



Title	スピンドリップラマンレーザ
Author(s)	安田, 和人; 白藤, 純嗣
Citation	大阪大学低温センターだより. 1980, 29, p. 4-7
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/9200">https://hdl.handle.net/11094/9200</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# スピンドリップラマン レーザ

## — 可変波長赤外レーザ —

工学部 安 田 和 人 (吹田 4567)  
白 藤 純 嗣

理化学辞典によると、「ラマン効果」とは「単色光を物質にあてて散乱させる時、散乱光のうちにその物質に特有な量だけ波長が変わった光が混って来る現象」であると説明されている。物質に特有な量は光と相互作用する素励起で決まるが、磁場中の電子のエネルギーが上向きスピンのものと下向きスピンのものとで少し違っているために生じるゼーマン分裂の大きさによって特有な量が決まる時、そのラマン効果を特にスピンドリップラマン（以下SFRと略記）効果という。つまり図1のようにエネルギーの低いゼーマン準位の電子（上向きスピン）がフォトンエネルギー  $\hbar\omega_i$  によって空中高く放り出され、どこかにつかまるとまもなく1段上のゼーマン準位（下向きスピンの準位）に落下するが、その時エネルギー  $\hbar\omega_s = \hbar\omega_i - g\mu_B B$  ( $g$  は実効  $g$  因子、 $\mu_B$  はボーア磁子、 $B$  は磁場の強さ) のフォトンを放出（ストークス散乱）する。逆に上の段から下の段へ墜落する過程（反ストークス散乱）もあり、その時には  $\hbar\omega_s = \hbar\omega_i + g\mu_B B$  となる。このようなラマン過程では電子のスピンの向きが反転するところからスピンドリップの名がつけられている。

SFR散乱を生じる状態で入射レーザ光量を次第に大きくして行くと、電子の墜落はでんではばらばらではなく一どきに位相揃えて起るコヒーレントな状態となり、誘導ラマン散乱と呼ばれる状態になる。こうなればしめたもので、光共振器（といっても半導体結晶の両面を平行平坦に鏡面研磨しておくだけでよい）内に入れて正の帰還がかかるようにするとSFRレーザが出来あがる。

SFR光の波長シフトの大きさは  $g\mu_B B$  で決まるから磁場  $B$  に対して可変となる。波長

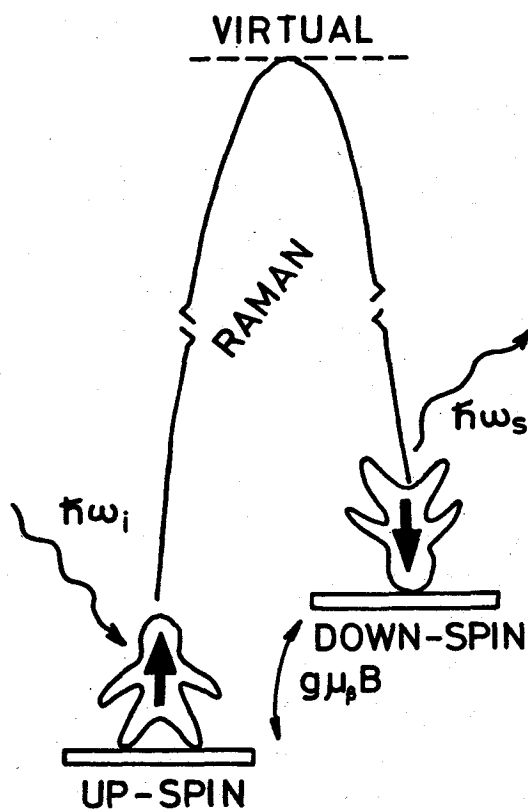


図 1.

可変のコヒーレント光源としての利用にはできるだけ広い範囲に波長が変えられることが望ましい。そのためには $g$ 値の大きいnarrow gap半導体中の伝導電子を利用するのが賢明で、InSb、 $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ や $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ が用いられる。SFRレーザは $g$ 値の強磁場効果やその異方性を調べるのにも有効で、CdS、CdTeなどで実験が行われている。

ランダウ準位間のラマン遷移を利用すると波長シフトは $\hbar\omega_c$  ( $\omega_c$ はサイクロトロン周波数)となり、 $g\mu_B B$ より広い範囲にわたって波長可変のレーザができそうなものであるが表から知れるようにラマン利得が小さいので残念ながら無理である。

表 ラマン利得 ( $n_e \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) [ $\text{cm}^{-1}/\text{Wcm}^{-2}$ ]

		InSb	InAs
	SFR	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-6}$
ランダウ準位	$\Delta\ell = 1$	$3.4 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-8}$
ラマン	$\Delta\ell = 2$	$5.7 \times 10^{-7}$	$5.5 \times 10^{-8}$

実際のSFRレーザをInSbを例にとって説明しよう。電子密度約 $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (77 K)のn形InSb単結晶で断面5mm角、長さが5~10mmの直方体を作り、相対する2つの $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の面を互に平行になるよう鏡面研磨し、レーザ共振器として用いる。電子の動きを静めるため10 K以下に冷却し、超電導マグネットで磁場を加える。20 kG程度の磁場を加えた状態で $\text{CO}_2$ レーザ( $Q$ スイッチあるいは横励起)からの波長 $10.6 \mu\text{m}$ のパルス光を照射して散乱光の強さを測っていると、入射光強度がしきいの値 $5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ を越すとレーザ発振が起り急に指向性の強い光が観測されはじめる。その時、分光器を使ってSFRレーザ光の波長を測定すると、図2のように磁場と共に波長シフトが大きくなることがわかる。

誘導放出によるラマン利得を $g_R$ 、共振器端面の反射率を $R$ 、共振器長を $L$ 、共振器内での光損失を $\alpha$ とすると、レーザ発振の条件は良く知られているように

$$g_R \geq \alpha + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R} \right)$$

である。利得 $g_R$ は入射光強度、ラマン遷移

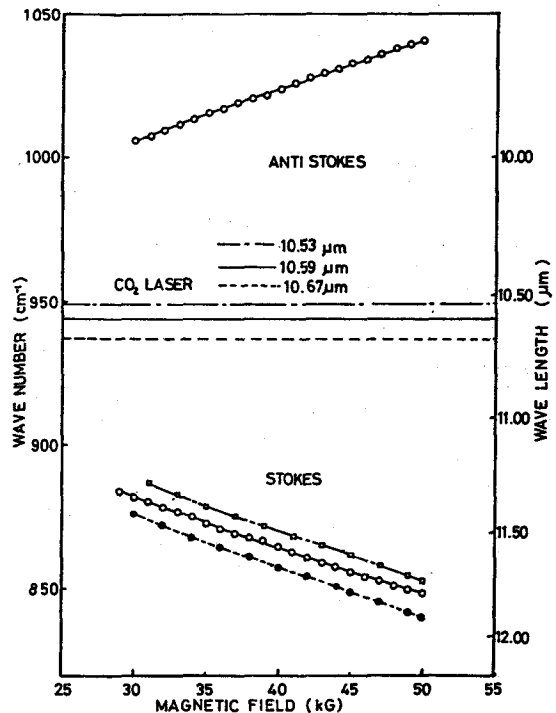


図 2.

の行列要素、上向きスピンの電子の数と下向きスピンの電子の数の差  $N_{\uparrow} - N_{\downarrow}$  などによって決まる。遷移行列要素の大きさは外部磁場によって大きく変わることはないが、電子の占有状態は磁場に対して敏感で、フェルミ準位が  $(0, \downarrow)$  ゼーマン準位を横切る磁場で  $N_{\uparrow} - N_{\downarrow}$  が最大、従って利得  $g_R$  も最大となる。一方、損失  $\alpha$  は主に SFR 光の自由電子吸収とランダウ準位間遷移による共鳴吸収によって決まっている。ランダウ準位間の間隔  $\hbar\omega_c$  が磁場と共に広がり、 $\hbar\omega_s$  が  $n\hbar\omega_c$  ( $n$ ; 整数) あるいは光学フォノンエネルギー  $\hbar\omega_{op}$  との和に一致すると共鳴的に光吸収が起り、利得  $\alpha$  が磁場に対して振動的に磁場をスweepすると、SFR レーザ出力は図 3 のように複雑な構造を示す。

InSb 共振器と CO<sub>2</sub> レーザの組合せでは光エネルギーの変換効率が 1% 程度と低いのでレーザ発振はパルスのにせざるを得ない。しかし、ラマン効果は 2 次遷移であり、2 次の摂動項が分母に

$E_m - E_i - \hbar\omega$  ( $E_m, E_i$  はそれぞれ中間状態および始状態のエネルギー) の項を含んでいることを賢明な諸兄は先刻ご承知であろう。入射光子エネルギー  $\hbar\omega$  を共振器結晶のエネルギーギャップ  $E_g$  に近づけると共鳴効果によってラマン散乱効率が著しく enhance されることが期待される。InSb の液体ヘリウム温度での  $E_g$  の大きさは 0.235 eV であるから CO<sub>2</sub> レーザ励起 ( $10.6 \sim 9.6 \mu\text{m}$ ) ではこのような共鳴効果は期待できないが、CO レーザ ( $5 \sim 6 \mu\text{m}$ ) を用いると共鳴効果によるラマン利得の enhancement (変換効率 50% 以上) を利用して CW 発振が可能となる。

CO<sub>2</sub> レーザを光源として CW SFR レーザを実現するには組成制御により  $E_g$  を 0.12 eV 程度に調整できる  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  や  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  のような 3 元混晶が良い。結晶純度を比較的良くできる  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  ( $n_e \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) を用いて  $10 \mu\text{m}$  域の CW SFR レーザが実現されている。

SFR レーザの特徴はスペクトル線幅が非常に狭く (CW 動作の時 約  $100 \text{ kHz}$  すなわち  $3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ ) 磁場によって連続的に波長を掃引できることで、極く狭い波長域に多くの回転振動準位を持っているガス分子 ( $\text{NH}_3, \text{NO}_x, \text{CH}_3\text{OH}$  など) の吸収スペクトルを光音響分光 (photoacoustic spectroscopy) する際の光源として最適である。TE CO<sub>2</sub> レーザ励起の時にはパルスではあるがピーク出力 1 kW 以上の SFR レーザが出来るので、入射光と SFR レーザ光との混合を行ってエネルギー  $g\mu_B B$  の差周波光をとり出すと、磁場で波長可変の遠赤外光源を作ることが出来る。非線形光学結晶として InSb や GaAs が用いられている。

$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  接合レーザも赤外域のコヒーレント光源で、線幅が非常に狭く、電流によって連続的に波長を変化できる。SFR レーザに比べ小形、軽量であるから、高分解能分光光源として SFR

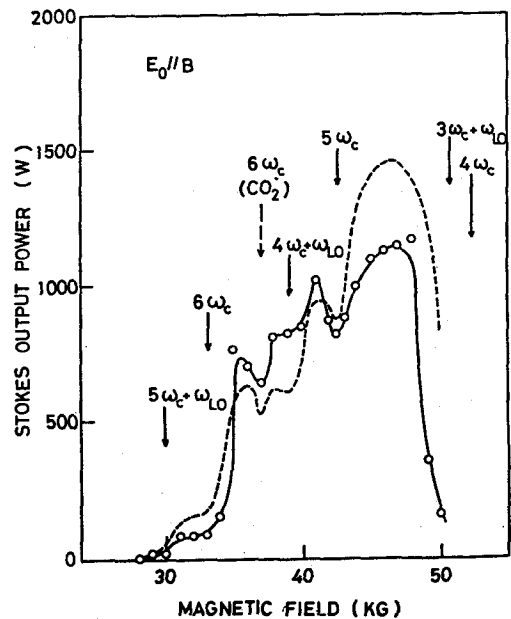


図 3. —○— は実験値、..... は計算値、矢印は共鳴吸収の位置を示す。

レーザより優れているとも言える。しかし、SFRレーザはTE CO<sub>2</sub>レーザ励起により高出力パルスを得ることができるから、同位体分離やphotophysics, photochemistry などの選択励起用の高出力チューナブル光源として将来を期待できよう。

## 「超電導」と「超伝導」

Superconductivity の訳語として「超電導」と「超伝導」があるが、先日工学部の裏教授から低温センターだよりはどちらを使うつもりかという御質問があった。本誌 12号の編集後記で松尾氏が過去の低温センターだよりでは「超電導」が優勢であり、そろそろ統一してはと述べている。

編集委員会ではこの機会に学協会の日本語誌の用語を調査した。その結果は次の通りである。

### 1. 超電導に決めている学協会

電気学会、計測制御学会、低温工学協会

### 2. 超伝導に決めている学協会

日本物理学会、電子通信学会、日本金属学会

### 3. いずれにも決めていない学会

応用物理学会、日本化学会、日本原子力学会

このルールが投稿者に強制力を持っているのは、日本物理学会、電子通信学会、計測制御学会であり、日本金属学会は便覧、会報（依頼原稿）では「伝」に統一しているが、会誌（投稿）では著者の自由としている。ただ著者の自由としている応用物理学会等でも同一著者の同一論文内ではどちらかに統一することを要求している。

このように有力学協会の間で意見が割れているため「大阪大学低温センターだより」では今しばらく「超電導」も「超伝導」も著者の選択で使用できることにする。ただし同一論文内での統一は要求する。