

高分解能レーザー分光における4準位光ポンピング効果

Four-Level Optical Pumping Effects in High-Resolution Laser Spectroscopy

中山 茂

Shigeru NAKAYAMA

京都工芸繊維大学 工学部 電子工学科

Department of Electronics, Kyoto Institute of Technology.

§1 はじめに

最近吸収ガス中にレーザーで誘起された光化学活性を利用し、高感度にわたる高分解能レーザー分光がいくつか報告されており、精密測定に応用されている。ここでは、アルカリ原子D線について飽和分光[1]、速度選択光ポンピング(VSOP)分光[2]、偏光分光[3]での相対信号強度の理論計算[4]を行い、各分光に応用できる一般式を導出した[5]。その結果、自然放出を考慮した4準位光ポンピング効果が重要で、実験とよく一致することがわかったのをご報告する。

§2 4準位光ポンピング効果

光化学活性は原子の電気感受率によって表現される。感受率は4準位原子とpump光 $i$ (角周波数 $\omega_i$ )とprobe光 $j$ ( $\omega_j$ )レーザー電場( $E_i, E_j$ )との

相互作用を密度方程式で解き、分極 $P$ を電場に關して3次まで求めることによって与えられる。

$$P = \chi_1 E_j + \chi_3 E_j E_i^* E_i \quad (1)$$

右辺が1項はDoppler広がりを持つ線形吸収で、が2項は以下に議論するpump光による(飽和)吸収分散を与える。3次の電気感受率はDoppler近似で、 $\Delta\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j$ ,  $\omega_{ij} = (\omega_i + \omega_j)/2$  とすれば、

$$\chi_{ij}^{(3)} \propto \sum_{i,j} I_{ij}^{(0)} \exp[-(\Delta\omega_{ij}/2ku)^2] / [\omega - \omega_{ij} - i\gamma] \quad (2)$$

となり、線巾 $\gamma$ を持つ共鳴周波数 $\omega_{ij}$ での複素 Lorentz 関数の Zeeman 遷移に対する和と存在。

共鳴信号強度は、4準位系を仮定して相対強度  $I_{ij}^{(0)} = |\mu_i|^2 |\mu_j|^2 \cdot [-\delta_{i,sp} + |\mu_{sp}|^2/\Gamma]$  と、probe光とpump光の2つの遷移のDoppler広がりや重なり程度を示す指数関数の積で与えられる。ここで、 $|\mu_{sp}|^2 = |\mu_i|^2 |\mu_j|^2$  は自然放出、pump光、probe光の遷移確率で、 $\delta_{i,sp}$  は Kronecker's 記号である。 $\Gamma$  は励

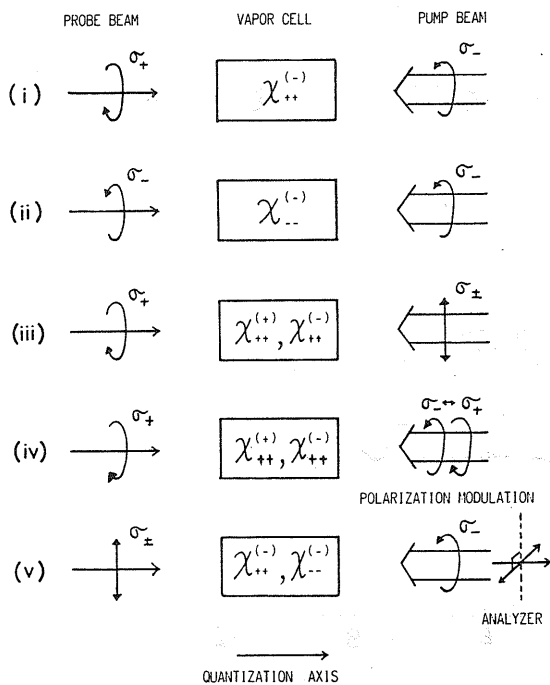


Fig. 1 円偏光光化学活性を利用した高分解能レーザー分光(i)(iii)飽和分光(iv)VSOP分光(v)偏光分光

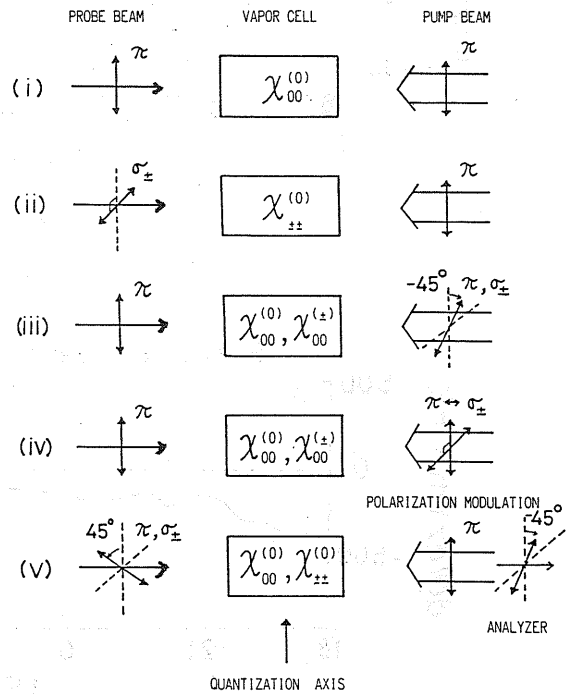


Fig. 2 直線偏光光化学活性を利用した高分解能レーザー分光(i)(iii)飽和分光(iv)VSOP分光(v)偏光分光

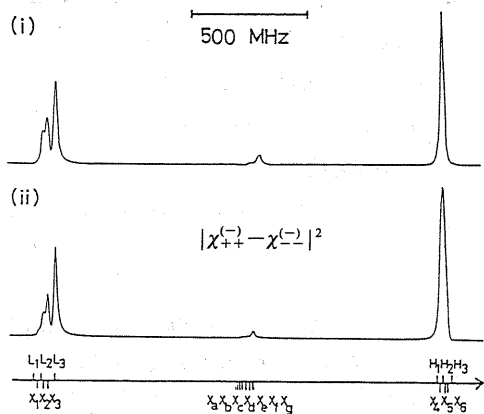


Fig. 3 NaD<sub>2</sub>線の円偏光による偏光分光 (Fig. 1 (v)) (i) W. Gawlik[6]による実験(蒸気温度:150 °C pump, probe光強度:25μW/mm<sup>2</sup> 0.5μW/mm<sup>2</sup>), (ii)理論(半値全幅:2γ=16 MHz)

起準位からの飽和率で、 $|\mu_{sp}|^2/\Gamma$  は自然放出の有様比で、pump された準位のHole burningの谷を埋め、pump された準位には bump (山) をつくる。

### S3 高分解能レーザー分光信号

分光信号は光学活性より求められる。飽和分光(Figs. 1-2, (i)-(iii))では1次感受率によるDoppler広がりが見られるがchopper等で強度変調をかけ同期検波で消せる。そこで、飽和信号はガス中でのprobe光の吸収だけを観測しているため、3次感受率の虚数部で与えられる。

$$I_{ss} \propto \text{Im}[\chi_{\pm\pm}^{(0)}] \quad (\text{see Figs. 5-6})$$

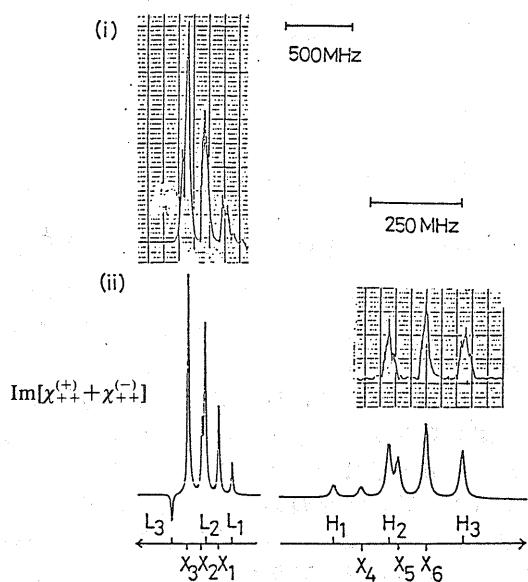


Fig. 5 CsD<sub>2</sub>線の円偏光飽和分光 (Fig. 1 (iii)). (i) 実験 [7] (25 °C, 数 mW), (ii) 理論 (15 MHz)

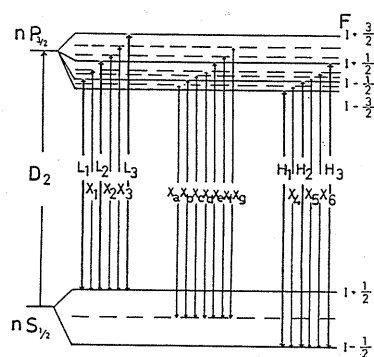


Fig. 4 アルカリ原子 D<sub>2</sub>線の超微細構造遷移とcrossover共鳴

VSOP 分光では、pump 光に偏光変調をかけて同期検波すれば、それぞれの吸収係数の差になる。例えば、円偏光光学活性では、 $I_{VSOP} \propto \text{Im}[\chi_{++}^{(+)} - \chi_{--}^{(-)}]$

となり、Doppler 広がり差をとりためるために消える。

偏光分光では、直交した偏光子横光子を用いるので、前方散乱だけを観測する。例えば、

$$I_{PS} \propto |\chi_{++}^{(+)} - \chi_{--}^{(-)}|^2$$

となり、複屈折と二色性が関係している。(see Figs. 1-2 (v) and Fig. 3)

S4 おわりに

このような相対信号強度の理論は、非線形高分解能レーザー分光での原子とレーザー電場との複雑な相互作用の解明の一助となると考える。

### References

- [1] S. Nakayama, JJAP 23 (1984) 879.
- [2] S. Nakayama, JPSJ 53 (1984) 3351.
- [3] S. Nakayama, Opt. Com. 50(1984) 19.
- [4] S. Nakayama, JJAP 24 (1985) 1.
- [5] S. Nakayama, Proceedings of Laser '84, U.S.A.
- [6] W. Gawlik, private communication (1984).
- [7] T. Hirano, private communication (1984).
- [8] J. Monden, ME Thesis, Kyoto University (1984).

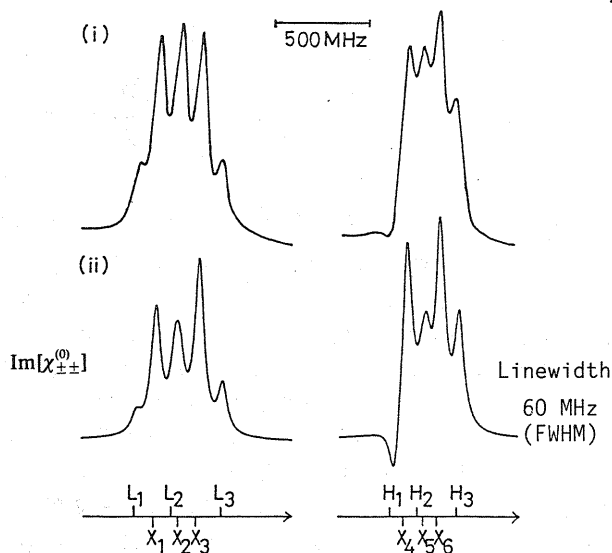


Fig. 6 CsD<sub>2</sub>線の直線偏光飽和分光 (Fig. 2 (ii)). (i) 実験 [8] (11 °C, 23.6μW/mm<sup>2</sup>; 1.3μW/mm<sup>2</sup>), (ii) 理論