特集 7

赤外帯域計測用半導体デバイス

植田 陽一*・篠原 宏爾*

(1984年11月30日 受理)

Infrared Semiconductor Devices

Yoichi UEDA* and Koji SHINOHARA*

(Received November 30, 1984)

1. 緒 言

赤外線検知技術の応用は、当初米国を始めとした先進諸国の間で、軍用を中心に開発されたが、その後、その技術が平和的応用に波及し、医学、農業、水産、工業、土木、建築、地学、海洋、気象、宇宙などの面で利用されるようになった。赤外線応用技術の主流は、現在パッシブ応用（物体が放射する赤外線を、リモートセンシングによって検出し応用する技術）が中心である。しかし、最近優れた赤外線レーザーの出現によって、公害探知などのアクティブ応用（赤外レーザーと赤外検知器との組み合わせによって、公害ガス探知等を行う技術）も、急速な進歩を見るようになった。

パッシブ赤外技術は、衛星による宇宙規模のものから、小さいものでは赤外顕微鏡まで、その応用面は広い。これらの目覚ましい発展をもたらしたのは、高性能検出器のほか、光学系、電子系の著しい進歩によるものである。中でも、赤外線検出器のここ10年の進歩は著しく、多素子化技術の基礎がほぼ確立され、応用面でも、その優秀性が立証されるようになった。多素子

検知器の実用化は、装置の高性能化、小形化を実現し、これが各方面の需要を刺激して、赤外線応用をより一層発展させると考える。赤外線検出器の発達過程は、大きく三つの時代に分けることができる。第1世代は、単素子時代である。この時期には素子の物理、検出器の物理が研究され、これを応用する装置技術も確立された。第2世代は、さらに進んで、リニアレイ時代であり、装置技術もさらに一段と飛躍するようになった。第3世代は、電荷転送デバイスの時代である。第2世代までは、赤外信号を人間の眼が採らえると云った形で応用されたが、第3世代では、勿論従来方式も用いられるが、さらに進んで、広い意味での電算機への入力デバイスとしての色彩が濃くなると云える。この世代のデバイスは、現在実用には供されていないが、近く実用レベルに達すると考えられる。

一方アクティブ応用においては、ガス、液体、固体レーザーに加えて、半導体レーザーが、実用の域に達した。この目的に供される遠赤外半導体レーザーには、 PbSSe 、 PbSnTe 等 IV—VI 属カルコゲナイド化合物半導体が用いられ、そのカバーする波長範囲は $4 \sim 20 \mu\text{m}$ と広く、

* (株)富士通研究所 (〒243-01 厚木市小野1677)

* Fujitsu Laboratories LTD, ATSUGI (1677, Ono, Atsugi, 243-01)

その放射する波長のスペクトル巾は、発振波長に対して 10^{-3}A 以下である。このレーザーは素子温度を変えることによって、数 μm の範囲で発振波長を変え得ることと、発振スペクトル巾が狭いことから、新しい応用の道が開けつつある。

本稿では、 $2\sim 20\mu\text{m}$ の波長範囲における半導体赤外センサ、並びにレーザーについて最近の状況を述べる。

2. 赤外センサ

2.1 パッシブ赤外線技術^{1,2)}

赤外線技術とはパッシブ、アクティブとも、目標物体に接触することなく、その物体の存在、形状、温度、組成等を検出することである。

パッシブ赤外線装置は、可視光および電波応用装置に比べて、優れた特性をもっている。光に対する優位性としては、自然に物体が放射する赤外線を検知するので、昼夜にかかわらず、また霧、霞、煙を通して目標物体を見ることができる。電波に対する優位性としては、波長が短いために、相手物体を可視光と同様、像として識別することができる。また自然に物体が放射する赤外線を検知する場合、電波のような妨害を受けることはない。さらに物体が放射する赤外線は、物体の温度に比例して、その量とスペクトル分布が異なるため、目標温度が測定できるし、またその放射スペクトルをリモートでセンシングすることによって、物体の性質を

知ることができる。

パッシブ赤外線技術の基本は、 $1\mu\text{m}$ から $15\mu\text{m}$ までの波長範囲に有効な眼を作り出すこととある。図1に赤外の眼の基本構造を示す。現在実用レベルにある赤外線機器は、可視光に比べて一世代遅れており、Fig.1に示すごとく、1枚の赤外画像を得るためには機械走査鏡が必要である。しかし、最近可視光のエリヤセンサと類似の動作原理に基づく、二次元アレイ赤外センサの研究が盛んであり、近い将来技術が実用レベルに達した場合、画素数も増加してを現在第2世代で得られてるような赤外画像が、電子走査のみで得られるようになると考えられる。

2.2 赤外センサ^{1,2)}

赤外センサには、Table 1に示すような多種多様なものが実用に供せられている。しかし基本的には加熱形と量子形にわけることができる。

加熱形センサは感度が低く、応答速度も遅いが、感度に波長依存性がなく、素子冷却が不要なため、分光器を始め、近距離で、動きの遅い物体の検出に用いられている。最近焦電形センサを始め³⁾、パイロビジョン⁴⁾等の開発が盛んであり、さらに焦電形二次元アレイセンサの研究⁵⁾も報告されている。

一方、量子形センサは、半導体の内部光電効果を利用するもので、感度は加熱形に比べて1～2桁高く、応答速度も早く、多素子化も容易である。しかし感度に波長依存性があり、高感

Fig.1 赤外線機器の構成と関連技術

表1 赤外デバイスの分類

赤外受光デバイス

加熱型

- ① ボロメータ
- ② 焦電型
- ③ 赤外ビジコン
- ④ ニューマチックセル

量子型

- ① 外部光電効果型
- ② 内部光電効果型
- 光伝導型 (PC)
- 光起電型 (PV)
- 光電磁型 (PEM)

MIS型

赤外発光源

- ① 黒体炉
- ② ガスレーザー
- ③ 液体レーザー
- ④ 固体レーザー
- ⑤ 半導体レーザー

度を得ようとすれば素子を冷却する必要がある。

半導体の内部光電効果を用いるセンサには、光伝導形、光起電形、MIS形、光電磁形がある。光伝導形は素子に入射することによって、その導電率が変化し、電流値に変化が生じる。光伝導形は、真性形と不純物励起形に分けることができる。光励起形は可視センサにおけるホトダイオードと同様の原理に基づくもので、赤

外線を照射した場合、素子端子に起電力が発生する。MIS形(金属—絶縁物—半導体構造)は、金属—半導体間に印加した電圧によって発生したポテンシャル井戸に、赤外線によって半導体中に発生した電荷を蓄える構造のもので、赤外CCD等の受光素子に用いられる。光電磁形は、赤外線によって半導体表面に発生した電子、正孔が表面から内部へ拡散することによって生じる電流の磁場によるホール効果を用いて起電力を発生させるものである。

2.3 赤外センサ発達の経緯

量子形赤外検知器は、Table IIに示すように、その発達の過程を3世代に分けることができる。第1世代は⁶⁾単素子検知器と走査鏡の2次元走査によって赤外イメージを得る方式であり、走査に時間を要するため、実時間表示は困難である。目標物体が室温またはそれ以下の場合、8～14 μm 帯に感度を有するHgCdTe光伝導形検知器が最も優れており、実用装置のほとんどは、この検知器を利用している。第2世代では第1世代と同様、HgCdTe光伝導形1次元アレイ検知器と、高速1次元走査鏡による実時間表示が得られている⁷⁾。1次元アレイ検知器の出現によって、走査方向にアレイを並べ、超高速二次元

Table II 赤外線検知器の各世代比較

	第 一 世 代	第 二 世 代	第 三 世 代	
特 徴	単素子検知器＋ 二元機械走査	一次元アレイ＋ 高速一次元機械走査	ハイブリッドIRCCD 一次元アレイ＋ 高速一次元機械走査	IRCCD二次元アレイ ＋ 電子走査
有効波長帯	2～14 μm	2～14 μm	2～10 μm	2～5 μm
技術レベル	実用レベル	実用レベル	研究レベル	
検 知 器	Ge: Au (2～9) Ge: Hg (2～14) InSb (2～5) HgCdTe (2～14) PbSe (2～4)	PbSe (2～4) HgCdTe (2～14) InSb (2～5)	HgCdTe (2～10) InSb (2～5) *Si: Ga (2～18) PbSnTe (6 μm 以上)	HgCdTe (2～5) (8～10) InSb (2～5) Siショットキイ (2～4) *Si: Ga (2～18)
素 子 数	単 素 子	200素子以下	**1000素子以下	**300×300以下

注) * 20 K動作他は77 K動作

** 原理的可能な数値

Fig. 2 第2, 第3世代センサの素子配列

走査鏡と組合わせるTDI方式(時間遅延積分)があり⁸⁾, より一層良質の赤外イメージを得る方式も開発されている。第3世代は米国を始め⁹⁾ 世界各国で盛んに研究開発が行われつつある。開発の流れに2つあり, ひとつは赤外リニアセンサアレイとSiCCDの組合わせによるハイブリッド形であり¹⁰⁾, 今一つは2次元センサアレイである。Fig. 2に, 第2, 第3世代検知器の素子構造原理を示した^{2, 11, 12)}。

第2世代ではFig. 2に示すごとく, 検知器容器から素子数と同数のリード線が外部に取り出される。そのため素子数が増すと検知器容器の寸法が大きくなる欠点があり, 200素子程度が限界と考えられる。一方第3世代検知器では⁹⁾, 図2に示すごとく, 素子から得られる信号はシリコン信号処理回路によってマルチプレックスされるため, 容器外部へのリード線は十数本以下に抑えることができる。従って原理的に製作可能な素子数の制限はないが, ここ当面の限界は素子製作技術面から考えて, 表2に示すごとく, 一次元のもので1000素子程度, 二次元のもので300×300程度と考えられる。

2.4 第1世代センサ^{1, 6)}

第1世代センサは各方面で実用に供されている。例としては人体のサーモグラフによる診断, 飛行機, 人工衛星からのリモートセンシングによる地上, 海面の熱分布の観測, 等である。これらの目的に用いられる単素子センサには過去

各種のものが研究されたが, 現在ではHgCdTeが主力で, 一部InSbが用いられている。

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ はHgTeとCdTeの混晶で, その混合比率を変えることによって, センサの応答波長特性を自在に変えることができる。Fig. 3には組成を変えることによって得られた各種Hg $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 検知器の波長感度特性を示す。図中分光特性に付加された数字は, 結晶組成の割合 x 値を示す。これらの分光特性のピーク値はBLIP(センサ感度が背景光雑音で制限される)線と呼ばれる曲線に近づいている。

2.5 第2世代センサ^{1, 7, 8)}

第2世代センサは赤外前方監視装置(FLIR)⁸⁾に用いられる。FLIR装置では高い温度分解能と高い空間分解能が要求される。そのため, センサ感度のほか, 量子数 n を大きくする必要が

Fig. 3 組成 x を変化させた場合の $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 赤外センサの波長-感度特性

Fig.4 SPRITE検知器とTDIの比較

ある。FLIRには先にも述べたように、多素子センサによるシリアルスキャン方式と⁸⁾、多素子センサによるパラレルスキャン方式とがある⁷⁾。前者では、素子数が少く、素子感度のバラツキも問題にならないが、後者では、素子数が多く、素子感度バラツキに対する要求も厳しい。

最近、両者の利点を合せたようなセンサが、英国王立シグナルス・レーダ研究所 (RSRE) から報告された^{13,14)} このセンサは、SPRITEと呼ばれ、Fig.4に従来のTDIセンサとこのセンサの比較を示した。従来のセンサは、各素子から出力された信号は、増巾器によって増巾され、遅延素子を経て出力される。一方SPRITEは受光とTDI機能を同時に同一素子内で行わせようとするものであり、図に示すような三端子構造が基本となる。TDIセンサの利点は時間遅延積分によってセンサ感度を単素子の場合の $\sqrt{n}$ (n = 素子数) 倍高めることができる。従来形では、走査方向の素子数を増すことは、容易であるが、走査方向に垂直に素子を並べることは容易ではない。SPRITEでは、それが可能である。SPRITEのTDI機能は、Fig.4に示すごとく、赤外線によって素子中に発生したキャリアは、素子両端にかかるバイアスによってドリフトし、そのドリフト速度 V_a と、光学系の走査速度 V_s が一致したとき、素子中でキャリアの積分効果がおこる。この場合過少キャリアに寿命がある

ためと、機械走査効率から $n \approx 11$ と報告されている。

2.6 第3世代センサ^{2,9,15,16)}

第3世代センサは、二次元アレイが主流であり、その波長帯は、大気窓領域に適合した $3 \sim 5 \mu\text{m}$ と $8 \sim 10 \mu\text{m}$ のものが開発されている。長波長のものは、少なくとも $11 \mu\text{m}$ 程度までの波長域拡張を求められているが、現在技術ではこの程度にとどまっている。一方、特種な応用に対しては、リニヤ形のものも研究されている¹⁰⁾ 現在開発されつつある赤外2次元センサは大別するとFig.5に示すような2種類に分けることができる。Fig.5(a)はハイブリッド形或いはサンドイッチ形と呼ばれ、化合物半導体で構成された赤外ホドダイオード2次元アレイとシリコン信号処理回路がインジウムの柱でお互いにはり合わされた構造になっている。この場合シリコンと化合物半導体の熱膨張の程度の一致が重要であり、 64×64 程度のものが開発されている。一方Fig.5(b)に示すように、モノリシック形のものも発表されている。モノリシック形には、IRCCD或いはIRCID (赤外電荷結合素子或いは赤外電荷注入 (素子)) があり、シリコンの信号処理回路はチップの周辺に置かれるので、材料的な熱膨張係数の差の問題は考えなくてよい。

現在、可視の二次元アレイセンサでは、CCD、

Fig. 5 2次元赤外センサ

形とCID形のほかMOS形¹⁷⁾等が報告されている。可視センサでは、いずれのセンサも既に実用域に達しているが、概してCCDは外部駆動系が簡単であるが、デバイスの製作技術は難しい。赤外センサでは、狭バンドギャップの化合物半導体を光電変換部に用いるので、技術的に未発達であり、良質の絶縁物-半導体界面特性が得られず、転送効率等の点で、実用の目処は得られていない。一方CID素子構造では転送効率がほとんど問題にならないので、実用に近いものが報告されている。

赤外線感光部の構造はFig. 6に示すような3つの形が発表されている。それは真性形、外来形そしてショットキバリア形である。真性形では

Fig. 6 モノリシック形素子の検知部

材料にHgCdTe, PbSnTe, InSb等が用いられ、半導体表面に絶縁物をかぶせ、所定の赤外線に対して、透明な電極を乗せたMIS構造が一般的である。この場合には素子厚さは $10\mu\text{m}$ 以下と薄い。外来形はシリコンに適当な深い準位を作る不純物を添加し、一般のシリコンプロセスを用いて素子加工を行う。この場合にはシリコンのMOS構造が普通であるが、添加不純物の濃度が十分とれないため、素子厚さを $300\mu\text{m}$ 以上に厚くする必要があり、素子の動作温度も50 K以下にする必要がある。素子厚さが厚いと、素子間での信号光のクロストークが生じる。3番目にはシリコンのショットキバリア形がある。この場合には金属中の電子が赤外線のエネルギーを得て、シリコン中に注入される現象を利用するものである。このセンサの感度は金属膜の厚さを薄くすることによって得られる。しかしあまり薄くしすぎると、十分赤外線を金属が吸収できず感度が制限される。このセンサもシリコンプロセスを使って二次元アレイを作ることは容易であるが、感度は $3\sim 5\mu\text{m}$ にかけて急激に低下し他のものに比べて1~2桁低い。

$8\sim 10\mu\text{m}$ 帯のリニヤハイブリッドセンサは現在HgCdTeとSi CCD以外の組み合わせは考え難い。この場合のハイブリッド技術としてはFig. 5(a)に示したようなインジウム柱による貼り合せ法か、或いはリニヤセンサアレイとリニヤCCDとのワイヤボンディングによるハイブリッドが用いられる。

以上述べたように、赤外センサは第3世代へとその開発の流れが及んでいる。第3世代のセンサが完全に実用になるためにはセンサ部の化合物半導体の結晶製作技術、素子化プロセス技術、信号処理技術の一層の向上が望まれている。第3世代センサでは化合物半導体素子とSi ICとの一体化技術が必要である。最近他のセンサにおいても多機能化が求められ、IC化が進められているが、赤外センサにおいても同様の状況にあると云える。第3世代センサが実用化されるには少なくとも数年の年月を必要とするが、もし実用化されればセンサの小形化はもとより、

装置全体も小形化され、低価格化が実現でき、さらに信頼性の面から有利になる。

3. 波長可変赤外ダイオードレーザー

3.1 鉛カルコゲナイドレーザー

1966年J. O. Dimmockらにより、 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ダイオードレーザーの液体ヘリウム温度での発振が報告され¹⁸⁾、鉛カルコゲナイドレーザーが注目されはじめた。 $PbSnTe$ 、 $PbSSe$ などの鉛カルコゲナイドレーザーの最も大きい特徴は、その波長可変性にある。すなわち、温度、駆動電流、磁場等により、チューニングが可能である。上記二種のレーザーは、その組成(Pb/Sn比、S/Se比)を適当に選択する事により、発振波長を4~20 μm の領域で自由に設定する事ができる。また、レーザー光は単色性が極めて良い(半値幅0.01 $\text{\AA}$ 以下)。このことから、従来の分光器にはない、全く新しいレーザー分光装置への応用が考えられた。

殆どどのガス分子は、4 μm ~20 μm の赤外領域に、分子固有の振動、回転モードにもとづく吸収スペクトル線を持つことから、鉛カルコゲナイドレーザーを光源として用いた分光測定により、ガスの種類(同位体を含め)の識別、濃度の検出に有効である。

我々は、すでに極めて信頼性の高い $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ^{11,12)}、 $PbS_{1-y}Se_y$ ¹³⁾レーザーの77K、CW発振に成功しており、これら光源を用いたガス検知の計測を行っている。本章では、開発したレーザーの性能、及びこれを用いたガス検出について述べる。

3.2 レーザーの発振波長及び各種気体の吸収スペクトル

Fig. 7に、 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ 、 $PbS_{1-y}Se_y$ レーザーの発振波長域及び、各種気体(主として大気汚染気体)の吸収スペクトル位置を示す。これらのレーザーは、組成、温度により、発振波長が可変であることは述べたが、一例として、 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ のエネルギーギャップは次式で表わされる。

Fig.7 鉛カルコゲナイドレーザーの発振波長と各種汚染気体の吸収帯

$$E_g = 0.19 - 0.543x + \frac{4.5 \times 10^{-4} T^2}{T + 50}$$

組成により、特定気体の吸収帯に概略一致させたレーザーを製作し、その後、動作電流を変化させる事によるP-N接合部でのジュール発熱量を利用した温度チューニングにより、ガスの吸収線に正確に一致させ、ガス計測を行う。

3.3 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ レーザー

$Pb_{1-x}Sn_xTe$ レーザーは、高効率で発振を行うため、光及びキャリアの閉じ込め効果のあるPbTe/ $Pb_{1-x}Sn_xTe$ /PbTeダブルヘテロ構造をもつ。Fig. 8に我々の試作したメサストライプ構造の素子模式図を示す。図の構造は、PbTe基板結晶上に、ボートスライド方式液相エピタキシャル法によって得られる。レーザー光は、図の中央の活性層(Active Region)から約30度

Fig. 8 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ レーザー素子の構造

の広がり角をもって出る。その出力は、12Kに於て30mW、77Kに於て8mWが得られている。Fig. 9に、電流チューニング特性の一例を示す。レーザー光は、電流変化により、連続的にその波長を変化し、ある点で不連続なモードホップを示す。このモードホップは、共振条件によるものであり、素子ごとに異なる。このため、複数のレーザー素子を用いる事により、このモードホップ領域をカバーする事ができる。更にヒートシンク温度を12K~90Kと変化させる事によ

Fig. 9 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ レーザー 電流チューニング特性

Fig. 10 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ レーザー 連続動作特性

Fig. 11 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ レーザー 熱サイクル特性

り、一個のレーザー素子で2μm程度のチューニングが可能である。

Pbカルコゲナイドレーザー開発当初の問題点は、信頼性の欠如にあった。このレーザーは、77K程度以下の低温動作であるので、連続動作に於ては、結晶欠陥の増殖等がみられず、5000時間以上の動作で何ら劣化（閾値電流密度の上昇）は認められなかった²⁰⁾(Fig. 10)、動作時（低温）と非動作時（室温）の熱サイクルによって顕著な劣化があった。我々は、この熱サイクル劣化の機構が、PbTe母材と、それまでに使用していた MgF_2 又は SiO_2 絶縁膜の熱膨張率の非整合にある事をつきとめ、Fig. 11に示す、酸化膜を絶縁膜として用いた新しい構造のレーザー素子を試作した²¹⁾。Fig. 12に示す様に、この構造の素子は100回以上の熱サイクルでも全く劣化を示さないものである。

3.3.2 低閾値レーザー¹³⁾

Pbカルコゲナイドレーザーの動作には低温が必要である。レーザーの発振閾値電流を下げる事により、動作温度を少しでも高めるため、狭ストライプ構造格子整合型DHレーザーの試作を行った。基本的な構造はFig. 8に示すものと同様であるが、活性層のストライプ幅は従来の30μmから約1/8の4μmと狭小化し、厚みも5μmから11μmへと1/5に薄層化している。更に活性層をはさむ上下のクラッド層には、従来のPbTeに代りPbTeSeを用いた。PbTeSeはPbTeと殆んど同じエネルギーギャップ、屈折率を持ち、しかも活性層であるPbSnTeと格子整合する。従ってPbTeSe-PbSnTe DH構造はヘテロ接合に格子不整に伴う結晶欠陥を含まず、理想的な構造といえる。試作したレーザー素子の活性部の断面顕微鏡写真をFig. 12に示す。

この狭ストライプ薄層レーザーは、40Kでの閾値電流はわずか1.2mAであり、147KまでCW発振が得られた。12~80Kの範囲でI-L特性をFig. 13に示す。

3.3.3 シングルモードレーザー²³⁾

鉛カルコゲナイドレーザーを後述する分光用又はガスセンサ用の光源として用いる場合、モ

Fig. 12 狭ストライプ型レーザーの断面写真

Fig. 13 狭ストライプ型レーザーI-L特性

Fig. 14 埋めこみレーザー断面写真
(活性層: $4\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$)

ード分配雑音をさけるため、或は装置を小型化するために、シングルモードレーザーが望まれる。我々はマックスウェル方程式からシングルモード発振に必要な活性層のディメンジョンを求め、これをウラッド層でとじこめた埋め込み

Fig. 15 埋めこみレーザー出力スペクトル

形レーザーを試作した。埋め込み構造の実現には二段階エピタキシャル法を採用した。埋め込み層断面の写真をFig. 14に示す。レーザー発振特性をFig. 15に示す。 $1\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ の活性層を埋めこむ事により、シングルモードレーザーが実現できた。

3.4 応用

3.4.1 高分解能分光

Pbカルコゲナイドレーザーの発振スペクトル幅は極めて狭い。発振波長 $10\mu\text{m}$ に於て、スペクトルの半値幅 54KHz ($\sim 2 \times 10^{-4}\text{\AA}$) が報告されている²⁵⁾。このため、無限分解能分光が可能である。低圧力での多原子分子の赤外スペクトルには、数多くの固有微細構造が含まれている。この微細構造は、グレーティング方式の分光器では、識別できない。レーザー分光はこのスペクトル分離の障壁を破るものである。

Fig. 16にレーザー分光装置の模式図を示す。レーザー素子から約30度の立体角をもって出る赤外線は、レンズにより平行ビームとなり、ガスセル又はチューニングレート測定用エタロンを通過した後、再度レンズにより赤外線検知器上に集光される。レーザーのチューニングは、レーザー素子に鋸歯状波電流を印加する事にて行

Fig. 16 レーザー分光ブロックダイアグラム

Fig. 17 メタンの ν_3 バンド微細吸収スペクトル

う。出力はオシロスコープ又はX Y記録計のX軸に印加電流を、Y軸に検知器出力を入れてとる。Fig. 17にメタンの微細吸収スペクトルを示す²⁶⁾。図中の吸収波数値は理論²⁷⁾との重ね合せにより同定したものである。これから理論

値では、同じ位置にあるスペクトルが、実際は若干違った位置に現われているのがわかる。更に、天然に微量含まれている同位元素メタン($^{13}\text{CH}_4$)も明瞭に識別されているのがわかる。これら吸収スペクトルの実際はレーザー分光の

Fig. 18 ガスセンサ光学系模式図

出現によって初めて明らかになった。

種々のガス微細吸収帯を計算機に記憶させ、これと測定値の重ね合せ作業を行う事により、未知のガスの検出、濃度測定、或は逆にレーザー波長の絶対値測定が可能となる。

ここに述べたガスの室内検出は、今後、燃焼効率の向上、ファインケミカル分野でのプロセスコントロール等への応用が期待される。

3.4.1 ガスセンサ

最近、大気中の公害ガスや可燃性ガスの濃度を実時間・高感度に測定する事が、環境の安全性を高めるため必要とされている。我々は Pb SnTeレーザーを光源とするレーザー方式ガスセンサが実時間・高感度センサとして最適であると考え、その開発を行っている。

レーザー方式ガスセンサでは高感度化のため二次微分計測法を採用した²⁴⁾ この方法はレーザーのスペクトル幅がガス吸収線の半値幅より十分小さいことを利用し、レーザー駆動電流に小振幅の正弦波を重畳し、その変調周波数の二倍波を検出するものである。この二倍波が吸収

特性の二次微分値に対応する事から、高感度検出が可能となる。装置光学系の模式図を図18に示す。PbSnTeレーザーは小型の循環式冷凍機を用いて冷却している。マルチパスセルは光路を長くして吸収量を稼ぎ感度を上げるために用いている。

この装置において、検出感度を決定するのは、光学系に立つ光定在波（エタロンフリンジ）である。エタロンフリンジのうち最大のものは検知器窓（平行Ge板）で発生していた²⁸⁾。このため窓をテーパー付Geに変更し、多重反射光が検知面に入らないようにする事により、これを抑止した。さらにマルチパスセル内部で発生するフリンジは、ガス吸収スペクトルにくらべてピッチが狭いため、計算機による演算処理でこれを消去した。以上の高感度化検討を行った結果、0.1ppmの精度でメタンガスの検出が可能となった。バックグランドメタンの二次微分吸収スペクトルをFig. 19に示す。マルチパスセルで光路長を稼ぐ事により、デスクトップタイプのガスセンサの実現が可能となった。

Fig. 19 バックグランドメタン二次微分信号

3.6 今後の課題

鉛カルコゲナイドレーザーの実用上の問題はその冷却にある。手軽な液体窒素も、その入手できる範囲が限定される。最近ヘリウムガス循環型冷凍機も急速に発展してきたが、現状ではまだ高価である。Pbカルコゲナイドレーザーをより使いやすいものにするため、その動作温度

を上げる努力がなされているが、まだペルチェ素子による冷却でレーザー発振には至っていない。これは今後に残された大きな課題であろう。

参 考 文 献

- 1) 植田陽一：日経エレクトロニクス，21号pp. 94～117 (1977)
- 2) 植田陽一：センサ，日経エレクトロニクス・ブックス，日経マグローラヒル社，p. 214 (1981)
- 3) 竹内孝介等：第45回応物予稿集59. 10. 12～15, p. 67, 14P-X-5 (1984)
- 4) A. G. シェファード：センサ，日経エレクトロニクス・ブックス，日経マグローラヒル社，p. 225 (1981)
- 5) S. Iwasa: Electronics **54** (1981) 54.
- 6) J. M. Lloyd: "Thermal Imaging Systems", Plenum Press, New York and London, (1975) p. 330.
- 7) *ibid.* p. 331, p. 349.
- 8) *ibid.* p. 352.
- 9) *ibid.* p. 352.
- 10) H. Takigawa, et al.: IEEE Trans. ED. **ED-27** (1980) 146.
- 11) 瀧川 宏等：赤外線技術Vol. 4, p. 27 (1979)
- 12) 野村治等：*ibid* Vol. 4, p. 33 (1979)
- 13) C. T. Elliott: Electron. Lett. **17** (1981) 312.
- 14) T. Ashley, et al.: Infrared Phys. **24** (1984) 25.
- 15) IEEE Trans. ED., **ED-27** (1980).
- 16) Tech. Digest of IEDM: IEEE ED Society, (1980) Dec. 8～10.
- 17) 高橋建二等：テレビジョン学会誌Vol. 37, p. 812 (1983)
- 18) J. O. Dimmock, I. Melnngailis and A. J. Strauss: Phys. Rev. Lett. **27** (1966) 1193.
- 19) K. Shinohara, Y. Nishijima and H. Fukuda: Proc. SPIE **438** (1983) 21.
- 20) M. Yoshikawa, K. Shinohara and R. Ueda: Appl. Phys. Lett. **31** (1977) 699.
- 21) M. Yoshikawa, M. Koseto and R. Ueda: CLEDS '77 (San Diego).
- 22) K. Shinohara, Y. Nishijima, H. Fukuda, H. Ebe and K. Murase: Conf. Digest of 9th Int'l Conf. on IR and Millimeter Waves, (1984) p. 71.
- 23) 西嶋由人等：59年秋応物14a R 2
- 24) E. D. Hinkley: Final Report to U.S. E.P.A.
- 25) E. D. Hinkley and C. Freed: Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 227.
- 26) K. Shinohara, T. Akamatsu and R. Ueda: Jpn. J. Appl. Phys. **20** (1981) 439.
- 27) A. Chedin, N. Husson and N. A. Scott: J. Mol. Spectrosc. **71** (1975) 343.
- 28) 土肥正二等：電気学会研究会資料LAV-84-29-33, p. 1 (1984)