

17. 赤外域同調可能光励起半導体レーザーによる汚染ガスの検出

Detection of Pollutant Gases Using Optical Pumped Tunable Semiconductor Lasers in Infrared Region

吉田多見夫, 重富 晃, 藤井信一, 山林直之, 宮崎和彦, 藤澤和男

Tamio YOSHIDA, Akira SHIGETOMI, Shinichi FUJII, Naoyuki YAMABAYASHI,
Kazuhiko MIYAZAKI and Kazuo FUJISAWA

大阪大学 基礎工学部 電気工学科

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Sciences,
Osaka University

1) はじめに

赤外域には種々のガス分子の振動, 回転による吸収線が存在する。また半導体レーザーは狭小スペクトル幅を有し, その同調も種々の方法(組成, 温度, 磁界, 圧力等)によって可能である。そこで, 赤外域における同調可能半導体レーザーの応用の一つとして, 大気汚染の問題と関連し, 吸収測定による汚染ガス(例えば CO , NO , NO_2 , SO_2 等)の検出が考えられる。

我々は, 赤外域における同調可能半導体レーザーの開発を目的に研究を行なってきたが, 本講演では, CO レーザ光励起 InSb レーザ(誘導再結合放出(以後 SR と略す)および Spontaneous Raman レーザ(以下 SFR))と CO_2 レーザ光励起 PbTe レーザの同調特性を中心に報告し, 更に, 汚染ガス検出のための基礎実験として行なった InSb SFR を用いた NO ガスによる吸収測定についても報告する。

2) 実験装置および実験方法

実験装置および配置を図1に示す。半導体試料の励起には TE CO および CO_2 レーザを用いた。このレーザーはラインタイプパルス発生器によって励起され, 繰返し 10 Hz で用いた。レーザーの共鳴器の一方に回折格子を用いたレーザーでは約40本, CO_2 レーザでは約80本の発振線を得たが励起にはその中の1本を選んで用いた。使用した試料は InSb , PbTe 単結晶で, 光共鳴器は試料の2面を平行に

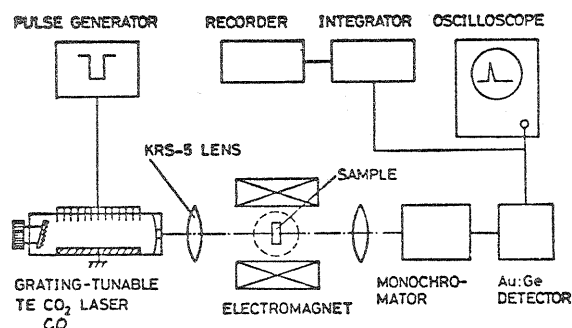


図1. 実験装置および配置

鏡面研磨し作成した。その共振器長は 0.5 ~ 6 mm (InSb-SRR), ~ 6 mm (InSb-SFRL), ~ 1 mm (PbTe) である。試料の配置は縦形配置、すなわち 励起レーザ光および半導体レーザ光が平行で共に試料の共振器面に垂直とした。試料の冷却には閉サイクル冷凍機を用い、最低約 2 K まで冷却されるが、その温度はヒータによって調節した。ただし、InSb-SFRL の場合のみ液体ヘリウムを用い約 1 K まで冷却した。磁界は共振器面に平行に直向電磁石によって最高約 20 kG まで印加した。半導体試料からのレーザ発振光は分光器に導かれ A 型の検出器で検出され、オシロスコープおよび記録計によって観測された。

NO ガスによる吸収測定の場合には、半導体試料からのレーザ光を長さ 50 cm のガスセル(両端に KBr-5 の窓)内を通し、上記の方法によって検出した。

3) 実験結果および考察

3-1 InSb-SRR

TECO レーザ光による共振励起¹⁾によって SRR を観測するためには TECO レーザの共振波長を適当に選択する必要があり、最適の励起波長は InSb 試料のキャリア密度によって異なった。すなわち 最適励起波長はキャリア密度が大きくなるほど短波長(高エネルギー)側へ移った。²⁾ また、図 2 に示す様に磁界同調特性もキャリア密度に依存した。この依存性は以前に観測された TECO レーザ光励起(2 光子励起) InSb レーザの場合とほぼ同じであり、³⁾ 低磁界における複雑な振舞も含めて、この磁界同調特性は各試料における電子の擬フェルミ準位の違いによって説明できる。⁴⁾ 約 5 kG 以上での直線的な変化は伝導帯の最低のランダウ準位のスピンによって分離した 2 つの準位の磁界による変化に等しく、その変化割合 ΔE は $\Delta E = (\hbar\omega_c \pm |g_c| \beta \hbar) / 2$ で表わされる。結局、磁界 20 kG を印加して、5.3 ~ 5.1 μm まで同調が実現され、高密度の試料を用いれば高なるランダウ準位が関与したレーザ発振が観測され同調可能範囲が拡大される事が明らかとなった。

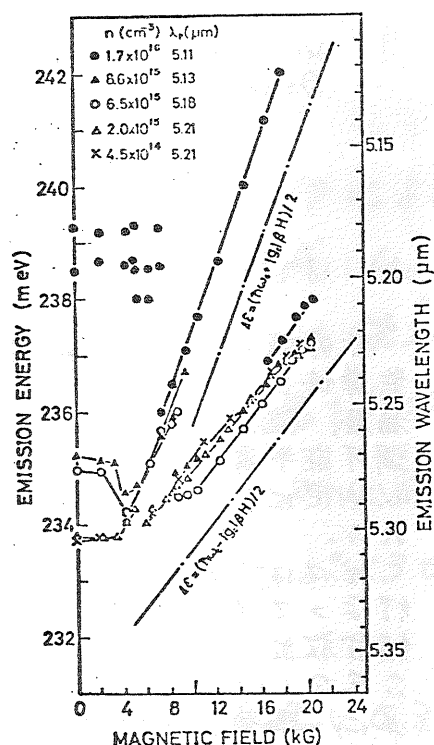


図2. InSb-SRR の磁界同調特性

3-2 InSb-SFRL

低磁界で InSb-SFRL を実現するためには、励起に CO レーザを用い共振効果を利用すれば可能である。⁵⁾ SFRL の共振光エネルギー $\hbar\omega_r$ は励起レーザ光のそれを $\hbar\omega_p$ とすると、 $\hbar\omega_r = \hbar\omega_p \pm |g_c| \beta \hbar$ と表わされる。図 3 には、励起 CO レーザ光の波長を変えた場合の磁界同調特性を示す。短波長の光による励起の場合は 3-1 で述べた SRR のみか、長波長の場合には SFRL のみが観測された。その共振光エネルギー(

波長)の変化割合は $\Delta E = -19.13 \text{ H}$ で表わされた(1次ストークス光)。その中間の励起波長では SRR と SFR の両方が発振し、更に励起波長 5.233, 5.265 μm の時には1次ストークス光の他に2次ストークス光 ($\Delta E = -219.13 \text{ H}$) も観測された。5.233 μm 光励起の場合のスペクトルを図4に示す。磁界の増加と共に SRR は短波長側に、SFR は長波長側に变化する極子が描かれている。更に上記3種のレーザ発振光の他に、試料内部で生じた SRR を励起光とした SFR 光も観測された(図4(b)の矢印)。結局、この場合 5.21 ~ 5.43 μm で同調可能となり、同一試料において励起波長を変化させる事により同調可能範囲は拡大されたと言える。

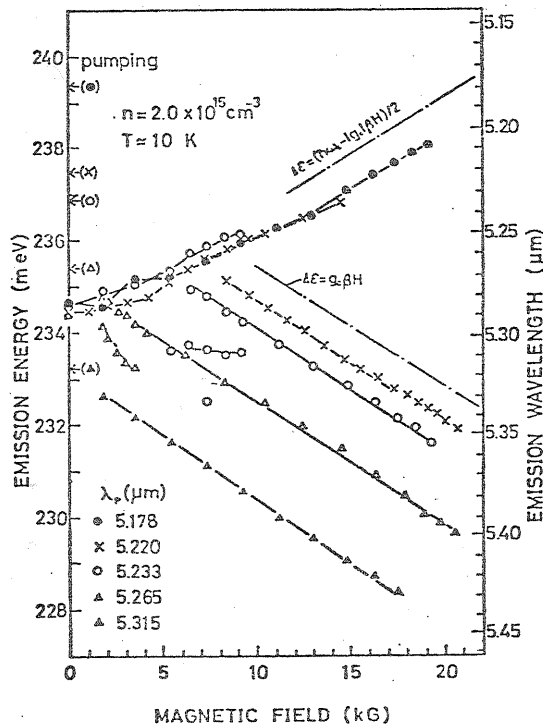


図3. InSb-SFRLおよびSRRの磁界同調特性

3-3 PbTe レーザ

以前に InSb の励起に用いた CO_2 レーザ光による2光子励起法⁶⁾を PbTe に適用し、そのレーザ発振⁷⁾の磁界および温度による同調特性を観測した。レーザ発振のスペクトルを調べると、すでにこの磁界において3~4モードが発振された。支配的なモードの発振光エネルギーは磁界の増加と共に約 $1 \times 10^{-4} \text{ eV/G}$ の割合で高エネルギー側に变化し、他のモードもわずかに $(1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ eV/G})$ であるが高エネルギー側に变化した。次に、支配的なモードについてその発振光エネルギーの温度依存性を図5に示す。発振光エネルギー

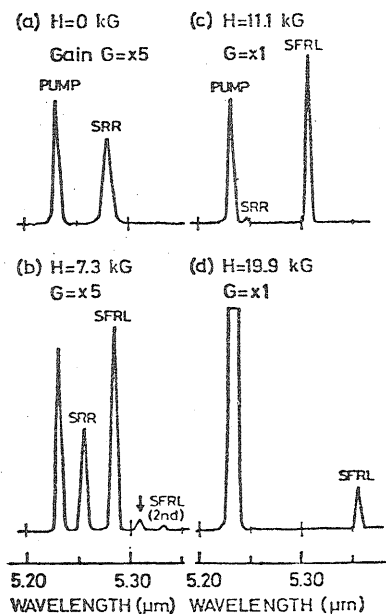


図4. 励起波長 5.233 μm の場合のスペクトル

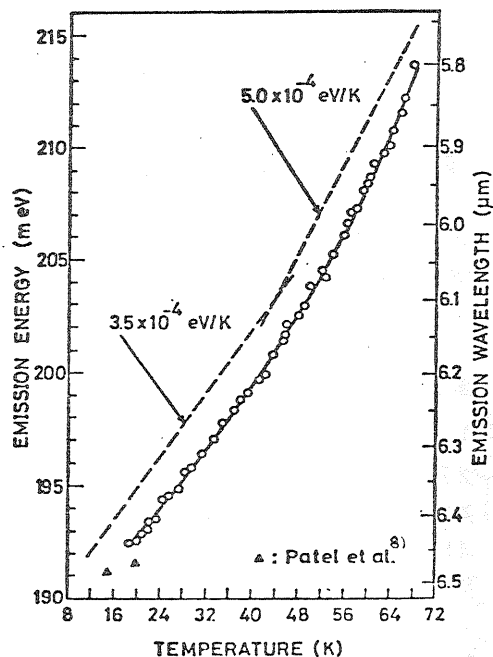


図5. PbTeレーザの温度同調特性

ーは温度の上昇と共に高エネルギー側(短波長側)へ変化し、その変化の温度係数は $3.5 \sim 5.0 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ であった。レーザ発振は約70 Kまで観測され、その同調範囲は約22 meV ($6.45 \sim 5.8 \mu\text{m}$)であった。以上2光子励起PbTeレーザでは温度によって粗同調が、また磁界によって微同調が可能である事が確認された。

3-4 InSb-SFRLによるNOガスの吸収

汚染ガスの検出のための基礎実験としてInSb-SFRLを用いてNOガスによる吸収を測定した。InSb-SFRLを動作させるための励起COレーザの波長は $5.283 \mu\text{m}$ で、磁界は約3.5 Gから5.5 Gまで掃引した。ガスセル(長さ約50 cm)にNOガスを10 Torrを入れた場合の測定結果を図6に示した。図中矢印で示した吸収線は $5.307 \mu\text{m}$ (1884 cm^{-1})の吸収である。その他NOによる吸収の他に不純気によると思われるものも観測された。各吸収線の幅が約 0.1 cm^{-1} である事からInSb-SFRLの幅がこの値以下である事が推測され、容易に高分解能分光が可能である事がわかる。次に図7には図6の矢印で示した吸収線についてNOガスの圧力を変化させた場合のスペクトルの変化を示した。

現段階では、まだ汚染ガス検出のための初期実験段階であるが、今後、他種ガスとの混合状態における実験や、大気圧下での実験等を考えている。また、3-2で記したPbTeレーザの同調範囲にはNO₂の吸収線が存在するため、その検出分光に役立つものと思われる。なお、磁界同調範囲の広帯域化のため、現在超電導磁石を用いた実験を進行中である。

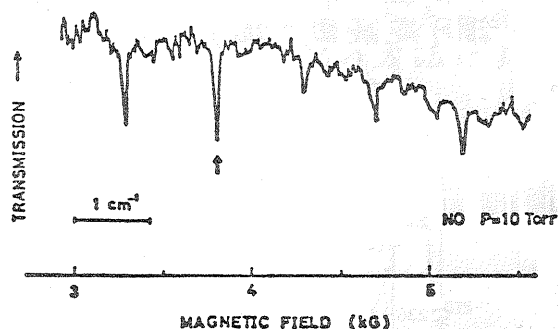


図6. InSb-SFRLによるNOガスの吸収

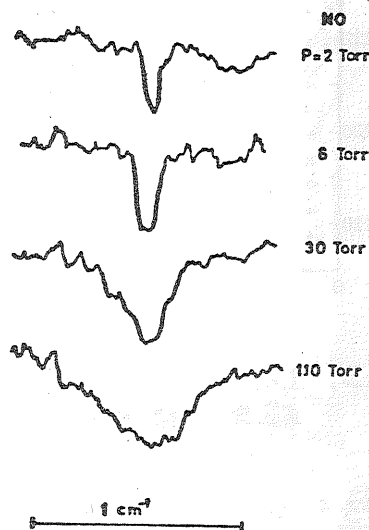


図7. NOガス圧力を変化した場合の吸収スペクトル

参考文献

- 1) N. Henyuk et al. : IEEE J. Quantum Electronics **QE-11** (1975) 477.
- 2) T. Yoshida et al. : Electron. Letters **12** (1976) 402.
- 3) T. Yoshida et al. : Japan. J. appl. Phys. **14** (1975) 425.
- 4) T. Yoshida et al. : Japan. J. appl. Phys. **14** (1975) 1987.
- 5) C.K.N. Patel : Appl. Phys. Letters **19** (1971) 400.
- 6) T. Yoshida et al. : J. Japan Soc. Appl. Phys **44** (1975) suppl., p45.
- 7) T. Yoshida et al. : Japan. J. appl. Phys. **15** (1976) 1613.
- 8) C.K.N. Patel et al. : Phys. Rev. Letters **16** (1966) 971.