

位相変調を用いた 半導体レーザーのスペクトル線幅測定法

Spectral Linewidth Measurement of Semiconductor Laser Diodes By Phase Modulation Technique

森 正和†, 岩井 真人‡, 後藤 了祐‡
Masakazu MORI, Masato IWAI, and Ryosuke GOTO

Abstract : Methods to measure spectral linewidths of semiconductor laser diodes are investigated. Firstly, methods which realize carrier-suppressed phase modulation are experimented. Secondly, a method which utilizes a phase modulator with an ultrasonic transducer is developed. By combining a fiber loop mirror, the carrier component is suppressed by more than 20dB, and the lasing spectral component can be monitored up to 35dB or more. The method is of low cost and versatile to measure spectral linewidths of semiconductor laser diodes less than several MHz. The principle of the operation and characteristics are described in detail.

1. はじめに

近年、半導体レーザーの可干渉性は格段に向上し、光を電気信号と同様な波として利用する技術の進展が著しい。通信分野では、無線通信で使われている周波数や位相を利用する手法がそのまま光通信にも適用されるようになってきている。光波の可干渉性を利用する技術は、光通信の新時代を切り開きつつある。

筆者らは、光波の可干渉性を利用し、連続光を多縦モード発振のファブリ・ペロー型半導体レーザーに注入する「全光制御モード同期法」を提案して¹⁾、その実用化を進めている。本原理により、繰り返し周波数 100GHz 以上の光パルス列の発生や同期、分周、逡倍が可能である。この実用化を進める中で、半導体レーザーのスペクトル線幅を狭窄化するための外部共振器や、その制御方式を開発してきた²⁻⁵⁾。

他方、光パルスの同期や分周、逡倍を実現するためには、複数個の半導体レーザーのスペクトル線幅を常時モニタしてフィードバック制御する必要がある。そこで、簡易で、設定自由度が大きく、且つ低コストのスペクトル線幅モニタ法を開発していく必要がある。

半導体レーザーのスペクトル線幅測定法としては、音響光学効果を利用した周波数シフトを用いる手法が一般的である。この手法は精密な測定法として優れているが、システムの現場で使用するには不便である。また、コストの点でも改良を加える余地が残っている。

本研究では、スペクトル線幅が数 MHz 以下の場合について、小型・高コスト・並みの低コスト、かつ汎用性のあるスペクトル線幅測定法を開発することを目指した。

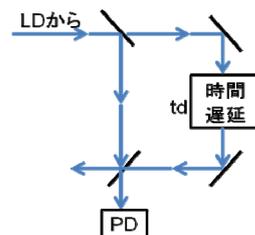
2. 発振スペクトル線幅測定法の形式

半導体レーザー(LD)のスペクトル線幅を決定する要因は、振幅雑音ではなく、位相雑音である。そのため、出力光を直接検波しても線幅は観測できず、干渉計を使って、位相雑音を振幅雑音に変換して測定する必要がある。

代表的なスペクトル線幅測定法は、図2.1に示す遅延自己ホモダイン法と遅延自己ヘテロダイン法である⁶⁻⁸⁾。

遅延自己ホモダイン法⁷⁾は Mach-Zehnder 型干渉計そのものの構造になっている。位相揺らぎが無ければ、一定割合の光が受光器(PD)側に抜けてくるが、位相揺らぎがあると、抜けてくる光の割合が揺らぐので、これを電気的なスペクトルアナライザで測定する。簡易な構成であるが、スペクトル線幅とは関係がない直流成分に雑音スペクトルが重なって現れる

遅延自己ホモダイン法



遅延自己ヘテロダイン法

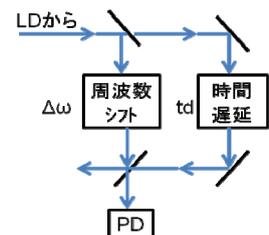


図 2.1 代表的なスペクトル線幅測定法

† 愛知工業大学大学院 研究工学科(豊田市)

‡ 富士通株式会社 フォトニクス事業本部(川崎市)

ため、両者を分離するのが困難であるという欠点がある。

遅延時間を t_d 、LD のスペクトル線幅を Δf とすると、大雑把には $t_d \Delta f \gg 1$ であれば、二つの光波間の位相差は、random walk による確率分布にしたがうとみなせる。一般の条件下でフォトダイオード PD の光電流の自己相関関数を計算し、観測されるスペクトルを求めると、二つのパラメータ $\phi_i = 2\pi t_d \Delta f$ と $\phi_c = 2\pi t_d f_c$ が関係していることが導かれる。ここで、 f_c は LD の発振周波数であり、 ϕ_i は二つの光波間の平均位相差を表す。 $\phi_i = 2\pi t_d \Delta f \geq 6$ であれば、Lorentz スペクトルに収束しているとみなすことができる。また、 $\phi_i \geq 6$ の場合には、 ϕ_i にはほとんど依存しないことが分かる⁹⁾。

遅延自己ヘテロダイン法の欠点を解消したのが遅延自己ヘテロダイン法⁸⁾である。遅延自己ヘテロダイン法の構成において、一方の光波の周波数を周波数シフト $f_m (= \Delta\omega/2\pi)$ だけシフトさせる。合波すると、PD 側に抜けてくる光パワーは差の周波数 f_m で変化する。これに位相ゆらぎによる変動が加え合わさるため、観測されるスペクトルは、周波数 f_m を中心として現れる。電気スペクトルアナライザによる測定が容易であるという特長がある。この方法では、雑音スペクトルの観測は容易であるが、変調周波数が固定されるなど、設定自由度が小さいという問題や、システムの現場での使用には適さないなどの問題がある。

3. Mach-Zehnder 型振幅変調器を用いる手法

遅延自己ヘテロダイン法では音響光学効果を利用した周波数シフトが広く用いられている。この場合には、あらかじめ設定した変調周波数に固定されることになる。そこで、Mach-Zehnder 型振幅変調器を用いて変調周波数を任意に設定できる手法の検討を行った。

3.1 構成

周波数シフトと同様な作用は、Mach-Zehnder 型振幅変調器の直流バイアスを出力光パワーが最小となる点に設定することによっても実現できる⁹⁾。

理想的な Mach-Zehnder 型振幅変調器の印加電圧と出力光の特性は図 3.1 のようになっており、半波長電圧 V/π で ON/OFF を繰り返す。これを電界振幅で見ると、光出力が 0 のところの左右では、電界振幅の位相が 180 度変化している。したがって、光出力が 0 のところにバイアスして、正弦波電圧を加えると、搬送波が抑圧された振幅変調をすることができる。電界振幅のスペクトルで表すと、入力光の成分は無く、その左右に位相が 180 度ずれたサイドバンド成分ができることになる。すなわち、

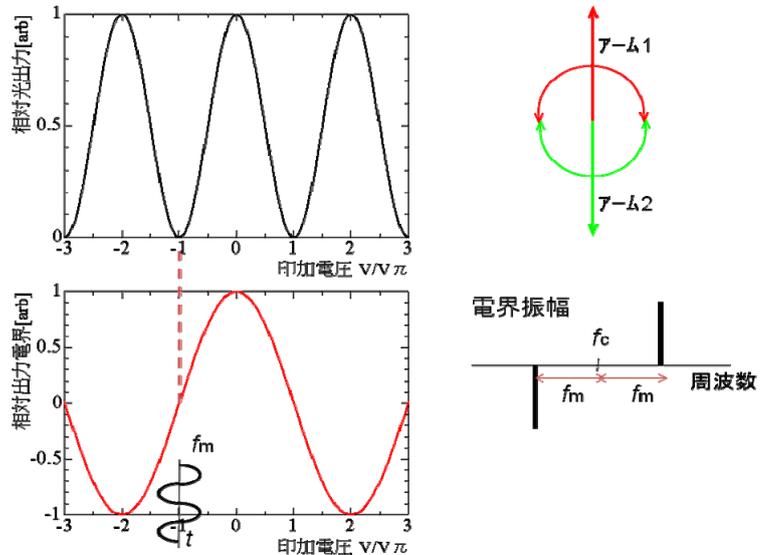


図 3.1 周波数シフトとして動作する Mach-Zehnder 干渉計

周波数シフト動作が実現できる。音響光学効果を利用した周波数シフトでは、一方のサイドバンド成分のみが出力ファイバに結合するように配置するが、図 3.1 の場合には両方のサイドバンドが出力される。この両方のサイドバンドがあると雑音のパワースペクトル密度を求めると、周波数シフトを用いる方式と同じ条件下で Lorentz スペクトルに収束することが分かる。この手法では、変調周波数 f_m を固定する必要はなく、Mach-Zehnder 型振幅変調器が動作する周波数範囲内で、GHz 領域までも任意に設定できるという利点がある。

3.2 実験結果

実験系を図 3.2 に示す。LD からの光を二つに分けて、一方を 5km ファイバに通し、もう一方を Mach-Zehnder 型振幅変調器に通した。それらを合波して、Ge-PIN PD で受けて増幅し、電気スペクトルアナライザで観測した。電界の方向を揃えるために、偏波制御器(PC)や定偏波ファイバの光部品(図中に赤で示した)を使用している¹⁰⁾。

使用した Mach-Zehnder 型振幅変調器の直流特性を図 3.3 に示す。半波長電圧 V/π は 3.5V であった。実験では -2V 近辺にバイアスして、周波数シフトとして用いた。

変調周波数 100MHz、変調信号レベル +11dBm で測定した

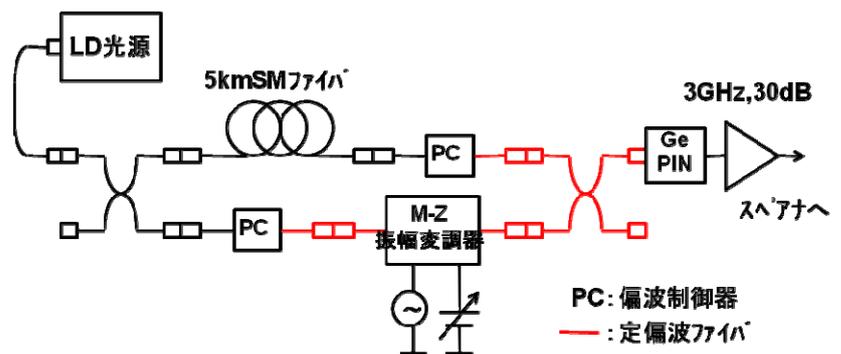


図 3.2 Mach-Zehnder 型振幅変調器を用いたスペクトル線幅測定

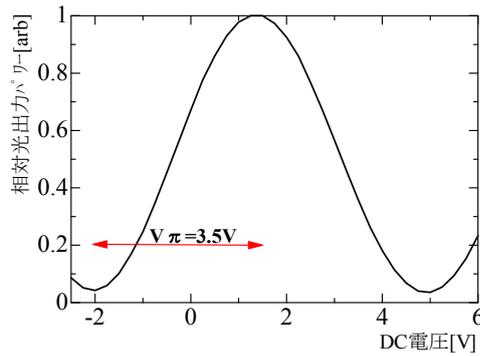


図 3.3 Mach-Zehnder 振幅変調器の直流特

雑音スペクトルの測定結果を図3.4に示す。光源として、線幅が250kHzのレーザーと、線幅が100kHzのレーザーと二つのレーザーを用いた。同図の下側が従来法の周波数シフト方式での結果である。

全体的な特徴は一致しているが、本提案方式では、中心周波数近辺の雑音レベルが1dB~2dBほど低くなっている。もう一つのレーザーについても同様であった。この原因は、Mach-Zehnder型振幅変調器で生成されるサイドバンドの位相が180度ずれているため、スペクトルライナの分解帯域幅を広く設定した場合には干渉が生ずるためである。

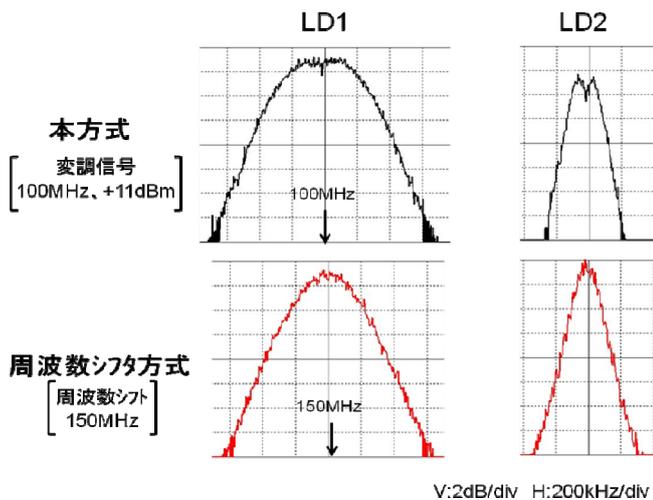


図 3.4 スペクトル線幅の測定例

スペクトルライナの分解帯域幅を10kHz以下に設定するとこのようなことは生じない。

変調信号のパワーを+11dBmに固定して、変調周波数を変化させた場合の雑音スペクトルの測定結果を図3.5に示す。変調周波数を2MHzから1.05GHzまで変化させても、観測される雑音スペクトルの形はほとんど同じである。

同図の下に示したのは、Mach-Zehnder型振幅変調器の出力光をプリスペクトルレンジ2GHzのconfocal Fabry-Perot干渉計で観測した結果である。100MHzの場合では、両側のサイドバンド成分と、その中央に搬送波成分があるのが分かる。搬送波成分は、Mach-Zehnder型振幅変調器のアーチ特性がアンバランスなために現れるものである。搬送波成分が現われても、二つのサイドバンド成分の振幅が同じになってい

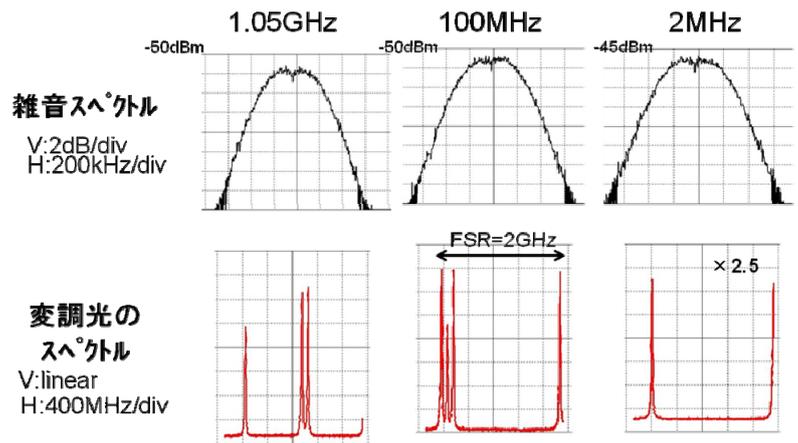


図 3.5 観測される雑音スペクトルの変調周波数依存性

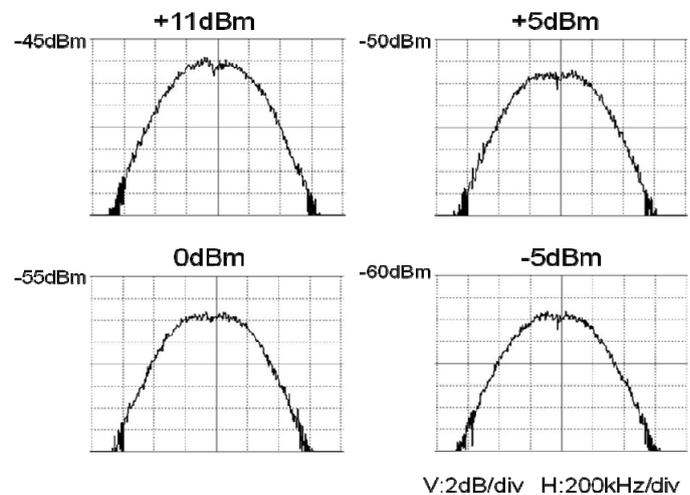


図 3.6 観測される雑音スペクトルの変調信号パワー依存性(変調周波数 5MHz)

ば、線スペクトル成分はキャンセルするため、大きな影響はない。

変調周波数を5MHzにして、変調信号のパワーを変化させたときの雑音スペクトルの測定結果を図3.6に示す。信号パワーを+11dBmから-5dBmまで下げても観測される雑音スペクトルの形はほとんど同じであった。

図3.5の変調周波数を変えた場合の結果と合わせて考えると、本手法では、変調信号として、周波数が数MHzで、パワーは0dBm前後でよいことになる。したがって、簡易でかつ設定自由度が大きい手法であると言える。

4. 超音波振動子を用いる手法

前節の Mach-Zehnder 型振幅変調器を周波数シフトとして用いる手法においては、Mach-Zehnder 型振幅変調器の主要な機能は、①位相変調の付加、②干渉による搬送波成分の除去、の二つである。前者を圧電素子などで実現できれば、より簡易な構成が可能となる。そこで、超音波振動子による位相変調の可能性を調べた。

4・1 超音波振動子の特性

より高い周波数で超音波振動子を変調するには、静電容量が小さい素子を用いる方が有利である。そこで静電容量が 1,000pF 程度以下の超音波振動子を選んで用いることとした。今回用いた超音波振動子を図 4.1 に示す。直径 30mm、厚さ 5mm で、静電容量の実測値は約 800pF であった。これに直径 250 μ m の定偏波ファイバ素線を 10 巻～20 巻して位相変調器として使用した。

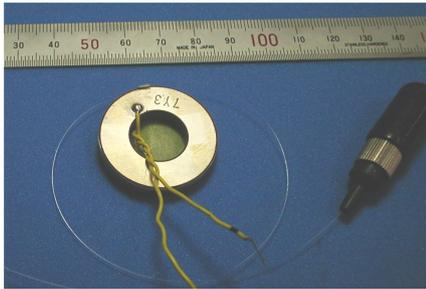


図 4.1 超音波振動子による位相変調器

直流駆動したときの光学長変化を Mach-Zhender 型干渉計で測定した結果を図 4.2 に示す。±15V の電圧印可で 1 μ m 以上の光学長変化が得られている。

超音波振動子を数 MHz 以上で駆動する場合は、振動子の共振周波数に設定する必要がある。この振動子では、1.4MHz の奇数倍に設定した時に大きな光学長変化が得られた。図 4.3 は 4.286MHz で駆動したときの光学長変化を示したものである。数 10Vp-p の電圧を印可したと

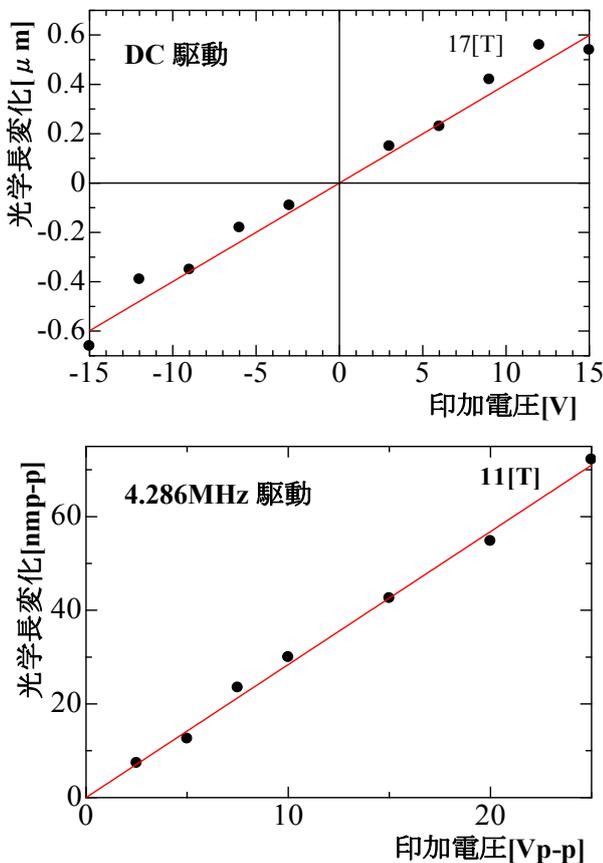


図 4.2 超音波振動子による光学長変化量

きの光学長変化の大きさはせいぜい 100nm で、直流駆動と比較すると 1/10 以下になる。

4・2 ファイバーループによる搬送波成分の抑圧

音響光学周波数シフトの代わりに超音波振動子を用いた場合の遅延自己ヘテロダイン法の構成を図 4.3 に示す。あるスペクトル線幅を持った光を入力すると、超音波振動子による位相変化量が小さいので、小さなサイドバンド成分が生じるが、ほとんどの入力パワーは周波数シフトを生じないままに残る。これと 5km ファイバで遅延させた光とを混合して光受信器に入力すると、ヘテロダイン成分が支配的となり、肝心のヘテロダイン成分がその中に埋もれてしまう。そこで、周波数シフトしない成分を抑圧するために、振動子とファイバーループを組み合わせる構成とした。

分岐比 1:1 のカップラで分かれた光の一方は振動子によってサイドバンド成分を生じる。これに対して、もう一方は、ファイバーループを一周してからサイドバンド成分を生じる。ファイバーループを一周する時間が振動子の変調周波数 f_m の半周期の奇数倍になっていれば、位相差が生じてサイドバンド成分はファイバーループを通過する。一方、周波数シフトしない成分(搬送

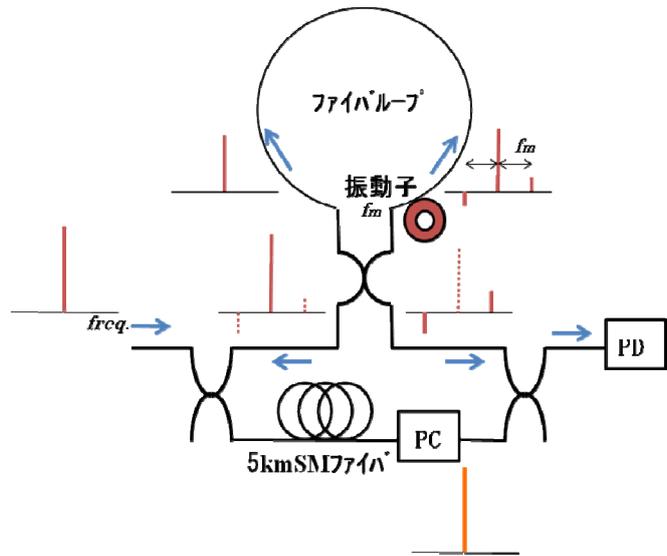


図 4.3 ファイバーループによるヘテロダイン成分の抑圧

波周波数成分)は位相変化が無いので、ファイバーループによって全反射される。このように、ファイバーループと組み合わせることにより、ヘテロダイン成分を抑圧して、ヘテロダイン成分を効率よく取り出すことができる。

音響光学周波数シフトの代わりに超音波振動子を用いて遅延自己ヘテロダイン測定を行った場合の結果を図 4.4 に示す。用いた光源のスペクトル線幅は 200kHz であった。超音波振動子は周波数 7.139MHz、振幅 12Vp-p で駆動した。このときの光学長変化は約 35nmp-p である。同図の下に、フリスベクトルレンジ 300MHz の confocal Fabry-Perot 干渉計で超音波

振動子の出力を観測したスペクトルの様子を示す。サイドバンド成分は左右にある小さな成分(搬送波パワーの2%程度)で、周波数シフトしない成分が支配的であることが分かる。受光器で受けると、雑音成分によってヘテロダイン成分がマスクされている状態である。ただしこの状態でも、20dB程度までならスペクトル線幅を観測することができる。

次に、超音波振動子とファイバリングを組み合わせて実験した。ファイバリングの長さは、伝搬時間が駆動周波数7.139MHzの半周期にほぼ等しくなるように14mとした。超音波振動子の駆動条件は図4.4の場合と同じに設定した。ファイバリングの出力光をconfocal Fabry-Perot干渉計で観測すると、同図下に示したように、搬送波成分が抑圧されて、左右のサイドバンド成分よりも小さくなっていることが分かる。大雑把に見積もって、搬送波成分は20dB程度抑圧されている。この状態で5kmファイバを伝搬してきた光と混合して受光器で受けると、ファイバリングが無い場合と比較して

雑音成分は20dB以上抑圧されて、ヘテロダイン成分は35dB程度まで観測できるようになった。この図で14MHz近辺のスペクトル成分は超音波振動子による位相変調の第二高調波成分から生ずる成分である。

異なるスペクトル線幅の光源について測定した結果を図4.6に示す。上の図がスペクトル線幅200kHz、下の図がスペクトル線幅45kHzの光源を用いた場合の結果である。いずれの場合でも、ピーク値から35dB、あるいは40dB下のところまで観測できていることが分かる。

同図の左側には、駆動周波数7.139MHz近辺のヘテロダイン成分を拡大したものを用いた。方法式で測定した結果(赤色)と、同じ光源を市販の音響光学周波数シフト方式を用いたス

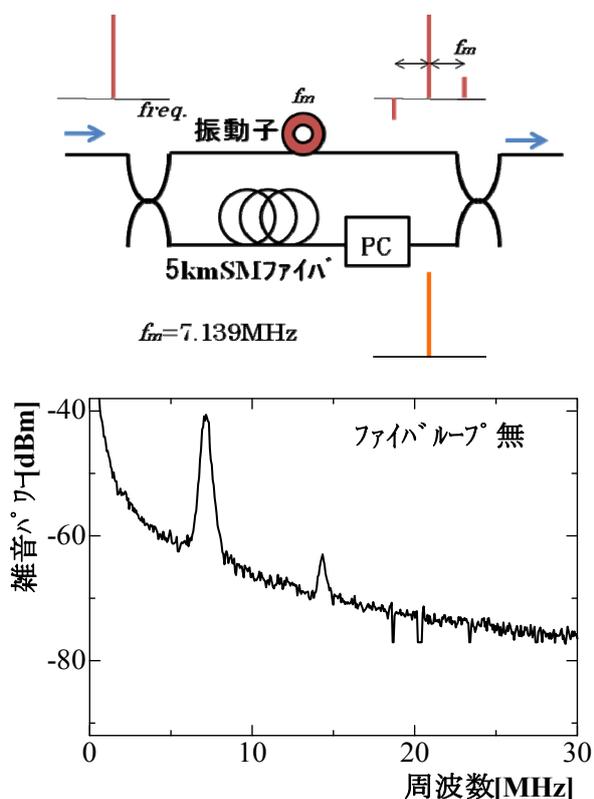


図 4.4 ファイバリングが無い場合

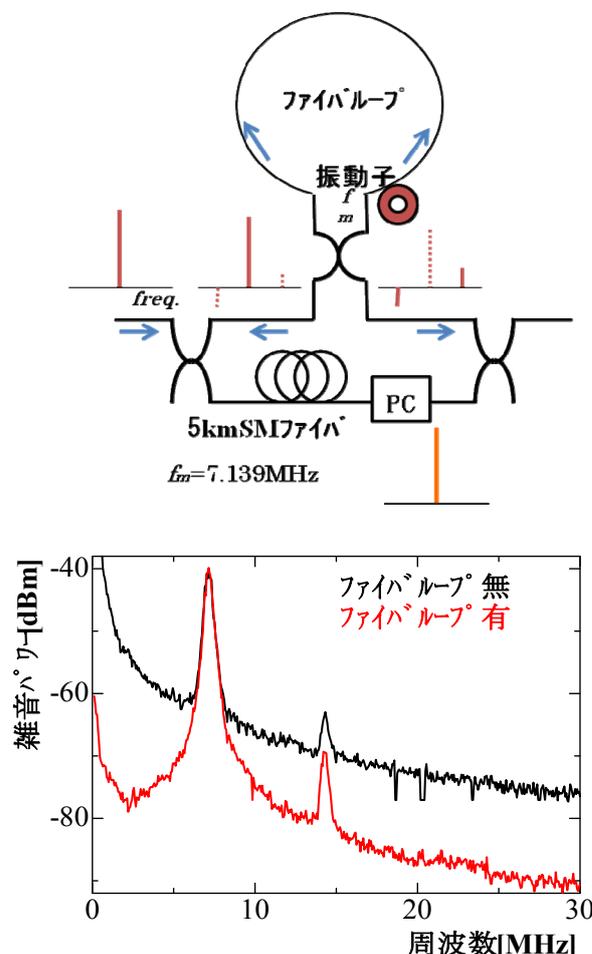


図 4.5 ファイバリングがある場合

スペクトル線幅測定器で測定した結果(黒色)と比較すると、ピーク値から 40dB 程度下のところまで両者の結果はよく合っていることが分かる。

以上は超音波振動子を 7.139MHz で駆動した結果であるが、4.286MHz で駆動した場合も両者はよく合っていることが分かった。ただし、本方式においては、ヘテロダイン成分の低周波側は残留ヘテロダイン成分と重なってくるので、観測可能なスペクトル強度の範囲はやや狭くなった。

以上のように、超音波振動子による位相変調とファイバリングを組み合わせた遅延自己ヘテロダイン法が有効であることが分かった。この手法は低コストであり、広帯域増幅による信号処理が可能であるという特徴を持つ。

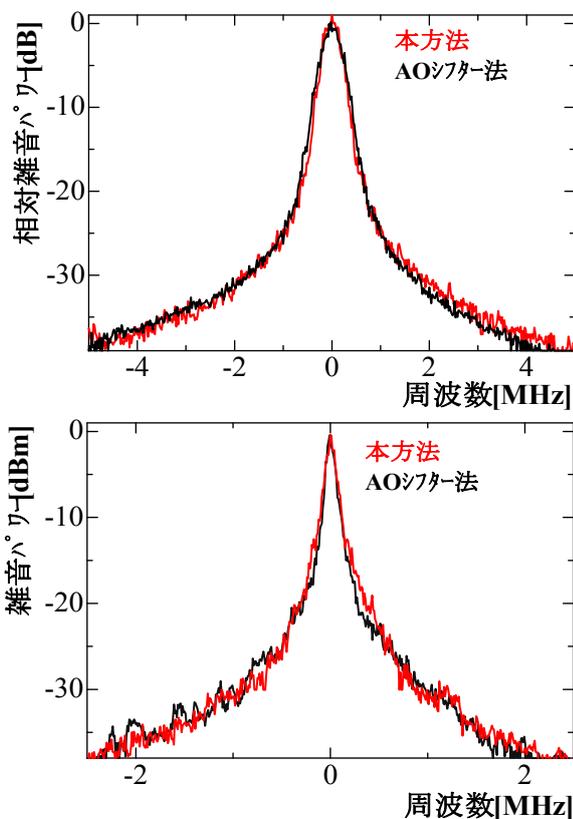


図 4.6 スペクトル線幅測定結果の例

5. まとめと今後の予定

半導体レーザーのスペクトル線幅が数 MHz 以下の場合について、設定自由度が大きい遅延自己ヘテロダインの構成法を実験検討した。周波数シフト量を数 MHz とし、回路規模を小さく抑えることを念頭に置いて、実験した結果、超音波振動子と定偏波光ファイバリングとを組み合わせる手法が有効

であることが分かった。これにより、周波数シフト量が 4MHz~7MHz で、観測可能なレベル範囲が 30dB 以上の実用的な方式を考案できた。

今後は、音響光学周波数シフトを用いる手法と同等以上の性能を目指して、以下の検討を行う予定である。

- ①不要スペクトル成分(ヘテロダイン成分、第二高調波成分)を現状よりも 15dB 以上抑圧する手法の開発。
- ②高速増幅による信号処理が可能であるという利点を活かした、感度や操作性の向上。

6. 参考文献

- 1) H.Kasuya, M.Mori, R.Goto, T.Goto, and K.Yamane, "All Optical Mode Locking of Fabry-Perot Laser Diode via Mutual Injection Locking between Two Longitudinal Modes", *Appl.Phys.Lett.*,vol.75,No.1,pp.13-15(1999).
- 2) 森正和,松平成暁,中瀬達寛,西澤典彦,後藤了祐,丸橋大介:外部共振器の能動制御による多縦モード発振半導体レーザーのスペクトル線幅狭窄化,愛知工業大学研究報告,第 42 号 B, pp.43-53 (2007).
- 3) 森正和,伊藤樹,後藤了祐,丸橋大介:多縦モード発振半導体レーザーのスペクトル線幅一括モックに用いる帯域阻止フィルタの検討,2008 年電子情報通信学会総合大会,C-4-25 (2008).
- 4) 森正和,岩井真人,原田実鈴,後藤了祐:多縦モード発振半導体レーザーのスペクトル線幅一括モックに用いる帯域阻止フィルタの検討(II),電子情報通信学会サテライト大会,C-4-20(2008).
- 5) 森正和,伊藤樹,後藤了祐,丸橋大介:cw 光注入による半導体レーザーの全光制御モード同期方式におけるスペクトル整形用光フィルタ,愛知工業大学研究報告,第 43 号,pp.77-84(2008).
- 6) J.A.Armstrong,"Theory of Interferometric Analysis of Laser Phase Noise"*J.Opt.Soc.Am.*,vol.56,No.8,pp.1024-1031 (1966).
- 7) R.W.Tkach and A.R. Chraplyvy,"Phase Noise and Linewidth in an InGaAsP DFB Laser"*J.Lightwave Technol.*, vol. LT-4,No.11,pp.1711-1716(1986).
- 8) T.Okoshi, T.Kikuchi, and A.Nakayama,"Novel Method for High Resolution Measurement of Laser Output Spectrum", *Electron.Lett.*,vol.16,No.16,pp.630-631(1980).
- 9) 森正和,伊藤樹,南紀太郎,後藤了祐,丸橋大介:半導体レーザーのスペクトル線幅測定法に関する一検討,電気関係学会東海支部連合大会,O-345(2007).
- 10) 岩井真人,森正和,中村達,後藤了祐:振幅変調器による半導体レーザーのスペクトル線幅測定法の検討,電気関係学会東海支部連合大会,O-481(2008).

(受理 平成 21 年 3 月 19 日)