

センサー用発光素子

東京工業大学 総合理工学研究科 大 津 元 一

1. まえがき

光センサーシステムにおいて光源は不可欠な基本要素であり、システムの性能は光源の性能により制限されるといっても過言ではなからう。光源には各種の発光素子が使われているが、産業用には小型、低消費電力、長寿命等の利点を有する半導体レーザが適している。ところで、従来より、レーザから出て来る光は周波数または位相の揃ったきれいな波であるといわれているが、実際の光センサシステムに半導体レーザを用いるとき、戻り光誘起不安定などを避けるためにそのコヒーレント性を下げて使うことがしばしば行われている。しかし、光センサシステムの精度、分解能を向上させるにはレーザのもつコヒーレント性を積極的に利用するのが妥当な方法である。本稿ではこの認識にもとづき半導体レーザの高コヒーレント化の実現をめざした研究の現状について述べる。

レーザの周波数変動の大きさを表す標準偏差値 σ の値は図1に示すようにレーザ発明当時(1960年)は約 10^{-7} (すなわち、レーザ周波数100THzに対して10MHzの揺らぎ)であったが、その後この揺らぎを小さくするための努力が継続してなされ、昨年7月の時点でのトップデータとしてはすでに 10^{-16} が実現している¹⁾。つまり揺らぎはわずか0.01Hzにまで抑えられている。これは計測などで頻繁に使われている気体レーザの値であるが、この図によると σ の値は10年間ごとに約5桁ずつ減少しており、現在もその減少のようすに頭打ちが見られない。もちろんこのような高度の安定度を得るにはレーザ物理、分光、制御技術などの進歩に負うところが大きい。約30年にわたってこのように順調に進歩した技術の例は少ないのではなからうか。この図をもとにした技術予測によると特に大きな壁

にぶつかることなく21世紀初頭には $10^{-18} \sim 10^{-21}$ が達成しうるといわれている¹⁾。

このような順調な進歩はつぎのような考察によって理解できる。即ち、レーザに限らず、一般の非線形自励発振器が外部の制御装置によって周波数制御を施されているとき、時刻における周波数変動 $\delta\nu(t)$ は

$$\delta\nu(t) = \kappa \cdot \Gamma_0 - \int_0^\infty h_t(\tau) \cdot \{\delta\nu(t-\tau) + \Gamma_n(\tau)\} d\tau \quad (1)$$

と表される²⁾。ここで κ はレーザ共振器の損失、 Γ_0 は量子効果(自然放出光揺らぎ)に起因する非制御時のレーザ周波数揺らぎを引き起こす雑音源、 $\delta\nu(t-\tau)$ は制御装置内の周波数揺らぎ検出系により検出された周波数揺らぎ、 Γ_n は制御装置内で発生する雑音、 h_t は制御装置のインパルス応答を表す。この式をフーリエ変換して整理すると、

$$F(f) = \frac{1}{1+H(f)} \cdot \kappa \Pi_0(f) - \frac{H(f)}{1+H(f)} \cdot \Pi_n(f) \quad (2)$$

を得る。ここで、 F 、 Π_0 、 Π_n 、 H は各々(1)式中の $\delta\nu$ 、 Γ_0 、 Γ_n 、 h_t のフーリエ変換である。ここで制御利得 H を大きくすると($|H| \rightarrow \infty$)この式右辺第1項は0に漸近する。一方第2項は $|\Pi_n|$ に漸近する。このことは高利得の制御装置を用いて制御を施せば、量子効果に起因する非制御時の周波数揺らぎの値以下の値が実現でき、それは究極的には制御系の雑音によって制限される値をとることを意味する。

さて、この原理は工業的な応用上重要な半導体レーザにも当然当てはまる。半導体レーザの周波数揺らぎは非制御時には非常に大きい。制御を施すことによりこれを抑圧でき、きれいな光波を得ることが可能である。これが実現すれば高性能

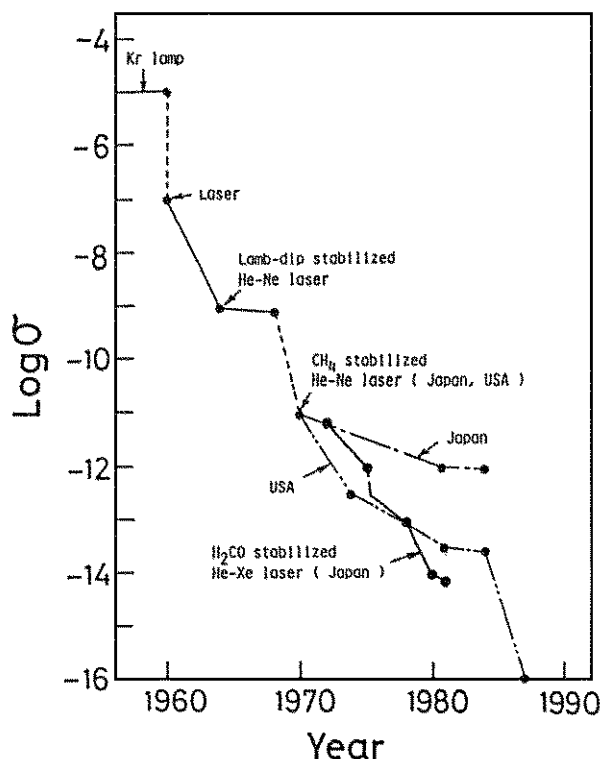


図1. He-Neレーザの周波数変動の大きさを表す標準偏差 σ の値の進歩。

の光周波数シンセサイザ、光トラッキングジェネレータとして光センサシステムにおいて威力を発揮する。

そこで以下の節では半導体レーザの周波数制御方法とその特性、および問題点を順次列挙したい。ただし、2節では単一縦モード発振する半導体レーザについて議論する。この単一縦モード性に関する問題点は3節で取り上げる。尚、半導体レーザの周波数特性の基礎については文献3)～5)を、理論と実験の詳細については文献6)、7)を参照されたい。

2. 半導体レーザの周波数制御の実際

半導体レーザを使う場合、その周波数が一定値を取ること、その値が正確にわかっていること、すなわち、安定性と再現性が高いことが望まれる。さらに、これらとは一見相反するように感じられるが、周波数が広範囲にわたって掃引しうることが挙げられる。これらの周波数制御性を実現するためには、従来マイクロ波発振器に対し確立して

いる周波数制御技術⁸⁾との類推により、以下の各小節で述べるような各項目を実行すればよい。

2. 1. 発振スペクトル中心周波数の安定化

周囲温度変化、自己発熱などによりレーザ発振スペクトルの中心周波数が少なくとも 10^{-7} 程度ドリフトするのでこれを抑える必要がある。

使用目的にもよるが、約1 MHzの帯域の低周波制御装置が必要になる。レーザのヒートシンクの温度を制御してもよいが、高精度制御のためには注入電流制御の方がよい。周波数固定のための周波数基準として、簡便なものでは小型ファブリ・ペロー共振器が使われるが、周囲温度変化などによるこの共振周波数自身のドリフトがあるので、達成しうる安定度は 10^{-9} が限界である⁹⁾。より高度の安定度を得るには現在のところ原子、分子気体の吸収スペクトルが使われている。たとえば波長 $0.8\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ の領域には H_2O 、 NH_3 、 CO_2 を始めとする多数の有機分子の振動回転遷移の高調波、結合調の吸収スペクトル線が約10 GHz間隔で分布している。これらは多数分布しているので各半導体

レーザ素子は少なくとも1本の吸収線に同調，安定化でき，都合がよい．これにより波長 $0.8\mu\text{m}$ のAlGaAsレーザ， $1.5\mu\text{m}$ のInGaAsレーザとともに 10^{-11} の周波数安定度が得られている^{10,11)}．この場合の問題点として，吸収強度が小さいので制御利得がやや小さいこと，吸収線の同定がまだ不十分なので周波数再現性がよくないこと，などが挙げられる．

波長 $0.8\mu\text{m}$ 付近にはRb, Csなどのアルカリ金属の共鳴スペクトルがあり，この吸収強度は大きく，また同定も行われているので周波数基準としては有利である．これを用い 10^{-12} の周波数安定度が得られている¹²⁾．この場合の問題点はスペクトル線の数が少ない為に同調しうるレーザ素子が限られることである．原理的には(2)式の Π_n で決まる値，すなわち 10^{-15} の安定度が可能であると推定されている¹³⁾．ただし，この限界に達するにはさらに制御利得を増加させる必要があり，そのためにはFM分光法のような高感度な吸収スペクトル線検出法を採用する必要がある¹⁴⁾．

以上のような原子分子を周波数基準に用いた場合の共通の問題点としては，吸収スペクトル周波数が気体圧力によりシフトすることである¹⁵⁾．これらは 10^{-12} より良い長期周波数安定度， 10^{-11} より良い周波数再現性を得ようとするとき問題になる．外部環境の変化に対してより安定な原子分子の探索が今後必要となろう．さらに，安定化された周波数の測定精度は現在のところ約 10^{-7} である¹⁶⁾．干渉測長への応用の際，この値は長さ絶対値の確度を制限するので十分でない． 10^{-10} 程度の精度の波長測定装置の開発が必要である．

2. 2. 発振スペクトル線幅の狭窄化

より高速の周波数揺らぎの成分はレーザ発振ス

ペクトル線の幅をひろげる．非制御時の線幅は数MHz～100MHzである．共振型ファイバジャイロ，ヘテロダイン形干渉測長，コヒーレント・ライダーなどの広帯域光計測用光源としてはこのような線幅を狭窄化する必要がある．2. 1節のような電流負帰還制御を施す場合，広帯域制御回路の設計は必ずしも容易ではないので10年以上前から現在まで，別の簡便な方法が採られてきた．これは(2)式において， $H = 0$ （負帰還制御はしない）とするがその代わりに x を小さくする（レーザ共振器損失を小さくする）ものである．こうするとレーザ共振器の帯域全範囲で周波数揺らぎが小さくなり，スペクトル線幅も狭くなる．これを実行するには図2のようにレーザの一方の端面に反射防止膜を塗り，その代わりにレーザ長以上離れたところに反射鏡または回折格子を置く．こうしてレーザ単体のときにくらべ格段に長い共振器を構成し，これにより x を小さくする．この方法により数10kHzの線幅が実現している¹⁷⁾．鏡を置く代わりにレーザ端面にファイバを接続した例¹⁸⁾や，外部導波路をレーザと一緒に集積化した例もある¹⁹⁾．この場合の問題点は系の安定性である．すなわち，負帰還制御を施していないので外部鏡，ファイバなどの機械的振動，熱膨張などの影響により線幅が時間的に変化する．これを抑えるためにレーザ端面の反射防止を強化し，レーザへの戻り光量を増す方法が採られるが²⁰⁾，それでもその安定性は実用的な光計測への応用には不十分である．その他の問題として，注入電流を変調してもレーザ周波数が変調されなくなること，縦モード周波数間隔が狭くなるので単一モード発振が保証されなくなること，などが挙げられる．

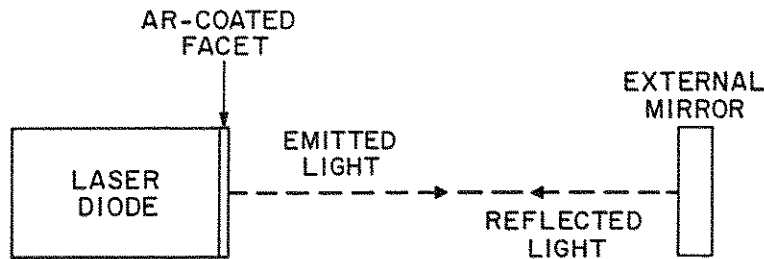


図2. 外部反射体を用いた光帰還法により線幅を狭窄化する方法の原理.

これらの欠点のうち、とくに系の不安定性をおさえるには2. 1節と同様、負帰還制御を施すのがよい。この場合は制御帯域は少なくとも非制御時の発振スペクトル線幅の値と同程度必要である。しかし最近のレーザの線幅は10MHz以下のものが多くなってきているので、あまり広い制御帯域は必要にならず、負帰還制御が容易になった。その制御装置の代表例を図3に示す。周波数揺らぎの検出には2. 1節でも述べた簡単な小型ファブリ・ペロー共振器の透過光を用いる。波長0.8 μ mのAlGaAsレーザの場合、制御により線幅は100kHzまで狭くなった。これは非制御時の1/50である。また、この図ではファブリ・ペロー共振器の反射光を用いたもう一つの負帰還制御回路により同時に発振スペクトル中心周波数も安定化している。このような負帰還制御により線幅は安定に狭窄された。

図3の制御装置では(2)式の H_n の値によって決まる線幅狭窄の限界は約1kHzであるが、現在のところ、この値に達していない。それは制御装置の制御帯域が約20MHzであり、これは十分広くないので制御利得もまだ不十分であることによる。レ

ーザの周波数応答特性も含めた回路解析によると、制御系の遅延時間が0.6ns以内になれば十分な制御帯域が確保でき、従って制御利得もより増加できて上記限界に達する。この遅延時間を実現するにはたとえばGaAsなどの高速ICを用いて制御増幅器を作り(この場合遅延時間は約0.2ns)、さらに制御ループの光路長、電気長を12cm以内(遅延時間は0.4ns)にすればよい。こうすれば光集積回路などを用いた制御系の集積化などに頼る事なく、現在入手しうる光学、電気要素の組合せで図2の方法よりも狭い線幅が実現しうる。さらに図3のファブリ・ペロー共振器の周波数弁別感度の最適化により(2)式の H_n によって決まる線幅狭窄化の限界は約1Hzという小さな値になる²¹⁾。制御帯域を広げるためにはレーザそのものの周波数応答特性も重要で、特にその位相遅れが均一である方が有利である。最近はその実現するためにレーザの電極を2つに分割し、各々に流す直流電流値を調節することにより位相遅れ特性を改良する試みがなされている²²⁾。この電氣的な負帰還制御の問題点はやはり制御帯域が有限なことである。従って、制御帯域外、すなわちレーザ発振スペクトルの裾を構成す

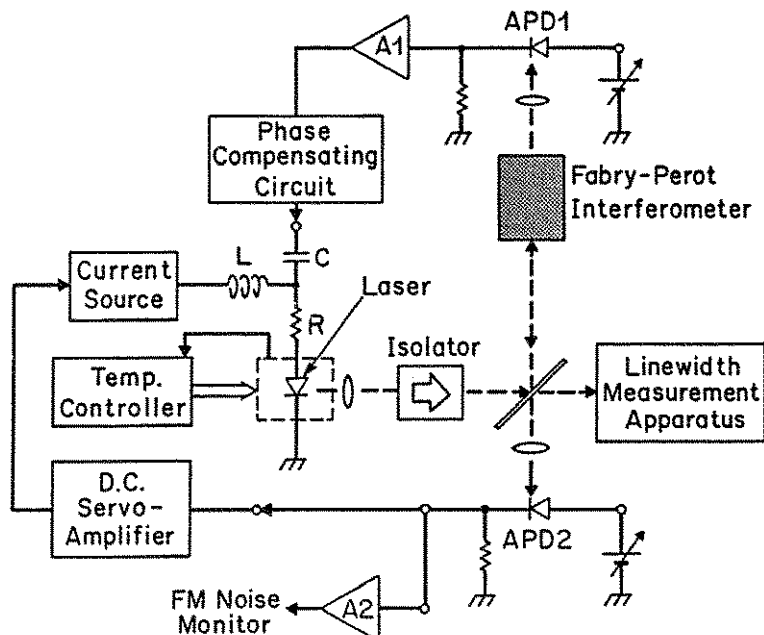


図3. 電氣的負帰還制御法の実験装置。

る周波数揺らぎは抑圧されない。そこで図2の光帰還の方法と図3の電氣的負帰還の方法とその利点を生かした複合法を採用するのがよい。その例として図4に示すように外部ファブリ・ペロー共振器からのわずかな量の戻り光をレーザに再注入して(2)式の x の値を減少させ、同時にレーザとファブリ・ペロー共振器との距離を電氣的に負帰還制御して系の安定性を保つ方法が提案された²³⁾。これにより比較的安定に線幅20kHzが実現した。また、戻り光量が少ないので縦モード周波数間隔はレーザ単体のままに保たれており、単一モード性は失われない。さらにレーザの電流をファブリ・ペロー共振器の自由スペクトル域の値の有理数倍の値の周波数で変調するとレーザ周波数は変調される²⁴⁾、などの利点を有する。

2. 3. 周波数の精密な追従

ヘテロダイン形の光計測では周波数の安定な主レーザに従レーザの周波数を高精度で追従させることが必要である。このためには従来注入同期現象が利用されていた²⁵⁾。これは非線形光学効果にもとづく現象なので物理的には興味深い安定性などの点で実用上問題がある。

図5はそれに変わるもので、マイクロ波におけるヘテロダイン形位相同期ループに対応するものである。すなわち、主、従レーザのヘテロダイン信号の位相が局部発振器であるマイクロ波シンセサイザの位相に同期するよう従レーザの注入電流を制御するものである²⁶⁾。ここで主レーザとしては2. 1節および2. 2節で示したように周波数

安定度を向上させたレーザを用いればよい。この位相同期法のキャプチャ・レンジは約1.2GHzであった。また、ヘテロダイン信号周波数の安定度として 1×10^{-14} が得られている。この安定度は2. 1節で示した主レーザの発振スペクトル中心周波数の安定度よりよい。このことは従レーザの周波数は主レーザのそれに忠実に追従していること、言い替えば主レーザの高安定性が従レーザに移乗していることを意味する。このことから良質の光トラッキング・ジェネレータが実現していることが確認される。周波数追従の制御帯域を広げ、利得を増加させることによりヘテロダイン信号の位相揺らぎを1ラジアン以下にするような位相同期ループを構成することが原理的に可能である。さらにこのように位相同期の成立するレーザを多数用意し、それら全てのレーザ光を重ね合わせると、これはモード同期レーザからの光と同じ特性を示す。すなわち、非線形光学効果を使わずにフェムト秒程度の超短光パルス発生が可能である。

2. 4. 安定な周波数掃引

周波数を安定に、かつ広帯域に掃引することは分光計測などには必須である。たとえば図2で示した光帰還法において、外部反射鏡のかわりに回折格子を使い、その面を回転させると周波数掃引が可能になる。波長 $1.5\mu\text{m}$ のInGaAsPレーザではこの方法により67GHz(波長に換算すると0.5nm)にわたり周波数掃引された例がある²⁷⁾。しかしこの場合には周波数の安定度として2. 1節で示した値は得られておらず、きわめて荒っぽい掃引で

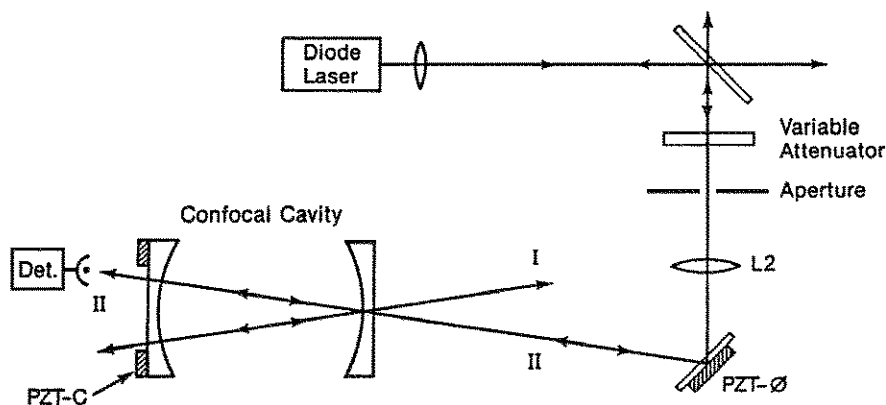


図4. 外部共焦点ファブリ・ペロー共振器からの光帰還による線幅狭窄化の実験装置²³⁾。

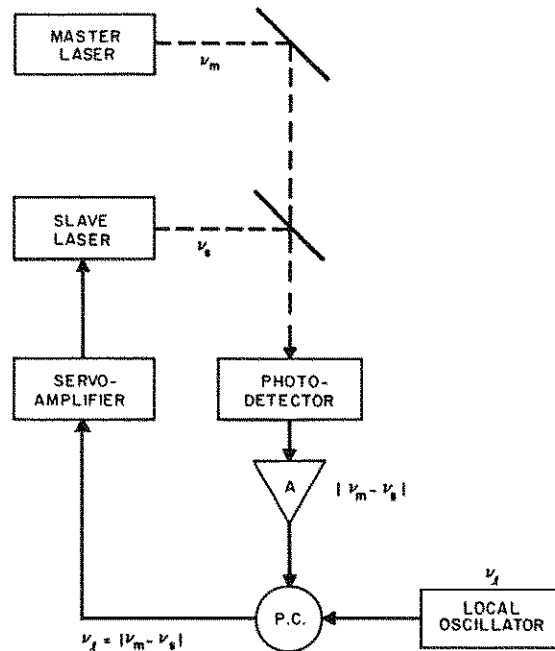


図5. 周波数追従の原理²⁶⁾。P.C.: 位相比較器。ν_m, ν_s, ν_l は各々主レーザ、従レーザ、マイクロ波シンセサイザの周波数。

ある。従って、掃引中の周波数の校正もされていない。周波数掃引をより高精度に行うには2. 4節の光位相同期の系を用い、局部発振器としてのマイクロ波シンセサイザ周波数を掃引すればよい。これにより2. 3節で示した安定度を保ったまま53GHzの範囲にわたって連続掃引された²⁶⁾。この場合、掃引可能範囲はレーザのモードホッピング特性により制限されている。従って、モードホッピングのない単一モードレーザを使えば²⁸⁾、原理的には1THzの範囲にわたって周波数連続掃引可能である。

3. 半導体レーザの周波数制御のための問題点

光計測システムへの応用のために2節で述べたような周波数制御をする際、半導体レーザデバイスに関連した問題点を挙げるとつぎのようになる。

(1) 縦モードの単一性

今までは半導体レーザが単一縦モード発振するという仮定のもとに議論を進めてきた。しかし、DFB形のように注意深く作られた単一モードレーザでも自然放出光揺らぎの混入により従モードが

過渡的に発振し、このモードとの非線形モード結合により主モードパワーが過渡的に減少するパワー・ドロップアウトが見られる^{29,30)}。ドロップアウトの深さは10%~60%。持続時間は数μs~数nsであり、これらはバイアス電流に依存する。従って、このような時間範囲内では主モードの単一モード性は保証されない。使用する光計測システムの特性にもよるが、このドロップアウトを抑えるには主モード、従モードのパワーの時間平均値の比が40dB以上必要である^{29,30)}。デバイス試作段階ではこのような高パワー比をもったレーザは得られるが、このようなデバイスは実用的な光計測システムにはまだ十分安定に供給されていない。このようなドロップアウトが起こる一要因として、レーザの発振利得スペクトル幅にくらべ縦モード間隔が狭すぎ、隣合う縦モード間の利得差が少ないことが挙げられる。

例えば波長0.8μmのAlGaAsレーザの場合、発振利得スペクトル幅、縦モード間隔は波長単位で表すと各々500Å, 3Åである。

一方長さ15cmの単一モードHe-Neレーザではそれらは各々、1GHz, 1GHzである。縦モード間

隔はレーザの長さに反比例するので、短いレーザのほうが単一縦モード性に優れているが、両レーザのこれらの数値を比較し、半導体レーザをそれと等価なHe-Neレーザに置き換えてみると、その長さはなんと25mにもなる。さらに、より詳しい議論をするとHe-Neレーザの縦モード間の結合は弱く、2つ以上の縦モードは同時に安定なパワーで発振するが、半導体レーザではその結合は強く、縦モード間でパワー・スイッチング現象を示す³¹⁾。これを考慮すると半導体レーザは長さ約100mのHe-Neレーザに対応する。だれもこのような巨大なレーザは使いたくないので、今後単一モード性を改善するには縦モード間隔を大きくするか、発振利得スペクトルを狭くすべきである。縦モード間隔を大きくするにはレーザ長を短くすればよいが、パワー低下、周波数揺らぎ増加を引き起こすので不利である。むしろ量子井戸など³²⁾の新構造、さらには新材料を用いて発振利得スペクトルを狭くすべきである。

(2) 周波数の長期シフト

半導体レーザの周囲温度揺らぎを 10^{-5}°C 以内、さらに注入電流揺らぎを $0.6\text{nA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以内に抑圧した超高安定環境下で約6カ月の長期にわたり周波数のドリフトを測定すると、約 $20\text{MHz}/\text{h}$ のブルーシフトが見られる³³⁾。これはInボンディング層の酸化による熱抵抗の変化、レーザ端面付近でのキャリアの非放射再結合による熱効果などによると言われている³⁴⁾。光計測では発振周波数、波長の絶対値の再現性に対する要求が今後一層強くなると考えられるので、このような再現性、すなわちスペクトル寿命を向上させるためにデバイス設計製作の段階での熱抵抗の低減、スクリーニングなどの配慮が必要である。

(3) 半導体レーザ装置の寸法

(1)では縦モードの単一性の面から半導体レーザ素子の等価的寸法がまだ非常に大きいことを指摘した。さらに指摘すべきことは、半導体レーザ素子の実際の寸法が小さい(長さ数 $100\mu\text{m}$)ので(2)式の x の値が大きく、従って周波数揺らぎが大きいために、その揺らぎを抑えるには図2、3のような外付け光電回路が必要となり、結果的には半導体レーザ装置全体の寸法はHe-Neレーザ装置程度の

大型になってしまうということである。装置全体を小型化するには外付け回路の集積化のみでなく、広帯域の位相変調器の開発、さらにより重要な課題として周波数制御利得の高い半導体レーザを実現することが必要である。すなわち、2、2節でも述べたように電極を分割するなどして周波数変調効率がよく、その位相遅れ特性の均一なレーザの開発が望まれる。

4. あとがき

本稿ではまず半導体レーザは原理的にきわめて周波数安定度の高い光源となりうる可能性を理論的に示し、さらに4項目に関しその実験結果を示した。これらの実験結果により現在のところ簡易形の気体レーザなみの性能が得られていることがわかる。一方、半導体レーザデバイスそのものに注目すると、いくつかの問題があり、周波数安定性の点ではまだ不十分な段階である。これらの問題を克服し、より信頼性の高い周波数安定半導体レーザを実現するためには新デバイス設計、周辺デバイスの高性能・集積化、制御法の改良、などを有機的に行う必要があろう。このような技術の積み上げのもとに光センサシステム用の実用的な光源が実現することを期待したい。

参考文献

- 1) J.L.Hall : US-Japan Seminar, Quantum Mechanical Aspects of Quantum Electronics, July 1987, Monterey, CA, Paper III-4
- 2) M.Ohtsu, K.Kuboki, N.Tabuchi : Sixth International Congerence on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, January 1987, Reno, Nevada, TUC5
- 3) 大津元一 : 「レーザと原子時計」, 1986年, オーム社, 第6章
- 4) 大越孝敬編 : 「光ファイバセンサ」, 1986年, オーム社, 第3章
- 5) 応用物理学学会編 : 「半導体レーザの基礎」, 1987年, オーム社, 第2章
- 6) M.Ohtsu : IEEE J.Lightwave Technology, January 1988, in press
- 7) M.Ohtsu and T.Tako : Progress in Optics, 25,

Elsevier, Amsterdam, 1988

8) P.Kartaschoff : Frequency and Time, Academic Press, London, 1978

9) K.Kuboki, M.Ohtsu, N.Tabuchi, and Ouchi : Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering) Vol.723, Progress in Semiconductor Laser Diodes, September 1986, Cambridge, MA, 73

10) H.Tsuchida, M.Ohtsu, and T.Tako : Jpn, J.Appl, Phys., 21(1982) L1

11) M.Ohtsu, H.Kotani, and H.Tagawa : Jpn, J.Appl, Phys., 22(1983) 1553

12) H. Tsuchida, M. Ohtsu, T. Tako, N. Kuramochi, and N. Oura : Jpn, J.Appl, Phys., 21 (1982) 1561

13) M. Ohtsu, H. Fukada, T. Tako, and H. Tsuchida : Jpn, J. Appl, Phys., 22 (1983) 1157

14) G.C.Bjorklund : Opt, Lett., 5 (1980) 15

15) 吉田浩之, 橋本実, 大津元一 : 第48回応物理学学会学術講演予稿, 1987年10月, 17a-ZC-2

16) K.Fukuoka, M.Ohtsu, and T.Tako : Jpn, J.Appl, Phys., 23 (1984) L117

17) R.Wyatt and W.J.Devlin : Electron. Lett., 19 (1983) 110

18) F.Favre, D.Le Guen, and J.C.Simon : IEEE J.Quantum Electron., QE-18 (1982) 1712

19) T.Fujita, J.Ohya, K.Matsuda, M.Ishino, H.Sato and H.Serizawa : Electron, Lett., 21 (1985) 374

20) N.A.Olsson and J.P.van der Ziel : IEEE J, Lightwave Technol., LT-5 (1987) 509

21) M.Ohtsu : Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics, June 1986, San Francisco, CA, WB4

22) H.Yasaka, Y.Yoshikuni, Y.Nakano, and K.Oe : Electron. Lett., 23 (1987) 1161

23) B.Dahmani, L.Hollberg, and R.Drullinger : Opt, Lett., 12 (1987) 876

24) 大津元一 : 電子情報通信学会光量子エレクトロニクス研究会技術報告, 1987年12月, OQE87-135

25) S.Kobayashi and T.Kimura : IEEE J.Quantum Electron., QE-18 (1982) 575

26) K.Kuboki and M.Ohtsu : IEEE J.Quantum Electron., QE-23 (1987) 388

27) K. H. Cameron, M. R. Matthews, T. G. Hodgkinson and W. J. Devlin : Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, MA, 1985, TUC5

28) Y.Tohmori : Ph. D.Thesis, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, March 1986

29) R. Linke, B. L. Kasper, C. A. Burrus, I. P. Kaminov, J. S. Ko, and T. P. Lee : IEEE J. Lightwave Technol., LT-3 (1985) 711

30) 大津元一 : 電子情報通信学会光量子エレクトロニクス研究会技術報告, 1987年12月, OQE87-136

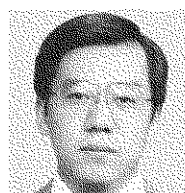
31) M.Ohtsu, Y.Teramachi, Y.Otsuka, and A.Osaki : IEEE J.Quantum Electron., QE-22 (1986) 535

32) R.Chin, N.Holonyak, Jr. and B.A.Vojak : Appl, Phys, Lett., 36 (1980) 19

33) M.Ohtsu, M.Hashimoto, and H.Ozawa : Proceedings of the 39th Annual Frequency Control Symposium, May 1985, Philadelphia, PA, p.43

34) F.Farve and D.Le Guen : Electron, Lett., 19 (1983) 663

〔著者紹介〕



大津元一(おおつ もといち)
昭48年東工大電子卒, 昭53同
大学大学院博士課程終了, 同
年東工大助手, 昭57年同大助
教授, 現在に至る。この間,
昭61年~62年米国AT & Tベル
研究所研究員, 工学博士。