

最近の技術から

半導体レーザーへテロダイン検出法による分子分光法

桜井 捷海

東京大学教養学部 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1

1. まえがき

簡単に同調可能な各種の半導体レーザーが、 $3\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 帯のある分子の基本振動やそれらの分子振動の倍音の吸収 ($1\sim3\text{ }\mu\text{m}$) の分光測定に用いられている¹⁾。ビデオディスクや光情報機器に用いられる 750~900 nm 帯の GaAlAs レーザーや、市販品も現わるようになった 600 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、赤領域から中赤外線領域の分光光源としては、半導体レーザーが重要なものとなるであろう。本稿では、半導体レーザーを高感度の分光測定に用いるとき一つの技術として最近用いられるようになってきた、光へテロダイン法による分子分光について紹介する。

2. 分光用半導体レーザー光源

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 $15\sim25\text{ GHz/K}$, $3\sim6\text{ GHz/mA}$ 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 $5\sim20\text{ MHz}$ であることが知られている²⁾。320 K より 130 K まで任意の温度に冷却でき（同調波長 790~76nm），温度制御精度が 1 mK の発泡スチロール製の簡便なレーザー冷却デュワーを製作した。温度による波長掃引を用いて積算する場合には、半導体レーザーの温度を精密に測定しなければならない。レーザーダイオードの電流を一定に保っておけば、ジャンクション温度 T と端子電圧 V とはほぼ比例する ($\ln(I/I_0) \propto eV/kT$)。温度同調時の端子電圧による波長積算は十分な精度をもち、SN 比改善には十分に役に立つ。

3. 光へテロダイン分光法

光へ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へテロダインピートとして測定する方法である。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³⁾。半導体レーザーを UHF 周波数で変調すると、発振出力は変調周波数 ω_m により AM, FM 変調を受け、光電場は、

$$E(t) = E_0 \{1 + M \sin(\omega_m t + \phi)\} \exp[j\omega_0 t] \\ + j\beta \sin \omega_m t$$

となる。変調指数 $M, \beta \ll 1$ であるときには、 ω_0 、サイドバンド $\omega_0 \pm \omega_m$ のスペクトルとなる。分子吸収によるキャリアーおよびサイドバンドの吸収損失 $\delta_{0, \pm 1}$ 、位相差 $\phi_{0, \pm 1}$ とすれば、検出器上での光強度は ($\phi=\pi/2$)

$$I(t) = \exp(-\delta_0) [1 + \{\beta(\delta_{-1} - \delta_1) + M(2 + 2\delta_{-1} - \delta_{-1} - \delta_1)\}] \cos \omega_m t + \{\beta(\phi_{-1} + \phi_1 - 2\phi_0) \\ - M(\phi_{-1} - \phi_1)\} \sin \omega_m t$$

となる。cos, sin 成分は元の UHF 電場と DBM (double balanced mixer) によって位相敏感検波 (PSD) され、それぞれは分離検波される。レーザーの発振周波数 (キャリアー) を温度掃引しながら、cos または sin 成分を検出すれば、吸収スペクトル線が測定される³⁾。

ヘテロダイン分光法も一種のソース変調法の一つとも考えられる。ソース変調分光法とは、光源の周波数 (波長) を掃引しながら、AF 周波数でドップラー幅程度周波数変調し、AF 周波数に同期した透過光の変化により吸収線を検出する方法である。この方法は $1/f$ ノイズを避けられるので、波長掃引だけを行なうビデオ検出に比べて感度が良い。半導体レーザーを用いたソース変調分光の際には、透過光を変調 AF と同期検波すると、吸収がないところでも強度変調に由来する DC 成分が現われ、このゆらぎが SN 比を決める。したがって、レーザーには変調を加えずに、吸収線に変調を掛けるシャトルク変調分光やゼーマン変調分光法が S/N の点で有利である。また、レーザー光の干渉によるベースラインの荒れを取り除くのにもゼーマン変調法は威力がある。

われわれはゼーマン変調とヘテロダインを混用した分光装置を製作した。変調周波数 990 Hz の 1300 ガウスの変調磁場中に吸収セル (全長 4 cm) を置いた (図1参照)。吸収セルを透過した光は APD ダイオードで検出

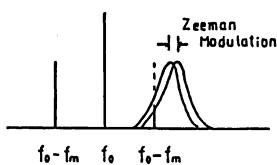
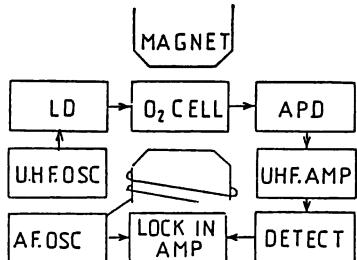


図 1 ゼーマン変調光ヘテロダイイン分光

され、UHF 受信機で増幅され、その AF 出力はロックインアンプで検波されたのちコンピューターで処理される。ゼーマン変調を用いたヘテロダイイン検出法により測定された酸素の $^3\Sigma-^1\Sigma$ 回転遷移のスペクトル線が図 2 に図示されている。装置自体はまだ最適状態ではないが、 $\Delta I/I = 10^{-6}$ の吸収が $S/N = 5$ 程度で検出可能である。

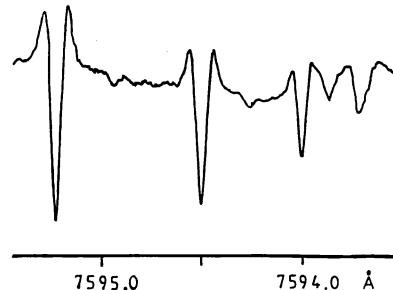


図 2 酸素の回転スペクトル(磁気双極子遷移)

る。将来改善により高検出感度が期待される。

文 献

- 1) 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に詳しい。
- 2) たとえば、末松靖晴(編著):半導体レーザー(コロナ社、東京, 1985)。
- 3) W. Lenth: "Optical heterodyne spectroscopy with frequency and amplitude modulated semiconductor laser," Opt. Lett., 8 (1983) 575-577.

(1988年11月11日受理)