

13 共鳴散乱方式レーザレーダによるNa層の観測

Observation of the Sodium Layer by Laser Radar Based on Resonance Scattering

上山 弘, 有賀規, 岡野章一, 稲場文男*, 十文字正憲*

Kamiyama, H., T. Aruga, S. Okano, F. Inaba*, and M. Jumonji*

東北大学理学部 地球物理学科 *東北大学電気通信研究所

Geophysical Institute, Tohoku University

*Research Institute of Electrical Communication,

Tohoku University

§ 1. おえびき

地球大気からの散乱を扱う従来のレーザレーダは気体のRayleigh散乱に基づいており、散乱断面積が小さいこと及び気体の種類についての情報が得られないという致命的な欠点を持っている。これに対し共鳴散乱方式のレーザレーダは散乱断面積が桁違いに大きいこと、この他に、ある特定の気体に着目できるという長所を持っているので、色々の観測から関心を集めているが、超高層大気物理学の研究分野においても、その長所は極めて応用性に富むものと考えられる。

一方量子エレクトロニクス分野での大きな課題であり、レーザの発振波長を可変にする問題は Sorokin⁽¹⁾らによる色素レーザの開発と以来、回折格子や干渉フィルター等を用いて発振波長を連続可変にする試みが各地で行われ、現在ではレーザ光の波長選択は近紫外から近赤外の領域でほぼ可能になっている。しかし、完全に実用化の域には達していない。このような波長選択の技術は広い応用面をもつが、特に種々の原子、分子の共鳴線に波長を同調し、共鳴散乱を超高層大気の研究に利用することは甚だ有望な研究方法である。

1969年、英国の Bowman 等⁽²⁾は共鳴散乱方式レーザレーダで超高層のNa層の観測に初めて成功した。我々も共鳴散乱方式レーザレーダの理論的検討⁽³⁾、波長可変色素レーザの開発並に室内実験⁽⁴⁾を行って来たと、最近東北大学蔵王観測所において、Na層を90~95kmの高度に検出することに成功したので、その結果を報告する。

§ 2. Naの共鳴散乱について

光吸収によって励起され、再び光を放出する現象は光ルミネッセンスと呼ばれる。その図に示すように四種類に分けられる。

共鳴散乱の微分散乱断面積はHubberの理論⁽⁵⁾と縮退系に展開して結果次のようになる。トッラー中 γ_0 、自然中 γ_N 、衝突中 γ_c より充分大きく且つクエンチングが無視できる時は、縮退している系 α, β (α の上のレベル)の遷移に対して

$$\left(\frac{d\sigma(\omega_i)}{d\Omega}\right)_{\alpha\beta} = \left(\frac{4\pi}{hc^2}\right)^2 (\pi \ln 2)^{1/2} \frac{\omega_i^4}{\gamma_0 \gamma_N} \frac{1}{g_\beta} \left\{ \sum_{ab} |\alpha_i|^2 |\alpha_f|^2 \right\} \exp\left[-\frac{4(\omega_i - \omega_0)^2 \ln 2}{\gamma_0}\right] \quad (1)$$

$$\gamma_0 = 2\omega_i \left(\frac{kT}{mc^2}\right)^{1/2} (2 \ln 2)^{1/2} \quad (2)$$

ω_i : 入射光の振動数, h : plank定数, a, b : α, β 内のエネルギー順位

α_i, α_f : 天々入射, 散乱光の偏光方向双極子モーメント演算子成分のマトリックス要素

g_β : 統計学的重率

Heisenbergによれば、磁場のない時の偏光は非常に弱い。磁場の平行に入射光の偏光している場合と等価である。White理論⁽⁶⁾を導入して計算すると、円偏光又は偏光していない入射光に対して原子の場合

$$\sum_{ab} |\alpha_i|^2 |\alpha_f|^2 = \left(\frac{3hc^3}{8\pi\omega_i^3}\right) l A_{J'J''}^2 \quad (3)$$

$A_{J'J''}$: $J'(L), J''(F)$ 間の遷移確率

l は $\Delta J = 0, \pm 1$ の場合によって異なる。例えば $J'' = J' + 1$ の時は

$$l = \frac{1}{\{(J'+1)(2J'+3)\}^2} \cdot \frac{1}{2} \sum_{M'=-J'}^{J'} \left[\{(J'+M'+1)(J'-M'+1)\}^2 (1 + \omega_i^2 \theta) + (J'+M'+1)(J'-M'+1) \{(J'+M'+1)(J'+M'+2) + (J'-M'+1)(J'-M'+2)\} \left(\frac{2 + \sin^2 \theta}{2}\right) \right] \quad (4)$$

J : 全角運動量, M : 磁気量子数, θ : 散乱角

(3)と(4)を代入し、入射光の中心周波数 ω_0 (波長 λ_0)に一致した時

$$\left(\frac{d\sigma(\lambda_0)}{d\Omega}\right)_{J'J''} = \frac{9}{16} \frac{(\ln 2)^{1/2}}{\pi^{1/2}} \frac{\lambda_0^2}{\gamma_0 \gamma_N} \frac{l}{2J''+1} A_{J'J''}^2 \quad (5)$$

一方、吸収の断面積は全散乱断面積に等しい。Chamberlain⁽⁷⁾の吸収の断面積から全散乱断面積を求めるとできる。しかし微分散乱断面積を求めためには、彼の理論にHamilton⁽⁸⁾とChandrasechar⁽⁹⁾の理論に於けるface function $P(\theta)$ を導入して角度依存性を考慮しなければならない。その結果

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\sigma(\lambda_0)}{d\Omega}\right)_{\alpha\beta} &= \sigma_0 \frac{A_{\alpha\beta}}{\sum_{\alpha} A_{\alpha\beta}} \frac{P}{4\pi} \\ &= \frac{(\ln 2)^{1/2}}{8\pi^{1/2}} \frac{\lambda_0^2}{\gamma_0 \gamma_N} \frac{g_\alpha}{g_\beta} A_{\alpha\beta}^2 P \end{aligned} \quad (6)$$

σ_0 : 吸収断面積

P は $\Delta J = 0, \pm 1$ の場合によって異なる。例えば $J'' = J' + 1$ の場合 phase matrix

$$\frac{3}{2} \frac{J'(2J'+1)}{10(J'+1)(2J'+3)} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \frac{3(6J'^2+17J'+10)}{10(J'+1)(2J'+3)} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

から求める。(6)の原子aの場合

$$\left(\frac{d\sigma(\lambda_0)}{d\Omega} \right)_{J'J''} = \frac{(\ln 2)^{1/2}}{8\pi^{1/2}} \frac{\lambda_0^2}{\gamma_0 \gamma_N} \frac{2J'+1}{2J''+1} A_{JJ''}^2 \cdot P \quad (8)$$

超微細構造を考慮しに(1)-(8)式で: $J \rightarrow F, M \rightarrow M_F, g_J \rightarrow g_J(2I+1)$ とすればよい。

Naについて散乱の強度比を求めたものにaが表されている。Naのエネルギー準位をb図、超微細構造における吸収の理論的スペクトルをc図に示して。

§3. 共振波長の狭帯域化

3-1 回折格子

Echelle格子の回折条件は

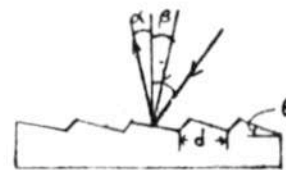
$$m\lambda = d(\sin i \pm \sin \alpha), \quad m: \text{次数} \quad (9)$$

レーザ共振器に用いる場合、 $i = -\alpha, m = 1$

$$\lambda = 2d \sin \alpha \quad (10)$$

$$\Delta\lambda = 2d \cos \alpha \cdot \Delta\alpha \quad (11)$$

$\Delta\lambda$: 共振波長中, $\Delta\alpha$: ビームの広がり



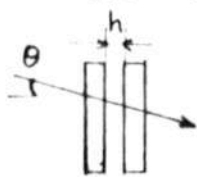
3-2 Fabry-Perot 型干渉フィルタ

i) 干渉フィルタの反射率による定波長中, $(\Delta\lambda)_R$

$$\text{干渉条件} \quad m\lambda_m = 2h \cos \theta \quad (12)$$

$$(\Delta\lambda)_R = \delta\lambda \cdot \frac{1}{F} \quad (13)$$

$\delta\lambda$: free spectral range, F : finesse



$$\delta\lambda = \lambda_{m-1} - \lambda_m \approx \frac{\lambda_m}{m} \quad (m \rightarrow \infty) \\ = \frac{\lambda^2}{2h \cos \theta} \quad (14)$$

$$F = \pi R^{1/2} / (1-R) \quad (15)$$

ii) 干渉フィルタの面精度による定波長中, $(\Delta\lambda)_D$

$$\Delta h \neq 0, \quad (13)より \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta h}{h} \quad (16)$$

面精度 Δh は面精度指数 g を用いて

$$\Delta h = \lambda/g \quad (17)$$

と表わす。 (14), (16)より

$$g = \frac{\lambda^2}{h\Delta\lambda} \approx 2\delta\lambda/\Delta\lambda \quad (\theta \rightarrow 0) \quad (18)$$

面精度による定波長 finesse F_D を便宜上導入する。

$$(\Delta\lambda)_D = \delta\lambda \frac{2}{g} = \delta\lambda/F_D \quad (19)$$

$$F_D = \frac{8}{2} \quad (20)$$

iii) 入射ビームの拡がりによる波長巾, $(\Delta\lambda)_B$

$$\begin{aligned} (\Delta\lambda)_B &= \lambda \cdot \tan \theta \cdot \Delta\theta \\ &\approx \lambda \cdot \theta \cdot \Delta\theta \quad (\theta \rightarrow \text{小}) \end{aligned} \quad (21)$$

§4. 超高層Na層の観測結果

観測に用いた色素レーザの概略図をオ4図に示す。色素には Rhodamine 6G, 10^{-4}M/l のエタノール溶液を用い、放電管は空気を放電ガスとするものを南産して使用し、入力 120J (22kV , $0.5 \mu\text{F}$) で約 1mJ の出力、発振波長巾約 0.03\AA の状態で NaD_2 線 (5889.95\AA) に同調させた。繰返し 1Hz で毎回 100shots の光電子パルス数を積算した。一例をオ5図に示し、オ6図は15分おき2時間のデータである。90-95kmに鋭いピークがあり、2~3kmの scale height である。オ6図から予想された。Na層のピークでの密度を求め、Aスコフ方式を用いて10-15kmの Rayleigh 光による光電子パルスの写真を撮った。レーザレーザ方程式

$$N_S = N_0 n \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \frac{A}{h^2} \Delta h \cdot T^2 \cdot K \eta L \quad \text{より} \quad (22)$$

$$\frac{n(R)}{n(\text{Na})} = \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Na}} \cdot \frac{1}{h_{\text{Na}}^2} \cdot \frac{1}{N_{S, \text{Na}}} \cdot L}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_R \cdot \frac{1}{h_R^2} \cdot \frac{1}{N_{S, R}} \cdot 1} \quad (23)$$

を用いて $n(\text{Na})$ を求めることができた。6月14日の場合、 $n(\text{Na}) \approx 1.0 \cdot 10^3 \text{cm}^{-3}$ であり、5月31日にもほぼ同じ値を得た。

参考文献

- (1) Sorokin, P.P. et al.; IBM J., 10, 162 (1966)
- (2) Bowman, M.R., A.J. Gibson, and M.C.W. Sandford; Nature, 221, 456 (1969)
- (3) 上山, 有賀, 粕場, 小林; 中間圏・電離圏シンポジウム報告集 (東大宇宙研), 219 (1970)
- (4) 十文字, 有賀, 小林, 粕場; 東北大学電通談話会記録, 41, 1. 13 (1972)
- (5) Huber, D.L.; Phys. Rev., 170, 2, 418 (1968)
- (6) White, H.E.; "Introduction to Atomic Spectra" McGraw-Hill, New York, 161 (1934)
- (7) Chamberlain, J.W.; "Physics of Aurora and Airglow" Academic Press, New York and London, 422 (1961)
- (8) Hamilton, D.R.; Astrophys. J., 106, 457 (1947)
- (9) Chandrasekhar, S.; "Radiative Transfer" Dover Pub. Inc., 50 (1960)

表 1

fine structure

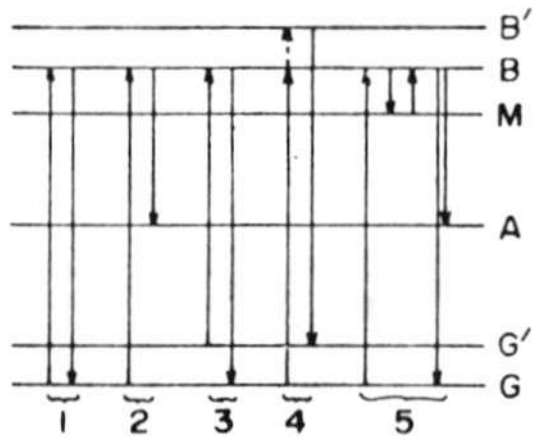
	$\frac{\sigma_0}{4\pi}$ / factor	$(\frac{d\sigma(\lambda_0)}{d\Omega})$ / factor					
		$\theta = 0, \pi$			$\theta = \pi/2, 3\pi/2$		
		Res. Scatt.		Fluo.	Res. Scatt.		Fluo.
R.R.S.	I.R.S.	R.R.S.	I.R.S.				
D ₁	4	4		0	4		0
		0	4		0	4	
D ₂	8	10		0	7		0
		6	4		3	4	

hyperfine structure

	$\frac{\sigma_0}{4\pi}$ / factor	$(\frac{d\sigma(\lambda_0)}{d\Omega})$ / factor							
		$\theta = 0, \pi$			$\theta = \pi/2, 3\pi/2$				
		Res. Scatt.		Fluo.	Res. Scatt.		Fluo.		
R.R.S.	I.R.S.	R.R.S.	I.R.S.						
D ₁	D _{1a}	1 ^D ₁₂	4000	3350		650	3325		675
				50	3300		(750)	25	
	D _{1b}	1 ^D ₂₁	4000	2350		1650	1825		2175
				1050	1300		(2350)	525	
D ₂	D _{2a}	2 ^D ₁₂	800	134		650	133		675
				2	132		(750)	1	
	D _{2b}	2 ^D ₂₁	4000	2350		1650	1825		2175
				1050	1300		(2350)	525	
D ₂	D _{2a}	2 ^D ₂₂	4000	2350		1650	1825		2175
				1050	1300		(2350)	525	
	D _{2b}	2 ^D ₀₁	1600	1600		0	1600		0
				0	1600		0	1600	
D _{2b}	2 ^D ₁₁	4000	3750		650	3215		675	
			1250	2500		(670)	625		2500
D _{2b}	2 ^D ₂₁	4000	2350		1650	1825		2175	
			1050	1300		(2350)	525		1300

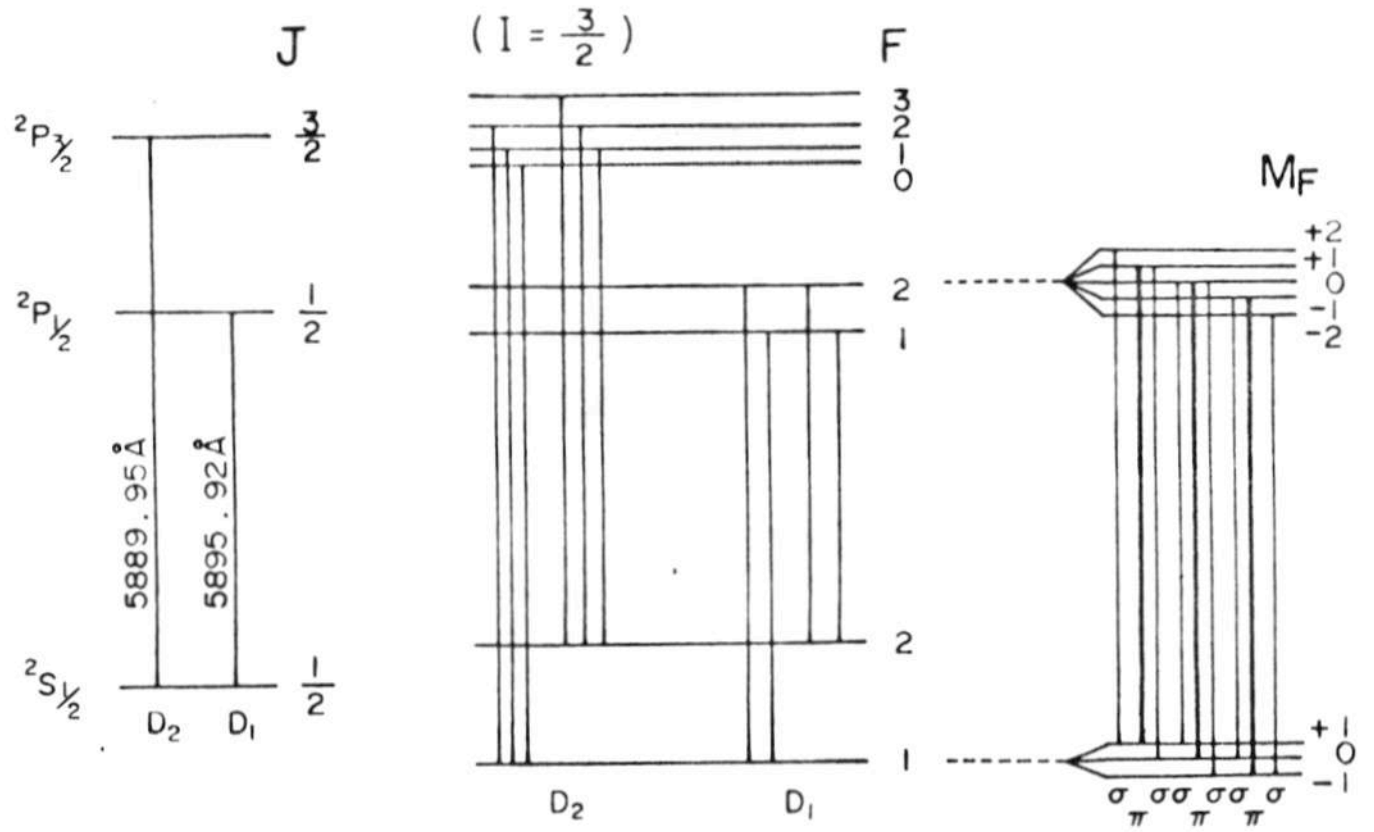
D ₁	D _{1a}	8000	5700		2300	5150		1850
			1100	4600	(3100)	550	4600	(2450)
D ₁	D _{1b}	4800	2500		2300	1950		2850
			1100	1400	(3020)	550	1400	(2490)
D ₂	D _{2a}	16000	15028		2300	12486		1850
			5084	9944	(3100)	2542	9944	(2450)
D ₂	D _{2b}	9600	7700		2300	6550		2850
			2300	5400	(3020)	1150	5400	(2490)

D ₁	12800	12800 (14320)			12800 (12040)		
		8200		4060	7100		4600
D ₂	25600	27328 (28848)			24736 (23976)		
		22728		4600	19036		4600
		7384	15344	(6120)	3692	15344	(4940)

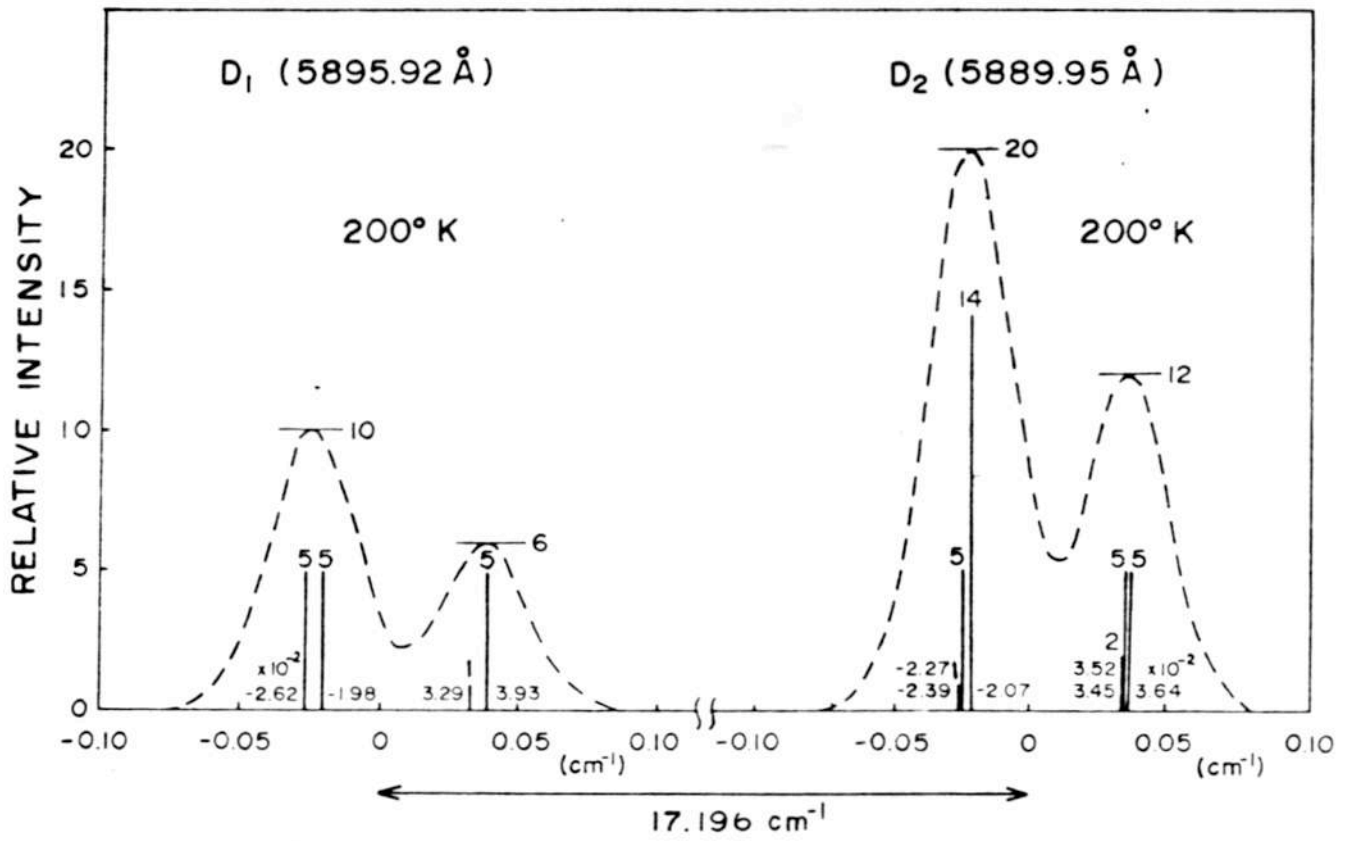


- 1 : resonance fluorescence
- 2 : fluorescence
- 3,4 : anti - Stokes fluorescence
- 5 : phosphorescence

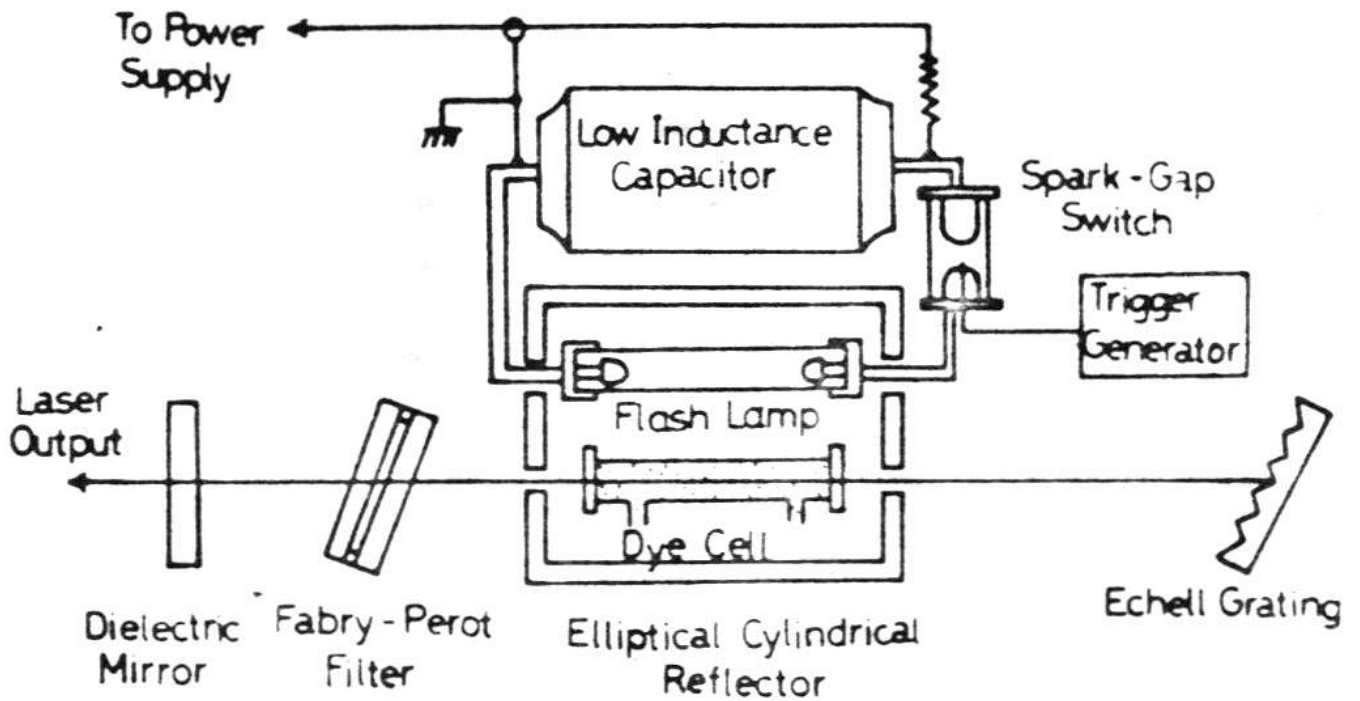
★ 1 回



★ 2 回



→ 3 图



→ 4 图

