

## 2つの共鳴条件を同時に満足する Spin-Flip Raman レーザの研究 Spin-Flip Raman Lasers Enhanced Simultaneously with Two Resonance Effects

宮崎和彦、霜浦正継

Kazuhiko MIYAZAKI, Masatsugu SHIMOURA

広島電機大学 工学部

Faculty of Engineering, Hiroshima-Denki Institute of Technology

**Abstract:** Ternary narrow-gap semiconductor  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  SFR (Spin-Flip Raman) laser and  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  SFR Laser pumped with the infrared  $NH_3$  laser were studied in connection with the conditions of ① resonance enhancement effect due to the band-gap and ② resonance Raman scattering. Both conditions of ① and ② were simultaneously satisfied in the infrared region of  $15.9\mu m \sim 16.0\mu m$  for  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  SFR laser with  $x=0.172$  and  $\lambda_p=12.845\mu m$  ( $\lambda_p$ : pumping laser wavelength) and  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  SFR laser with  $x=0.038$  and  $\lambda_p=12.694\mu m$ .

はじめに

赤外域同調可能レーザの一つとして、Spin-Flip Raman (SFR) レーザが注目される。このレーザの特長は、励起光波長と磁界の大きさにより、その発振波長を連続的に制御できることである。(Fig. 1, Appendix)

さらに、

- ① バンドギャップによる共鳴
- ② 共鳴ラマン散乱

の2つの共鳴条件を同時に満足させることができれば、極めて高い効率の、高出力発振線が得られるものと期待される。<sup>1-6)</sup>

ここでは  $15.9\mu m \sim 16.0\mu m$  赤外域で、上記2つの共鳴条件を同時に満足する SFR レーザの開発に関する研究の結果を報告する。分子法レーザウラン濃縮における、UF<sub>6</sub> 選択励起用レーザとして有望と考えられるからである。

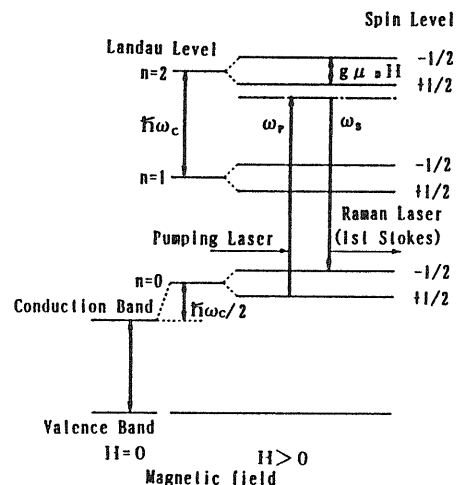


Fig. 1 Partial Energy Level Diagram of Ternary Lead Salt Semiconductor

まず ① バンドギャップによる共鳴の条件を満足させるためには、励起光の光子エネルギー ( $\hbar\omega_p$ ,  $\hbar=h/2\pi$ ,  $h$ : プランク定数) が、SFR レーザを発振させる半導体単結晶のバンドギャップエネルギー  $E_g$  に近いこと ( $E_g \approx \hbar\omega_p$ , ただし  $E_g > \hbar\omega_p$ ) が必要で、そのため本論文では、 $Pb_{1-x}Sn_xTe$  と  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  の2種類の狭バンドギャップ (narrow-gap) 半導体を考え、これら三元化合物の鉛塩 (lead salt) 半導体の組成 ( $x$  の値) 変化させることで、そのバンドギャップエネルギーを制御する。

また、② 共鳴ラマン散乱を考えると、通常、中間状態は仮想準位であるが (Fig. 1)、もしこの中間準位が実準位 (real state) である場合、共鳴ラマン散乱の条件が満足され、非常に強い SFR レーザ発振光が観測される。<sup>4~6)</sup>

Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te SFR レーザ

Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te 単結晶において、 $x=0.172$  (Pb<sub>0.828</sub>Sn<sub>0.172</sub>Te) としたとき、バンドギャップエネルギー $E_g$ は、 $12.817\mu\text{m}$  ( $780.19\text{cm}^{-1}$ ,  $97.74\text{meV}$ )、有効 $g$ -因子の値は、 $71.73$ である。<sup>7)</sup>

この場合、励起レーザー光として赤外域 NH<sub>3</sub> レーザの、 $aP(8,3)$   $12.845\mu\text{m}$  ( $778.51\text{cm}^{-1}$ ,  $96.54\text{meV}$ ) 発振線を使用すれば、①のバンドギャップによる共鳴の条件を満足されるとともに、Fig. 2 に示すように、磁界  $4.5\text{ T}$  (テスラ) C の場合は、②の共鳴ラマン散乱の条件も満足され、 $15.9\mu\text{m}\sim 16.0\mu\text{m}$  の赤外域で、上記①、②の共鳴条件を満足させることができた。

Fig. 3 は Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te SFR レーザにおけるランダウ準位およびスピンサブレベルの磁界による変化の様子を、励起光レーザー光の光子エネルギー ( $\hbar\omega_p$ )、SFR レーザ発振光の光子エネルギー ( $\hbar\omega_s$ ) との関係で、模式的に示したものである。

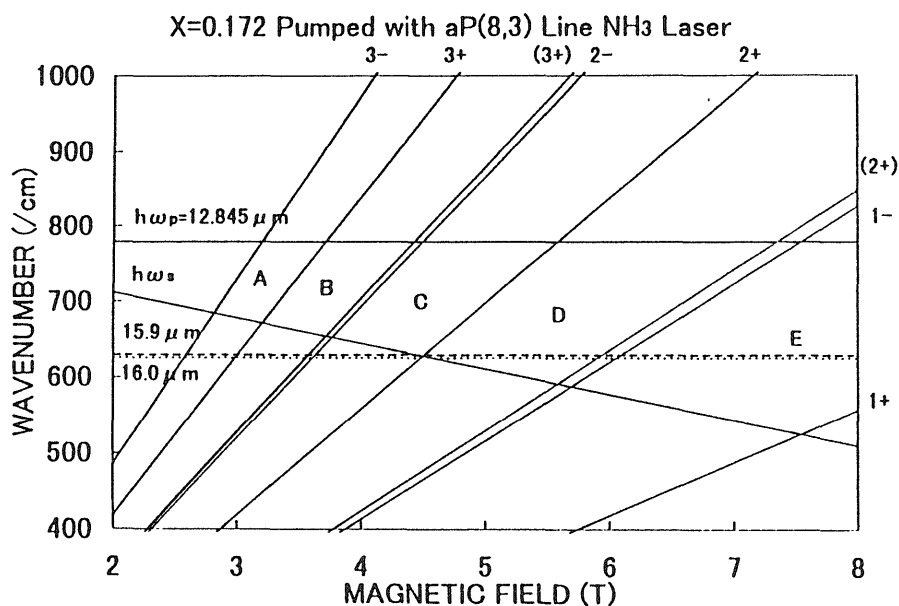


Fig. 2 Emission Properties of Pb<sub>0.828</sub>Sn<sub>0.172</sub>Te SFR Laser

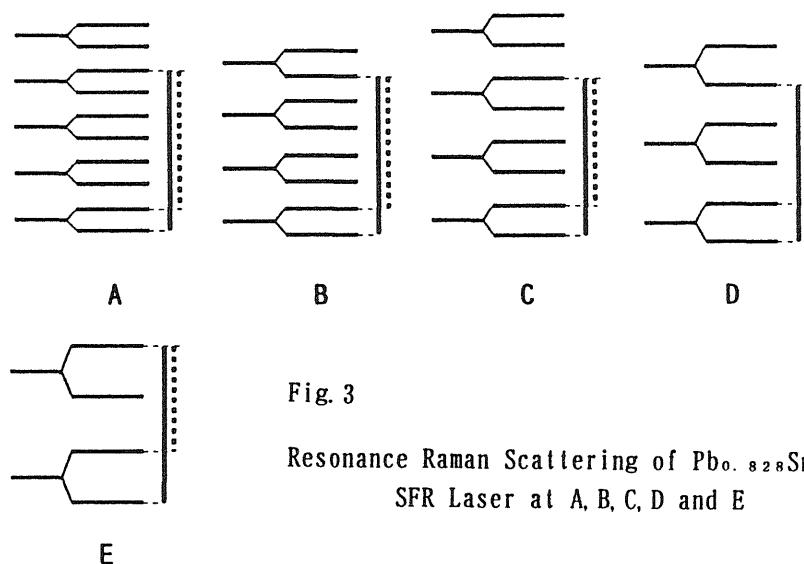


Fig. 3

Resonance Raman Scattering of Pb<sub>0.828</sub>Sn<sub>0.172</sub>Te SFR Laser at A, B, C, D and E

Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Se SFR レーザ

Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Se 単結晶については、 $x=0.038$  (Pb<sub>0.962</sub>Sn<sub>0.038</sub>Se) としたとき、そのバンドギャップエネルギー $E_g$ は、 $12.655 \mu\text{m}$  ( $790.21\text{cm}^{-1}$ ,  $97.98\text{meV}$ )、有効 $g$ -因子の値は、 $49.46$  である。<sup>8)</sup>

この場合、励起レーザー光として赤外域 NH<sub>3</sub> レーザの、 $aP(7,6)$   $12.694 \mu\text{m}$  ( $787.77\text{cm}^{-1}$ ,  $97.68\text{meV}$ ) 発振線を使用すれば、①のバンドギャップによる共鳴の条件が満足されるとともに、Fig. 4 に示すように、磁界  $7.0 \text{ T}$  (テスラ) B の場合には、②の共鳴ラマン散乱の条件も満足され、 $15.9 \mu\text{m} \sim 16.0 \mu\text{m}$  の赤外域で、上記①、②の共鳴条件を満足させることができた。

Fig. 5 はPb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Se SFR レーザにおけるランダウ準位およびスピンサブレベルの磁界による変化の様子を、励起光レーザー光の光子エネルギー ( $\hbar\omega_p$ )、SFR レーザ発振光の光子エネルギー ( $\hbar\omega_s$ ) との関係で、模式的に示したものである。

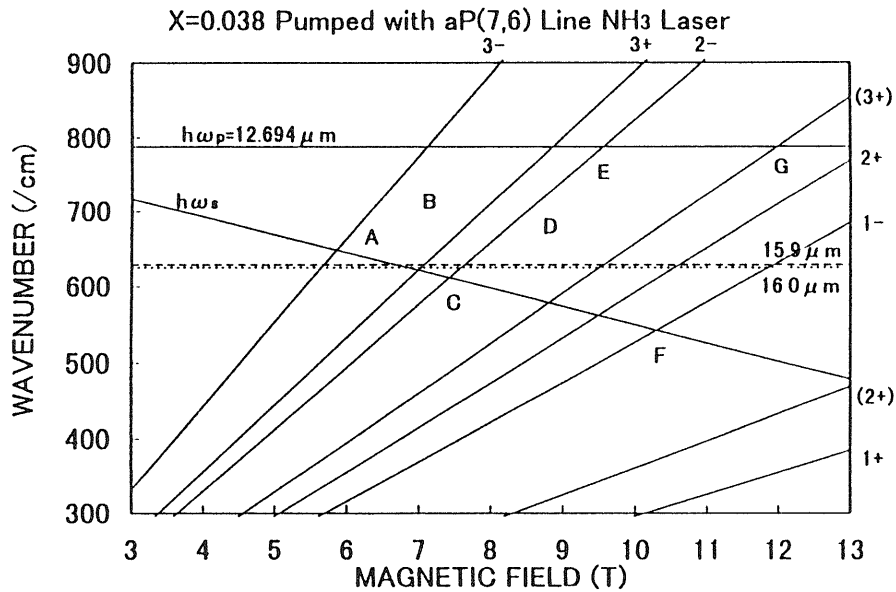


Fig. 4 Emission Properties of Pb<sub>0.962</sub>Sn<sub>0.038</sub>Se SFR Laser

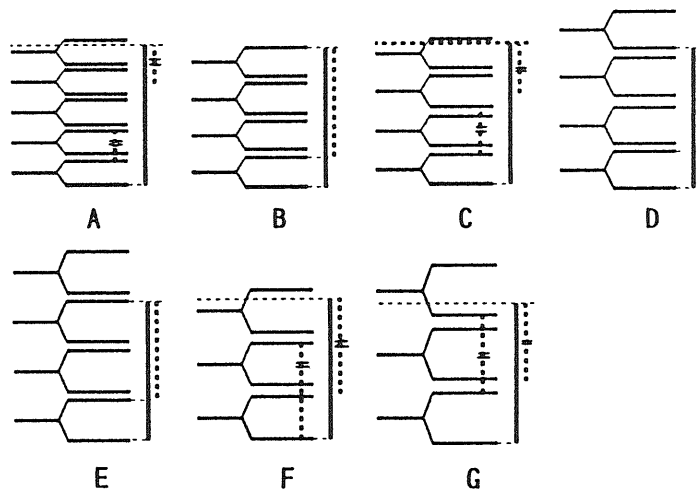


Fig. 5 Resonance Raman Scattering of Pb<sub>0.962</sub>Sn<sub>0.038</sub>Se SFR Laser at B, D and E

おわりに

分子法レーザウラン濃縮における、UF<sub>6</sub> 選択励起用レーザの開発に関連して、Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te SFR レーザとPb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Se SFR レーザの研究をおこない、15.9 μm~16.0 μm 赤外域で2つの共鳴条件が同時に満足される場合を見いだすことができた。

## 文献

- 1) S. R. J. Brueck , A. Mooradian : Phys. Rev. Letters 28(1972)161.
- 2) S. R. J. Brueck , A. Mooradian : Appl. Phys. Letters 18(1971)229.
- 3) H. G. Hafele : Appl. Phys. 5(1974)97.
- 4) K. Miyazaki: Tech. Digest 16th Int'l Conf. Quantum Electronics (1988)88.
- 5) K. Miyazaki: Conf. Digest 14th Int'l Conf. on Infrared and Milimeter Waves (1983)298.
- 6) K. Miyazaki, H. Kasada and M. Otsuka :Int'l J Infrared and Milimeter Waves 15(1994) 1669.
- 7) R. Dornhaus, G. Nimtz and B. Schlicht :Narrow Gap Semiconductors, Springer-Verlag (1983)42, 55, 63.
- 8) R. Dornhaus, G. Nimtz and B. Schlicht :Narrow Gap Semiconductors, Springer-Verlag (1983)43, 57, 63.

## Appendix :

SFR レーザ発振線の光子エネルギー ( $\hbar\omega_s$ ) は、  
1次ストークス光の場合、

$$\hbar\omega_s = \hbar\omega_p - |g_c| \mu_B H$$

で与えられる。

ここに、

$\hbar = h/2\pi$ ,	$h$ : プランク定数
$\omega_s$ :	SFR 発振光の角周波数
$\omega_p$ :	励起レーザ光の角周波数
$g_c$ :	伝導帯電子の有効g-因子
$\mu_B$ :	ボーア磁子
$H$ :	磁界の強さ

である。