

磁界による GaAlAs レーザダイオードの発振波長シフト

正員 佐藤 孝[†] 准員 川島 英俊[†] 准員 中村 利男[†]
 正員 大河 正志[†] 正員 丸山 武男[†] 正員 榛葉 實[†]

Oscillation Wavelength Shift of GaAlAs Laser diodes in a Magnetic Field

Takashi SATO[†], Member, Hidetoshi KAWASHIMA[†],
 Toshio NAKAMURA[†], Associate Members, Masashi OHKAWA[†],
 Takeo MARUYAMA[†] and Minoru SHIMBA, Members

あらまし 半導体レーザの発振波長が、磁界を印加することでシフトすることは半導体レーザの開発当初から知られている。しかしそのほとんどは、極低温・強磁界の下での研究であった。そこで、近年開発されてきた室温で連続発振するいくつかの半導体レーザを用いて実験を行ったところ、半導体レーザの内部構造により波長シフトの特性が大きく異なることが明らかになり、また磁界の方向によって、発振波長がシフトする場合としない場合があることがわかった。従来の極低温・強磁界の実験条件では、主としてランダウ準位によりその波長シフトは説明されてきたが、今回我々が用いた室温・比較的弱磁界の条件においてはランダウ準位は形成されず、従来の理論では今回の波長シフトは説明できない。ここでは、現在までに得られた各種構造の GaAlAs レーザダイオードによる実験結果について述べると共に、波長シフトの機構とこの波長シフトを用いた波長制御について検討している。

キーワード 半導体レーザ, GaAlAs レーザダイオード, 内部構造, 磁界, 波長シフト

1. ま え が き

半導体レーザの研究が開始された 1960 年代前半から、半導体レーザの発振波長が、注入電流、レーザの温度、圧力や磁界により変化することが知られている。このうち注入電流の変化で、半導体レーザは高速に周波数変調が可能であり、将来のコヒーレント光通信の分野で重要な役割を果たすと期待されている。これまで注入電流による波長制御も行われてきたが、その制御できる波長範囲に制限がある。また注入電流は波長を変化させると同時にレーザの出力の変化をもたらす、目的によっては注入電流以外の波長制御方法が必要となり、半導体の組成、内部構造、レーザの温度や外部光学系による制御が研究されてきた。

近年盛んに研究されている固体レーザ励起用光源と

しての半導体レーザの利用は、半導体レーザの発振波長のモードジャンプ特性のため、レーザの温度や注入電流の制御だけでは最も効率の良い波長での励起が必ずしも実現できておらず、レーザの温度や注入電流以外の波長制御がここでも必要である。

一方、圧力や磁界による波長シフトは現在までのところ、ほとんど半導体レーザの物性的な側面の研究にのみ用いられてきた。特に磁界による波長シフトの研究は、現在半導体レーザの主流となっている注入形の半導体レーザ^{(1)~(4)}とスピンドリフ・ラマンレーザ^{(5),(6)}について行われてきているが、その研究はこれまで極低温に限定され^{(1)~(5)}、磁界も非常に強い場合がほとんどであった^{(3)~(5)}。主としてこれは、半導体レーザが極低温でないと発振しなかった半導体レーザの開発の初期にこれらの研究が行われ、またこの波長シフトが小さく、強磁界の下でないと観測できなかったからだと思われる。そしてこれら物性的研究終了後も、外部の光により励起されるスピンドリフ・ラマンレーザで

[†] 新潟大学工学部電気電子工学科, 新潟市
 Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21
 Japan

は分光学への応用がなされているが⁽⁶⁾、注入形の半導体レーザでの応用研究は我々の知る限りあまり行われていない。従って近年のさまざまな組成、内部構造の半導体レーザの、発振波長の磁界による制御・応用を研究した例は、量子井戸構造レーザの磁界中の波長特性が量子細線構造を検討する目的で研究されているだけである⁽⁴⁾。

そこで我々は、近年開発されて常温で連続発振を実現しているさまざまな内部構造をもつファブリーペロー共振器形の半導体レーザを用いて、室温で波長シフトの観測の実験を行い、この種の実験としては比較的弱い磁界である磁束密度 1.4 T で最大 0.01 nm の波長シフトを観測した。ここではこの観測された磁界による波長シフトの実験結果と、波長シフトの機構ならびに波長シフトを利用した半導体レーザの発振波長の制御の可能性について検討したので報告する。

2. 磁界による波長シフト

2.1 実験方法と実験条件

図 1 に実験系を示す。市販の半導体レーザは磁性体の保護キャップで覆われているので、その保護キャップを外して使用した。また今回用いる電磁石の磁極間隔は 7 mm であるので、それ以下となるように半導体レーザのパッケージ部分を切断して小さくし、磁極間に固定して実験を行った。半導体レーザからのレーザ光は光ファイバを使ってモノクロメータに導き、その出力光をフォトマルによって受光した。この実験ではレーザの動作条件を一定にするため、レーザ温度が一

定である必要がある。そこで、レーザ温度をサーミスタ素子により検出し、温度制御回路によってレーザ温度の変動を 0.01°C 以下に制御した。更に、磁界を印加するためのコイルの発熱による温度上昇も問題となるので、半導体レーザとコイルを内部に含むように発泡スチロールの恒温槽を作製し、その内部の温度変動を 1°C 以内になるように制御した。

応用を念頭に置き、室温での波長シフトを研究対象にしたため、波長シフトは非常に小さくなることが予想された。そのため、本研究の初期には観測方法として Rb 原子の吸収線を用いて、大きな波長分解能をもった観測系を構成して実験を行い、波長シフトを観測していた⁽⁷⁾。ところがこの方法では、半導体レーザの特性がわずかに変化すると、発振波長を吸収線に同調させるための注入電流やレーザ温度などの動作条件が変化するため、定量的な波長シフトの測定が困難であった。また得られた波長シフトは当初予想していたものより大きく、半導体レーザの構造、組成などにより異なるが、磁束密度 1.4 T で最大 0.01 nm 程度シフトすることもあり、分解能の高い通常のモノクロメータならば観測可能であることがわかった⁽⁸⁾。

今回用いたモノクロメータの分解能は 0.02 nm であり、波長の再現性は 5×10^{-3} nm まで確認できている。用いた半導体レーザが単一横モードであるときには、分解能が 0.02 nm でも十分正確に発振波長を読み取ることができる。しかし、横モードが単一でない場合には波長の読取り精度が問題となっている。実験方法としては、(1)レーザの注入電流を固定し、モノクロメータの回折格子を掃引する方法と、逆に(2)回折格子を固定し、レーザの注入電流を掃引する方法の二つの方法があり、今回の実験では、主として実験方法(2)を用いて、注入電流を掃引したときのフォトマル出力をレコーダチャート紙上で 1 mm 以下の精度で読み取っている。後述する半導体レーザの電流-波長特性の傾きを用いると、電流の誤差から波長の誤差を求められるので、レコーダチャート紙上で 1 mm の誤差があるとして計算すると、実験で用いたレコーダの感度から、この場合の電流誤差は 0.05 mA であり、波長誤差は約 10^{-4} nm となり、モノクロメータの分解能の約 1/20 まで読み取れることになる。実験に使用した半導体レーザの波長(約 800 nm)から周波数に換算して周波数誤差を求めると約 500 MHz となる。予想される波長シフトの大きさは、この波長の読取り精度よりは十分大きいですが、モノクロメータの波長再現性の程度であり、十分とは言えない。し

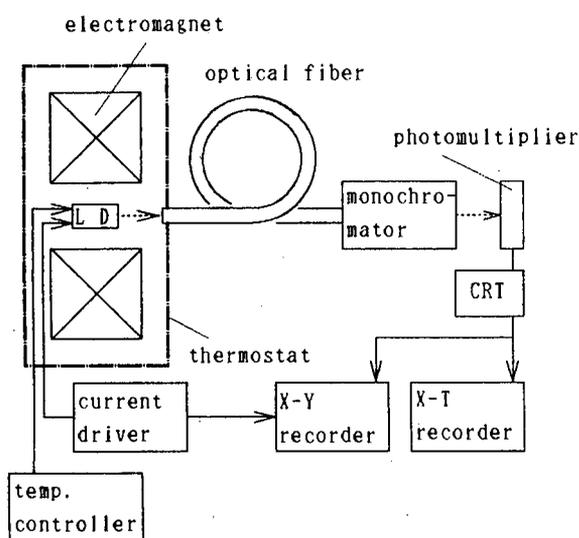


図1 実験系
Fig. 1 Experimental setup.

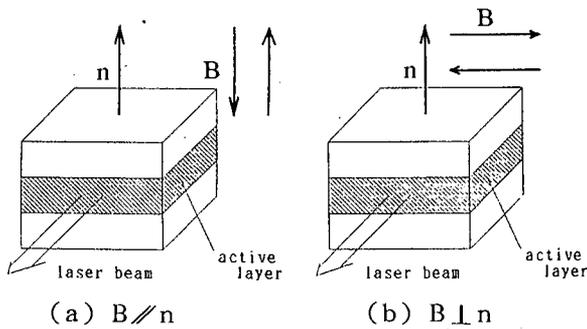


図2 磁界の方向と半導体レーザの方向の関係
Fig. 2 Definition of the direction of a magnetic field.

しかし、前述した原子の吸収線を用いる方法では行えなかった波長域での実験が行え、また実験中に半導体レーザの特性変化があっても、ほぼ同じ条件で実験できる。この実験中の半導体レーザの特性変化に関しては、半導体レーザの初期劣化が一つの大きな原因と考えられる。そこで今回の実験で試料として用いる半導体レーザは、あらかじめ100~300時間程動作させたものを用いている。このとき、ほとんどのレーザは通電後数十時間たつと同じ温度、同じ注入電流の条件で発振モードが変化した。しかし、更に時間が経過すると、このようなモード変化は見られなくなり安定になった。このため、実験中の特性変化はある程度は押さえられていると考えている。

これまで行ってきた実験の結果から、磁界の方向と半導体レーザの方向との関係も重要であることがわかっている^{(7),(8)}。そのため、次に述べる方向の組合せで実験を行った。一つは、図2(a)に示すように磁束密度ベクトル B と半導体レーザの積層面の法線方向 n とが平行である場合 ($B // n$)、今一つは、図2(b)に示すように磁束密度ベクトル B と半導体レーザの積層面の法線方向 n とが垂直である場合 ($B \perp n$) である。

実験では電磁石のコイルに15 Aの電流を流し、1.4 Tの磁束密度の磁界を印加した場合としない場合の、同じ波長に対する注入電流を図3のようにプロットし、その結果を直線で近似し、それぞれの磁界に対する発振モードの電流-波長特性を求めた。そのうえで同じ注入電流で発振するであろう波長の差を求めてその波長シフト量とした。

2.2 実験結果

我々はこれまで、ファブリーペロー共振器構造をもつ発振波長800 nm帯の5種類のGaAlAsレーザダイオードである、IS (Inner Stripe) 形⁽⁹⁾、TJS (Transverse Junction Stripe) 形^{(10),(11)}、TAPS

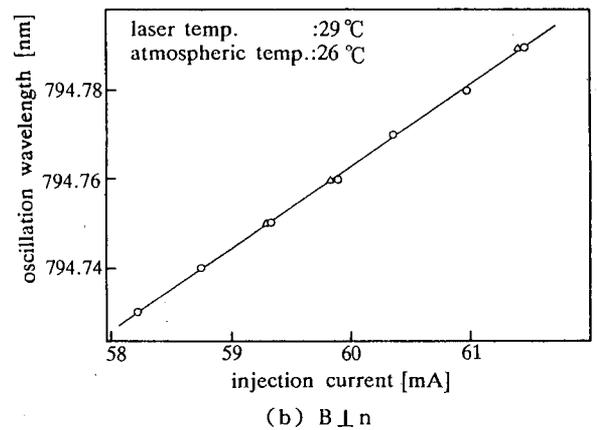
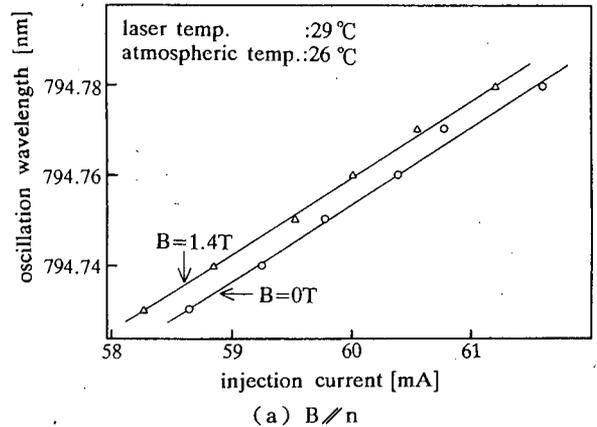
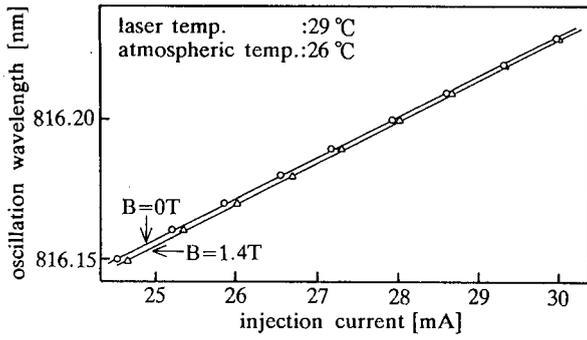


図3 IS形レーザダイオードの電流-波長特性(試料1)
Fig. 3 Current vs. wavelength characteristics of IS type laser diode (sample No. 1).

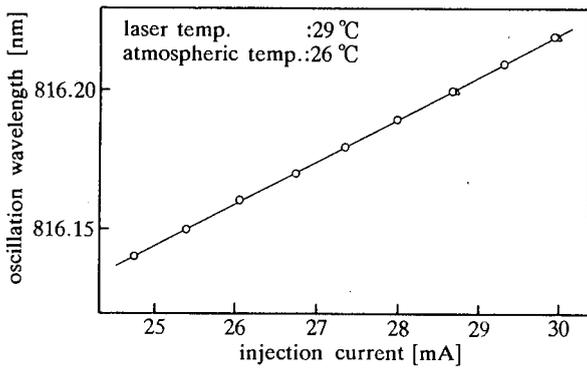
(Tapered Stripe) 形⁽¹⁰⁾、VSIS (V-Grooved Substrate Inner Stripe) 形⁽¹⁰⁾およびCSP (Channelled Substrate Planar) 形^{(10),(12)}を用いて波長シフトの実験を行ってきた。その結果を以下に述べる。

IS形の半導体レーザを用いた場合の電流-波長特性の一例を図3に示す。図3のIS形レーザ(試料1)では、(a) $B // n$ で長波長側にシフトが観測され、この試料のシフト量は 5.8×10^{-3} nmであった。(b) $B \perp n$ では波長シフトはほとんど観測されていない。

TJS形の半導体レーザを用いた場合の電流-波長特性の例を図4と図5に示す。観測された波長シフトは個体差が大きく、後述するように長短どちらの波長のシフトも観測されている。図4のTJS形レーザ(試料5)では(a) $B // n$ で短波長側に波長シフトが観測され、この試料のシフト量は -2.5×10^{-3} nmであった。(b) $B \perp n$ では、シフトは長波長側にほんのわずかが観測され、そのシフト量は 9×10^{-4} nmであった。図5のTJS形レーザ(試料2)では、磁界を印加した場合に、印加しない

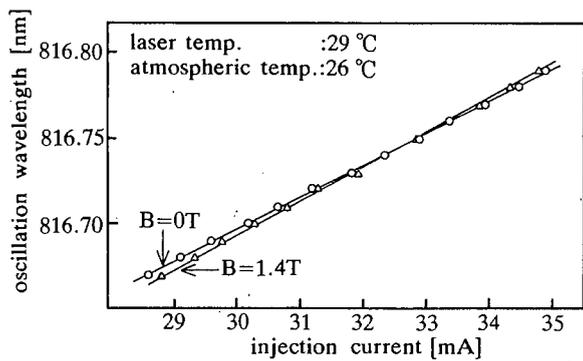


(a) $B // n$

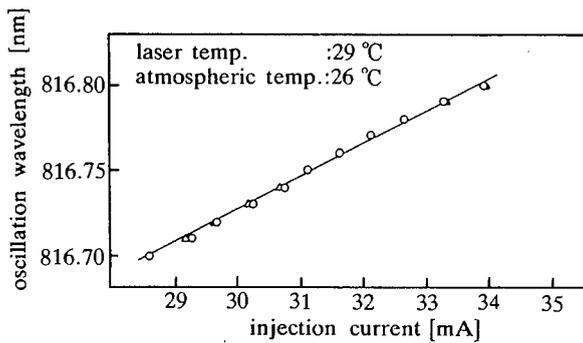


(b) $B \perp n$

図4 TJS形レーザダイオードの電流-波長特性(試料5)
Fig. 4 Current vs. wavelength characteristics of TJS type laser diode (sample No. 5).



(a) $B // n$



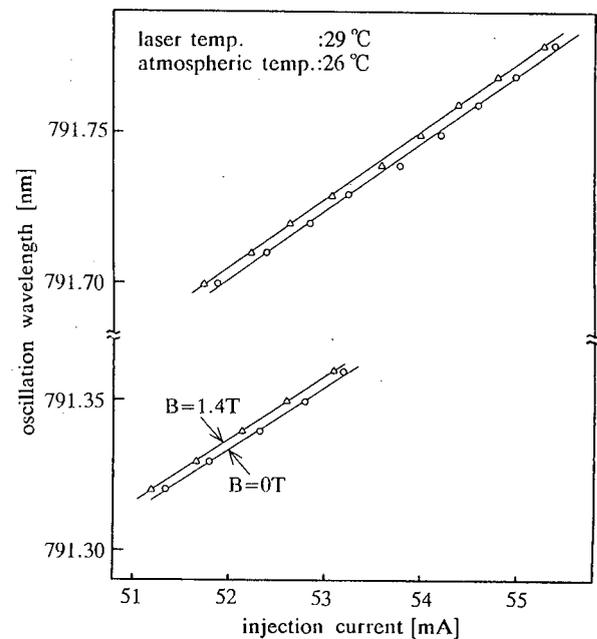
(b) $B \perp n$

図5 TJS形レーザダイオードの電流-波長特性(試料2)
Fig. 5 Current vs. wavelength characteristics of TJS type laser diode (sample No. 2).

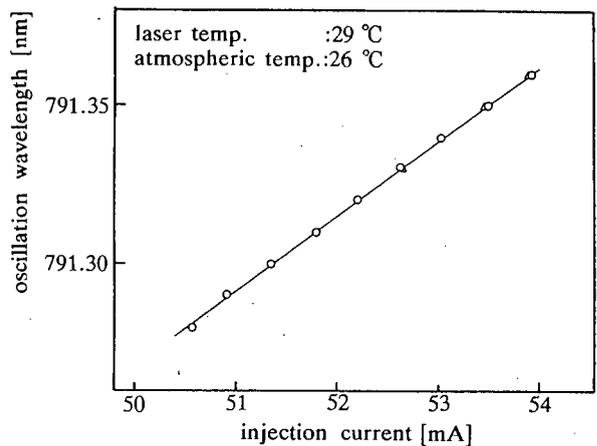
場合と比べてモードの傾きが大きく変化するのが観測された。つまり波長シフト量は注入される電流値により異なり、低電流側から電流を大きくしていくとこの試料の場合、約 $-3.3 \times 10^{-3} \sim 2.6 \times 10^{-3}$ nm 変化した。

TAPS形の半導体レーザを用いた場合の電流-波長特性の一例を図6に示す。このレーザ(試料1)は縦多モードのレーザであるが、IS形と同様に(a) $B // n$ で長波長側にシフトが観測され、この試料のシフト量は 3.2×10^{-3} nmであった。(b) $B \perp n$ ではほとんどシフトは観測されていない。この傾向は、どのモードでも同様に観測されている。

VSIS形の半導体レーザを用いた場合の光出力-波長



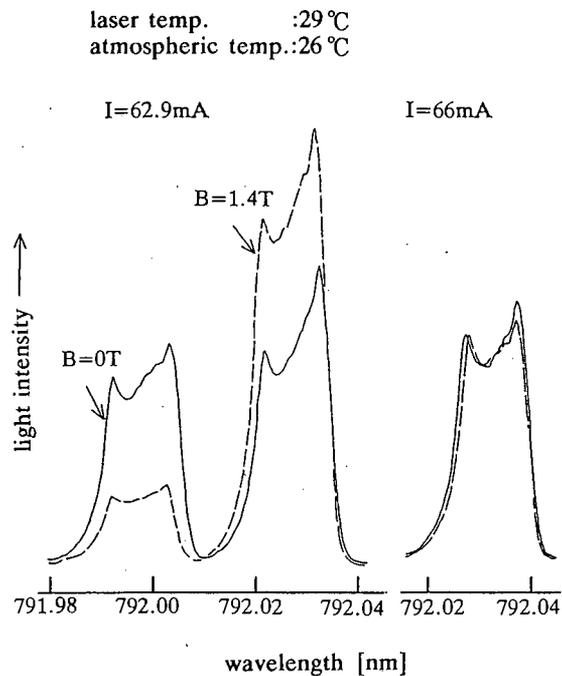
(a) $B // n$



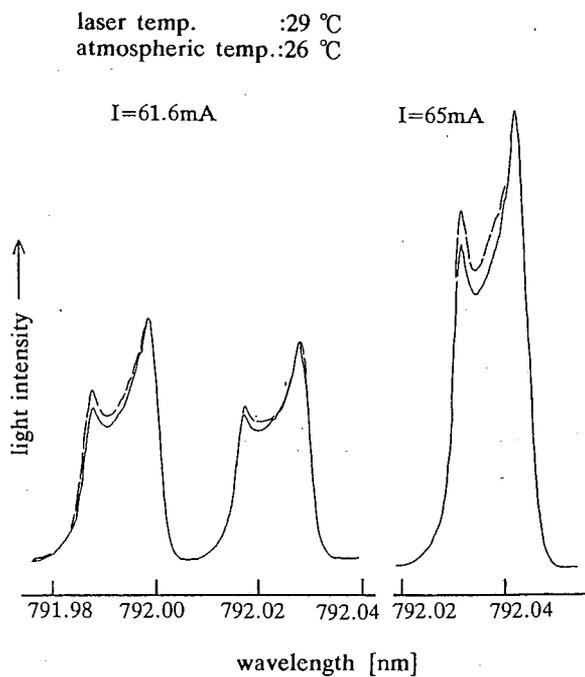
(b) $B \perp n$

図6 TAPS形レーザダイオードの電流-波長特性(試料1)
Fig. 6 Current vs. wavelength characteristics of TAPS type laser diode (sample No. 1).

特性と電流-波長特性を図7と図8に示す。VSIS形は小さい動作電流では、縦横とも多モード発振で、この動作状態では試料1の図7(a) $B \parallel n$ でモードによって長短どちらの波長側へもシフトが起こり、同時にその横モード間隔が狭くなることが観測され、最も出力の



(a) $B \parallel n$

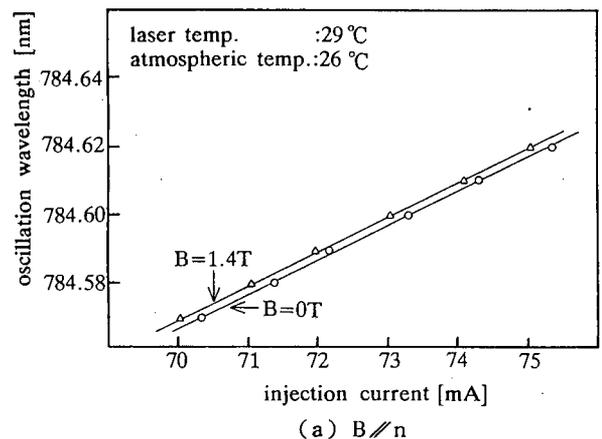


(b) $B \perp n$

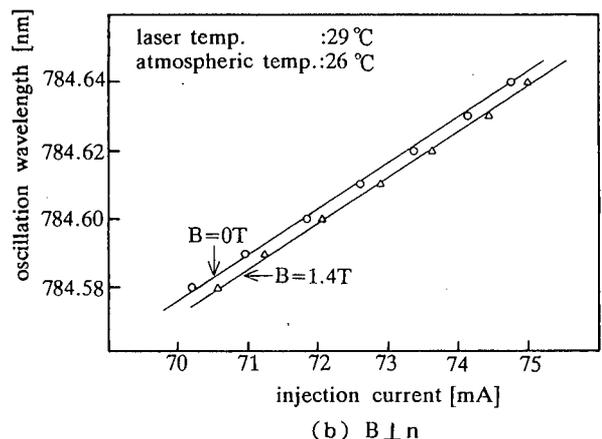
図7 VSIS形レーザダイオードの波長-光強度特性(試料1)
Fig.7 wavelength vs. optical output characteristics of VSIS type laser diode (sample No. 1).

大きなモードのシフトは短波長側で、そのシフト量は -5×10^{-4} nm 程度であった。(b) $B \perp n$ では、そのシフトや横モードの変化は観測されていない。更に注入電流を大きくすると、単一モード発振状態となり、試料2の図8(a) $B \parallel n$ で長波長側にシフトが観測され、図8(b) $B \perp n$ では短波長側にシフトが観測された。そのシフト量は(a) $B \parallel n$ で 2.7×10^{-3} nm で、(b) $B \perp n$ では -3.3×10^{-3} nm であった。また、これまでの実験から CSP 形では、 $B \parallel n$ 、 $B \perp n$ とも波長がシフトしないことが確認されている⁽⁷⁾。

以上の結果をまとめると表1のようになる。表1は、個々の試料レーザダイオードに対して繰り返し実験を行い、同時に得られた磁束密度 0 T と 1.4 T に対する電流-波長特性を表す直線のシフトを、幾つか平均したものである。電流シフト (ΔI) は波長を固定して注入電流を掃引した実験から求められた電流のシフト量であり、波長シフト ($\Delta \lambda$) は既に述べたように電流-波長特性のグラフで、同じ電流値に対する波長を比較したときの波



(a) $B \parallel n$



(b) $B \perp n$

図8 VSIS形レーザダイオードの電流-波長特性(試料2)
Fig.8 Current vs. wavelength characteristics of VSIS type laser diode (sample No. 2).

表1 各種半導体レーザの磁界による特性変化

レーザの種類	IS (No. 1)		IS (No. 2)		TJS (No. 1)		TJS (No. 2)		TJS (No. 3)	
	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$
電流シフト [mA] ($\Delta I = I_{B=1.4T} - I_{B=0T}$)	-0.355	-0.027	-0.189	-0.011	-0.017	-0.145	0.175~ -0.200	-0.100~ 0.015	0.088	0.016
波長シフト [nm] ($\Delta\lambda = \lambda_{B=1.4T} - \lambda_{B=0T}$)	0.0058	0.0005	0.0030	0.0001	0.0044	0.0035	-0.0033 ~-0.0026	0.0016~ -0.0003	-0.0015	-0.0003
周波数シフト [GHz] ($\Delta f = f_{B=1.4T} - f_{B=0T}$)	-2.76	-0.21	-1.43	-0.03	-1.88	-1.49	1.41~ -1.11	0.72~ -0.13	0.64	0.13
レーザの種類	TJS (No. 5)		TAPS (No. 1)		TAPS (No. 2)		VSIS (No. 2)		VSIS (No. 3)	
磁界の方向	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$	$B//n$	$B\perp n$
電流シフト [mA] ($\Delta I = I_{B=1.4T} - I_{B=0T}$)	0.165	-0.065	-0.151	-0.029	-0.097	-0.022	-0.265	0.256	-0.624	0.032
波長シフト [nm] ($\Delta\lambda = \lambda_{B=1.4T} - \lambda_{B=0T}$)	-0.0025	0.0009	0.0032	0.0002	0.0021	0.0005	0.0027	-0.0033	0.0058	-0.0004
周波数シフト [GHz] ($\Delta f = f_{B=1.4T} - f_{B=0T}$)	1.13	-0.41	-1.53	-0.10	-1.00	-0.24	-1.32	1.61	-2.80	0.19

長の差である。また、これを周波数で表現したものをここで周波数シフト (Δf) とする。従って一例が示されているだけの図中のシフトと表に示しているシフトは必ずしも一致していない。TJS形以外では、試料により若干の量的な違いはあるが、シフトの特性はほぼ同じであった。しかしTJS形では、試料によりシフトの特性は大きく異なっている。多くのものは、他のレーザと同様に $B//n$ で波長がシフトし、 $B\perp n$ ではシフトは小さいが、試料によっては $B//n$ で長波長側にシフトするものや、短波長側にシフトするもの、図5のように傾きが変わるものがある。 $B\perp n$ でも他のレーザに比べると、大きなシフトが観測されており、 $B//n$ で長波長側にシフトする試料1では、 $B\perp n$ でも大きく長波長側へシフトしている。

これまでの実験で、安定な単一モードで発振している条件では、波長シフト ($\Delta\lambda$) すなわち周波数シフト (Δf) の磁界依存性は、ほぼ $\Delta\lambda \propto B^2$ であった^{(7),(8)}。モードジャンプを起こす条件のところや、モード競合を起こしているところでは、磁界を印加するとモードジャンプ点の位置が変化したり⁽⁸⁾、図7(a)に示すように競合しているモード間のバランスが一方のモードに偏ったりする効果がある。そのため、このような条件では $\Delta\lambda \propto B^2$ の関係は成立していない⁽⁸⁾。また、今回の実験で波長シフトが観測された4種類のレーザでは、磁界の向きを反転させても結果はほぼ同一であった。

3. 考 察

極低温・強磁界の下での研究で観測されている短波長側へのシフトは、磁界により半導体のエネルギーバンド中に形成されるランダウ準位を用いて、うまく説明されている^{(3)~(5)}。また磁界により発振縦モードが変化することにより波長がシフトするという機構も報告されている^{(1)~(3)}。しかし、今回の室温・比較的弱磁界という実験条件では、ランダウ準位は形成されず、また主として長波長側へシフトしている今回の実験結果を説明できない。更に、若干の不純物濃度差を除いて、ほぼ同様の組成のレーザダイオードの内部構造の相違による波長シフト特性の違い、例えばCSP形⁽¹²⁾では波長シフトが見られず、内部構造が他のレーザとは異なり、活性層に電流が横方向から注入されるTJS形⁽¹¹⁾が他のレーザと大きく異なる波長シフト特性をもっていることを説明することもできない。そこで、現在、組成の違いよりも内部構造の相違に注目して検討している。磁界の方向と電流の方向との関係が異なると電流に働く力の方向と大きさが異なり、活性層内を通る電流が磁界の方向によってはその通路を大きく変えることが考えられる。そこで我々は、内部構造によってはこの電流の通路の変化が活性層内での電流密度を大きく変化させ、そのため活性層内のキャリア分布と温度分布が変化し、発振波長がシフトするという仮説を立てている。特に $B//n$ の場合にはTJS形を除くと注入

電流 I の方向と磁界 B の方向の関係は $B \parallel I$ となり、電流の拡散が抑えられる方向に働いているので $B \perp n$ よりも電流密度が大きくなって活性層付近の温度が上昇し、通常の電流-波長特性または温度-波長特性により長波長側へシフトするのではないかと考えている。それを検討すべく、TJS 形と同様に内部構造に横方向の非対称性のある TS 形 (Terraced Substrate)⁽⁹⁾ のレーザを用いて実験を行い、内部構造の対称性との関係を研究中である。

しかし、波長制御という観点からは、波長シフトの機構がはっきりしなくても実用化の追求は可能である。現在のところ、1.4 T の磁束密度で最大約 0.01 nm の波長シフトが観測されているが、この値は、磁界を印加しないときのファブリーペロー形のレーザダイオードの平均的な縦モード間隔である 0.3 nm に比べると約 3% と小さい。しかし、波長シフト量はこれまでの実験で磁束密度の 2 乗に比例することが観測されており⁽⁷⁾、また、モードジャンプ点付近では磁界により大きく波長がシフトすることも観測されている⁽⁸⁾。従ってこの波長シフトは、磁束密度を大きくすることで現在安価に手に入る通常のファブリーペロー共振器形半導体レーザや開発途中の高出力半導体レーザの波長制御の一つの方法として実用可能となると期待できる。

今回、実験的には、まず半導体レーザの初期劣化を完全に起こさせるために、半導体レーザに 100~300 時間通電した後、半導体レーザを保護しているキャップならびにパッケージの多くの部分を取り除くことで磁界の損失を少なくし、レーザチップに印加して実験している。しかし半導体レーザが直接空気にさらされていることにより、実験中の半導体レーザの若干の特性変化が起こっているように思われる。

4. む す び

本研究では、室温で比較的弱磁界という条件で、磁界による半導体レーザの発振波長のシフトの測定を行った。この条件の下で、今回用いた CSP 形を除く以下の 4 種類のレーザダイオードで波長シフトは観測された。

IS 形では磁束密度 B とレーザダイオードの積層面の法線方向 n との関係が $B \parallel n$ のときに、磁束密度 1.4 T で 5.8×10^{-3} nm の波長シフトが得られた。また、TJS 形では 4.4×10^{-3} nm から -3.3×10^{-3} nm まで個々のレーザによりシフト量は大きく異なる結果が得られた。TAPS 形では 3.2×10^{-3} nm、VSIS 形では 2.7×10^{-3} nm の波長シフトが得られた。 $B \perp n$ では TJS 形の少数

の例と VSIS 形を除いて、多くの実験例では波長シフトは観測されなかった。 $B \parallel n$ で観測された波長シフトは当初の予想より大きく、温度や電流による波長制御と組み合わせると微妙な制御が可能であり、市販されている安価な半導体レーザや開発途中の高出力半導体レーザの発振波長制御の一つの方法として実用可能であると思われる。

極低温・強磁界での波長シフトの説明に用いられているランダウ準位は、室温・比較的弱磁界では形成されない。また波長シフトの方向も今回の波長シフトは主として長波長側であり、ランダウ準位による波長シフトは短波長側であるので、今回の波長シフトはランダウ準位では説明できないことがわかった。また、内部構造が他のレーザとは異なり、活性層に電流が横方向から注入される TJS 形⁽¹¹⁾は、他のレーザと異なる波長シフトの特性を示すことがわかった。そのため、電流の流れる通路の変化により活性層内のキャリア分布と温度分布が変化し、その結果発振波長がシフトするという仮説を立てているが、まだはっきりと確認するには至っていない。そこで現在、TJS 形と同様に内部構造に横方向の非対称性のある TS 形⁽⁹⁾の半導体レーザを用いて内部構造の対称性との関係を研究中である。

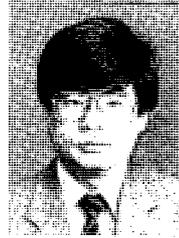
謝辞 本研究を進めるに当り、実験に御協力頂いた、本学卒業生、堀井篤宏君に感謝致します。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費、池谷科学技術振興財団ならびに村田学術振興財団の援助のもとに行われた。

文 献

- (1) Melngailis I. and Rediker R. H. : "Magnetically tunable cw InAs diode maser", Appl. Phys. Lett., 2, 11, pp. 202-204 (June 1963).
- (2) Melngailis I. and Rediker R. H. : "Properties of InAs Diode Masers", IEEE Trans. Electron Devices, ED-10, pp. 333-334 (Sept. 1963).
- (3) Galeener F. L., Melngailis I., Wright G. B. and Rediker R. H. : "Magnetic Properties of InAs Diode Electroluminescence", J. Appl. Phys., 36, 5, pp. 1574-1579 (May 1965).
- (4) Arakawa Y., Sakaki H., Nishioka M., Okamoto H. and Miura N. : "Spontaneous Emission Characteristics of Quantum Well Lasers in Strong Magnetic Fields—An Approach to Quantum-Well-Box Light Source—", Jpn. J. Appl. Phys., 22, 12, pp. L804-L806 (Dec. 1983).
- (5) Calawa A. R., Dimmock J. O., Harman T. C. and Melngailis I. : "Magnetic field dependence of laser emission in $Pb_{1-x}Sn_x$ Se diodes", Phys. Rev. Lett., 23, 1, pp. 7-10 (July 1969).
- (6) 宅間 宏 : "スピニング・ラマンレーザー研究の現状",

- 応用物理, 43, 10, pp. 1029-1034 (1974-10).
- (7) Sato T., Yashima S. and Shimba M.: "Frequency shift of a GaAlAs diode laser in a magnetic field", Electron. Lett., 22, 19, pp. 979-981 (Sept. 1986).
 - (8) Sato T., Sato S. and Shimba M.: "Frequency shift characteristics of a GaAlAs diode laser in a magnetic field", QELS'89, WDD38 (May 1989).
 - (9) 末松安晴, 伊賀健一: "光ファイバ通信入門", pp. 91-94, オーム社 (1982).
 - (10) Mroziejewicz B., Bugajski M. and Nakwaski W.: "Physics of semiconductor lasers", pp. 228-252, North-Holland, Amsterdam (1991).
 - (11) Namizaki H.: "Transverse-junction-stripe lasers with a GaAs p-n homojunction", IEEE J. Quantum Electron., QE-11, 7, pp. 427-431 (July 1975).
 - (12) Aiki K., Nakamura M., Kuroda T., Umeda J., Ito R., Chinone N. and Maeda M.: "Transverse mode stabilized $Al_xGa_{1-x}As$ injection lasers with channeled-substrate-planar structure", IEEE J. Quantum Electron., QE-14, 2, pp. 89-94 (Feb. 1978).
- (平成3年11月12日受付, 4年4月21日再受付)



大河 正志

昭59阪大・基礎工・電気卒, 平1同大学院博士課程了。同年新潟大・工・助手。光集積回路, 光計測, 光情報処理の研究に従事。工博。応用物理学会, レーザー学会各会員。



丸山 武男

昭40新潟大・工・電気卒。同年同大・工・助手。昭49同講師。昭52同助教授。平1同教授。現在に至る。プラズマ物理, 放電現象の基礎, 固体物性の研究に従事。工博。電気学会, 日本物理学会各会員。



榛葉 實

昭30早大・理工・通信卒。同年電電公社電気通信研究所入所。ミリ波導波管伝送, 海底同軸ケーブル, 準ミリ波アンテナ・伝搬等の研究に従事。昭58新潟大・工・教授。工博。電気学会, IEEE各会員。



佐藤 孝

昭51京大・工・電子卒。昭58同大学院博士課程了。新潟大・工・助手, 講師を経て, 現在, 新潟大・工・助教授。レーザによる粒子生成, 色素レーザおよび半導体レーザの周波数安定化の研究に従事。工博。電気学会, 日本物理学会, 応用物理学会, レーザー学会, IEEE各会員。



川島 英俊

平3新潟大・工・電気卒。現在同大学院修士課程在学中。磁界による半導体レーザの波長シフトの研究に従事。



中村 利男

平3新潟大・工・電気卒。現在同大学院修士課程在学中。磁界による半導体レーザの波長シフトの研究と半導体レーザの2次高調波の発生の研究に従事。