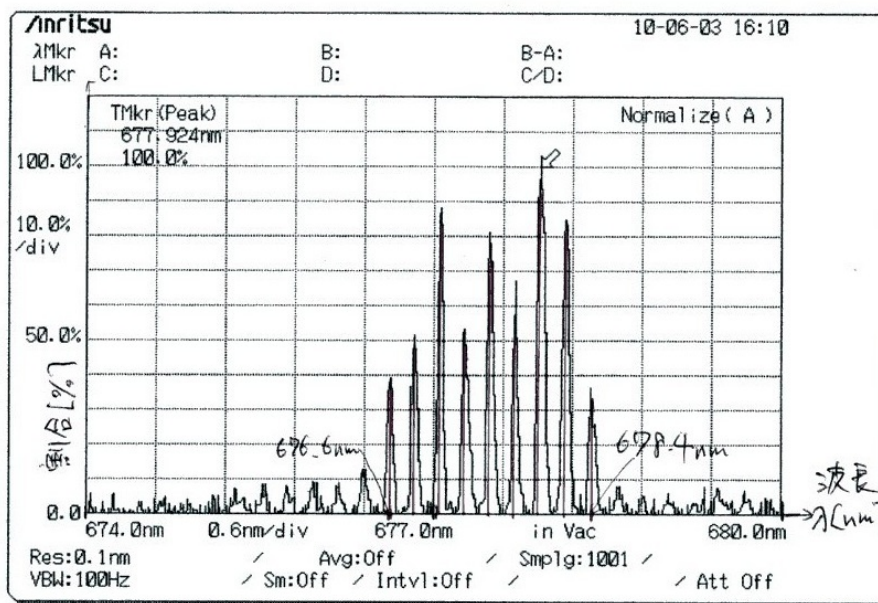
6 検討

- (1) ファブリペロ型半導体レーザは n 型クラッド・活性層・p 型クラッドの層構造からなり、誘導放射による光増幅が起こる光導波路は層の厚さに比べて著しく広い。そのためレーザ出射端にできる近視野像は、活性層に平行な方向には広く、垂直な方向には狭くなる。ここで近視野像のサイズが小さいほど回折が生じて大きな広がり角を持って伝搬する性質より、出射端から離れた位置にできる遠視野像は活性



8) 単一縦モード発振スペクトル

図4 単一縦モード発振時のスペクトル

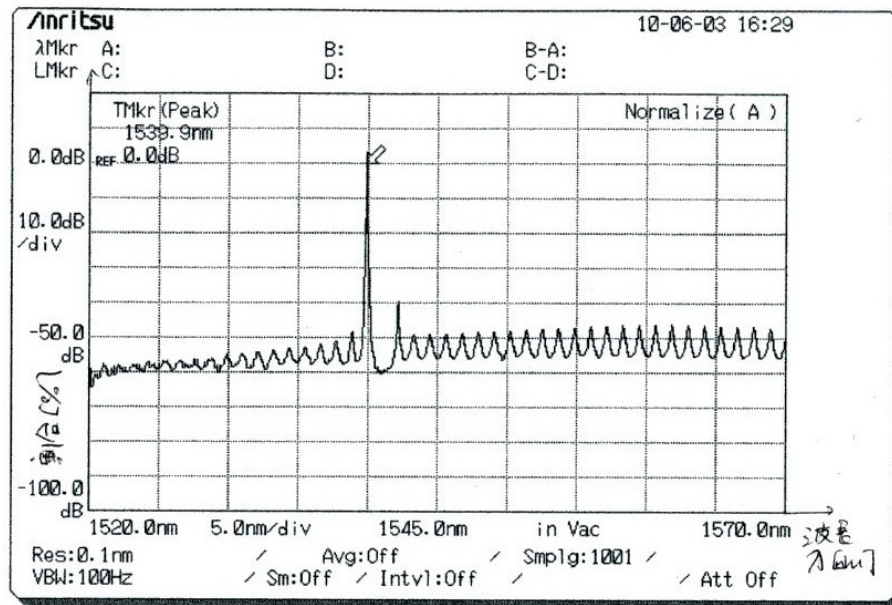


8) 多縦モード発振スペクトル

図5 多縦モード発振時のスペクトル

表 3 各電流における発振ピーク波長 (DFB 半導体レーザ)

電源出力電流[mA]	発振ピーク波長[nm]
40	1539.92
38	1539.92
36	1539.88
34	1539.88
32	1539.84
30	1539.84
28	1539.84
26	1539.80
24	1539.80
22	1539.76
20	1539.76
18	1539.76
16	1539.72
14	1539.72
12	1539.76
10	1542.24



9) DFB半導体レーザ スペクトル

図 6 DFB 半導体レーザ・単一縦モード発振時スペクトル

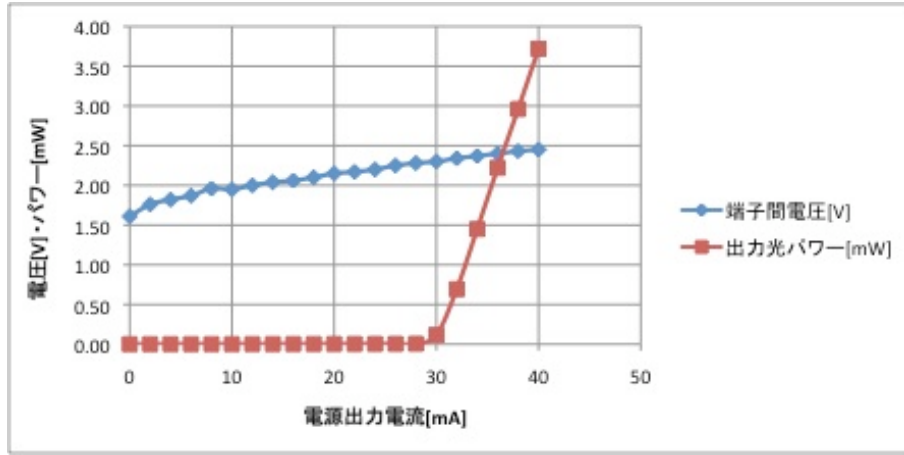


図 7 電源出力電流と端子間電圧・光パワーの関係

層に平行な方向には狭く、垂直な方向には広がる。よって遠視野像の縦横幅が異なって観察されたと考えられる。

- (2) 省略
- (3) グラフより、光の強度が極小となる位置を $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ とし、ピークからの時間幅を測ったところ、 $m=1$ のとき $4.64\mu\text{s}$ であった。これを CCD イメージセンサ上のスケールに換算する式 $11\mu\text{s}=100\mu\text{m}$ を使って変換すると、暗転位置は $4.22 \times 10^{-5}\text{m}$ となった。

理論値は

$$I(X) = d^2 \left(\text{sinc} \frac{\pi d X}{\lambda L} \right)^2 \quad (2)$$

が極小値をとる時の X の値なので、 $X=m\lambda L/d$ である。 $m=1$ 、 $\lambda = 6.78 \times 10^{-7}\text{m}$ 、 $L=0.1\text{m}$ 、 $d=2.0 \times 10^{-4}\text{m}$ を代入すると $3.39 \times 10^{-4}\text{m}$ となり、実験値とオーダーが 1 つずれている。 $m=2$ の時も同様に実験値を測ると $7.88 \times 10^{-5}\text{m}$ であるが、理論値は $6.7 \times 10^{-4}\text{m}$ となりオーダーが 1 つずれている。原因として計測誤差が考えられる。

回折格子を通過した入射光は、0 次の回折波である透過光のほか、スリットを通過したことによって光軸からずれた 1 次の回折光、2 次の回折光…に分解される。この伝搬により波面と光強度分布に変化が生じ、光波面上の 2 次波源が発する微小な波動によって新たな波面が形成され、さらに強度分布が変化する。このようにして光の強度分布に周期的な変化が起こり、回折現象として観察される。

- (4) 実験 (5) の結果をグラフにまとめたものが図 7 である。これよりしきい値電流は 32mA だと推測される。さらにしきい値を超えたあとの線形な区間のみを抜き出しグラフ化したものが図 8 である。近似直線の傾きは $\frac{dP}{dI} = 0.378$ となった。外部微分量子効率 η_d は

$$\eta_d = \frac{\frac{dP}{dI}}{\frac{h\nu}{e}} \quad (3)$$

で表されるが、平行化に用いた対物レンズでレーザ光が 90% に減衰していると仮定すると、実際の光出力パワー P は観測値の $\frac{10}{9}$ 倍である。 $c = \nu\lambda$ の関係より周波数は

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{6.78 \times 10^{-7}} = 4.42 \times 10^{14} [\text{Hz}] \quad (4)$$

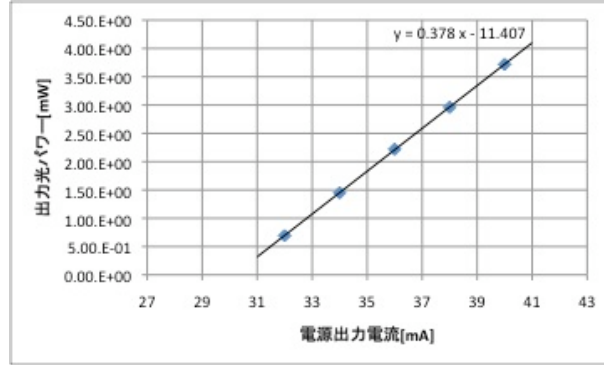


図 8 電源出力電流と端子間電圧・光パワーの関係（線形区間）

となるから、式 (3) に代入して、

$$\eta_d = 0.378 \times \frac{10}{9} \times \frac{1.60 \times 10^{-19}}{6.62 \times 10^{-34} \times 4.42 \times 10^{14}} = 0.230 \quad (5)$$

と求められる。

- (5) 入力結合効率が 100% にならない原因として、レーザから出た入射光が全て光ファイバーのコアに入射せず、入射前にいくらか反射されていることが考えられる。実験では 1 時間以上かけて調整を試みたが、位置合わせや光軸合わせが不十分なことや、レンズで絞ったスポットサイズと光ファイバの導波モードサイズがあっていないことが原因でレーザ光が 100% コアに入射するようにはできていないと推測される。またレーザ出力 3.66mW の値は時間によって若干変動しており、計測誤差を含むと考えられるので、その影響もあると考えられる。

結合効率を上げるためにはさらに時間をかけて光の入射位置を調節し、入射光の電磁界分布と光ファイバー内の導波モード分布を一致させる必要があると考えられる。

- (6) 図 7 や図 8 のようにレーザの注入電流を変化させるとそれに比例して出力光パワーを制御できる。そのため、注入電流に小信号を重畳すれば光パワーを直接変調することができる。その原理を図 9 に示す。注入電流を時間的に変化しない成分と小信号成分に分けて表すと

$$I(t) = I_0 + \delta I(t) \quad (6)$$

となる。 I_0 の時の出力光パワーを P_0 とすれば、小信号成分を与えた時の光パワーもその分の変位 $\delta P(t)$ を伴って

$$P(t) = P_0 + \delta P(t) \quad (7)$$

となって観察される。 $\delta I(t)$ に適当な正弦波や方形波を入力すれば、そのままの形がパワーとなって $\delta P(t)$ に現れ、情報を伝送することができる。

- (7) 実験 (8) の発振ピーク波長の変化をグラフにまとめたものが図 10 である。これより縦モード間隔 $\Delta\lambda$ は $678.4[\text{nm}] - 676.6[\text{nm}] = 1.8[\text{nm}]$ となる。両端の波長 $\lambda_1, \lambda_2 (> \lambda_1)$ は、 $\lambda_1 = 676.6[\text{nm}]$ 、 $\lambda_2 = 678.4[\text{nm}]$ なので、周波数に変換するとそれぞれ

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3.000 \times 10^8}{6.766 \times 10^{-7}} = 4.434 \times 10^{14} [\text{Hz}] \quad (8)$$

図 9 半導体レーザの直接変調の原理

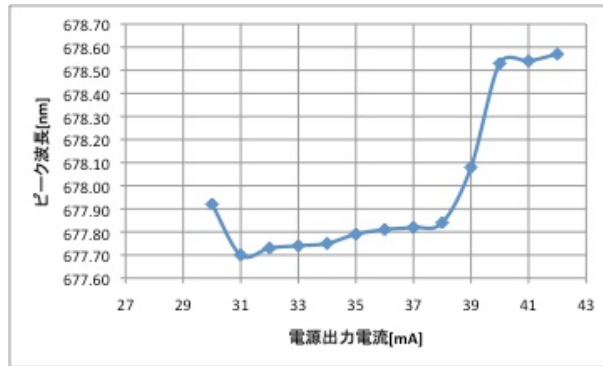


図 10 発振ピーク波長の注入電流依存性

$$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3.000 \times 10^8}{6.784 \times 10^{-7}} = 4.422 \times 10^{14} [Hz] \quad (9)$$

となる。これを (10) 式に代入して共振器長 L を求めると

$$\Delta f = \frac{c}{2N_g L} \quad (10)$$

$$L = \frac{3.000 \times 10^8}{2 \times 4.0 \times (4.434 \times 10^{14} - 4.422 \times 10^{14})} = 3.125 \times 10^{-5} [m] = 31.25 [\mu m] \quad (11)$$

と求められる。

シフトジャンプが現れる原因としては、レーザに電流が流れて高温になり、原子の格子振動が大きくなることでバンドギャップエネルギーが減少し、誘導放出で生じる光の波長が大きくなったことが考えられる。ピーク波長は

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (12)$$

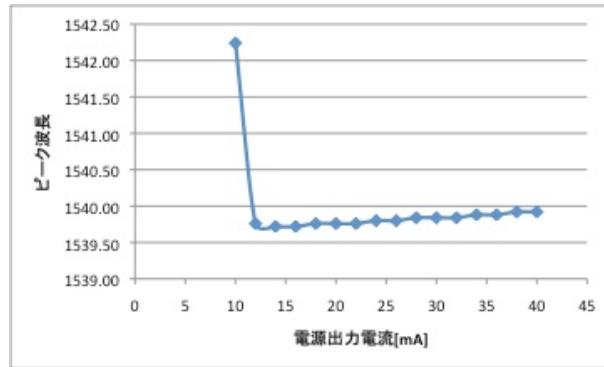


図 11 DFB 半導体レーザ・発振ピーク波長の注入電流依存性

で表されるようにバンドギャップエネルギー E_g に反比例するため、 E_g が小さくなると光のピーク波長 λ は大きくなると推測される。

また、温度が上がると物質の熱膨張により光の吸収が盛んになって物質中を進む光の速度が遅くなり、屈折率が上がる。さらに屈折率は誘電率にも依存しているため、誘電性が顕著な物質ではさらに屈折率が上がり、ピーク波長が増加したと考えられる。

- (8) 実験 (9) の発振ピーク波長の変化をグラフにまとめたものが図 11 である。これを図 10 のファブリペロ型半導体レーザと比べると、DFB 半導体レーザでは注入電流が大きく変化しても発振ピーク波長は一定しているのに対し、ファブリペロ型半導体レーザは注入電流によってピーク波長に変化が生じやすく、単一縦モード発振できる電流範囲も狭い。具体的に見ると、前者は 12mA から 40mA までの間にピーク波長は 0.16nm 変化しているが、後者は 31mA から 42mA までの間に 0.87nm 変化し、なおかつ波長のバラツキが大きい。よって DFB 半導体レーザの方が安定して特定の波長の光を出すことができると言える。

7 結論

1. 半導体レーザは n・p 型半導体のクラッド層とその間に挟まれた活性層の中で起こる誘導放出で生じた光子が共振器内で強められて発振することで動作する。共振器の構造を工夫することでより強い出力を持つ半導体レーザも製造されている。
2. レーザ光はコヒーレント光の一種であり、回折現象が観察される。
3. 半導体レーザは注入電流がしきい値を超えるまでは動作せず、超えると電流の増加に比例して出力光パワーが増加する。これを利用したのが直接変調であり、光ファイバなどの光通信などに応用される。
4. 半導体レーザは注入電流によって出力ピーク波長が変化することがあるので注意が必要である。

8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 5 人と、丁寧に指導して下さいった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

9 参考文献

- 実験テキスト「半導体レーザの動作とコヒーレント光の諸特性」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第2版第1刷 第2編
- 「先端光エレクトロニクスシリーズ2 半導体レーザの基礎」栖原敏明著 共立出版 初版第1刷
- 「光エレクトロニクスの基礎」多田邦雄・神谷武志共訳 丸善
- 「電子物性入門」浜口智尋著 丸善株式会社 第18刷
- 「 \LaTeX 2_ε 美文書作成入門 改訂第4版」奥村晴彦著 技術評論社 第4版第6刷

以上