

半導体レーザーのコヒーレント光位相同期ループの開発

大津 元一

東京工業大学 大学院総合理工学研究科
物理情報工学専攻 助教授

1. はじめに

コヒーレント光通信、コヒーレント光計測など、レーザーのコヒーレンスを積極的に利用する光応用システムにおいて光位相同期の開発は必須である。本研究では半導体レーザーのヘテロダイン形およびホモダイン形光位相同期ループを構築することを目的とする。

2. 半導体レーザーの発振スペクトル線幅狭窄化

光位相同期ループ(OPLL)を実現するためには発振スペクトル線幅の狭い(周波数揺らぎの少ない)半導体レーザーを使う必要がある。従来の半導体レーザーの線幅は数MHzであり、これではOPLLは実現しない。そこで、我々は半導体レーザーの注入電流を制御する(電氣的負帰還法)ことにより線幅 250Hzを得た。さらに、外部の高Qファブリ・ペロー共振器からの戻り光を半導体レーザーに注入する方法(光帰還法)を補助的に用いた電氣的負帰還法により、線幅 7 Hzを得た。

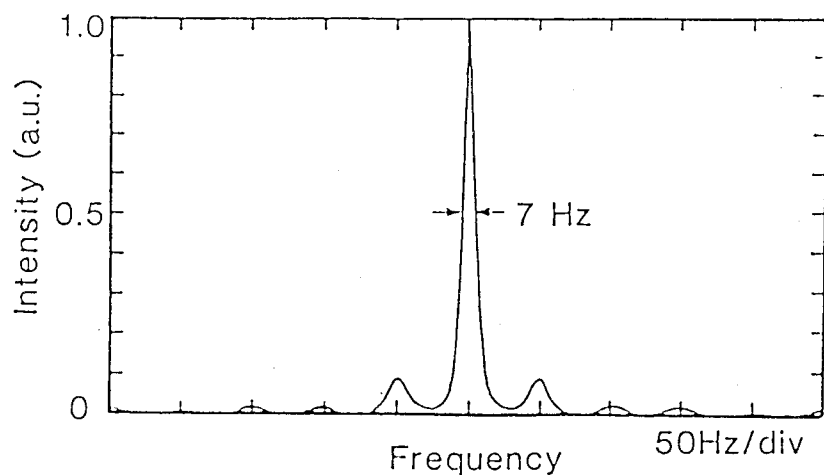


図1 自動制御された半導体レーザーの発振スペクトル形状

図1にその発振スペクトル形状を示す。また、この制御により制御帯域内への光パワー集中度率は98%に及ぶことが確認された。つまり、周波数揺らぎの高速成分も十分に抑圧された。

3. ヘテロダイン形光位相同期ループ

前節で実現した超高コヒーレント半導体レーザーを主レーザーとして用い、もう一つの半導体レーザー(従レーザー)との間でヘテロダイン形光位相同期ループを構成することを試みた。

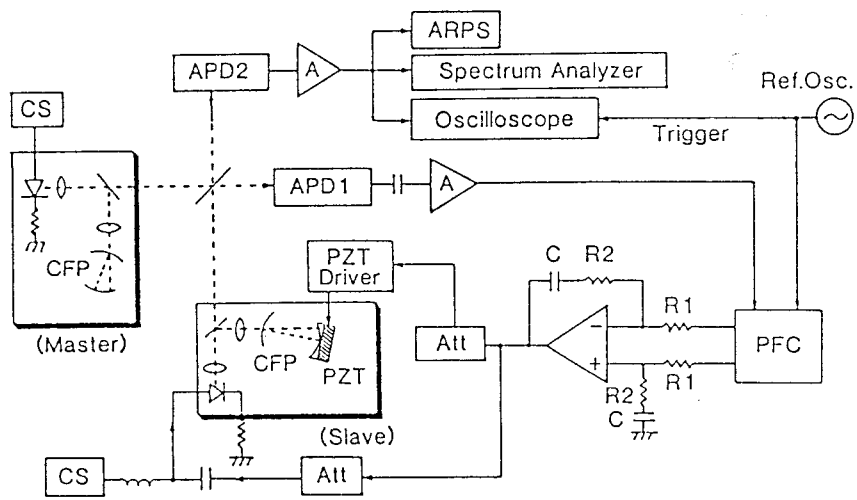
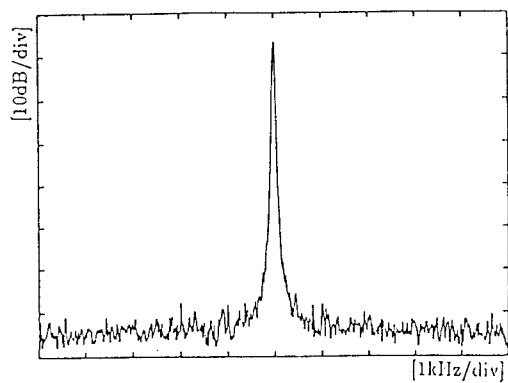
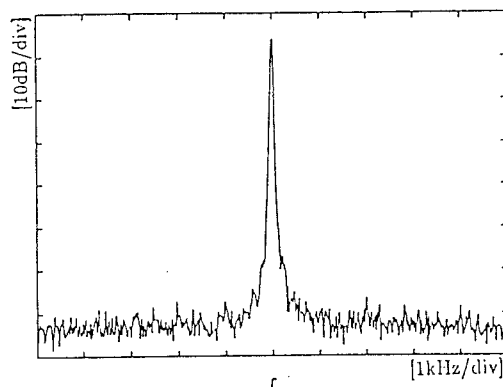


図2 ヘテロダイン形光位相同期ループの実験装置

図2のように局部発振器として周波数安定なマイクロ波発振器を利用する。この場合、OPLL実現時には主レーザと従レーザとの周波数値は局部発振器周波数に等しくなる。OPLLの実現のためのループフィルタなどは回路解析の手法を用いて最適設計した。



(a)



(b)

図3 (a)局部発振器の発振スペクトル形状
(b)光位相同期時の二台のレーザ間のヘテロダイン信号スペクトル形状

図3(a)には局部発振器の発振スペクトル形状の測定結果、(b)にはOPLL実現時の両レーザ間のヘテロダイン信号スペクトル形状を示す。(b)の形状は(a)の形状とよく一致しており、良好なOPLLの実現が確認された。なお、これらの形状の線幅はスペクトラムアナライザの分解能により制限されている。

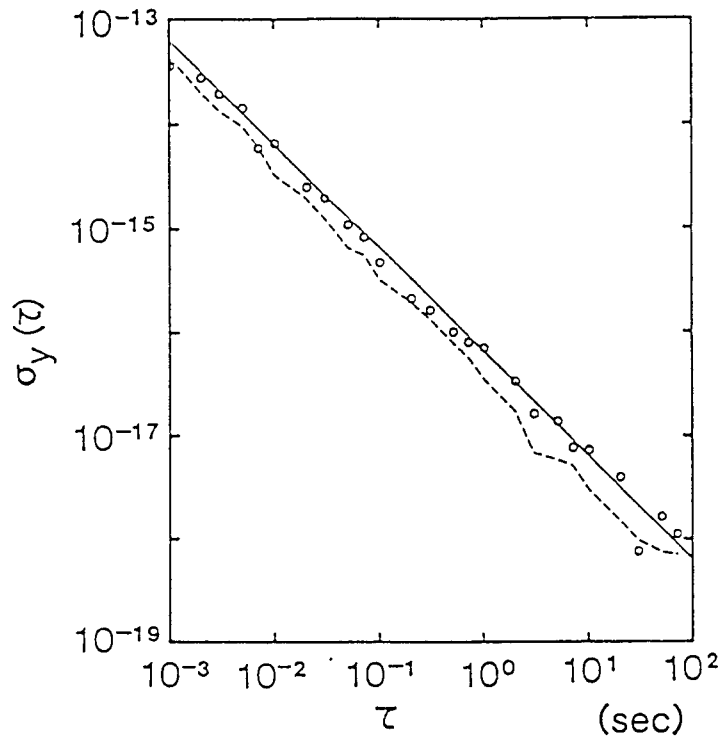


図4 ヘテロダイン信号の残留周波数揺らぎを表す分散の平方根

横軸は測定の積分時間。縦軸は分散の平方根であるが、これは光の周波数値(361THz)で規格化してある。白丸は測定値。実線は白丸に最小自乗当てはめを行った結果。破線は局部発振器の周波数揺らぎの測定値

次にOPLLの性能を定量的に評価するためにヘテロダイン信号周波数の残留揺らぎ量を測定した。図4の白丸および実線はその揺らぎの分散値の平方根の測定結果を示す。一方、破線は局部発振器の値である。縦軸は光周波数値で規格化した分散値の平方根を、横軸は測定の積分時間である。積分時間70sでは白丸の値は 1.1×10^{-18} となっている。つまり、ヘテロダイン信号周波数揺らぎは0.4mHzまで抑圧されていることを示している。この値からヘテロダイン信号の残留位相揺らぎの分散値を計算することができ、その結果 0.02 rad^2 であることがわかった。つまり、 1 rad^2 以下の値が得られ、OPLLの実現が再確認された。さらに、この結果から従レーザの全光パワーのうち、主レーザと位相同期している割合を計算することができ、その値として99%を得た。この値もきわめて良好なOPLLの実現を証明している。以上によりOPLLの性能が定量的に評価された。

なお、白丸と破線との比較によると現在のOPLLの性能は局部発振器の性能により制限されていることがわかる。従って、より高性能の局部発振器を使えばOPLLの性能はより向上する

ことが期待される。なお、白丸の値をもとに図3(b)の真のスペクトル線幅が推定でき、約20mHzの値が得られる。

4. ホモダイン形光位相同期ループ

次に、コヒーレント光通信システムにおいて受信系の負担を軽減し、データ伝送容量をより増大させるために必要なOPLL、すなわち、ホモダイン形OPLL、を実現することを試みた。

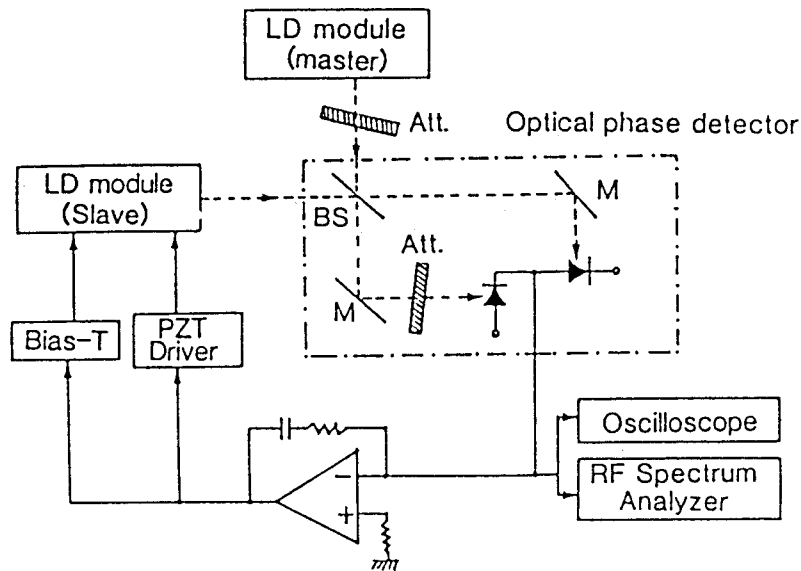


図5 ホモダイン形光位相同期ループの実験装置

図5に示すように二つの光検出器を用いてバランス形光位相検出器として用いた。その他、ループフィルタなどの最適設計は前節と同様に行った。

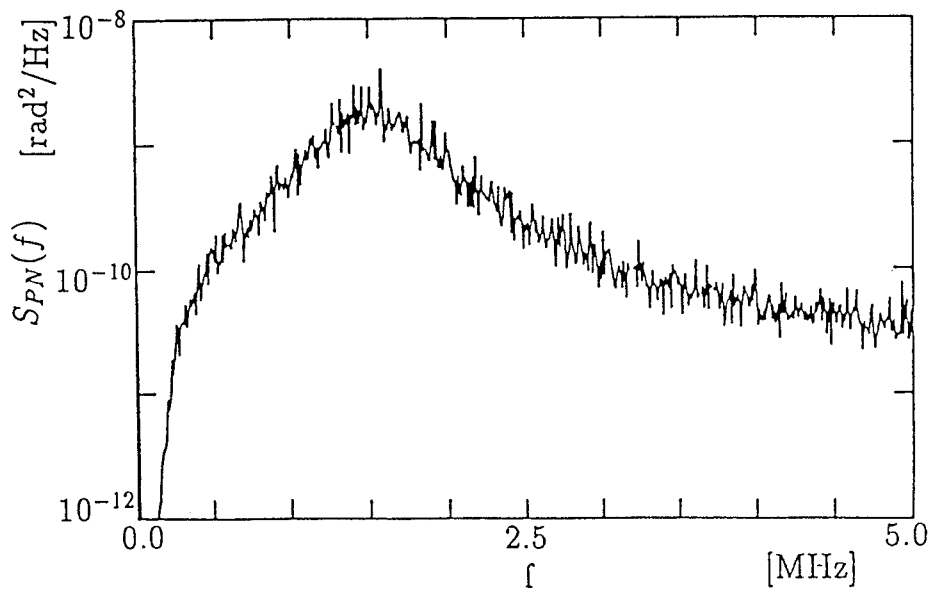


図6 ホモダイン信号の残留位相揺らぎのパワースペクトル密度の測定結果

その結果、図6のように残留位相揺らぎのパワースペクトル密度が得られた。制御帯域 1.5MHz 内で位相揺らぎが著しく減少していることがわかる。この実験結果より残留位相揺らぎの分散値は 0.02 rad^2 、従レーザの光パワーのうち主レーザに位相同期された割合は98%、と見積られ、良好なホモダイン形OPLLが実現したことが確認された。

なお、上記の帯域はコヒーレント光システムへの応用上、やや小さいのでこれを拡大すること

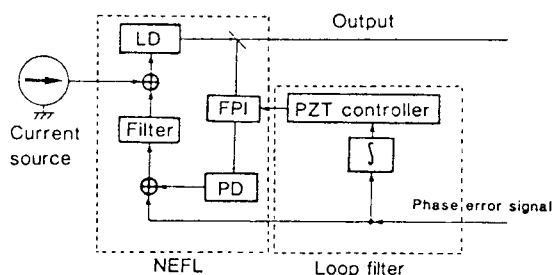


図7 広帯域ホモダイン形光位相同期のための従レーザの位相変調効率を最適化するための付加回路

を試みた。そのために図7に示すように従レーザの位相変調効率特性をOPLLのために最適化するように制御系を付加した。その結果、図8に示すように、OPLLの残留位相揺らぎのパワースペクトル密度の値はフーリエ周波数 134MHz 以下で著しい減少を示した。つまり、OPLL帯域が 134MHz まで拡大した。

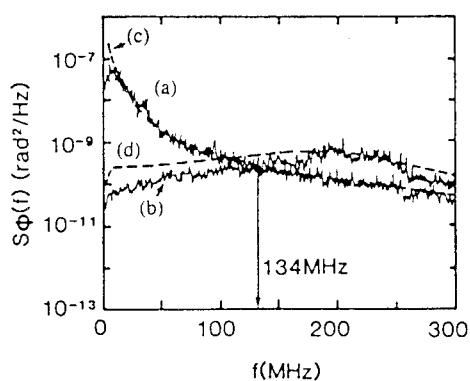


図8 ホモダイン信号の残留位相揺らぎのパワースペクトル密度
 曲線 a, b は測定結果。c, d は計算結果。曲線 a, c は非位相同期時。
 b, d は位相同期時。

5. まとめ

発振スペクトル線幅のきわめて狭い半導体レーザを用い、高性能のヘテロダイン形およびホモダイン形光位相同期を実現することに成功した。前節までに記した結果はすべて世界のトップデータであることにご注意頂きたい。この手法はコヒーレント光通信の実用システム実現のために必須の基礎技術となる。なお、本稿では割愛したが、これらのシステムは我々の考案した受動共

振形光ファイバジャイロ、フォトン走査トンネル顕微鏡、のシステムに採用され、これらの光応用システムの性能を著しく高めるために役立っている。今後は光位相同期そのものの一層の性能向上が応用システムの性能向上に直接寄与すると思われる。

なお本研究を成功させることが出来たのは(助)高柳記念電子科学技術振興財団のご援助によるものであり、理事長はじめ関係の皆様へ深く感謝いたします。最後に、故高柳先生のご冥福を心よりお祈り致します。

参考文献

- [1] M. OHTSU, M. MURATA and M. KOUROGI, "FM Noise Reduction and Subkilohertz Linewidth of an AlGaAs laser by Negative Electrical Feedback", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 26, No. 2, pp. 231-241, 1990
- [2] C. -H. SHIN, M. TESHIMA, M. OHTSU, T. IMAI, J. YOSHIDA and K. NISHIDE, "FM Characteristics and Compact Modules for Coherent Semiconductor Lasers Coupled to an External Cavity", IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 2, No. 4, pp. 297-300, 1990 (Letter)
- [3] C. -H. SHIN and M. OHTSU, "Heterodyne Optical Phase Locked Loop by Confocal Fabry-Perot Cavity Coupled AlGaAs Lasers", IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 2, No. 4, pp. 167-169, 1990(Letter)
- [4] M. OHTSU, H. SUZUKI, K. NEMOTO and Y. TERAMACHI, "Narrow-Linewidth Tunable Visible InGaAlP Laser, Application to Spectral Measurements of Lithium and Power Amplification", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 29, No. 8, pp. L1463-L1465, 1990 (Letter)
- [5] M. OHTSU, I. KOSHIISHI and Y. TERAMACHI, "A Semiconductor Laser as a Stable Phase Conjugate Mirror for Linewidth Reduction of Another Semiconductor Laser", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 29, No. 11, pp. L2060-L2062, 1990 (Letter)
- [6] C. -H. SHIN and M. OHTSU, "Stable Semiconductor Laser with a 7-Hz Linewidth by an Optical-Electrical Double-Feedback Technique", Opt. Lett., Vol. 15, No. 24, pp. 1455-1457, 1990 (Letter)
- [7] M. KOUROGI and M. OHTSU, "Novel Optical Frequency Discriminator for FM Noise Reduction of Semiconductor Lasers", Opt. Commun., Vol. 81, No. 3/4, pp. 204-208, 1991 (Letter)
- [8] M. KOUROGI, C. -H. Shin and M. OHTSU, "A 134MHz Bandwidth Homodyne Optical Phase-Locked-Loop of Semiconductor Laser Diodes", IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 3, No. 3, pp. 270-272, 1991 (Letter)
- [9] M. KOUROGI, C. -H. SHIN and M. OHTSU, "A 250Hz Spectral Linewidth 1.5- μ m-MQW-DFB Laser Diode with Negative-Electrical-Feedback", IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 3, No. 6, pp. 496-498 (Letter)