

## 最近の技術から

# 半導体レーザーを用いた分光測定

桜井 捷海

東京大学教養学部基礎科学科 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1

### 1. ま え が き

分子の基本振動の吸収帯は  $3\sim 20\ \mu\text{m}$  にあり、その分光測定には主として鉛化合物の半導体レーザーが用いられている。また、光通信用として開発された InGaAsP レーザーの発振領域である  $1.3, 1.5\ \mu\text{m}$  帯には分子の倍音の吸収帯があり、これらレーザーによる分光測定や分子検出のためのセンサーの研究が行なわれている。ビデオディスクや光情報機器に用いられる  $750\sim 900\ \text{nm}$  帯の GaAlAs レーザーや、最近開発され市販品も現われるようになった  $600\ \text{nm}$  帯の InGaAlP レーザーの発振領域では、分子の倍音の振動遷移はもとより原子分子の電子遷移も測定可能となる。さらに短波長の半導体レーザーが開発されれば、この領域の分光光源としては、半導体レーザーが高価なアルゴンイオンレーザー励起の色素レーザーに置き換わっていくことであろう。本稿ではいろいろな波長領域で半導体レーザーを高感度の分光測定に用いる場合に必要となる一般的な技術のなかで最近論文に現れたいくつかについて紹介する。

### 2. 発振波長の安定化と波長掃引

半導体レーザーの発振波長は温度と励起電流に依存し、その値は  $15\sim 25\ \text{GHz/K}$ ,  $3\sim 6\ \text{GHz/mA}$  程度である。また、電流および温度を極限まで安定化したときのフリーランニングの発振のスペクトル幅は  $5\sim 20\ \text{MHz}$  であることが知られている<sup>1)</sup>。分子の吸収を測定するためには、分子のシュタルク変調法とか光源の波長を変調するソース変調法が用いられる。半導体レーザーを光源としたときには、温度と電流をフィードバックにより制御するわけであるが、通常の状態では半導体レーザーの発振周波数のジッタが吸収線が周波数弁別器として働くことにより強度揺らぎとなり、これにより検出可能な分子の最小吸収が決まってしまうことが多い。

これを避けるために最近 Reich らは内部結合型のファブリ・ペロー干渉計を用いて、鉛化合物半導体レー

ザーの発振波長をコントロールし、高感度の分光計測を行なった<sup>2)</sup>。発振周波数の FM 変調を行ない、これにより FP 干渉計の共鳴と発振周波数とのずれの誤差信号を検出し、それらが一致するように電流にフィードバックを加えた。半導体レーザーの発振周波数を外部のファブリ・ペロー干渉計にロックした後、分子の吸収を測定するには干渉計の共鳴周波数を掃引した。この方法は色素レーザーの発振波長を掃引するとき用いられている歴史のある技術である。

発振波長をさらに安定に掃引し、弱い吸収を測定するために、測定する分子の吸収線自体を圧力幅で広げておき、これを周波数弁別器として発振波長を線幅内で安定に掃引する方法が Okude らによって試みられて、よい結果が得られている<sup>3)</sup>。図 1 に彼らの実験装置図を示す。

フリーランニング時の発振スペクトルは発振周波数が高速のランダムな周波数変調を受けてることによって生じている。したがって、これを数百 kHz にまで狭め、これを掃引して、原子分子のスペクトルの高分解能分光を行なうためには、高速の周波数フィードバック安定化が必要となる。Ohtsu らはレーザーの発振周波数の周波数弁別器としてファブリ・ペロー干渉計を用い、高速の電流フィードバックにより周波数安定化を行ない、約  $140\ \text{kHz}$  のスペクトル幅を得ている。分子スペクトルの測定には干渉計を掃引するか、または、2 台のレーザーを用意し、一方のレーザーを基準として、レーザー間のビートを利用して、他方のレーザーを掃引するオフセットロックによる発振周波数掃引の方法が有効である<sup>4)</sup>。

### 3. 光ヘテロダイン分光法

光ヘテロダイン分光法は、レーザーに FM 変調を加えておき、サイドバンドにおける分子の吸収係数の差をヘテロダインビートとして測定する方法である。分子吸収のない波長では FM 変調であるので、検出器には当

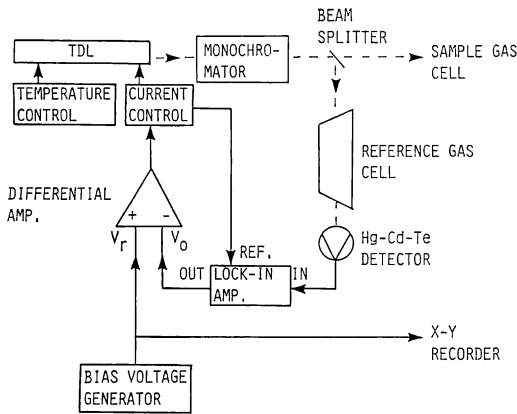


図1 測定すべき分子の吸収を用いた発振周波数掃引法

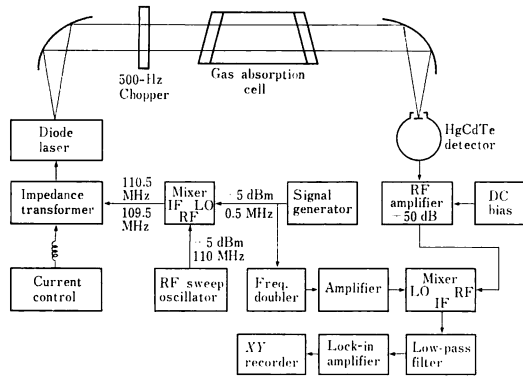


図2 2周波光ヘテロダイン分光法

然ビートが現れない。したがって、直接検出器に入る光強度のゆらぎが雑音になりにくい高感度の測定法である。半導体レーザーは注入電流の高周波変調により発振周波数の FM 変調を容易に行なうことができる。Lenth は GaAlAs 半導体レーザーを用いて、ヘテロダイン法が分子分光に非常に有効であることを示した<sup>5,6</sup>。半導体レーザーの電流変調の場合には、FM 変調と AM 変調が同時に加わってしまうが、彼は DBM (double balanced mixer) などで変調の高周波の位相に同期してヘテロダインビートを検波すれば、FM 成分だけを検出できることを示した。

光ヘテロダイン分光はサイドバンドにおける差分吸収

を検出するので、変調周波数は線幅程度であることが望ましい。大気中での NO<sub>2</sub> などを測定するときは、圧力幅によりこの値は 2~4 GHz にもなる。この周波数でのヘテロダインビートを増幅検波することは困難であるので、Janik らは 2 周波数 FM 変調分光法を考案し、色素レーザーを用いてその有用性を示した<sup>7</sup>。この方法では数 MHz から数十 MHz RF 周波数でマイクロ波を変調し、位相の揃った二つのマイクロ波を作り、これによりレーザーを FM 変調し、これによりヘテロダイン分光を行なうのである。検出器におけるビートは RF 周波数のものとなり、エレクトロニクスが簡単となる。Cooper らは、この方法を注入電流変調により FM 変調を行なうことのできる鉛化合物半導体レーザーに応用し、 $\delta I/I = 10^{-5}$  の差分吸収を検出した<sup>8</sup>。彼らの実験装置図を図 2 に示す。この実験では 110.5 と 109.5 MHz の周波数が用いられ、1 MHz の周波数で位相敏感検波を行なっている。

文 献

- 1) たとえば、末松靖晴 (編著): 半導体レーザーと光集積回路 (コロナ社, 東京, 1985).
- 2) M. Reich, R. Schieder, H. J. Clar and G. Winnewisser: "Internal coupled Fabry-Perot interferometer for high precision wavelength control of tunable diode laser," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 130-135, ダイオードレーザーの分子分光の文献あり。
- 3) S. Okude, F. Matsushima and T. Shimizu: "Stabilization of tunable diode laser for spectroscopy of low density gases," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987) L 1277-1280.
- 4) K. Kuboki and M. Ohtsu: "Frequency offset locking of AlGaAs semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987) 388-393.
- 5) W. Lenth: "Optical heterodyne spectroscopy with frequency and amplitude modulated semiconductor lasers," *Opt. Lett.*, **8** (1983) 575-577.
- 6) W. Lenth and M. Gehrtz: "Sensitive detection of NO<sub>2</sub> using high-frequency heterodyne spectroscopy with a GaAlAs diode laser," *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 1263-1265.
- 7) G.R. Janik, C.B. Carlisle and T.F. Gallagher: "Two-tone frequency-modulation spectroscopy," *J. Opt. Soc. Am.*, **B-3** (1986) 1070-1074.
- 8) D.E. Cooper and J.P. Watjen: "Two-tone optical heterodyne spectroscopy with a tunable lead-salt diode laser," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 606-608.

(1988年2月17日受理)