

高圧ガスを封じた ^{87}Rb セルの ^{87}Rb ランプ光に 対するフィルタ効果

松田 勲, 近藤義一*, 倉持内武**, 大浦宣徳***

Filtering Effect of the ^{87}Rb Cell Containing High Pressure Foreign Gas on the ^{87}Rb Lamp Light

Isao MATSUDA, Yoshikazu KONDO*, Naimu KURAMOCHI**
and Nobunori OURA***

Summary—Spectral profiles of the ^{87}Rb D_1 line ($\lambda=794.8\text{ nm}$) passed through the cell are calculated to evaluate the filtering effect. Upon the calculation, the broadening and shift of the profile due to high pressure foreign gas are taken into account to make the cell absorb the unwanted spectral components emitted from the lamp. Filtering effect is discussed on the ^{87}Rb cell containing a pressure of 300 to 900 Torr of N_2 or He gas.

1. ま え が き

Rb 原子発振器では ^{87}Rb 基底状態の超微細構造準位間に反転分布を生じさせるために光ポンピングを行っている。このための光源として ^{87}Rb と ^{85}Rb の同位元素のエネルギー準位のわずかな違いを利用して ^{87}Rb ランプ光のうち不要成分を ^{85}Rb フィルタセルで吸収させている。しかし Cs のように天然に適当な同位体のないものでは Rb の場合のように容易にポンピング光源を得ることはできない。このためもあって Cs 原子の場合にはビーム方式が発達した。

筆者らの解析によれば ^{85}Rb フィルタセルの吸収効果は同位体の効果のみではなく Rb とともに封入するガスによるスペクトル線の圧力シフトと

圧力拡がりの効果も含まれている¹⁾。したがって同じ同位体を用いても封入ガスの種類と圧力を適当に選べばガスの圧力シフトと圧力拡がりの効果によってフィルタ効果が期待できる²⁾。本論文では Cs 原子に対するフィルタ効果の解析の前段階として従来の ^{85}Rb フィルタセルに対する動作解析を適用して、 ^{87}Rb ランプ光が、300 から 900 Torr 前後の高圧ガスを封入した ^{87}Rb セルを通過した後のスペクトルプロファイルを計算してそのフィルタ効果を検討した。

2. フィルタ効果の数値計算

2-1. 解析方法

^{85}Rb フィルタセルによる吸収効果についてはすでに報告したが^{1), 3)}, ここでは ^{85}Rb 原子を ^{87}Rb 原子におきかえてそれと同じ手法で解析した。解析の手順としては図 1 に示すようにランプの発光スペクトル $I(\nu)$ とフィルタセルの吸収スペクトル $W(\nu)$ を ^{85}Rb セルの実験結果を参考にし

工学部電子工学科助教授

* 現在東芝エンジニアリング(株)

** 東京工業大学精密工学研究所助手

*** “ 助教授

昭和 57 年 9 月 25 日受理

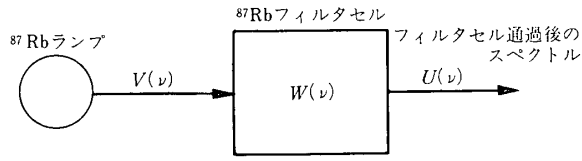


図 1 フィルタ効果の計算に用いたモデル

て次のように仮定した。

(a) ^{87}Rb ランプの発光スペクトル $V(\nu)$

^{87}Rb ランプから放射される D_1 光スペクトルプロフィールを図 2 に示すように D_1 光の成分線 c, d, e, f の 4 本の和としてそれぞれをガウス形で表わした。すなわち

$$V_i(\nu) = \exp \left\{ -\ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_i}{\Delta\nu_i/2} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで $i = c, d, e, f$

ν_i : 各成分線のピークの周波数

$\Delta\nu_i$: 各成分線の半値幅 (半値全幅)

したがって各成分線の強度を I_i とすると

$$V(\nu) = \sum I_i V_i(\nu) \quad (2)$$

となる。ここでは半値幅、強度比を文献 (1) と同様に次のように与えた。

$$\Delta\nu_c = \Delta\nu_d = 1.9 \text{ GHz} \quad \Delta\nu_e = \Delta\nu_f = 1.65 \text{ GHz}$$

$$I_c : I_d : I_e : I_f = 0.67 : 0.67 : 0.2 : 1$$

(b) ^{87}Rb フィルタセルの

吸収スペクトル $W(\nu)$

^{87}Rb D_1 線の吸収原子の分布は ^{87}Rb ランプの場合と同様に c, d, e, f の 4 本の和として、それぞれは原子の衝突による効果を考慮してローレンツ形とした。また強度比は発光スペクトルと同じとした。すなわち

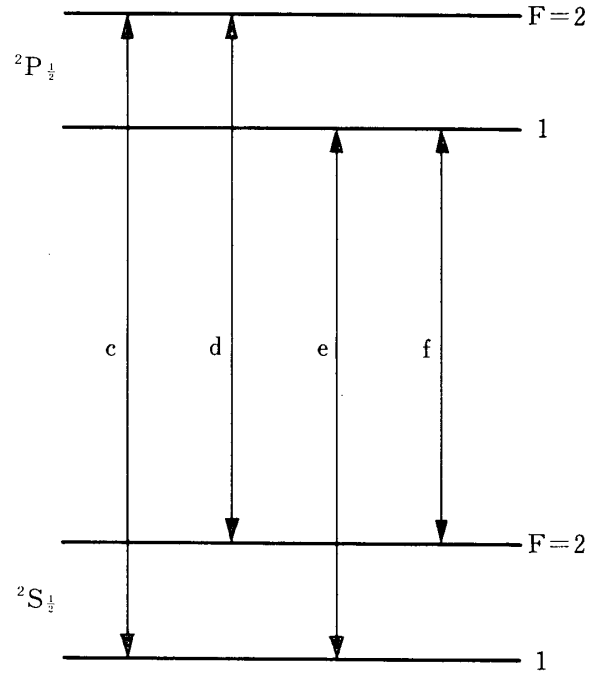
$$W_j(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{2}{\Delta\nu_j} \left\{ 1 + \left(\frac{\nu - \nu_j}{\Delta\nu_j/2} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (3)$$

$j = c, d, e, f$

$$W(\nu) = \sum I_j W_j(\nu) \quad (4)$$

$$\int_0^\infty W(\nu) d\nu = 1 \quad (5)$$

ここで ν_j は成分線のピークの周波数、 $\Delta\nu_j$ は成分線の半値幅、 I_j は 4 本の成分線の強度であ

図 2 ^{87}Rb D_1 線のエネルギー準位とそれに対応する遷移の名称

る。

吸収線の各成分の中心周波数 ν_j 、半値幅 $\Delta\nu_j$ は封入ガスの圧力シフトと圧力拡がりの効果によって図 3 のように変化する。ここでは封じ切りセルを考えてこの効果を次式のように与える。

$$\nu_j = \nu_{j0} + \alpha_0 P = \nu_{j0} + \alpha_0 P_0 T / T_0 \quad (6)$$

$$\Delta\nu_j = \Delta\nu_{j0} + \beta_0 P = \Delta\nu_{j0} + \beta_0 P_0 T / T_0 \quad (7)$$

ただし

ν_{j0} : 封入ガスがないときの中心周波数 (Hz)

$\Delta\nu_{j0}$: 封入ガスがないときの半値幅 (Hz)

T : フィルタセルの動作温度 (K)

T_0 : ガス封入時の温度 (293 K)

P : 温度 T のときのガス圧 (Torr)

P_0 : 封入時のガス圧 (Torr)

α_0 : スペクトル線の中心周波数のシフト係数 (Hz/Torr)

β_0 : スペクトル線幅 (全幅) の拡がり係数 (Hz/Torr)

ところでアルカリ原子に対する各種高圧封入ガスの圧力効果が発表されている⁴⁾が、ここでは比較的低压の封入気体に対して筆者らが実験と解析

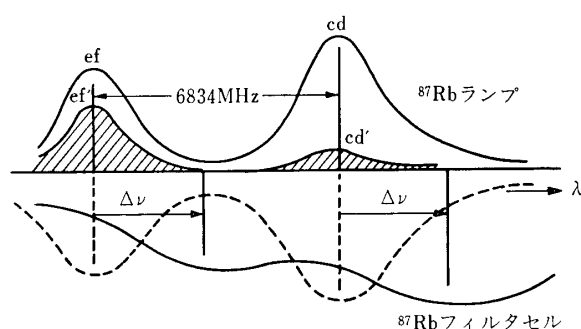


図 3 封入ガスによる ^{87}Rb フィルタセルの吸収スペクトルの圧力シフトと圧力拡がりの効果（圧力シフトが負の係数をもつ場合の例）。斜線部はフィルタセルで吸収された後のランプ光のスペクトルを示す。

で求めた以下の値を採用した¹⁾。

$\text{Rb } D_1$ 線 (794.8 nm) の場合

N_2 に対して $\alpha_0 = -8.0 \text{ MHz/Torr}$

$\beta_0 = 11.0 \text{ MHz/Torr}$

He に対して $\alpha_0 = 9.0 \text{ MHz/Torr}$

$\beta_0 = 24.0 \text{ MHz/Torr}$

(c) フィルタセル通過後のスペクトル $U(\nu)$

$V(\nu)$ なる光が長さ l のフィルタセルに入射するときセル内の ^{87}Rb 原子で吸収されて出てくる光 $U(\nu)$ は吸収方程式を解くことにより

$$U(\nu) = V(\nu) \exp\{-K_l N W(\nu)\} \quad (8)$$

で表われる。ここでスペクトル強度 $V(\nu)$ は 1 Hz 幅における光子数/ $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ で N は 1 cm^3 あたりの吸収原子数、 $W(\nu)$ は 1 Hz 幅における吸収原子の分布関数、 K_l は吸収過程における係数でここでは ^{85}Rb セルの場合にならって¹⁾ $K_l = 0.01 \text{ cm}^3 \cdot \text{Hz}$ とした。温度 T における Rb 蒸気の密度 N としては

$$\log_{10} N = 30.98 - 4560/T - 2.45 \log_{10} T$$

を用いた⁵⁾。

2-2. 計算結果

従来の ^{85}Rb フィルタセルの場合は封入ガス圧が 100 Torr 前後が普通であるが^{1), 3)} ここではガスの圧力効果を大きくすることを考えて封入ガスのガス圧を 100 Torr から 900 Torr まで変えてフィルタセル通過後の $\text{Rb}D_1$ 光のスペクトルプロ

フィルの計算を行った。ただし一体化セル⁶⁾ を考えてフィルタセル長は 6 mm とした。一体化セルではフィルタセルとランプとは同一の温度で動作させるが、この計算ではランプ温度はフィルタセル温度によらず 100°C 一定とした。封入ガスとしては圧力効果の係数を測定済みの窒素とヘリウムを選んだ。100 Torr 程度の低圧ではあまり効果がないので 300~900 Torr に対する計算結果を図 4 (A), (B) に示す。セル温度としては $30 \sim 110^\circ\text{C}$ まで 20°C おきにとった。図の上半分はポンピング光のスペクトルで下半分はフィルタセルの吸収特性を示す。

3. 考察および検討

ポンピング用光源としては、共鳴セル内の ^{87}Rb 原子の熱平衡状態をくずす機能を有することが必要である。そのためには、 ^{87}Rb ランプの発光スペクトルプロフィルのうち、 D_1 線では、 cd 成分または ef 成分のいずれかを何らかの方法で強く吸収し、出力光に強度差をつくればよい。

通常の Rb 原子発振器において、 ^{87}Rb ランプ— ^{85}Rb フィルタセルの組合せを用いたポンピング光源を使用した場合、 ^{87}Rb の超微細構造遷移の共鳴信号の大きさは ef' と cd' の差にほぼ比例するので⁷⁾、その強度差が大きい程 VCXO を制御しやすい。この観点から ^{87}Rb ランプ— ^{87}Rb フィルタセルの組合せである今回の解析結果をみると窒素ガスを封入した場合ガス圧が 300~700 Torr で、フィルタセル温度が 110°C 程度であれば ef' 成分の方が cd' 成分よりも 2 倍以上大きくなりポンピング光源として使用可能な特性をもっている。

ヘリウムガスは窒素ガスとは逆にスペクトルの中心を波長の短い方にシフトさせるので、除去する成分は窒素の場合と逆になる。計算結果ではガス圧が 500~700 Torr で、フィルタセル温度が 110°C 程度になると窒素の場合とは逆に cd' 成分の方が ef' 成分よりも 2 割程度大きくなり、やはりポンピング光源として使用可能な特性を示して

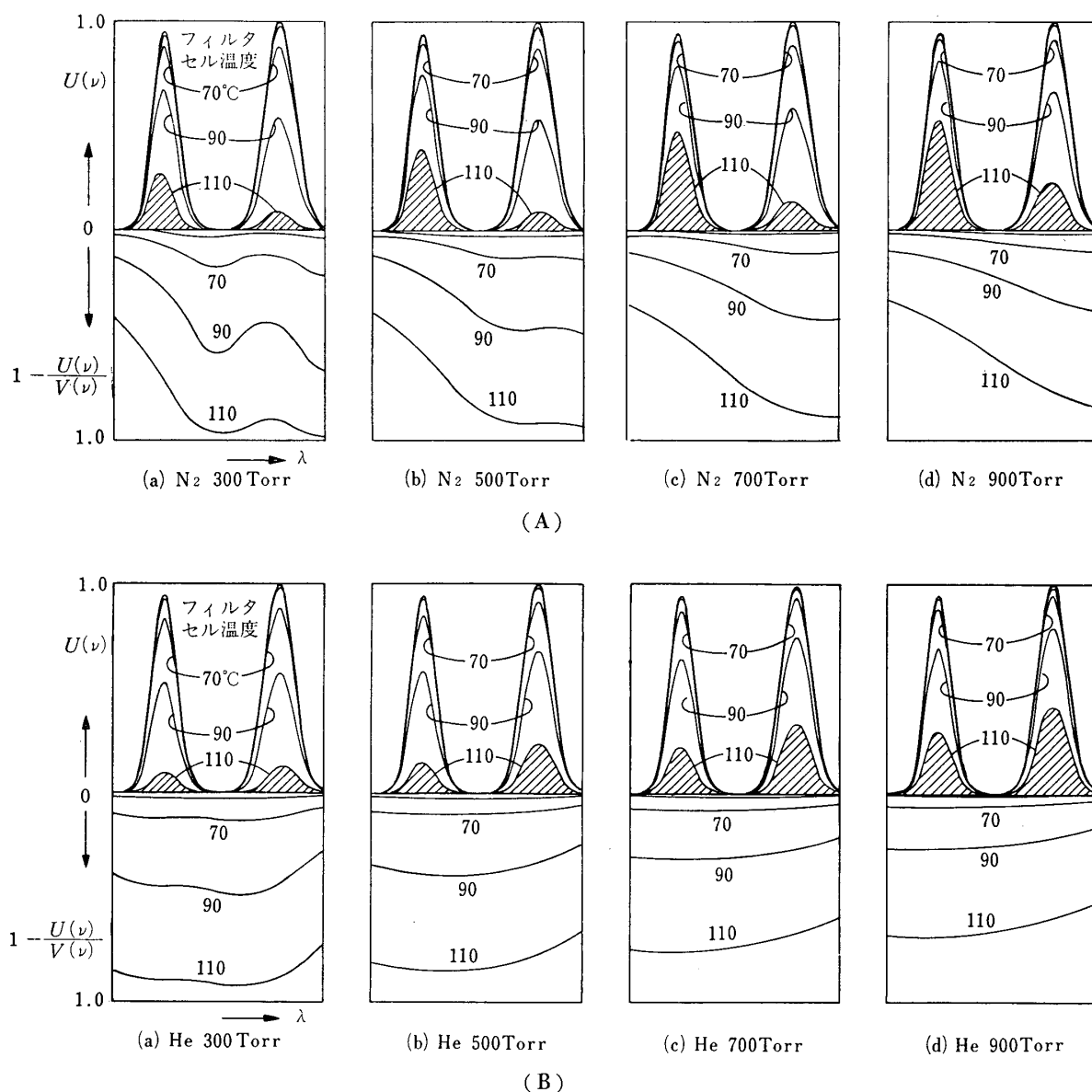


図 4 ^{87}Rb ランプ光の D_1 線が ^{87}Rb フィルタセルを通過した後のスペクトルプロファイル $U(\nu)$ と吸収特性 $1 - \frac{U(\nu)}{V(\nu)}$ の計算結果, (A) は封入ガスが窒素の場合, (B) はヘリウムの場合でランプ温度 100°C , フィルタセル長は 6 mm とした. 各図の $U(\nu)$ の左側の成分が ef' で右側の成分が cd' である. ガス圧の数値は P_0 の値を示す.

いる.

また, いずれのガスの場合も封入ガス圧をさらに高くしてもフィルタ効果があらわれるが圧力シフトよりも圧力拡がりの効果が大きくなって吸収特性が平坦になってくるため, ポンピング光源の特性としてはかえって悪くなっている.

本研究の結果を Cs 原子に適用する場合, ^{87}Rb 原子の超微細構造分離が 6834 MHz であるのに

対して Cs 原子では 9192 MHz とやや広いためフィルタセルによる吸収効率が低下することが予想されるが, ガスの種類や圧力の条件を選べば Cs ランプ-Cs フィルタセルの組合せでセシウムポンピング光源を得る可能性はあると考えられる.

4. 結 論

本研究ではガスの圧力効果を積極的に利用する

ために 100 Torr から 900 Torr までの高い圧力のガスを封入した ^{87}Rb セルを考え、 ^{87}Rb ランプ光がこれを通過した後のスペクトルプロファイルを計算することによって ^{87}Rb セルのフィルタ効果を調べた。その結果 N_2 ガスと He ガスの場合、封入ガス圧が 500 ± 200 Torr でセル温度が 110°C 程度で十分なフィルタ効果を示し、 ^{87}Rb ランプ - ^{87}Rb フィルタセルの組合せでも光ポンプ用光源として使用可能な特性が得られた。

本研究は、ランプと同じ原子番号のアルカリ元素をフィルタセルに用いても、封入ガスによる圧力シフトと圧力拡がりを利用すれば、優れたポンピング光源が実現できることを確認するために行なったもので、本研究の考え方を Cs 原子に適用した場合にも、Rb の場合と同等の性能のポンピング光源が得られるものと考えられる。

参考文献

- 1) N. Kuramochi, I. Matsuda and H. Fukuyo, "Analysis of the effect of foreign gases in the filtering action of a ^{85}Rb cell", J. Opt. Soc. Am., Vol. 68, No. 8, p. 1087, 1978.
- 2) 松田, 近藤, 倉持, 大浦 「同一の同位元素をフィルタセルに用いる超微細ポンピング用光源」第 41 回応用物理学学会学術講演会予稿集 17 p-K-5, 1980.
- 3) N. Kuramochi, I. Matsuda, N. Oura and H. Fukuyo, "Analysis of Rb optical pumping light sources", Japan J. Appl. Phys., Vol. 18, No. 2, p. 381, 1979.
- 4) W. R. Hindmarsh and J. M. Farr, "Collision broadening of spectral lines by neutral atoms", Progress in Quantum Electronics, Vol. 2, Part 3, p. 191, 1972.
- 5) C. J. Smithells, "Metals Reference Book Vol. 2", Butterworths, London, p. 655, 1962.
- 6) N. Kuramochi, S. Naritsuka and N. Oura, "Composite-type ^{87}Rb optical-pumping light source", Optics letters, Vol. 6, No. 2, p. 73, 1981.
- 7) I. Matsuda, N. Kuramochi, N. Shiomi and H. Fukuyo, "Signal intensity characteristics of the ^{87}Rb double resonance due to the pumping light", Japan J. Appl. Phys., Vol. 16, No. 3, p. 391, 1977.