

G 5

半導体レーザーの光ヘテロダイン検波法による酸素分子の分光

桜井 捷海

Katsumi SAKURAI

東京大学教養学部基礎科学科

Department of Pure and Applied Sciences, University of Tokyo

Optical heterodyne spectroscopy has been performed by modulating the current of a commercial GaAlAs diode laser at 480 MHz. In addition to FM modulation of laser frequency, double modulation on the molecular absorption was used to improve sensitivity. High sensitivity detection of molecular absorption line was demonstrated to measure the weak forbidden atmospheric band of oxygen by Zeeman modulation.

光ヘテロダイン検波を用いたレーザー分光に関してはLenthらが提案し、幾つかの実験を行い、検出の高感度、高速性を実証している。我々も温度同調可能な半導体レーザーを用いて光ヘテロダイン検波とゼーマン変調法を用いた分光器を製作し、酸素の磁気双子遷移である Atmospheric band の吸収線を高感度で測定出来たので報告する。

半導体レーザーをUHFまたはSHF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

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

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。分子吸収による吸収損失を $\delta_{0, \pm 1}$ 、位相差 $\phi_{0, \pm 1}$ とすれば、検出器上での光強度は

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

となる。cos, sin成分ともに吸収線の線形の一次微分 ($\delta_{-1} - \delta_1$)、二次微分 ($2\delta_0 - \delta_{-1} - \delta_1$) やその分散 (ϕ の成分)の一次微分、二次微分を含む。変調指数 M が0であれば、FM変調だけであり、この時には吸収線以外のところではRFビートは現われず、cos成分は吸収線の一次微分線形を与える。一般的にはAM, FM変調が加わるが、cos, sin成分はDBM (double balanced mixer) によって元のUHF信号と位相敏感検波 (PSD) することによって、それぞれは分離検波することができる。

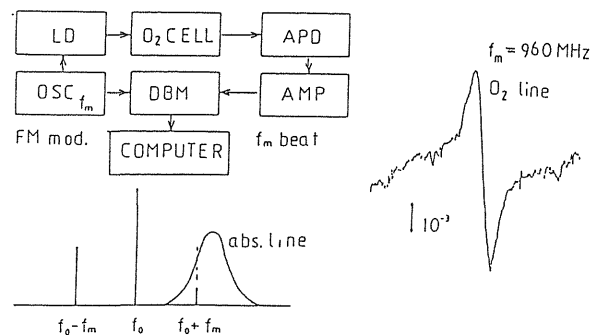


Fig. 1 Experimental arrangement of heterodyne spectroscopy and the observed spectrum of oxygen.

図1に本方式による分光装置の概念図と測定されたO₂の吸収線を示す。半導体レーザーの電流をUHFで変調する。吸収セルを透過したレーザー光はAPD検出器により検波され、IF出力はDBMにより位相検波される。レーザー発振周波数は電流または温度同調される。SIN成分だけを取り出すように高周波の位相を調節し、AM成分による寄与をキャンセルする。実際には、位相調整とDBMによりAM成分を完全にとりきれず、このゆらぎがSN比を決めている。

ゼーマン変調法とヘテロダイン検出法による分光装置 上記のレーザーに起因する雑音を徹底的に除くために、分子に変調をゼーマン変調を加え、これと同期したRFビートの交流成分を検出方法を試みた。この方法により高感度で分子の吸収を測定出来た。装置の概念図と測定された酸素の³Σ⁻¹Σ P7回転遷移(763.217nm)のスペクトル線が図2に示されている。吸収長は約4cmで、変調磁界は1500ガウスである。装置自体はまだ最適状態にはないが、 $\delta I / I = 10^{-7}$ 程度の高検出感度が期待される。

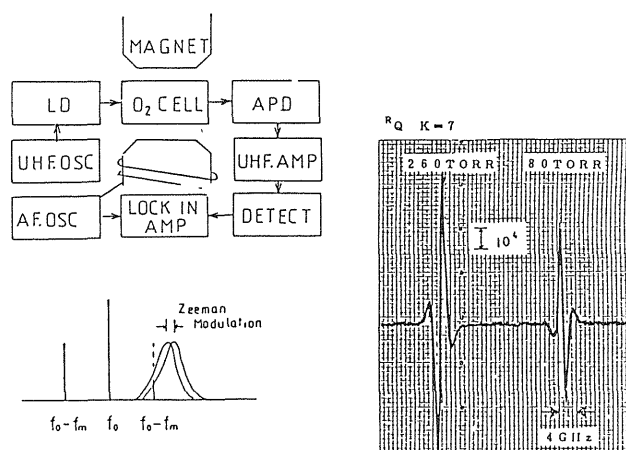


Fig. 2 Experimental arrangement of heterodyne spectroscopy with Zeeman modulation and the observed spectrum of oxygen.

分光計測でSN比を改善するためには、何回の波長掃引を行い、これを波長軸に対して積算することが必要となる。半導体レーザーの波長の掃引には、電流同調と温度同調とがあるが、同調範囲は温度同調の方が広い。したがって、簡単な原子スペクトルの観測には電流掃引、分子の複雑なスペクトルの測定には同調範囲の広い温度掃引が適している。温度掃引を用いて積算する場合には、精密に半導体レーザーの温度を測定しなければならない。幸いに半導体レーザーの電流I、ジャンクション温度Tと端子電圧Vとの間には

$$I = I_0 \cdot [\exp (eV/kT) - 1]$$

の関係がある。ここでI₀は飽和電流(温度依存性T³)、eは素電荷で、kはボルツマン定数である。レーザー発振時のように順バイアス時には、 $\exp (eV/kT) \gg 1$ であるから、レーザーダイオードの電流を一定に保っておけば、電流の温度依存性はほぼ指数関数部できまるので温度Tと端子電圧Vとはほぼ比例する($\ln(I/I_0) \propto eV/kT$)。この方式による加算を行い、よい結果を得た。

- 1) W. Lenth and M. Gerhertz; detection sensitive detection of NO₂ using high-frequency heterodyne spectroscopy with a GaAlAs diode laser, Appl. Phys. Lett. 47, 1263, (1985)