

# 最近の技術から

## レーザー冷却・トラッピング用半導体レーザー

香 取 秀 俊

東京大学工学部物理工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

### 1. ま え が き

これまで半導体レーザーは分光用光源として様々な応用が試みられてきたが<sup>1)</sup>、近年盛んに行われているレーザー冷却・トラップ実験では、近赤外域での実用的な光源として広く用いられるようになった、近赤外レーザーによる冷却・トラップ実験が可能な原子には、D2線を用いたアルカリ金属原子 K, Rb, Cs や、準安定状態  $[np^6(n+1)s; ^3P_2]$  からの遷移を用いた希ガス原子, Ar, Kr, Xe 等があり、これらのほとんどの原子で半導体レーザーを用いた冷却・トラップが報告されている。

以下では、筆者らが準安定状態 Ar・Kr のレーザー冷却・トラッピング実験<sup>2)</sup> ( $\lambda=811\text{ nm}$ ) で現在用いている半導体レーザーを例に、光源の概要を紹介する。

### 2. 外部共振器を付加した半導体レーザー

#### 2.1 半導体レーザーの諸特性

半導体レーザーでは、共振器の光学長と利得曲線の温度依存性を利用して波長のチューニングを行えるが、これらはそれぞれ異なった温度依存性をもつために、温度掃引では階段状の波長の飛びが生じ、また共振器のQ値が低いことやキャリア密度の揺らぎから、発振スペクトル幅は数十 MHz から 100 MHz となっている。このため、原子分光用光源としての利用を図るためには、これらの改善の工夫が必要となる。

#### 2.2 回折格子による光掃還

半導体レーザーのスペクトル幅の狭窄化の方法には、外部鏡・回折格子・共焦点共振器からの光掃還による方法や高速の電氣的負掃還による方法があるが、このうち回折格子による光掃還ではチューニング特性も同時に改善できる。現在市販されている数十 mW の高出力半導体レーザーでは、出射面に減反射コートがなされているために、このような光掃還が比較的安定に行える。

回折格子による光掃還を施した半導体レーザーを図1に示す。このときレーザーの発振周波数は、(1)半導体レーザーの利得スペクトル、(2)半導体レーザーの縦モ

ード、(3)回折格子の角度分散、(4)外部共振器の縦モード、によって決定されることになる。

このうち(2)、(4)は半導体レーザー共振器長、回折格子からなる外部共振器長から決まり、それぞれの縦モード間隔は  $10^2\text{ GHz}$ 、 $10\text{ GHz}$  程度である。一方、(1)の利得スペクトルは半導体レーザー縦モード間隔の  $10_2$  倍程度の広い幅をもつために、この範囲では回折格子の Littrow 条件  $\lambda=2d\sin\theta$  によってレーザーの発振波長を選ぶことができる。原子分光に必要な  $10\text{ GHz}$  程度周波数掃引は(4)の外部共振器長を電歪素子 (PZT) で変化させることで行う。

#### 2.3 外部共振器型半導体レーザーの製作

Ar, Kr の冷却・トラップでは、シャープの半導体レーザー LT 017 MD ( $\lambda=810\text{ nm}$ ,  $50\text{ mW}$ ) を用い実験を行った。  $f=4.5\text{ mm}$ 、 $NA=0.47$  のレンズによってビームのコリメートを行ったのち、 $1800\text{ g/mm}$  の回折格子により 80% を 0 次光として取出し、20% の 1 次光を半導体レーザーに帰還している。この外部共振器長はおおよそ  $1.5\text{ cm}$  とし、フリースペクトルレンジを広くとることと長時間の安定動作が可能になる。これらは  $40\text{ mm}\times 60\text{ mm}$  のジュラルミン基板上に組立て、基板全体にペルチエ素子またはヒーターによる温度制御を施し、半導体レーザーと外部共振器長の安定化を行い、さらに全体をケースで覆うことで共振器の光学長の空気による外乱を抑えた。このときの発振周波数変化は、注入電流に対し  $100\text{ MHz/mA}$  程度、共振器温度変化に対し  $10\text{ GHz}/^\circ\text{C}$  程度であった。

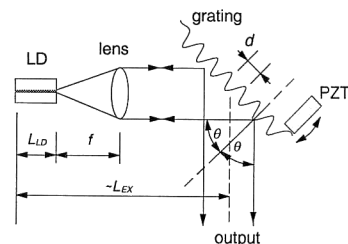


図1 回折格子による光学的掃還を施した半導体レーザー

1次回折光強度が20%のとき、PZTによる周波数の連続掃引範囲は5~10 GHzであり、回折格子の回転による波長調整範囲は10 nm程度であった。2台のレーザーのビート測定の結果から、レーザーの発振スペクトル幅はおよそ数百 kHz、中心周波数の揺らぎは3 MHz/min程度であった。これらは主として振動によるジッターであり、防震対策や次に述べる周波数安定化によってさらに改善することができる。

この半導体レーザーを用いた Kr 原子のレーザー冷却・トラップ、同位体分離を行った例を図2に示す。PZTによる外部共振器長変化によって安定な周波数掃引を行うことができ、数百 MHz程度離れた超微細準位をもつ <sup>83</sup>Kr では、半導体レーザーに直接電流変調を施し10%のRFサイドバンドを立てることで超微細準位のリサイクルを行っている。

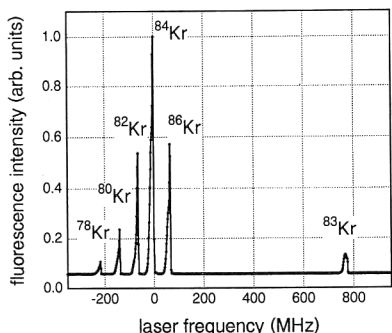


図2 外部共振器型半導体レーザーを用いた Kr 原子の冷却・トラップと同位体分離

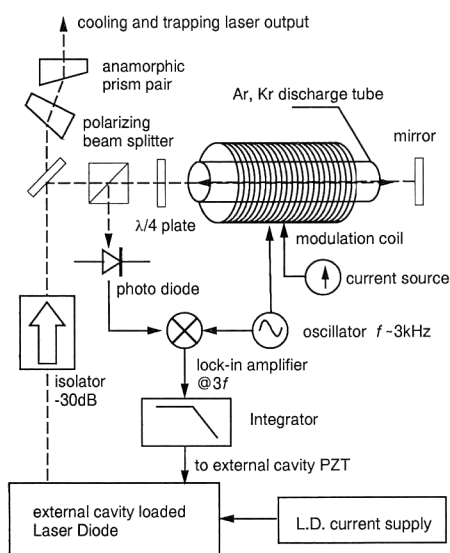


図3 冷却・トラップのためのレーザー周波数の安定化

### 3. 中心周波数の安定化

外部共振器型半導体レーザーでは、チューニング特性と発振スペクトル幅は比較的容易に改善できるが、周波数安定性は外部共振器長の熱的安定性に左右されるため、長期の周波数安定度を保つためには、より安定な基準共振器、または原子の吸収線への安定化が必要になる。

冷却・トラッピング用光源としては、冷却遷移の共鳴周波数から100 MHz程度の任意の離調をつけることが必要で、このときレーザーは無変調で行えることが望ましい。これらは、ゼーマン変調法による原子の飽和吸収線への安定化を行うことで達成できる。図3に冷却・トラップ光源の周波数安定化のブロック図を示す。

グロー放電によって Ar(Kr) 原子の準安定状態への励起を行い、 $\sigma^+$  光によって、冷却遷移の  $\Delta M = +1$  磁気副準位間の飽和吸収スペクトルを得ている。このとき、放電セルに巻いたコイルで AC 磁場を加え  $\Delta M = +1$  遷移のゼーマン変調を行い、位相敏感検波により飽和吸収スペクトルの3次微分信号をとることで、ドップラープロファイルによるバックグラウンドを除去したレーザー周波数安定化のための誤差信号を得ている。これを半導体レーザーの PZT に帰還し、安定化を行った。この方法では、ゼーマン変調コイルに DC 磁場を重畳することで、共鳴周波数からの任意の離調を付けることが可能になる。

### 4. む す び

半導体レーザーは、周波数安定化色素レーザーのような、大掛かりな装置も必要としないうえ、振幅ノイズ、周波数ジッターの点でも非常に有利である。光帰還半導体レーザーでは、さらに帰還量の増加、防震対策を施すことで、10 kHz程度のスペクトル幅を実現することもでき、数十 mWの光出力で行うことができる近赤外域での原子分光では  $Ti^{3+}: Al_2O_3$  レーザー、色素レーザーを凌ぐ理想的な光源となっている。

### 文 献

- 1) 原子分光用半導体レーザーについては次の詳細な解説がある。C.E. Wieman and L. Hollberg: "Using diode lasers for atomic physics," Rev. Sci. Instrum., **62** (1991) 1-20; K.B. MacAdam, A. Steinbach and C. Wieman: "A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb," Am. J. Phys., **60** (1992) 1098-1111.
- 2) H. Katori and F. Shimizu: "Laser cooling and trapping of argon and krypton using diode lasers," Jpn. J. Appl. Phys., **29** (1990) L2124-L2126.

(1994年6月30日受理)