レーザー解説

半導体レーザーの原子の吸収線を用いた波長安定化

佐 藤 孝*

(1990年8月10日 受理)

Wavelength Stabilization of a Semiconductor Laser by Using an Atomic Absorption Line

Takashi SATO*

(Received August 10, 1990)

This paper reviews the oscillation wavelength stabilization of a semiconductor laser using an atomic absorption line that is an accurate and stable wavelength reference. The strong absorption lines of cesium and rubidium atoms have been used as wavelength references for semiconductor laser wavelength stabilization because these lines are in the oscillation wavelength range of a semiconductor laser. A saturated absorption spectroscopy method has been applied to the stabilization because it provides a narrow Doppler free absorption spectrum as the wavelength reference. Wavelength stabilization under high speed modulation is required for coherent optical communication. On the other hand, wavelength stabilization without any frequency modulation is required for application fields which need a narrow oscillation linewidth. The wavelength stabilization using an atomic absorption line satisfies these requirements by using some control electronic circuits and/or magneto-optic effects, i.e., the Zeeman and the Faraday effects.

Key Words : Semiconductor laser, Wavelength stabilization, Atomic absorption line, High speed modulation, Magneto-optic effect.

1. はじめに

半導体レーザーは、発光効率が良く、安価で軽量、小型かつ高速に直接変調が可能なレーザーである。しかし雰囲気温度や注入電流の変動によりその発振波長が変化するため、発振波長が安定で発振幅の狭いより高品質なレーザー光を得るには、半導体レーザーそのもの、またはその制御系に若干の工夫が必要となる。こ

の発振波長の安定化は、現在様々な応用分野において必要とされている。例えば、最近の光通信の発展は、コヒーレント光通信による高速・大容量通信を目指しているが、そのためには高速変調時における波長安定化が必要となると考えられる^{1,2)}。また、ファイバージャイロ用の光源としては、発振幅が狭く、かつ波長が安定な光源として、半導体レーザーの発振波長の安定化が必要となっている³⁾。

*新潟大学工学部電気電子工学科(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)

*Department of Electrical and Electronic Engineering, Niigata University (8050 Ikarashi 2-no-cho, Niigata 950-21)

この波長安定化のために、半導体レーザーそのものの内部構造に工夫をしているのが、分布帰還型(DFB)及び分布ブラッグ反射型(DBR)の半導体レーザーである。その他に、注入同期による方法や、ファブリ・ペロー共振器などの外部共振器や原子・分子の吸収線を波長基準として用いて発振波長の安定化及び発振幅の狭帯域化を達成する方法がある⁴⁾。

ここでは、このうち原子の吸収線を用いた半導体レーザーの波長安定化の原理についてまず述べる。その後、飽和吸収分光法を用いたより良い安定度を得る方法、高速変調時における安定化そして無変調で発振幅が狭い状態のままの安定化について述べる。

2. 半導体レーザーに有用な原子の吸収線

原子の吸収線は、従来から色素レーザーの波長安定化によく用いられてきた^{5,6)}。これは、原子の吸収線から、安定でかつ信号強度が大きい波長基準信号が、比較的容易に得られるからである。ただ様々な原子の吸収線のうち、実際に使用することができるものは非常に少なく、使用できる原子の吸収線がない場合にはよく分子の吸収線が用いられている^{7,8)}。これは、原子が単体で気体として存在することが、その吸収線を用いる上で重要であるにもかかわらず、そのような性質を持つ元素が少ないからである。その意味では、気体分子の吸収線は数多くある。しかしその反面、気体分子の吸収線はその強度が小さく、十分な吸収による雑音の少ない波長基準を得るのが困難な場合が多い。

単原子気体としては、He, Ne, Arなどの希ガスがある。その他にNa, Rb, Csなどのアルカリ金属元素のように、密度は非常に小さいが、室温で単原子気体となるものもあることが知られている。特にこのアルカリ金属原子は、最外殻電子が1個だけ存在する水素類似原子であり、その吸収スペクトルは比較的簡単であるため、昔から研究されてきている⁹⁾。そして、アルカリ原子の最も強い吸収線は、微細構造と呼

ばれている2つの吸収線D₁線とD₂線からなり、それらは更に超微細構造と呼ばれるいくつかの吸収線からなることが知られている。

半導体レーザーの発振波長安定化のための波長基準として用いるには、これら吸収線の波長が半導体レーザーの発振波長域内にあることが必要である。そのため、現在までよく用いられてきているのは、これらアルカリ原子のうち、Rb(D₁線: 794.8 nm, D₂線: 780.0 nm)^{10~12)}とCs(D₂線: 852.1 nm)¹³⁾原子である。しかし今後、可視領域で発振する半導体レーザーの開発が進めば、K(D₁線: 769.9 nm, D₂線: 766.5 nm)¹⁴⁾、Li(D線: 670.8 nm)やNa(D₁線: 589.6 nm, D₂線: 589.0 nm)原子などの吸収線も⁹⁾、使用されるようになっていわれる。

さてRbは自然界に⁸⁵Rbと⁸⁷Rbの2種類の安定な同位体が7.2:2.8の割合で存在し、室温(298 K)では、その気体の原子密度は $2.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ である¹⁵⁾。その吸収線の波長は、それぞれの同位体により僅かに異なっており、D₂線を例にとると、その吸収線は2つの同位体に対し、Fig. 1 (a)に示す相対位置と強度を持った各々6本ずつ計12本の超微細構造に当たる吸収線で構成されている¹⁶⁾。室温では、原子の熱運動によるドップラ効果のために、1つずつの吸収線はドップラ広がりを持ち、12本の吸収線は近接した3本ずつが互いに重なり合って観測され、結局、Fig. 1 (a)に示した4つの吸収ピークを示すことになる¹⁾。Fig. 1 (b)に示すD₁線は、2つの同位体に対して各々4本ずつ計8本の超微細構造に当たる吸収線で構成されている。D₂線に比べて超微細構造間の周波数の間隔は大きく、その結果⁸⁵Rbではやはりドップラ広がりの中に重なり合って観測されているが、⁸⁷Rbでは分離されて観測されている。

ドップラ広がり幅であるドップラ幅 Δ_D (半値全幅)は、

$$\Delta_D = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2\ln 2 k_B T}{M}}$$

で与えられる。ここで c は光速、 k_B はボルツマ

Fig.1 Relative position, relative intensities and absorption curves of the Rb-D₂ (a) and D₁ (b) lines.

Fig.2 Optical system of linear absorption spectroscopy. LD, laser diode ; PD, photo diode.

ン定数, T は気体の絶対温度, M は原子の質量, ν_0 は吸収線の中心周波数である。室温では, Rb-D線の場合 Δ_D は約500 MHzとなる。

3. 原子の吸収線を用いた波長安定化

次にRb原子の吸収線から波長安定化のための制御信号を得る原理について述べる。

今, Fig. 2 に示す光学系を用いてRbガス中

Fig. 3 Absorption profile (a) and the differential profile (b) of Rb-D₁ linear absorption spectroscopy.

を透過する光を観測する場合を考える。透過光強度は, D₁線の場合Fig. 3 (a)のようになる。ここでこの光の波長を微小に変調すると, 透過光強度も変調される。この透過光強度の変調成分は, その点における透過光強度波形の傾き, すなわち微分値に比例している。従ってこの変調成分の信号を同期検波すると, Fig. 3 (b)に示すような周波数に関して1次微分された波形が得られる。この微分波形は, 吸収波形の中心の最も吸収が強くなる点でゼロとなり, その前後で符号を変えるので, これを制御信号として用いて, 波長をこの吸収線の中心に安定化することが可能となる。この吸収線の中心は外部の温度変化などにほとんど影響されないで, 非常に精度の良い波長基準となり得る。一方, 透過光強度信号を基準電圧と比較し, 吸収波形の傾きが大きい所にゼロ点を持つような信号を得て, それを制御信号とすることにより, 微小変調を加えない安定化も可能である¹⁷⁾。この方法はファブリ・ペロー共振器を波長基準として用いても報告されている^{17,18)}。しかし, 吸収線の傾きを用いる場合には温度変化によるドップラ幅の変化や吸収量の変化により, 制御信号のゼロ点変動してしまう可能性があるため, 従来から注入電流へ微小な変調を加えることによりレーザーの発振周波数を微小に変調し, そ

Fig. 4 An example of an experimental setup.

Fig. 5 Optical system of saturated absorption spectroscopy. LD, laser diode; PD, photodiode; B.S., beam splitter; M1 and M2, mirrors.

こから制御信号を得て波長を安定化する方法の方がよく採用されている。

Fig. 4 に Rb 原子の吸収線を用いた半導体レーザーの波長安定化の実験系の 1 例を示す¹²⁾。この実験系では、半導体レーザーの注入電流に微小変調を加えることにより、半導体レーザーの発振波長を僅かに変化させている。この結果、Rb セルを透過しフォトディテクタで受光された透過光強度信号を、ロックインアンプで同期検波することで前述の微分波形が得られる。Fig. 4 の実験系で Fig. 2 に示した光学系を用いた場合には、ドップラ広がりのため、近接した超微細構造の個々の吸収線を分解することができず、Fig. 3 に示した吸収波形と微分波形とが観測される。この通常の線形吸収分光を用いた方法に対し、光学系として Fig. 5 に示

Fig. 6 Absorption profile (a) and the differential profile (b) of Rb-D₁ saturated absorption spectroscopy.

すものを用いた場合を飽和吸収分光法と呼び、D₁線の場合、Fig. 6 (a) のような吸収波形と Fig. 6 (b) のような微分波形が得られる。Fig. 6 (a) の吸収波形内のくぼみには、図示したラムディップ (L) とクロスオーバーレゾナンス (C) と呼ばれる 2 種類があり、それぞれドップラフリーと呼ばれる幅の狭い信号となる¹²⁾。従って、これらの信号を用いればより良い制御信号を得ることができ、良い安定度が得られると考えられる。この波長安定度は、時間的に変動する系の安定度の評価によく用いられているアラン分散の平方根 σ で表されることが多い^{1,19)}。実際に Rb-D₁ 線を用いた実験では、その平均時間が 10 秒のときに、 $\sigma = 1 \times 10^{-10}$ と $\sigma = 4 \times 10^{-11}$ という結果が通常の線形吸収分光法と飽和吸収分光法のそれぞれに対して得られ¹²⁾、飽和吸収分光を用いた場合の方が良い安定度となっている。D₂ 線を用いた場合にも、同様に飽和吸収分光を用いてより良い安定度が報告されている^{11,12)}。

4. 高速変調時の波長安定化

前述したように、半導体レーザーは直接高速

変調が可能であるため、現在、光ファイバー通信光源としてよく用いられている。特にこれから実用化が期待されているコヒーレント光通信に半導体レーザーを用いる場合には、変調時の発振波長の安定化が必要となる。しかし、変調時には変調に伴うサイドバンドによる発振幅の広がりにより、無変調時に得られる波長基準信号がそのままの特性では得られなくなり、その結果、波長安定化のための制御信号に劣化が生じ、安定度が劣化する¹⁾。

そこで、安定化のための波長基準信号を得る方法に工夫を加えた方法がいくつか報告されている。波長基準として外部のファブリ・ペロー共振器を用いた方法には、変調時のサイドバンドを使用する方法や²⁰⁾、非常に大きな変調を加えた場合の透過光強度の変化の2階微分値から制御信号を得る方法が報告されている²¹⁾。

原子の吸収線を用いる方法では、Fig. 7 に示すように、周波数シフトキーイング(FSK)で半導体レーザーの発振周波数が変調されている場合に、その周波数変化に応じて透過光強度信号をスイッチングし、一方の周波数の透過光強度信号成分だけを取出し、制御信号を得るために用いる方法がある。すなわち時間領域のフィルタにより、そのままではサイドバンドにより広がった透過光強度信号のスペクトル幅を狭くし、そこから制御信号を得る方法である(同期受光方式)^{2,22)}。この方法で確かに安定度の劣化は抑制されることが確認されているが、無変調時の安定度と比べた場合、より以上の改善は得られていない。また、同じ2値FSK信号で半導体レーザーが変調されている場合に、Fig. 8 に示す包絡線検波の原理を利用する方法が報告されている^{2,23)}。この方法ではFig. 8 (b)の透過光強度信号の強い方の信号から、(c)の実線で示す信号を取出し、そこから(d)の制御信号を得ている(ピークホールド方式)。この方法では、波長安定度の劣化が抑制されるだけでなく、Fig. 8 (c)からわかるように、かえって無変調時よりも幅の狭い波長基準信号が得られる。その結果、Fig. 8 (d)に示す、より鋭い制

Fig. 7 Principle of a synchronous detection method.

Fig. 8 Principle of a peak-hold method.

(a), Absorption profile and FSK modulation; (b), Transmitted light intensity signal; (c), Output signal through the peak-hold circuit; (d), Differential profile of the peak-hold method. Point P shows the stabilization point.

御信号が得られる。この制御信号を用いることで、安定度が無変調時よりも良くなることが報告されている²⁾。

5. 無変調の波長安定化

ファイバージャイロ用光源として使用できるような発振幅が狭く、かつ波長が安定な半導体レーザーを得るには、制御信号を得るために注入電流に微小信号を加えることができない。これは、微小信号による周波数変動そのものが発振幅を広くするからである。そこでこれまでに様々な方法が考案されてきた。前述のオフセットを加える方法なども^{17,18)}、微小信号を加えない安定化の方法の1つであるが、ここではこれまでに考案されている原子の吸収線を用いたいくつかの方法について述べる。その1つは、外部に設置した超音波光変調器を用いてレーザー光の周波数を変調した後、吸収セルを通過させる方法である²⁴⁾。その他に吸収線の磁気光学効果であるゼーマン効果及びファラデー効果を用いて吸収線の波長を変調する方法がある。ゼーマン効果を用いる方法では、吸収セルに光の進行方向と平行に磁界を加えることにより、吸収線がシフトするゼーマン効果を利用し、半導体レーザーの発振波長を変調する代わりに、吸収線の中心波長を磁界の強度を変えることで変調する方法である。円偏光のレーザー光を磁界が変調されている吸収セルを通して観測すると、その透過光強度は半導体レーザーの注入電流に変調を加えた場合と同様の变化を示す²⁵⁾。特に、磁界として直流磁界と交流磁界を重畳した方法では、安定化点を直流磁界を変化することにより、掃引できることも報告されている²⁶⁾。またファラデー効果を用いた安定化では、直線偏光のレーザー光の、ゼーマン効果による左右円偏光の光の吸収率の違いにより、原子にスピン偏極を生じさせ、そこに帰還光が再び直線偏光で入射した時に生じる光誘起ファラデー効果による偏光面の回転を偏光板を通して観測することにより、制御信号を得る方法がある²⁷⁾。今1つのファラデー効果を用いた方法としては、Fig. 9のような光学系で、直流磁界と交流磁界を重畳することで得られる偏光面の回転を偏光板を通して観測することにより、制御信号を得る方法がある。この方法では、

Fig. 9 An example of an optical system using the Faraday effect.

LD, laser diode ; PD, photo diode ; LP1 and LP2, linear polarizer.

偏光板LP1とLP2の偏光方向の間の角度を 45° に設定することにより、偏光面の微小な回転を最も感度良く透過光強度の変化に変換している²⁸⁾。この方法でも、直流磁界を変化させることにより、安定化点を掃引できる。

これら無変調での波長安定化では、従来方式とほぼ同じ安定度が達成されているばかりではなく、より大きな制御信号を得ることが期待できるので、安定度の更なる改善も可能である。また、その波長安定化点が掃引可能であるという点も注目される。

6. おわりに

原子の吸収線を用いた半導体レーザーの波長安定化は、比較的簡単な系で良い安定度を得ることのできる方法である。

この波長安定化のための波長基準信号は、通常の線形吸収分光法よりも、飽和吸収分光法を用いた場合に、より線幅の狭い信号が得られ、より鋭い制御信号そしてより良い安定度が達成されている。

半導体レーザーに直接高速変調が加えられている時の波長安定化は、コヒーレント光通信に必要な技術である。この条件の下での原子の吸収線を用いた安定化は、包絡線検波の原理を利用したピークホールド回路を用いることで実現されており、無変調時よりも良い安定度が高速変調時に得られている。一方、波長が安定でか

つ発振幅の狭い半導体レーザーが必要な応用のために、注入電流に変調を加えていた従来方式とは異なり、ゼーマン効果やファラデー効果などを用いることで、発振波長を変調しない、発振幅の狭い波長安定化が実現されている。これらの方法の中には、その安定化点の波長掃引も大きくはないが可能である方法もある。

参 考 文 献

- 1) 佐藤孝, 須貝浩之, 榛葉實: 電子通信学会論文誌 J69-C (1986) 600.
- 2) 佐藤孝, 小泉春吾, 斉藤敏紀, 榛葉實: 電子情報通信学会論文誌 J71-C (1988) 1450.
- 3) M.Ohtsu and S.Araki: Appl. Opt. 26 (1987) 464.
- 4) 大津元一, 中川賢一: 応用物理 58 (1989) 1428.
- 5) P.P.Sorokin, J.R.Lankard, V.L.Moruzzi and A.Lurio: Appl. Phys. Lett. 15 (1969) 179.
- 6) T.Endo, T.Yabuzaki, M.Kitano, T.Sato and T.Ogawa: IEEE J. Quantum Electron. QE-13 (1977) 866.
- 7) M.Ohi: Jpn. J. Appl. Phys. 19 (1980) L541.
- 8) H.Tsuchida, M.Ohtsu and T.Tako: Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) L1.
- 9) G.Herzberg: *Atomic Spectra and Atomic Structure* (Dover Publications, New York, 1944) Chap.2.
- 10) H.Tsuchida, M.Ohtsu, T.Tako, N.Kuramochi and N.Oura: Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) L561.
- 11) H.Furuta and M.Ohtsu: Appl. Opt. 28 (1989) 3737.
- 12) T.Sato, M.Niikuni, S.Sato and M.Shimba: Electron. Lett. 24 (1988) 429.
- 13) T.Yabuzaki, A.Ibaraki, H.Hori, M.Kitano and T.Ogawa: Jpn. J. Appl. Phys. 20 (1981) L451.
- 14) 国立天文台編: 理科年表 (丸善, 1990) p.503.
- 15) A. M. van der Spek, J. J. L. Mulders and L.W.G.Steenhuysen: J. Opt. Soc. Am. B, 5 (1988) 1478.
- 16) H.M.Gibbs and R.J.Hull: Phys. Rev. 153 (1967) 132.
- 17) 鳥羽弘, 岩下克, 野須潔, 本杉常治: 電子通信学会昭和60年度総合全国大会 2647 (1985).
- 18) K.Kuboki and M.Ohtsu: IEEE J. Quantum Electron. QE-23 (1987) 388.
- 19) D.W.Allan: Proc. IEEE 54 (1966) 221.
- 20) C.J.Nielsen and G.Jacobsen: J. Opt. Commun. 4 (1983) 122.
- 21) H.Tsuchida and Y.Mitsuhashi: Electron. Lett. 23 (1987) 1147.
- 22) S.Koizumi, T.Sato and M.Shimba: Electron. Lett. 24 (1988) 13.
- 23) 斉藤敏紀, 佐藤孝, 榛葉實: 電子情報通信学会論文誌 J73-C-I (1990) 462.
- 24) 秋山浩二, 吉武哲, 大手明, 古賀保喜, 中段和宏, 大嶋新一: 電気学会論文誌 109-C (1989) 22.
- 25) R.A. Valenzuela, L.J. Cimini, R.W. Wilson, K.C.Reichmann and A.Grot: Electron. Lett. 24 (1988) 725.
- 26) T.Ikegami, S.Ohshima and M.Ohtsu: Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) L1839.
- 27) 河村達朗, 渋谷真, 河村研一, 藪崎努, 小川徹: 日本物理学会第41回年会予稿集 29a-CC-10 (1986).
- 28) M. Nakagawa, T. Sato and M. Shimba: Electron. Lett. 25 (1989) 430.