

J I E R - 0 3 3

光 セ ン サ 研 究 調 査 委 員 会

報 告 書

平 成 6 年 3 月

社 団 法 人 照 明 学 会

# 目 次

	ページ
1. まえがき	1 - 1
1.1 委員会構成	1 - 1
1.2 委員会開催経過	1 - 2
2. 可視センサー	2 - 1
2.1 可視センサーの基本原理	2 - 1
2.2 可視センサーの種類と特徴	2 - 2
2.2.1 電子管形センサ	2 - 2
2.2.2 半導体センサ	2 - 3
2.3 可視センサの応用	2 - 4
2.4 可視センサーの技術動向	2 - 5
2.4.1 電子管形センサー	2 - 5
(1) 小型化	2 - 5
(2) 高感度化	2 - 6
(3) 高速応答性	2 - 6
(4) 高速ゲート(シャッター)性	2 - 7
2.4.2 半導体センサ	2 - 8
(1) 固体撮像素子の小型化	2 - 8
(2) 高解像度化	2 - 8
(3) 高感度化	2 - 9
(4) インテリジェント化	2 - 10
2.5 まとめ	2 - 10
参考文献	2 - 11
図・表	2-13~2-30
3. 赤外線センサ	3 - 1
3.1 赤外線センサの基本原理	3 - 1
3.2 赤外線センサの種類と特徴	3 - 3
3.2.1 熱形赤外線センサ	3 - 3
(1) 焦電形赤外線センサ	3 - 3
(2) サーモパイル	3 - 8
(3) サーミスタボロメータ	3 - 8
3.2.2 量子型赤外線センサ	3 - 9
(1) 光導電型赤外線センサ	3 - 10

(2)	光起電力型赤外線センサ	3 - 11
(3)	赤外撮像デバイス	3 - 15
3.3	赤外線センサの応用	3 - 16
3.3.1	赤外線リモートセンシング	3 - 16
(1)	環境計測	3 - 16
(2)	その他	3 - 18
3.3.2	光通信	3 - 18
3.4	赤外線センサの周辺技術	3 - 19
3.4.1	赤外放射源	3 - 19
(1)	黒体炉	3 - 19
(2)	熱放射源	3 - 20
(3)	天然放射源	3 - 20
(4)	レーザ	3 - 20
3.4.2	赤外光学材料と光学素子	3 - 22
(1)	赤外光学材料	3 - 22
(2)	光学素子	3 - 23
3.4.3	赤外線センサ用冷却系	3 - 26
(1)	液体の蒸発潜熱を利用する方法	3 - 26
(2)	気体の理想状態からのズレを利用する方法	3 - 26
(3)	気体に膨張仕事をさせる方法	3 - 26
3.5	赤外線センサの技術動向	3 - 27
3.5.1	超電導光センサの原理と特徴	3 - 27
(1)	熱型超電導光センサ	3 - 28
(2)	量子型超電導光センサ	3 - 28
3.6	まとめ	3 - 30
	参考文献	3 - 31
	図・表	3-34~3-67
4.	紫外放射センサ	4 - 1
4.1	紫外放射センサの基本原理	4 - 1
4.1.1	紫外線の波長区分	4 - 1
4.1.2	紫外放射センサの構造と基本原理	4 - 1
(1)	光電子放出効果を利用したもの = 「電子管型」	4 - 2
(2)	光起電力効果を利用したもの = 「半導体型」	4 - 2
4.2	紫外放射センサの種類と特徴	4 - 3
4.2.1	電子管形センサ	4 - 3

4.2.2	半導体センサ	4 - 4
(1)	単結晶シリコン (Si)	4 - 4
(2)	アモルファス-シリコン (a-Si)	4 - 4
(3)	ガリウム・ヒ素・リン (GaAsP)	4 - 4
4.3	紫外放射センサの応用	4 - 5
4.3.1	紫外線照度計	4 - 5
(1)	紫外線照度計とは	4 - 5
(2)	放射照度の考え方	4 - 5
(3)	基本構造	4 - 6
(4)	紫外線照度計の校正の考え方	4 - 6
(5)	紫外線照度計の製作上の留意点	4 - 7
(6)	紫外線照度計の動向	4 - 7
4.3.2	紫外線撮像システム	4 - 8
4.3.3	天体観測用センサ	4 - 9
4.4	紫外放射センサの周辺技術	4 - 11
4.4.1	紫外放射源	4 - 11
(1)	重水素ランプ	4 - 11
(2)	殺菌ランプ	4 - 11
(3)	石英製低圧水銀ランプ	4 - 11
(4)	ブラックライト	4 - 12
(5)	光化学用・捕虫用ランプ	4 - 12
(6)	日焼用ランプ	4 - 12
(7)	キセノンショートアークランプ	4 - 12
(8)	メタルハライドショートアークランプ	4 - 12
(9)	UVレーザ	4 - 12
4.4.2	紫外線光学部品	4 - 13
(1)	外管、入射窓	4 - 13
(2)	フィルタ	4 - 13
(3)	レンズ	4 - 13
(4)	ミラー	4 - 13
4.4.3	紫外放射標準	4 - 14
4.4.4	紫外線分光測定システム	4 - 14
4.5	紫外放射センサの技術動向	4 - 14
	参考文献	4 - 16
	図・表	4-16~4-31
5.	あとがき	5 - 1

[録音08]

## 1. まえがき

光センサとその応用技術は、今日の情報関連分野を始め、医学分野、バイオ分野に至る先端技術の中核を担い、生体フォトン計測、光CTなどの新分野を開拓し始めている。

このような状況下において、光センサ研究調査委員会は光センサの技術動向の調査を主たる目的とするが、単に光センサに関する国内外の研究報告の調査に留まらず、先端技術のトレンドを把握するとともに、併せて、先端分野、産業分野での利用実態を含めた調査を進める主旨で設置された。

光センサ研究調査委員会では、昭和63年から約5年間の内外の光センサの研究開発の進展状況を中心として、その技術動向を調査してまとめた。調査は可視光、赤外線および紫外線の3分野に分類し、日本科学技術情報センターのオンライン情報検索から始め、この間、東京支部大会では光関連材料・デバイス研究専門部会に連帯してシンポジウムを開催した。

この報告書は、光センサ研究調査委員会が平成3年6月から平成6年3月まで、約3年間研究調査した内容をまとめたものである。なお、報告書の作成に当たっては、基本原理、種類と特徴、応用、周辺技術およびその最近の技術動向を詳述した各論とによって構成し、各章はそれぞれ単独で該当分野の開発進展状況が把握できるように配慮した。

### 1.1 委員会構成

委員長	石井 弘充	日本大学理工学部電気工学科
幹事	増田 千尋	芝浦工業大学システム工学部電子情報システム学科
委員	石崎 洋之	(株)富士通研究所厚木研究所赤外デバイス研究室
	江頭 信正	三菱電機(株)生活システム研究所システム制御開発部
	久米 英浩	浜松ホトニクス(株)電子管事業本部応用開発グループ
	高田 裕治	松下電工(株)電機技術開発研究所
	戸沢 均	(株)トプコン機器技術部
	中本 正幸	(株)東芝総合研究所電子部品研究所半導体機能デバイスグループ
	松本 一哉	オリンパス光学工業(株)技術開発本部
	谷治 環	埼玉大学工学部総合情報処理センター

[50音順]

## 1.2 委員会開催経過

第1回 平成3年8月9日

設置趣意書を基に委員構成、活動方針、スケジュールを決定  
調査対象範囲、分類方法、報告書内容等の検討

第2回 平成3年10月30日

「FIBRE-OPTIC SENSORS: A MICRO-MECHANICAL APPROACH」

江頭 信正 委員

「光集積差動形レーザドップラー速度計」

谷治 委員

「PYROELECTRIC INFRARED-CCD IMAGE SENSOR USING LiTaO<sub>3</sub>」

中本 正幸 委員

光センサ動作原理による分類、光センサ用途別分類等の検討

第3回 平成4年1月17日

「超高感度アバランシェ増倍型撮像管」

増田 千尋 幹事

「INTER OPTO '91 出展リスト」

谷治 委員

調査文献収集方法、公開研究会等の検討

第4回 平成4年3月13日

「CMD イメージセンサ」

松本 一哉 委員

「光センサ文献題目検索」(1142件)

石井 弘充 委員長

シンポジウム「2次元光センシング技術」等の検討

第5回 平成4年6月5日

「光センサ文献アブストラクト」収集(119件)

石井 弘充 委員長

「光センサ文献題目検索」(530件)

松本 一哉 委員

文献分担調査方法、東京支部大会シンポジウム等の検討

第6回 平成4年8月26日

「光センサ文献アブストラクト」収集(118件)

石井 弘充 委員長

(65件)

増田 千尋 幹事

文献分担調査グループ、執筆要綱等の検討

第7回 平成4年10月23日

東京支部大会シンポジウム「2次元光センシング技術」担当、講演

・ 超高感度アバランシェ増倍型撮像管

谷岡 健吉 N H K

・ HD TV 用 CCD素子

真鍋 宗平 東 芝

・ CMD イメージセンサの現状及び今後の動向

緒方 雅紀 オリオンパス

・ HgCdTe-IRCCDの解像度向上

栗本 健司 富士通

・ ショットキバリア赤外線イメージセンサ

木股 雅章 三菱電機



## 2. 可視センサー

可視センサーは、構造の違いから電子管センサー、半導体センサーに大きく分けることができる。本章では、それらについての動作原理、種類と特徴、応用から技術動向について記述される。

### 2.1 可視センサーの基本原則

光検出器は機能的に大別すると、光の強度のみを測定する光センサーと、位置検出能力をもつ光センサーとがあり、さらに構造の違いから電子管型光検出器と半導体検出器に分けられる。また光電変換の原理により外部光電効果型、内部光電効果型、熱効果型とに分類される。特に可視域においては外部光電効果、内部光電効果を用いたものが主流である。表1に代表的な可視光センサーの分類表を示す。

表1における外部光電効果型検出器は、光電子放出を基本とした、光電子増倍管、イメージインテンシファイアなどに代表され、超高速センサーであるストリーク管なども含まれる。いずれも光電面が光電変換面として用いられ、さらに電子増倍器であるダイノード、マイクロチャンネルプレートを内蔵することにより、高利得、高速、高空間分解能に特徴づけられる。

表1における内部光電効果型検出器は固体内で入射光により励起されたキャリアの動きを利用するもので、光導電型、光起電型がある。光導電型検出器は、入射光の強度により半導体の抵抗値が変化することを利用した光検出器で、代表的なものに光導電セル、光導電型撮像管などがある。光導電セルは時間応答が遅く前歴特性があるなどの難点もあるが、小型、軽量、安価などの利点により広く用いられている。光電変換材料として用いられるものに、可視域用ではCdS、赤外域用ではPbS、PbSe、InSb、HgCdTeなどがある。光起電型検出器として現在用いられているものはほとんどがpn接合型半導体素子であり、入射光励起による光起電力が発生することを利用している。この効果は光電子放出効果に比べ、光電子（キャリア）の収率がよいため、高い量子効率を得ることができる。またアバランシェフォトダイオードやフォトトランジスタのように増倍機構を内部に有するものも実用化されている。

半導体一次元、二次元光センサーは、CCD型イメージセンサ、MOS型に代表されるアドレス型イメージセンサーが一般的で広く用いられるに至ったが、増倍機能をもったAMI、SIT、CMDなども実用化されている。

## 2.2 可視センサーの種類と特徴

### 2.2.1 電子管形センサ

本節では、前述のセンサの分類のうち、外部光電効果を利用した電子管形センサの一般的特性について述べる。

電子管形センサとしては、光電管(Photo-Tube, 以後略してPT)、光電子増倍管(Photomultiplier Tube, 以後略してPMT)が一般的に用いられてきた。近年、マイクロチャンネルプレート(Micro-Channel Plate, 以後略してMCP)の利用、ストリーク管の出現により、光子計数計測法いわゆるフォトンカウンティング計測が可能になるとともに、ピコ秒領域までの計測が可能となった。電子管による光検出器の構成要素は、図1に示すように、光入射窓、光を電子に変換する光電面(外部光電効果による)、光電面より放出された光電子の制御電極(偏向、収束)、電子増倍部(ダイノードまたはMCP)および読み出し部(陽極、蛍光面)からなる。具体的には、これらの要素の組み合わせにより、光強度検出光センサー(PT, PMT)、一次元、二次元センサ(イメージインテンシファイ管)、特殊管(ストリーク管、拡大管)などが実用化されている。

いずれも光電変換は光電面においてなされるが、検出器の分光感度特性は、入射窓材の吸収による短波長側のカットオフ、そして光電面材料のバンドギャップによる長波長側のカットオフによって決まる。図2に代表的な光電面と窓材の組み合わせによる分光感度特性を示す。窓材と光電面の選択により、105nmから1200nmまでの波長域を測定することができる。図3に通常用いられている窓ガラス材の分光透過率を示す。これらの材料の吸収波長より短い領域の計測では、入射窓を用いない開放形光センサーが必要となる。

光の弱い領域では、光センサ内に増倍部を内蔵させ、光電子を増倍する手段がとられる。特に、極微弱な領域ではフォトンカウンティング法が不可欠であり、そのために光検出器の増倍器に $10^5$ 以上の増倍率が求められる。このために各種の電子増倍器(ダイノード)が開発されてきた。種々の型式のダイノードの構造を図4に示す。これらのダイノードは、高速性、ダイナミックレンジ、利得(gain)に関して一長一短があり、使用目的に応じて使い分けられている。通常光電子増倍管に1000~2000Vの電圧をかけることにより $10^6$ ~ $10^7$ の利得が得られ、容易にフォトンカウンティングモード動作が可能である。

電子管デバイスの時間応答特性は、光電面から放出される光電子の初速分布、放出角度広がり、ダイノード間での走行時間のバラツキおよびダイノードの構造、印加電圧、収束方式、印加電圧に依存する。図5に代表的なPMTおよびバイプラナーPTの印加電圧に対する立ち上がり時間の特性を示す。バイプラナーPTは、光電面及び陽極からなる二極管であり超高速応答性はあるが、PMTのような電子増倍器がないので微弱光計測に不向

きである。バイプレーナPMTの特徴として光電面と陽極の距離が接近していることと、信号取り出し用の陰極と陽極（グラッド電位）とが同軸構造となっているなどにより立ち上がり時間60psecの高速応答性を有する。図5中に示されるように、MCPを内蔵したPMTは150psecの時間応答性をもち、従来型のPMTにくらべ同等の増倍率を持ちかつ、活期的な高速応答性が達成されている。（後節参照）

電子管形の一次元、二次元センサーである静電収束型イメージンシファイア及び近接型イメージンシファイアの構造を図6、図7に示す。いずれも光電面、MCPと蛍光面の組合わせによる高感度二次元検出器であり、MCPを2段以上用いたものはフォトンカウンティングレベルでのイメージングも可能である。静電収束型は高い増倍が得られ、近接型は高速ゲートが得られ、さらに歪の無い良好な画像が得られる。イメージンシファイアは増倍型イメージセンサーであるので、暗視装置、高速シャッターカメラ用イメージセンサーとして応用される。

(久米 英浩)

## 2. 2. 2 半導体センサ

シリコン等の半導体に光が入射すると、光のエネルギーにより半導体内において正孔-電子対（ホットキャリア）が発生する。ホットキャリアの増加による導電率の増大を検出する（光導電型）、あるいは半導体ダイオードにホットキャリアを蓄積しダイオード電位の変化を検出する（光起電力型）ことにより光信号が得られる。

代表的な半導体である単結晶シリコンの禁制帯の幅（バンドギャップ）は室温に於て約1.1eVである。他方、光のエネルギーは、波長を $\lambda$ （Å）とすると $12400/\lambda$ （eV）と表される。これより単結晶シリコンは室温では $11300\text{Å}$ より短波長の光が検出可能となる。ゲルマニウム、ガリウムヒ素のバンドギャップは夫々0.67eV及び1.4eVであるため、検出限界波長は $18000\text{Å}$ 及び $8900\text{Å}$ となる。半導体センサにおいては光電変換層として非晶質シリコンあるいは非晶質セレンを使用する場合がある。それぞれのバンドギャップは1.6-1.7eV及び2.0eVとなっている。

図8に単結晶シリコンよりなる背面照射型Charge-Coupled Device（CCD）の分光感度特性を示す(1)。光電変換層となるシリコン層の厚さは $10\mu\text{m}$ である。可視光領域（ $4000\text{Å}-7000\text{Å}$ ）の他に、若干紫外線領域及び赤外線領域にも有感であることがわかる。長波長側での感度の低下はシリコン層を透過してしまう入射光の割合が増加する事による。短波長側の感度の限界は半導体を保護している保護膜による光吸収、あるいは保護膜のホットキャリアの捕獲で決まる。

次に、代表的なホトダイオードであるp-n接合よりなるホトダイオードを図9に示す。p型半導体の表面にn型拡散層を形成している。図9においてn型半導体に正の電位を印加する（逆バイアス状態）。この状態で半導体表面に光が入射すると、半導体内部で光は正孔-電子対に変換される。そして電子はn型領域に、他方正孔はp型領域に流れる。n型領域を電氣的にフローティング状態とすれば、光発生電子はn型領域に蓄積される。所望の蓄積期間後、n型領域にたまった電子の量を電流的に、あるいは電圧的に検出することにより、ホトダイオードに入射する光の強度がわかる。

図10はもう一つのホトダイオードのタイプである、MOS型ホトダイオードを示す。MOS型ホトダイオードの場合、多結晶シリコン等よりなるゲート電極上部より光が入射する。入射光により発生した電子は、正電位が印加されたゲート電極直下の半導体-ゲート絶縁膜界面に蓄積される。

### 2.3 可視センサの応用

家庭用VTRの受光デバイス、あるいはFA用カメラの"目"など、民生分野あるいは産業分野における可視光入力デバイス、特に映像を捕える固体撮像素子（イメージセンサ）の応用範囲は拡大の一步を辿っている。そこでここでは、可視光入力デバイスの中心的技術である固体撮像素子について紹介する。

最初に可視光固体撮像素子の構成および動作を説明した後、次に代表的な固体撮像素子あるCCDの構造、特性等を紹介する。現在までの固体撮像素子の開発の流れは文献(2)に、又、各種固体撮像素子の技術的な解説は文献(3、4)にまとめられているので、興味のある方はぜひ御参照頂きたい。

固体撮像素子は、受光部となるホトダイオードを含む画素と呼ばれる単位セルを二次元状に敷き詰め、撮像領域を形成する。画素数は、標準のテレビモード（NTSCモード）で約30万個、一方、近年精力的に開発中のハイビジョン（HDTV）モードでは約200万個にもものぼる。ホトキャリアが蓄積された各画素を順次選択することにより、時系列的な画像信号が得られる。

次に具体的なCCDの構成、及び動作について説明する。図11にCCD電荷転送路の断面構造を示す(5)。単結晶シリコン(Si)基板に対し、Si酸化膜を介在させて形成した、多結晶Siよりなる電極群を、3個毎に共通に結線する。各配線に高、中、低電位パルスを順次印加することにより、信号電子群を転送する（3相駆動CCD）。

図12はインターライン転送CCD固体撮像素子の概略的な平面構成である。ホトダイオードを含む画素の蓄積電荷は、順次垂直、水平CCD転送路で転送され、出力アンプで電荷数/電圧変換され、最終的に電圧信号として出力される。NTSCモード、HDTVモードとも、1/30秒毎に一画面(1フレーム)が出力される。

近年、各社よりHDTV規格に適應した固体撮像素子が相次いで発表された。文献(6)はそれらHDTV固体撮像素子の総合報告である。以下に、これらのHDTV

用撮像素子の例として、文献(7)に報告されたHDTVCCDの特性について解説する。なお最近、本CCDを使ったハイビジョン用モノクロカメラモジュール発売の発表があった。

図13に本CCD撮像素子の平面構成を示す。撮像部の有効画素数は1920\*1036個である。高輝度の光が入射した時、テレビ画面の上方及び下方に白い縦筋が発生するスマア現象を防ぐ為に、撮像部下方に蓄積部が形成されている。水平、垂直CCDは各々、2相、及び4相ハルスで駆動される。消費電力低減の為、水平CCDは2線構成となっている。図14は本CCDの画素部の断面構造である。各画素のホトダイオード上部には、等価的にホトダイオードの開口面積の向上がはかれる、有機材料よりなるオンチップマイクロレンズを形成している。素子の諸特性を表2にまとめた。理論的な水平限界解像度である1000TV本が得られている。

モノクロカメラ(XCH-1125)の感度は400 Lux F4 (S/N比=56dB)と、優れた値となっている。

HDTVCCDチップの消費電力は、現状最小でも0.48 W(8)と大きい。さらなる消費電力の削減が、感度の向上、ノイズレベルの低減等とともに期待される。

(松本 一哉)

## 2.4 可視センサーの技術動向

本節では可視センサーの小型化、高解像度化、高感度化、高速応答化などの開発動向について述べる。

### 2.4.1 電子管形センサー

#### (1) 小型化

一般的に、電子管形センサーは固体センサーにくらべると大型でありかつ、使いにくさに欠点があった。最近開発された超薄、微細構造をもつメタルチャンネルダイノードを内蔵しかつ、T08型パッケージに封入された超小型光電子増倍管が実用化された(9)。図15にその外観写真を示す。通常の光電子増倍管と同レベルの光電感度と、 $10^6$ の増倍率が得られ、光子計数も可能である。さらに、図16に示されるように高圧電源の内蔵されたモジュール型も開発され、低電圧での駆動、電圧調整が可能となった。半導体センサーとほぼ同程度の超小型性、低電圧駆動が可能となった新しいPMTが出現した。

## (2) 高感度化

光導電型撮像管は、光導電体の組成によって、ビジコン( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ )、カルニコン( $\text{CdSe}$ )、ニュービコン( $\text{ZnSe-Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ )、プランビコン( $\text{PbO}$ )、サチコン( $\text{Se}\cdot\text{As}\cdot\text{Te}$ )などが知られている。それらに比べ、さらに高解像度、高感度であるHARP管(High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor)が開発された(10)。図17に、HARPターゲット動作の概念図を示す。ターゲット両端に高電圧を加え、電子-正孔対は信号電極、走査側へ動く。この過程で、高電界で加速されてエネルギーを得、ターゲットを構成している原子に衝突しては電子-正孔対を発生させる。この現象が次々と起こる結果、なだれ状に増倍した正孔がターゲット走査側に信号電荷として蓄えられ、ビーム走査によって信号電流が得られる。その結果、HARP管は標準のサチコンに対し、10倍強の感度を有する。これは商品名HARPICONとして実用化され、高感度カメラ放送、ハイビジョン放送に应用されている。さらに、最近ではサチコンの100~1000倍もの高感度撮像が可能なSuper HARP管も開発された(11)。

## (3) 高速応答性

電子形光センサーは高感度性ととも高速応答性に特徴づけられる。その中でも特に、MCPを用いた光電子増倍管、ストリーク管において高速応答性の向上の試みがなされている。

図18にMCPを内蔵したPMTの構造を示す。基本的に光電面、MCP(2枚内蔵)および、陽極の各要素から構成されている。電流増倍率は、MCP 2枚を用いたことにより、 $10^6$ が得られ、光子計数法が可能である。特に光電面とMCP間の距離を近接構造したこと、MCPの高速応答性から、パルス応答立ち上がり時間100ps、時間分解能25psがえられている(12)。

ストリーク管は現存する光センサーの中では最も高速である。その動作原理図を図19に示す。入射パルス光は光電面上にスリット状に結像され、光電面から放出されたスリット状の光電子は加速、偏向される。このときトリガー信号と同期した掃引電圧を加えることにより、光電子パルスの時間差が位置の情報に変換される。光電子パルスはMCPで増倍され、蛍光体を発光させ、その濃淡が入射パルスの時間情報を与える。ここでスリットの横方向は結像系や分光器からの入射光とすれば位置または波長の情報を与える。時間分解能で2psから近年では、サブピコ秒のものも得られている。図20はフェムト秒ストリーク管によるダブルフェムト秒レーザパルスのストリーク像とその強度分布の測定例であり、360fsの時間分解能を得た(13)。ごく最近、さらに高速である200fsの時間分解能を得られた報告もある(14)。

#### (4) 高速ゲート（シャッター）性

高速に移動する物体の観測や、高速で変化する放電、爆発などの現象を解析し、静止画像化するニーズが高まっている。特に放電現象の観測や、内燃機関における爆縮現象解析、核融合、微粒粉体の動的解析、医学研究などの分野で容易に使用できる高速度カメラが必要とされている。これらの高速現象を計測するには、従来までは機械的シャッターまたは、高速ストロボと高速写真による手法が用いられてきた。しかしながら、さらに高速かつ電子的に読み取り可能な方式の開発が求められている。この要求に対し、電子式シャッター機能をもつ高速度カメラ（フレーミングカメラ）が開発された。応用上の要請から、ナノ秒領域でシャッターできること、高速シャッター動作に伴って露光時間が短く、入射光量が少なくなる為増倍機構が必要となる。さらに画像処理の容易性から、撮像管、固体撮像素子などによる電子式に画像化できることが望まれる。

シャッターカメラを構成するセンサとして、近接型のゲート付イメージンシファイアが用いられる(15)。図2-1にゲート付イメージンシファイアの動作図を示す。光電面に結像された光学像は、光電面で光電子像に変換される。光電子像は強い電界にひかれてMCPに入射し、ここで増強され、蛍光面に当たって増倍された光学像となる。ここで光電面の電位をマイクロチャンネルプレート(MCP)の入力面の電位に対して、正電位に保つことにより減速電界を形成し、光電面から放出される光電子を引き戻し、カットオフすなわち、シャッターを閉じた状態に保持する。必要とするタイミングに光電面に負極性のパルス電圧を印加して、光電面とMCP入力面間の電界を逆転させると光電子がMCPに到達でき、そのパルス電圧が印加されている間のみシャッターが開いた状態となる。つまり、印加した負のパルス電圧のパルス幅（時間）がシャッター時間となる。実際には、図に示すようにMCP入力面を電位的に固定して、光電面に負極性の200V程度の高速パルスを印加する方法でシャッター動作を行う。図2-1においては、 $V_G$ が印加されゲートONになった時のみ、イメージンシファイアとして動作し、そのときの映像増強度（ゲイン）は、5,000(ft-L/ft-C・・・MCPの電圧900Vのとき)が得られる。このゲート付イメージンシファイアに高速ゲートパルスを加えることにより、約2nsの立ち上がり時間、立ち下がり時間でゲートがON、OFFすることが報告された。最近さらに超高速である50ピコ秒でゲート動作するイメージンシファイアが開発されたという報告もある(16)(17)。

図2-2にゲート付イメージンシファイアを用いた高速シャッターカメラの構成図を示す。高速ゲート可能なイメージンシファイア、ゲート回路及び、読み出し用のCCDカメラから構成される。このカメラはCCD単体カメラにくらべ、数千倍の感度とナノ秒での高速の電子シャッター機能を有することから、高速移動物体の解析、微弱光物体の可視化、燃焼の解析等(18)に応用されている。

(久米 英浩)

## 2.4.2 半導体センサ

本節では半導体センサの技術動向として、固体撮像素子の開発動向について説明する。固体撮像素子の開発動向は、素子の小型化、高解像度化、高感度化、信号処理機能のオンチップ化などに大別される。以下に各項目についての研究開発例を説明しながら、最後に今後の研究開発動向をコメントする。

### (1) 固体撮像素子の小型化

固体撮像素子の寸法を縮小する事により、撮像光学系の小型化が実現される。結局、カメラ一体型VTRの小型軽量化、あるいは電子内視鏡等のカメラ部の小型化が可能になる故、撮像素子の小型化が民生分野、産業分野にはたす波及効果は大きい。

最近、フレームトランスファー(FT)型CCDを使った、1/5インチ25万画素イメージセンサが発表された(19)。FTCCDの受光部の断面構造を図23に示す。FTCCDは信号転送部(Nウエル)が受光領域を兼ねる為、同一チップインクルではITCCDに比べ画素寸法の縮小が容易である。このCCDの画素サイズは $5.8 \times 4.5 \mu\text{m}$ と、発表された中では最も小さい。図23にあるように、従来FTCCDでは受光部の上部に多結晶Siよりなる転送ゲート電極が存在するために、ゲート部の光吸収による青感度の低下が問題となっていた。本CCDにおいては、ゲート電極の薄膜化により、十分な青感度を得ている。

本CCDの仕様仕様、及び試作カメラの仕様を表3にまとめた。受光部寸法が $2.9 \times 2.18 \text{mm}$ と小さくなったにもかかわらず、試作カメラの最低被写体照度は5 Lux(F2.0)と、良好なカメラ感度が実現されている。

### (2) 高解像度化

高解像度電子映像メディアの入力素子、あるいは放送分野、コンピュータ分野等を統合する汎画像メディアの入力素子の候補として、電気通信技術審議会から超高精細デジタル映像システム(UDTV:Ultra Definition TV)に関するスタジオ規格が報告された。表4にUDTVのスタジオ規格を示す。いずれのレベルにおいても画素数は200万個以上、順次(ノンインターレス)走査、60枚/秒のフレームレート等が要求される。信号のビットレートはGbit/秒のオーダーとなり、固体撮像素子の高速駆動性も必須となる。

UDTV-0レベルが実現可能と思われる固体撮像素子が報告された(20)。この固体撮像素子は、各画素に増幅機能を持たせた内部増幅型固体撮像素子(21)の一種である、CMD(Charge Modulation Device)固体撮像素子に属する。この素子の1画素に対応する、CMDの構造を図24に示す(22)。CMDはリング状

のゲート電極を有するMOSTランジスタの一種である。入射光により発生した電荷のうち、正孔が、ゲート電極下の半導体表面に蓄積される(MOSホトダイオード)。蓄積正孔はゲート電位を変調する。その結果ソース電流も変調される。この変調されたソース電流を検出することにより入射光量がわかる。図24のドレイン領域が画素間の電氣的、光学的分離領域としても作用するため、画素の縮小化が容易である。CCDと異なり直接電荷を読み出さない為非破壊読み出しも可能である。

2/3インチ200万画素CMDイメージセンサの回路構成を図25に示す。1画素は1個のCMDよりなる。列方向に共通に繋がれたソースライン、及び行方向に繋がれたゲートラインにより各画素を選択する(X-Yアドレス)。本固体撮像素子は、同一チップに形成したスキャンコントローラに印加する制御信号により、インタレス/順次走査の選択が可能である。

図26に順次走査時の撮像例を示した。理論的な限界解像度である、垂直/水平1000TV本まで解像している事がわかる。チップサイズは13.8\*9.6mmである。消費電力はX-Yアドレス型を反映して160mWと少ない値を得た。60フレーム/秒の高速駆動、トータルなカメラシステム上での固定パターン雑音の低減等が今後の開発課題である。

多画素化の意味では文献(23)に2620万画素CCDイメージセンサが報告されている。主に天体観測用に用いられるこの素子は画素寸法が12 $\mu$ mと小さいにもかかわらず、多画素を反映して受光領域は6.1cm平方と巨大である。図27にチップ写真を示す。

### (3) 高感度化

高感度化に関する研究としては、光電変換部に雪崩増倍作用が生じるような高電界を印加し、その増倍作用により高感度化を達成する構成(24、25)、あるいは増幅型イメージセンサによる高感度化(26)等の報告がある。ここでは、後者の例を説明する。

図28は、(26)に報告された増幅型センサの画素構造の断面図である。光電変換部であるn型半導体層の表面に蓄積された光発生電子は、画素が選択された時は、正孔伝導型信号読みだしトランジスタのセンシングチャンネルに転送される。この信号読みだしトランジスタのゲート容量は十分小さく作られている為、転送された電子は効率よく読みだしトランジスタの正孔電流を変調する。なおFPPはチャンネルの電位分布を平坦化するために、ゲート酸化膜中に形成されたフラットポテンシャルプレートと称する第二電極である。画素のホトトランジスタの特性としては、等価雑音電子数が、0.8個(rms)と原理的には1個のホトン迄検出可能な優れた特性が得られている。イメージセンサとしての評価が待たれる。

#### (4) インテリジェント化

システムの小型化が要求されるロボットの目、あるいは小型かつ高性能なFA分野に適したセンサ等の用途には、信号処理機能を固体撮像素子上に持たせた、インテリジェントセンサの実現が望まれている。

インテリジェントセンサについては、バクテリオロドプン等の多様な光物理反応を有する感光性蛋白質を利用した動体検出用のセンサ(27)、2次元のホットダイオードアレイの各画素を抵抗のネットワークで結合したシリコンレチナ、内部増幅型センサの非破壊読みだし特性を応用したセンサ(28)等、近年活発な研究開発が進められている。ここでは内部増幅型イメージセンサを例として説明する。

図29に実時間(60フレーム/秒)で原画像、エッジ画像、スムージングされた画像等が出力可能なCMDイメージセンサの回路構成を示した。一列毎に3本のソースラインを形成し、CMDの非破壊読みだし特性を利用し、3\*3の局所信号群を同時に出力端A-Iに出力可能とした。局所信号群は順次、時系列的に走査される。9本の出力端は、図30に示す簡単なアナログ回路に繋がれており、アナログ回路の出力端子からエッジ信号(Laplacian Image)、原画像(Normal image)、スムージング像が、同時にしかも実時間で得られる。図31に本撮像素子による撮像例を示す。良好な輪郭抽出が可能である事がわかる。表5には本センサの仕様及び性能をまとめた。通常フレームメモリを使用した画像処理装置の消費電力は数Wのオーダーであるから、表5の80mWという消費電力は充分小さい。

本節の最初に述べたように、ロボットの目、あるいは小型かつ高性能なFA分野に適したセンサ等の実現に向けて、これからは一段と多機能化されたインテリジェントセンサの研究開発が進められると予想する。

#### 2.5 まとめ

以上固体撮像素子の研究開発動向をかいつまんで紹介した。本章では触れなかったが、コンパクトな2次元カラー・スキャナの実現を目指した完全密着型大面積イメージセンサ、あるいは毎秒数百フレーム以上の画像が読みだせる高速度イメージセンサ等、広範多岐にわたる研究開発が進行中である。イメージセンサ開発の究極の目標は、人間の目に比肩する高感度、高解像度かつ多様な信号処理能力を有する素子の実現であると言われている。この目標を目指して、今後もたゆまない固体撮像素子の研究開発が続くと思われる。

(松本 一哉)

参考文献

- 1) D. J. Woywood; The RCA CCD-1 BROADCAST COLOR CAMERA, 1984 NAB
- 2) 長原脩策：本誌記事に見る固体撮像素子カメラこの18年. 日経 エレ. no.563 pp.261-291(1992)
- 3) テレビジョン学会編：固体撮像デバイス. 昭晃堂 (1986)
- 4) 木内雄二：イメージセンサの基礎と応用. 日刊工業新聞社 (1991)
- 5) Boyle W.S. and Smith G.E.: Charge Coupled Semiconductor Devices. BSTJ 49 pp.587-593 (1970)
- 6) Manabe S. and Harada N.: High Definition Television (HDTV) Solid State Image Sensors. IEICE Trans. Electron. E76-C pp.78-85 (1993)
- 7) 米本、他：HDTV用200万画素FIT-CCDイメージセンサ. ITEJ Tech. Rep. vol.15 pp.7-12 (1991)
- 8) Morimoto M. et al: A 2/3" 2M-Pixel IT-CCD Image Sensor. to be presented in '94 ISSCC
- 9) H. Kyushima et. all: To be published on IEEE Trans. Nucl. Sci, (1994).
- 10) 河村達郎： NHK技研 R&D. NO.6. P12(1989).
- 11) 辻和隆 他： テレビジョン学会技術報告. 15. 52. P7(1991).
- 12) H. Kume et. all: Appl. Opt. 27, 1170(1988).
- 13) 木下勝之： TV全大, 2-1(1984).
- 14) K. Kinoshita et. all: SPIE, Vol.1982 Photoelectronic Detection and Imaging, 180(1993).
- 15) H. Kume et. all: SPIE, 1358, 1144(1990).
- 16) Stan Thomas, Jimmy Trevino: SPIE, Vol.1358, P84(1990).
- 17) Stan Thomas et. all: SPIE, Vol.1358, P91(1990).
- 18) Y. Goto: COMODIA, 90, 147(1990).
- 19) 岡田吉弘：1/5インチ25万画素イメージセンサの特性. 映像情報 5月号 pp.37-43 (1993)
- 20) 野本、他：2/3インチ200万画素CMDイメージセンサ, ITE Tech. Rep. vol.17 pp.13-18 (1993)
- 21) Fossum E.C.: Active Pixel Sensors: Are CCD's Dinosaurs?. SPIE Vol.1900 pp.2-14(1993)
- 22) 緒方雅紀：CMDイメージセンサの現状及び今後の動向. 平成4年照明学会東京支部大会予稿集 pp.116-119(1992)
- 23) Chamberlain S.G. et al.: A 26.2 Million Pixel CCD Image Sensor. SPIE Vol.1900 pp.181-191 (1993)
- 24) Huang Z.S. and Ando. T.: A Novel Amplified Image Sensor with a-Si:H Photoconductor and MOS Transistors. IEEE Trans. E.D. Vol.37 pp.1432-1438 (1990)

- 25) Komobuchi H. and Yamada T.: An Edge Breakdown Free MOS-Avalanche Photodiode Image Sensor Cell. IEEE Trans. Cons. El. Vol. 38 pp.590-594 (1992)
- 26) Yamashita H. et al.: A New High Sensitivity Photo-Transistor for Area Image Sensors. IEDM Tech. Dig. pp.78-81(1988)
- 27) 宮坂力 小山行一: 感光性たんぱく質ハクテリオロトフオンを用いる光電変換とイメージセンシング. 応用物理 第61巻 pp.1053-1057 (1992)
- 28) Takayanagi I.: A Multiple Output CMD Imager for Real Time Image Processing. IEDM Tech. Dig. pp.579-582(1993)

検出原理		光センサー	1次元、2次元光センサー
外部光電効果	光電管	光電子増倍管	イメージングフアライア(I.I.) イメージング管 SIT管 ストリクター管 複合素子(電子管+半導体センサ)
	光導電効果		
内部光電効果	光起電効果	フォトダイオード フォトトランジスタ フォトランジェクタ フォトダイオード	CCD型イメージセンサ アトリス型イメージセンサ(MOS, CIDなど) 増幅型イメージセンサ(AMI, PCD, SIT, CMDなど)

表1 可視センサーの分類

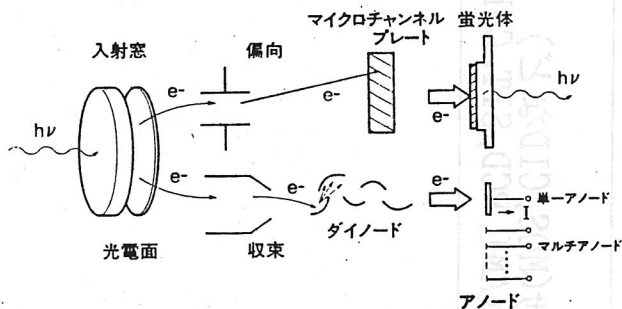


図1 電子管における光検出器の動作原理の構成

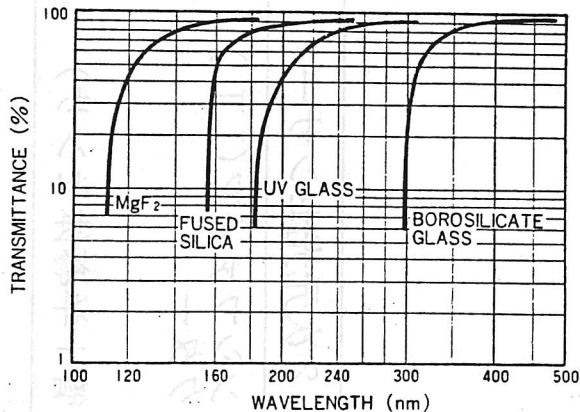


図3 光電管に使われている種々の窓材の透過率曲線

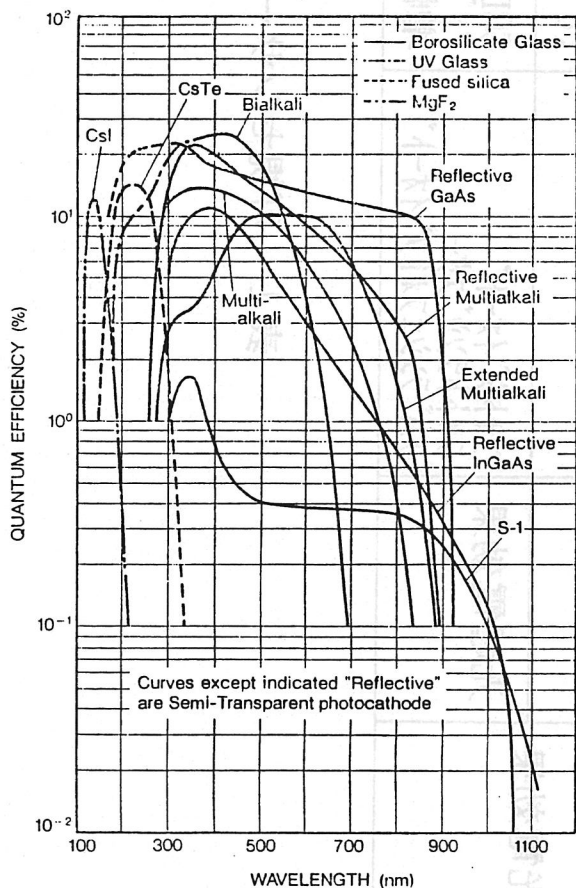


図2 代表的な光電面の分光感度特性

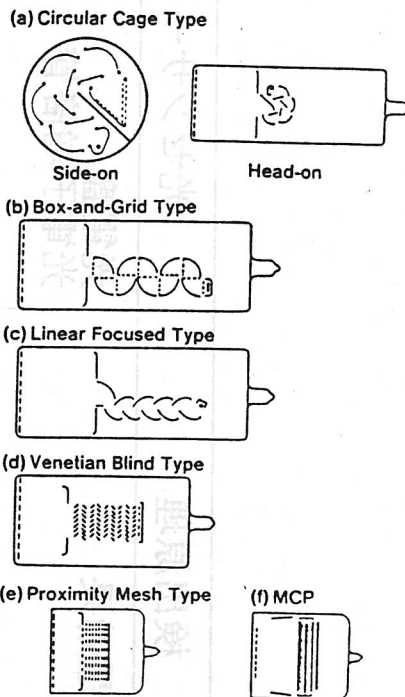


図4 光電子増倍管におけるダイノードの種類

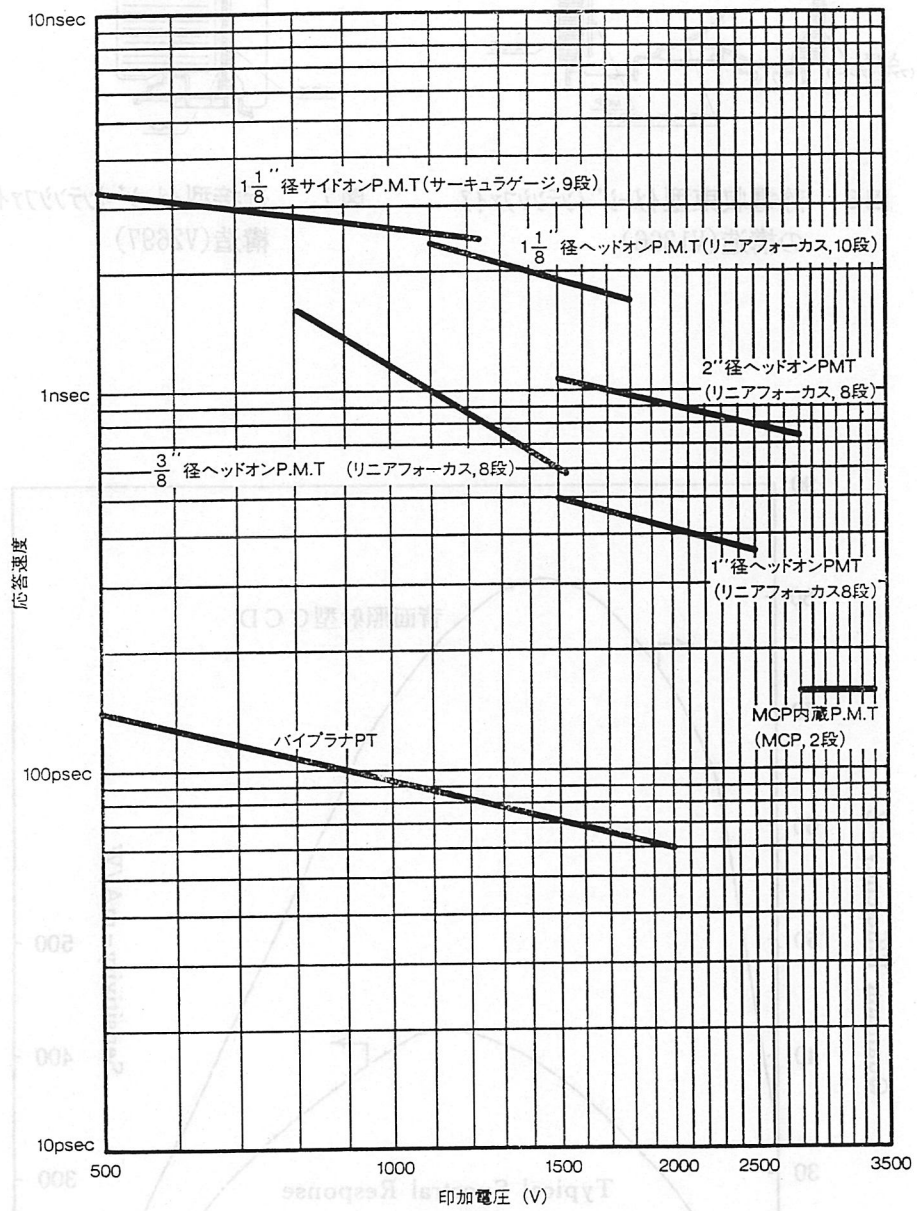


図5 バイプライン型および各種の光電子増倍管の応答速度

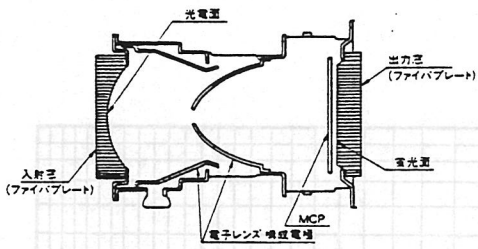


図6 静電収束型イメージインテンスファイアの構造(V1366)

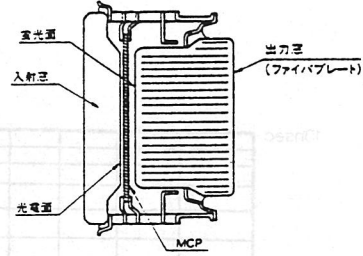


図7 近接型イメージインテンスファイアの構造(V2697)

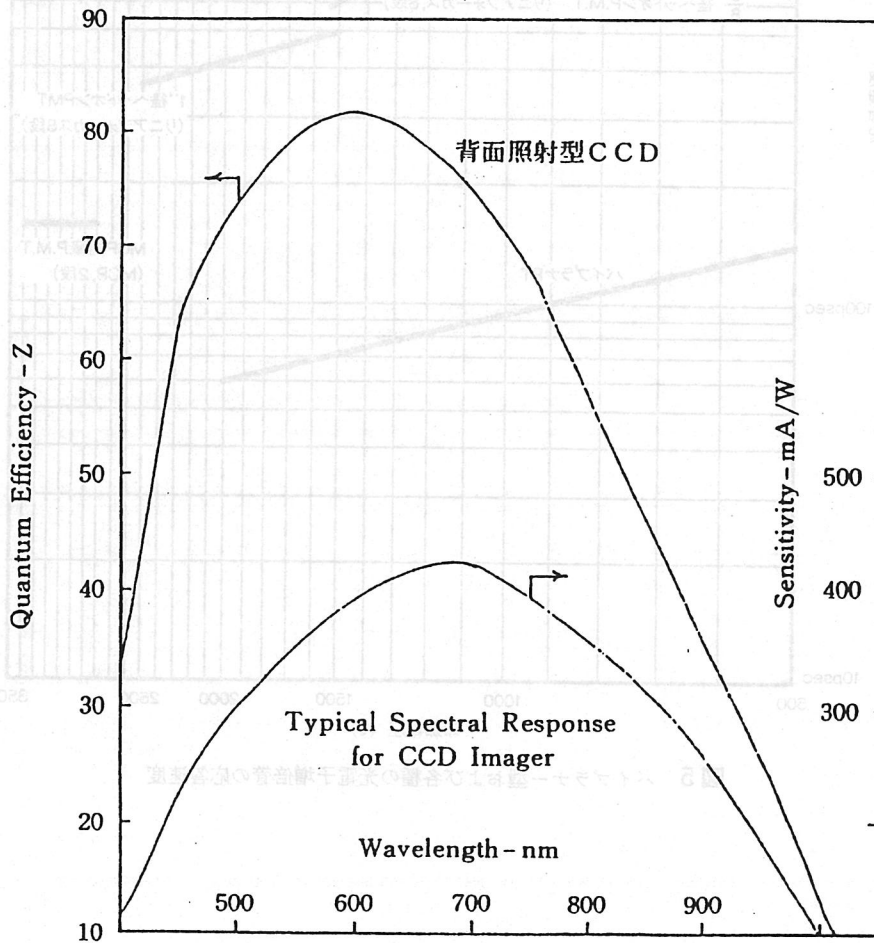


図8 背面照射型 CCD の分光感度特性例

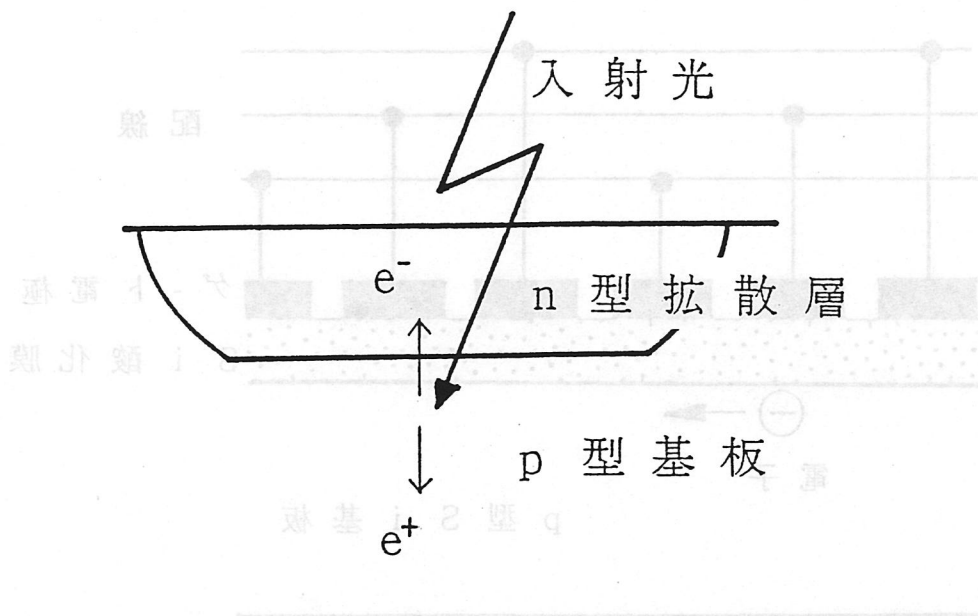


図9 p - n 接合ホットダイオード断面構造

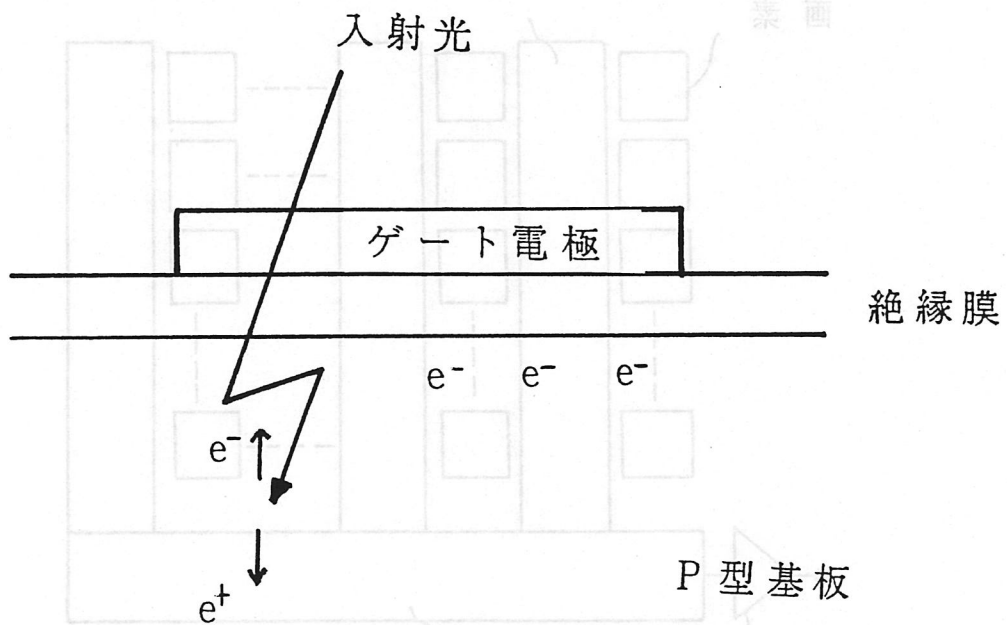


図10 MOS型ホットダイオードの断面構造

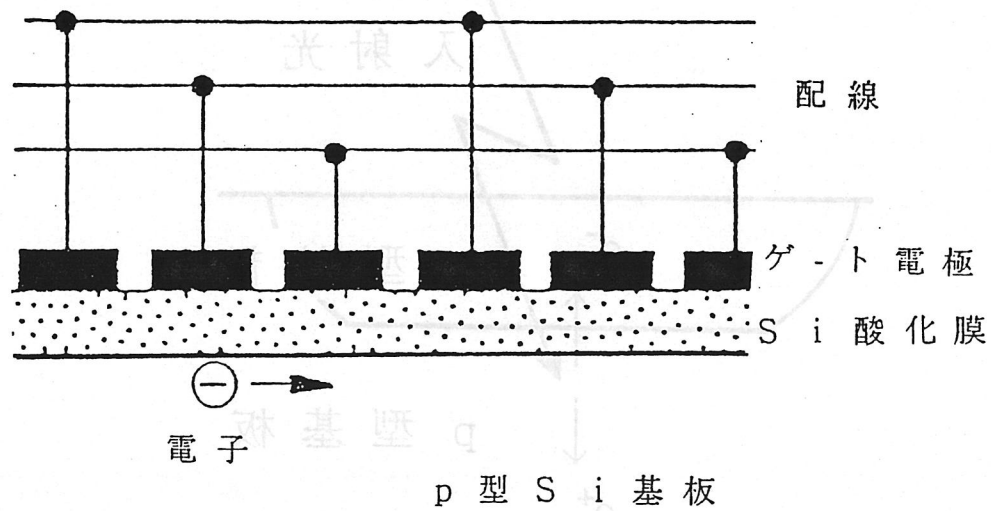


図11 C C D 転 送 路 の 断 面 構 造

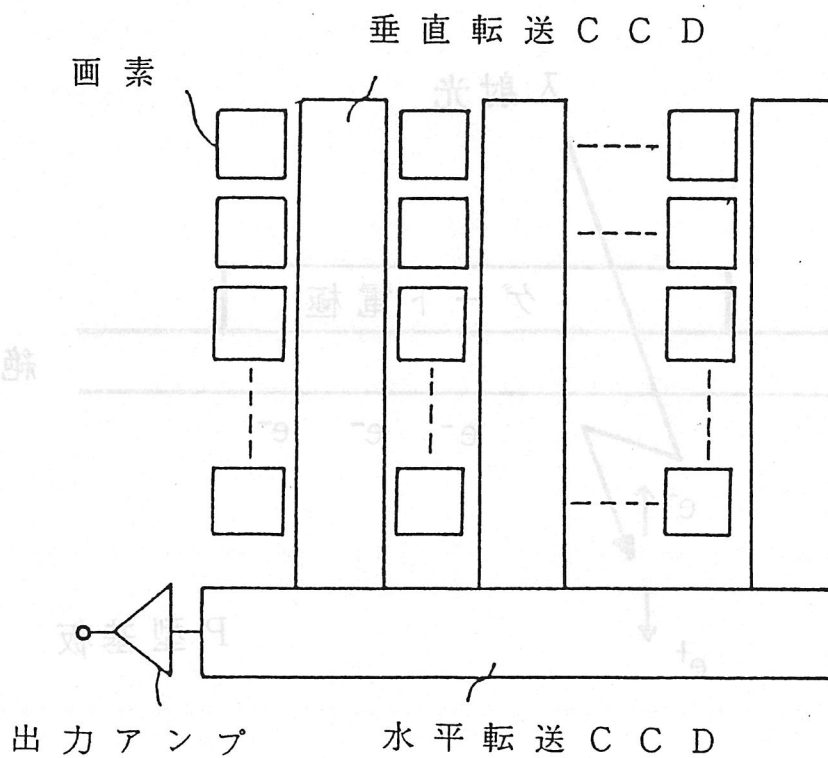


図12 イ ン タ ー ラ イ ン C C D の 平 面 構 造

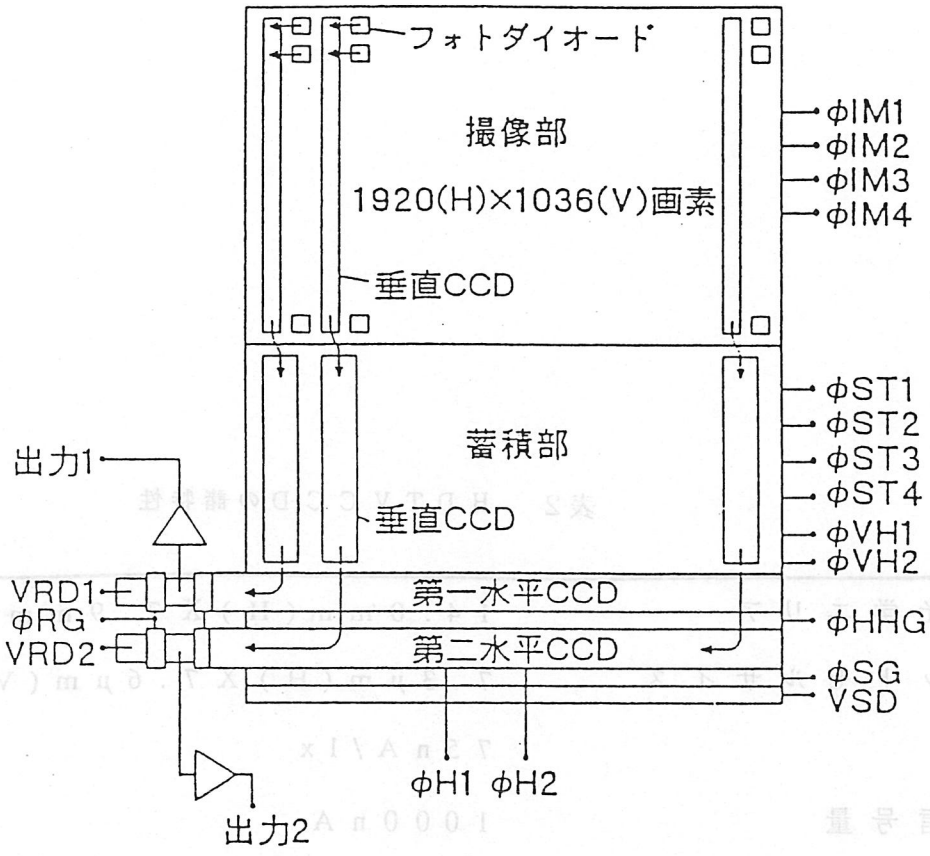


図13 HDTV CCDの素子平面構成

オンチップマイクロレンズ

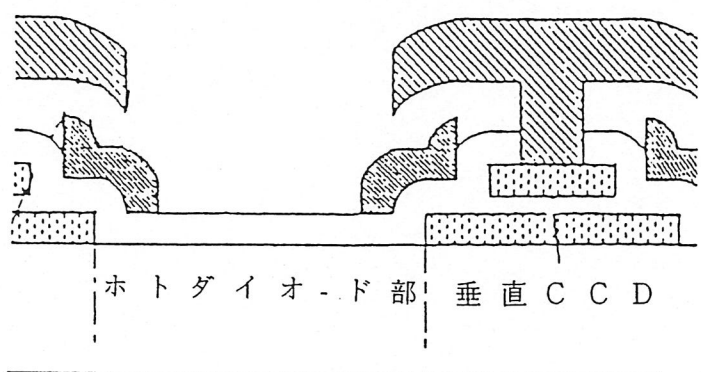
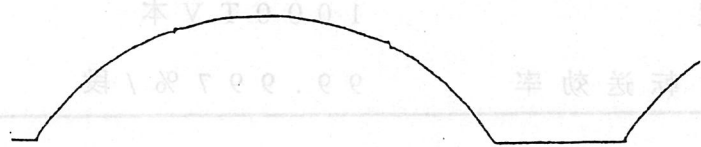


図14 画素部断面構造

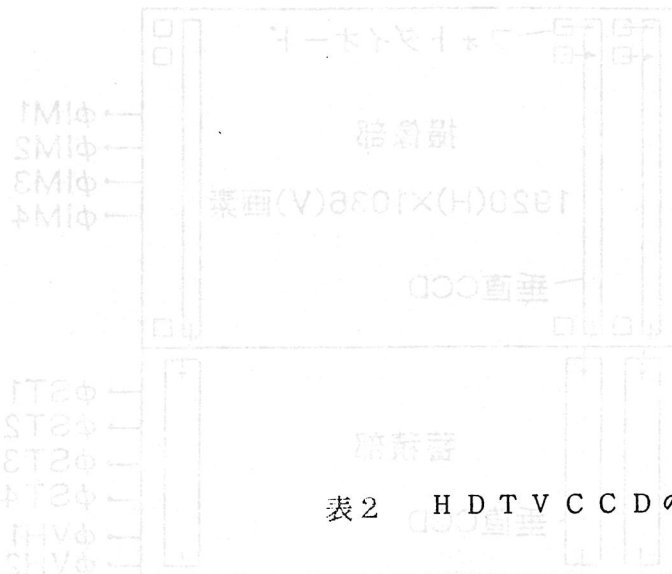
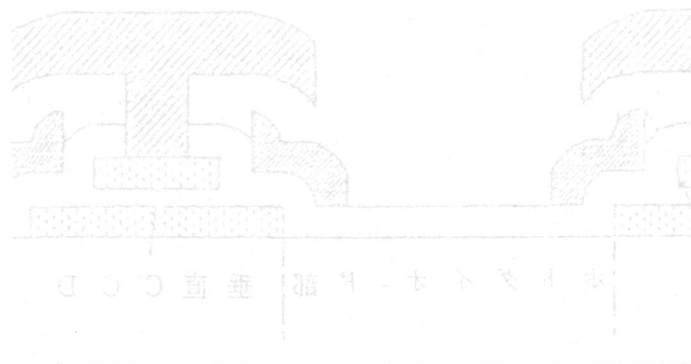


表2 HDTV CCDの諸特性

有効光学エリア	14.0 mm (H) X 7.9 mm (V)
ユニットセルサイズ	7.3 μm (H) X 7.6 μm (V)
感度	75 nA / lx
飽和信号量	1000 nA
ダイナミックレンジ	72 dB
スミヤ	-120 dB
水平解像度	100.0 TV本
水平CCD転送効率	99.997% / 段



垂直CCD転送効率

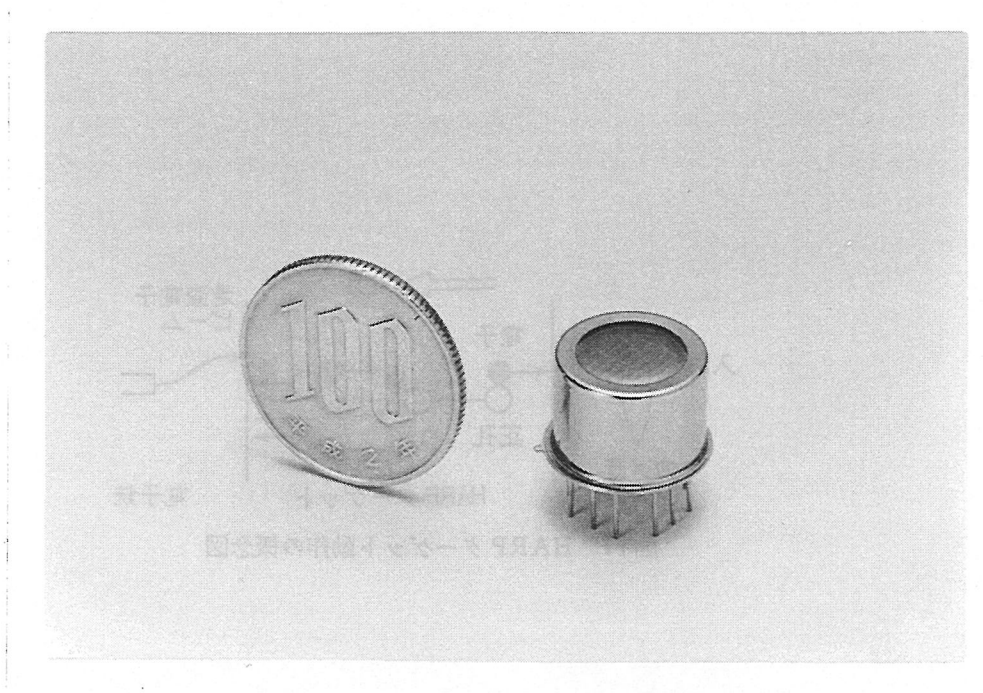


図15 超小型光電子増倍管の概観図

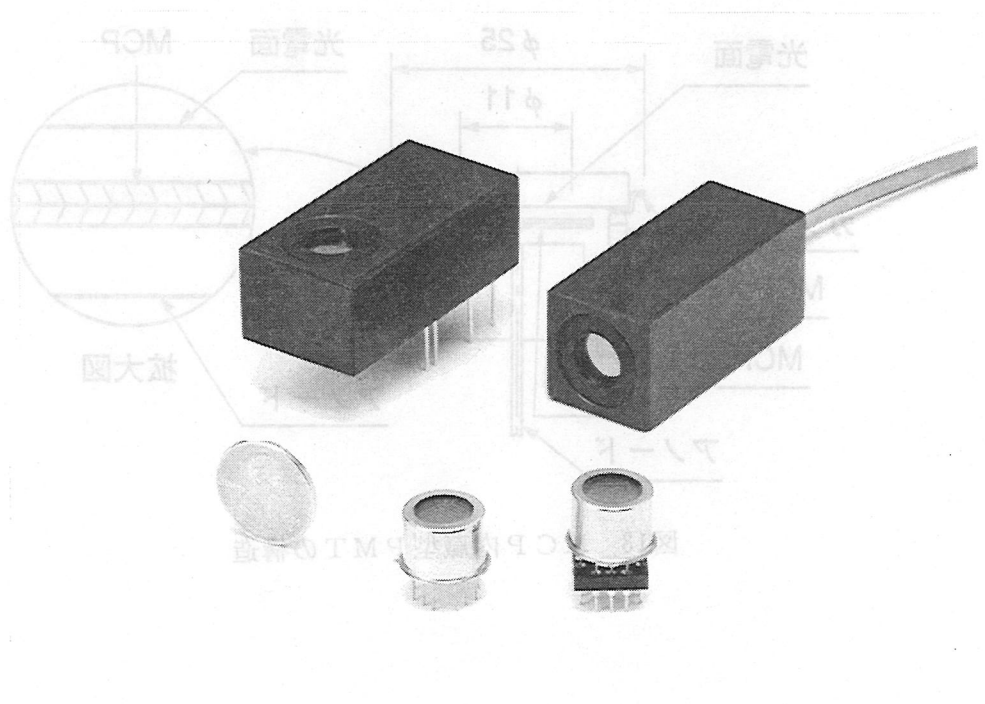


図16 高圧電源内蔵モジュール型の概観図

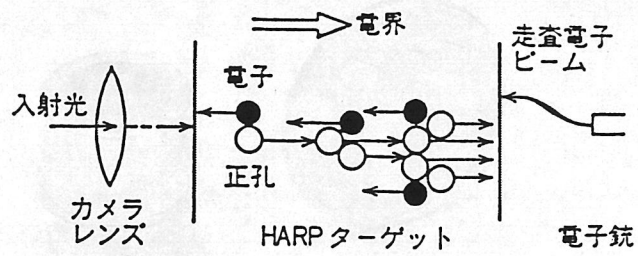


図17 HARP ターゲット動作の概念図

図17の電界は、電子銃の陰極とターゲットとの間に印加される。

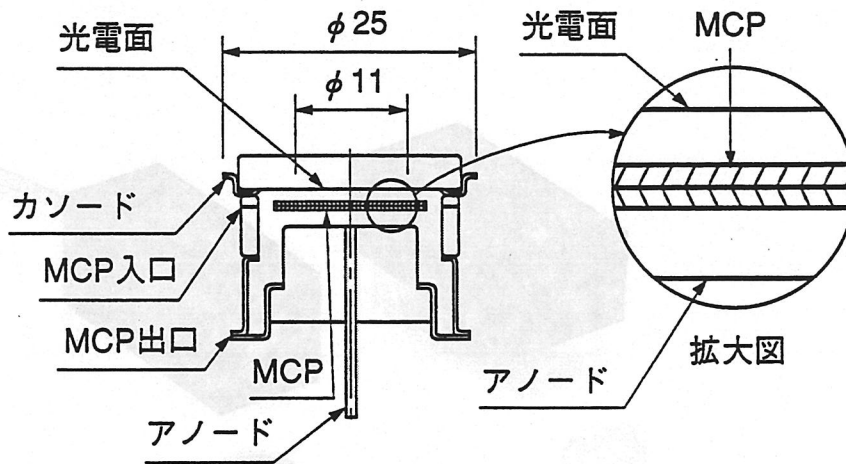


図18 MCP内蔵型PMTの構造

図18のMCPは、電子銃の陰極とターゲットとの間に印加される。

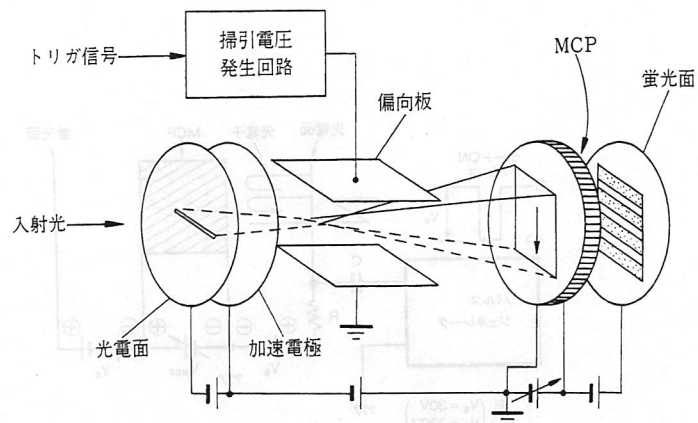


図19 ストリーク管の動作原理

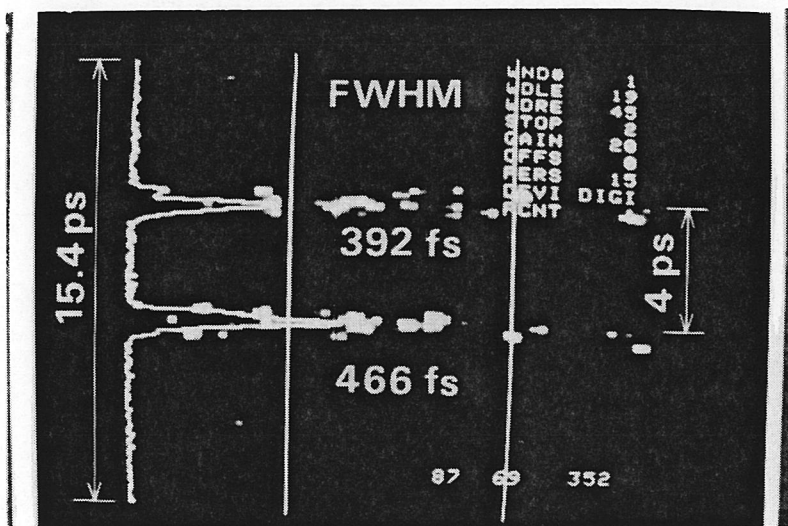


図20 フェムト秒ストリーク像によるダブルパルスのストリーク像とその強度分布測定例

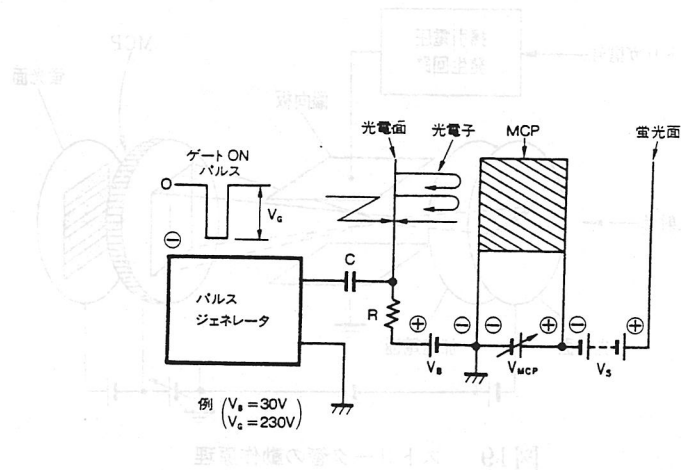


図21 シャッター駆動方法

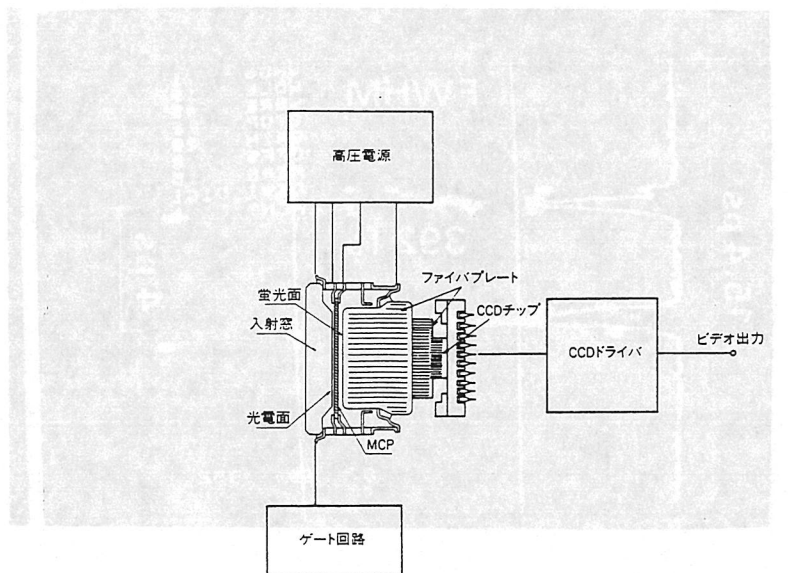


図22 ゲート付イメージインテンスファアを用いた高速シャッターカメラの構成図

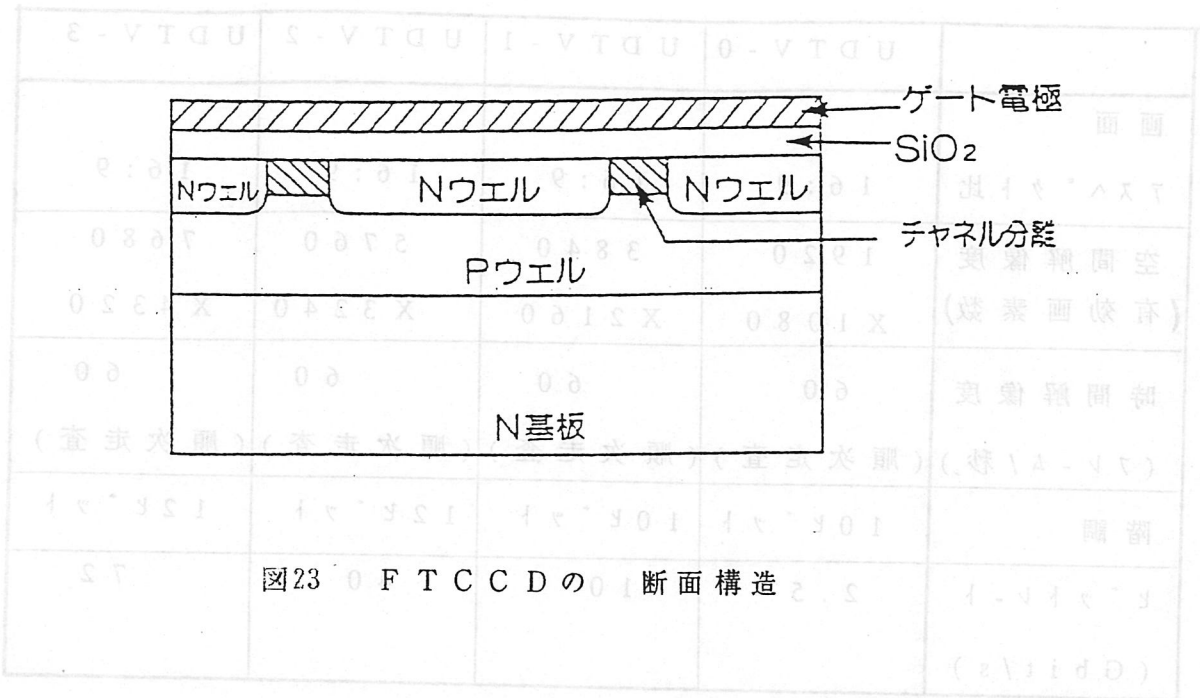


図23 FTCCDの断面構造

表3 FTCCDのデバイス及び試作カメラの仕様

転送方式	フレームトランスファ方式
光学サイズ	2.9(H)mm X 2.18(V)mm
有効画素数	508 X 492
セルサイズ	5.8(H)μm X 4.5(V)μm
チップサイズ	4.23(H)mm X 5.1(V)mm
パッケージ	20ピンクリアモールド
水平／垂直解像度	380/350TV本
最低被写体照度	5Lux(F2.0)

表4 UDTVのスタジオ規格

	UDTV-0	UDTV-1	UDTV-2	UDTV-3
画面				
アスペクト比	16:9	16:9	16:9	16:9
空間解像度 (有効画素数)	1920 X 1080	3840 X 2160	5760 X 3240	7680 X 4320
時間解像度 (フレーム/秒)	60 (順次走査)	60 (順次走査)	60 (順次走査)	60 (順次走査)
階調	10ビット	10ビット	12ビット	12ビット
ビットレート (Gbit/s)	2.5	10	40	72

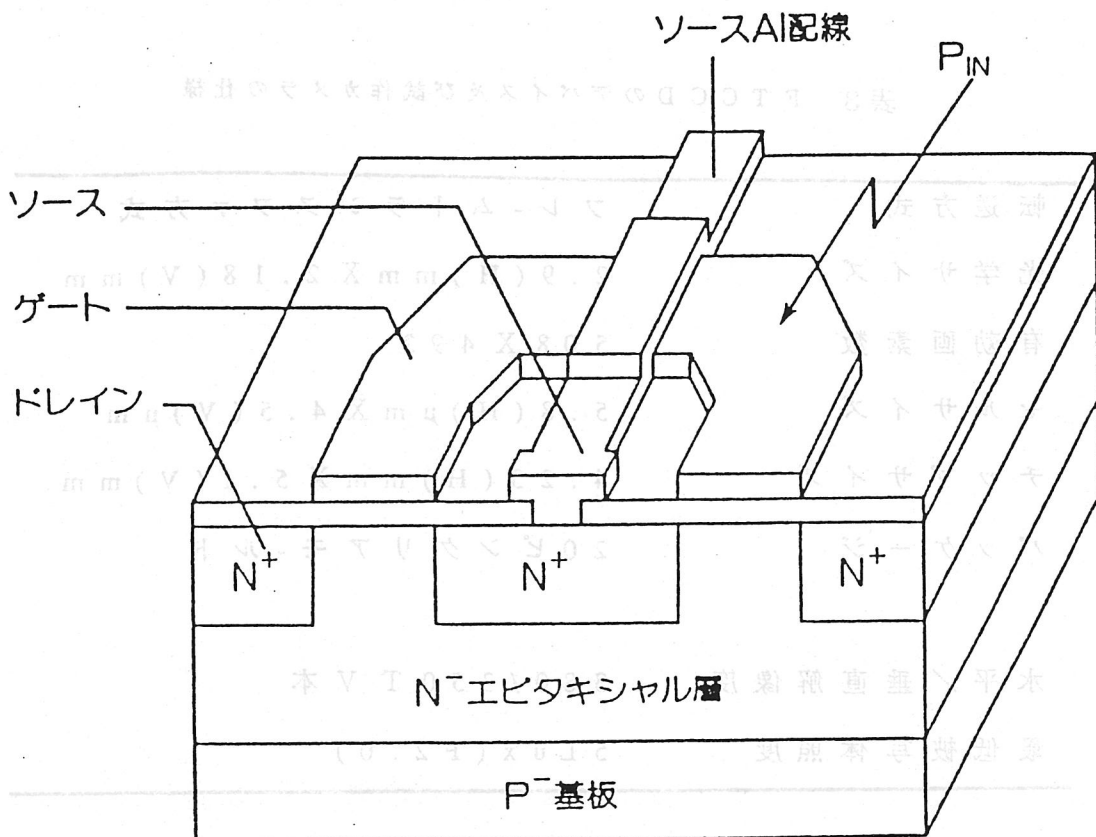


図24 C M D のデバイス構造

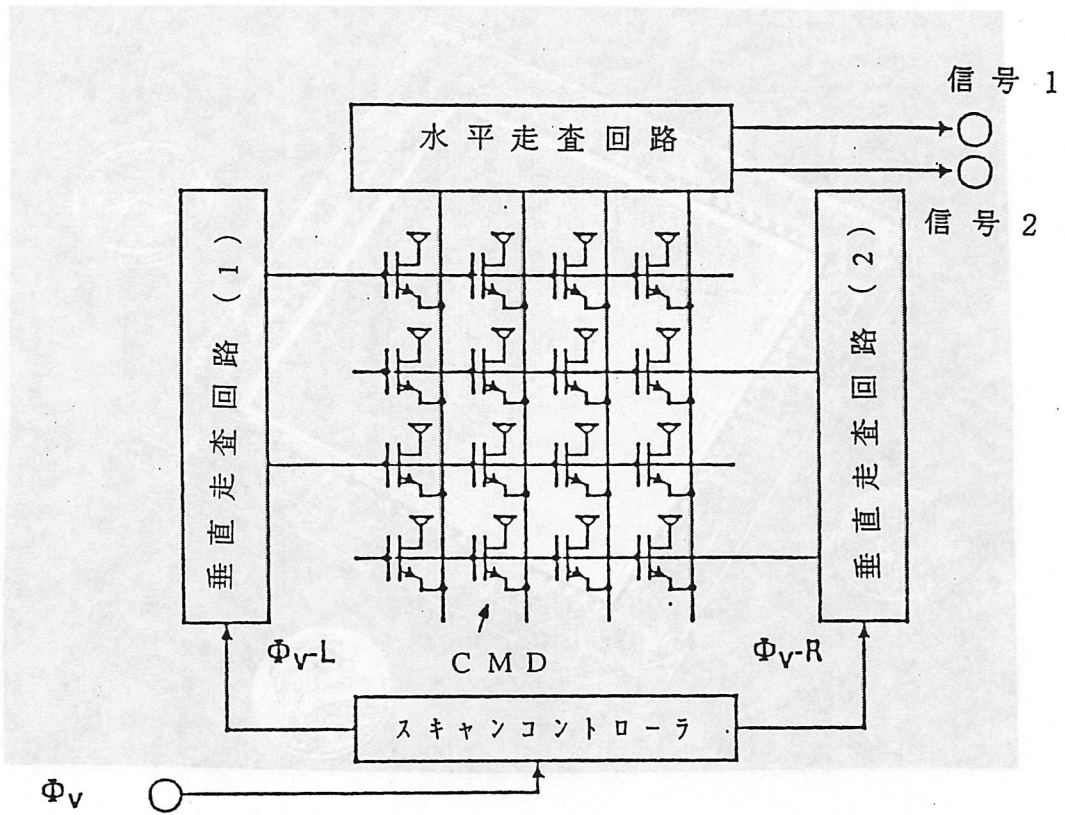


図25. CMDイメージセンサの平面構造

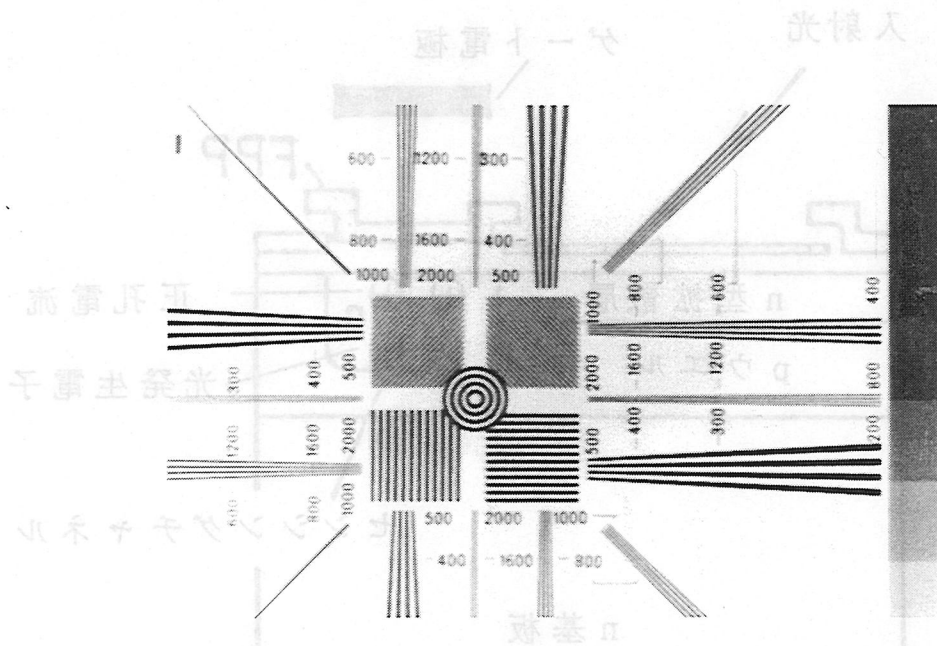


図26. ノンインターレス駆動時の撮像例

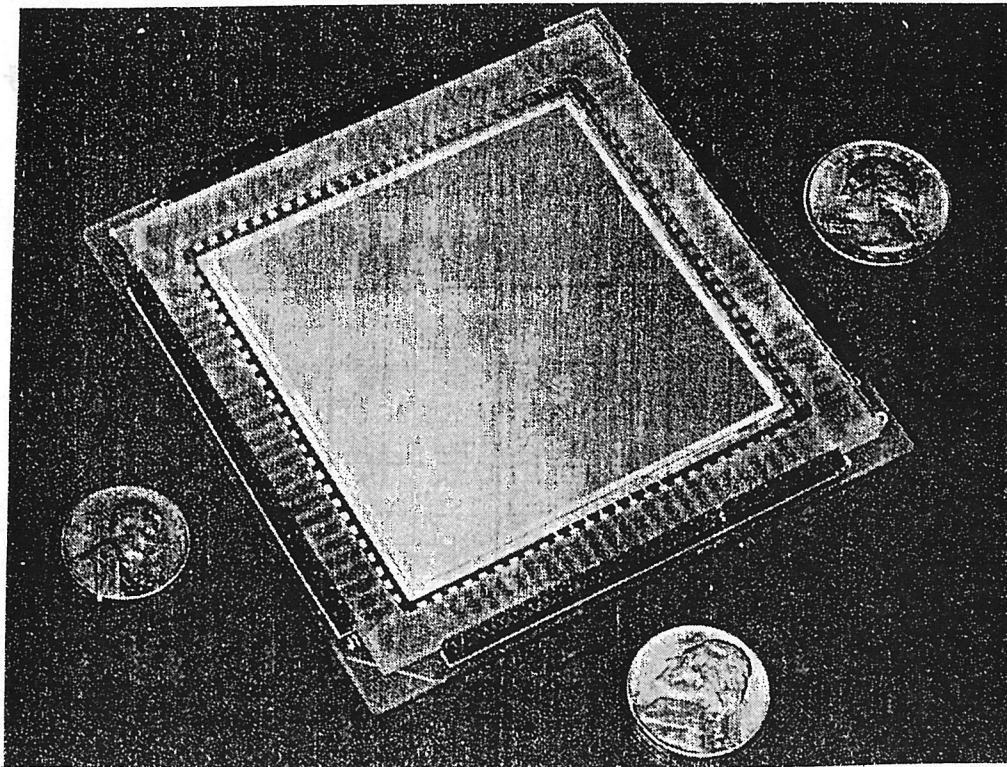


図27 チップ写真

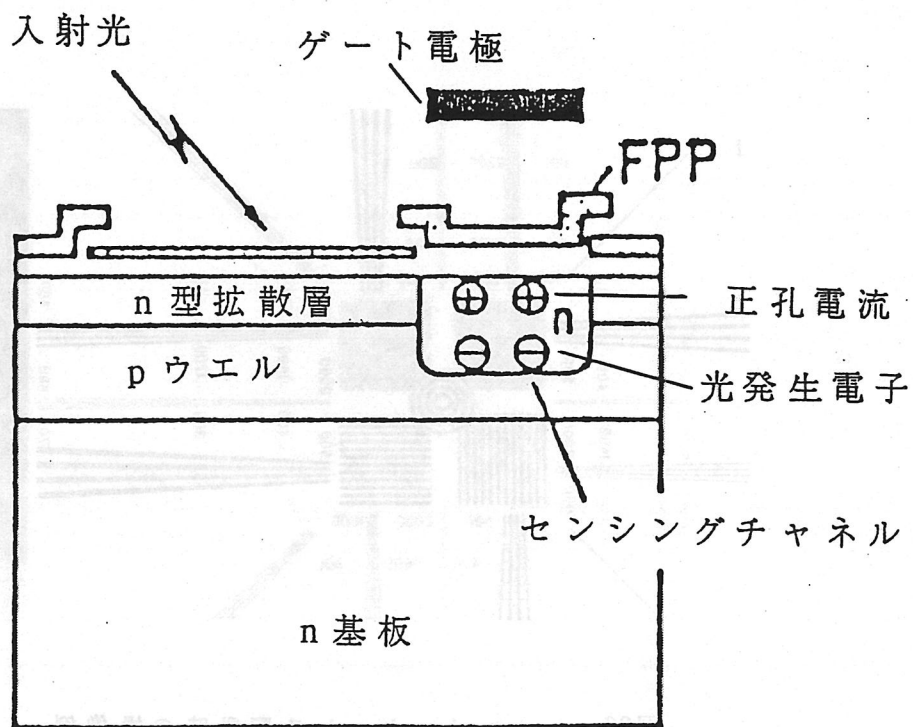


図28 画素部断面構造

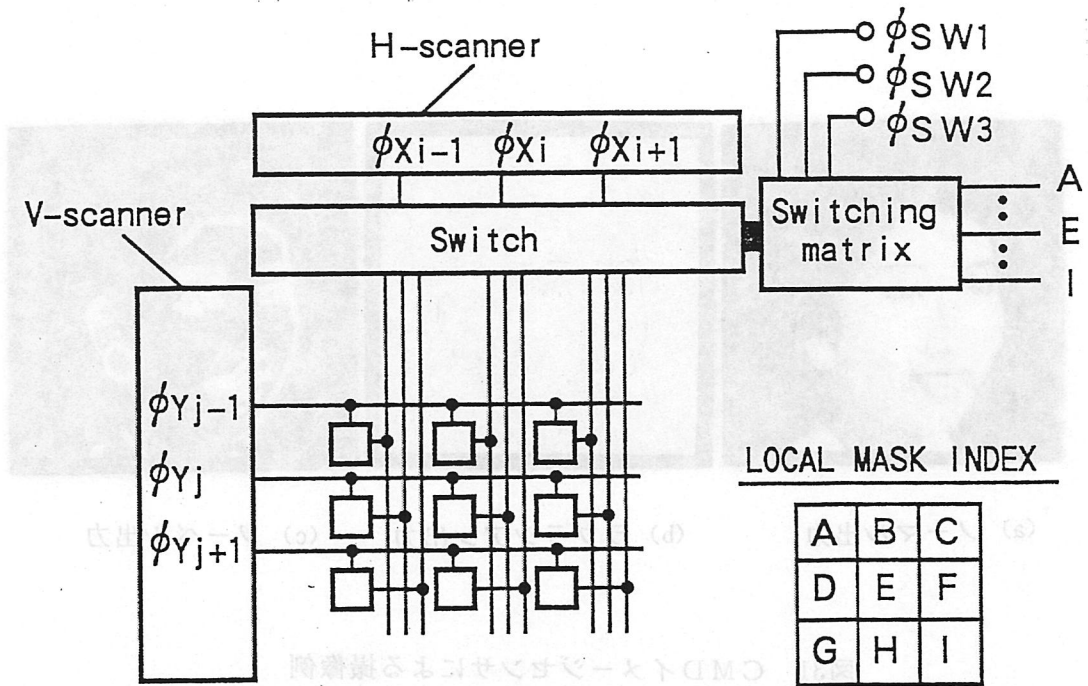


図29 多線出力CMDイメージセンサの回路構成

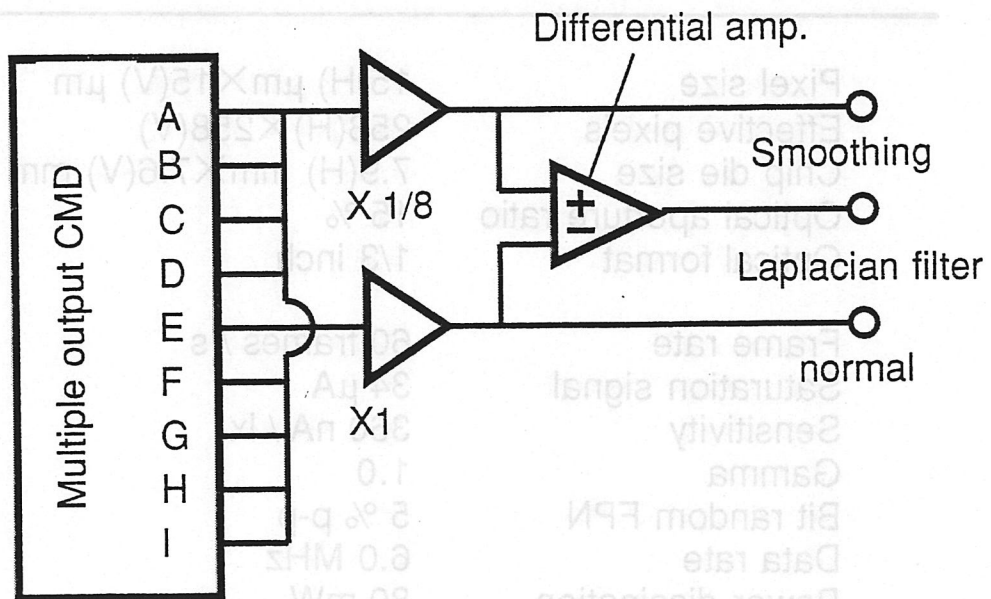
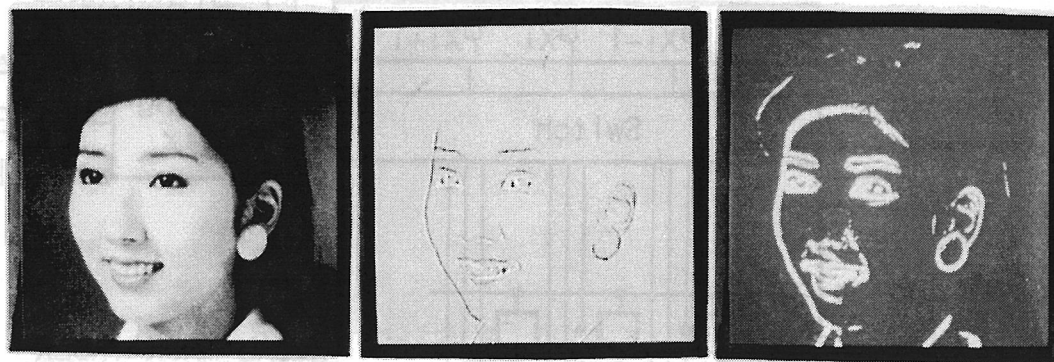


図30 アナログ処理回路



(a) ノーマル出力 (b) ラプラシアン出力 (c) ソーベル出力

図31 CMDイメージセンサによる撮像例

表5 CMDイメージセンサの諸特性

Pixel size	15(H) $\mu\text{m}$ $\times$ 15(V) $\mu\text{m}$
Effective pixels	258(H) $\times$ 258(V)
Chip die size	7.9(H) mm $\times$ 7.6(V) mm
Optical aperture ratio	15 %
Optical format	1/3 inch
Frame rate	60 frames / s
Saturation signal	34 $\mu\text{A}$
Sensitivity	360 nA / lx
Gamma	1.0
Bit random FPN	5 % p-p
Data rate	6.0 MHz
Power dissipation	80 mW

### 3. 赤外線センサ

近年、非接触温度測定、リモートセンシング、医療などの赤外線応用分野の活発な展開に伴い、赤外線センサの重要性が増大している。本章では、種々の赤外線センサの動作原理、種類と特徴、その応用及び周辺技術、さらに超電導センサを中心とした技術動向について述べる。

#### 3. 1 赤外線センサの基本原理

赤外線（赤外放射）はおよそ $0.75\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ の電磁波であり、すべての物質から放射されていると同時に、可視光より放射エネルギーが小さい。そこで、様々な原理や材料を用いて、目的に応じた波長の赤外線を検知しようとする試みがなされているが、動作原理から、赤外線センサは、大別して量子型と熱型に分類される。可視センサでも広く用いられる量子型は、感度が高く、応答速度も速いが、測定波長領域の制限があり、低温冷却を必要とする。一方、熱型は、感度が低く応答速度も遅いが、広い波長領域にわたって感度の波長依存性が無く、室温動作が可能で、しかも安価であるという特長を持っている。表3.1に主な赤外線センサの分類を示す。

熱型は、赤外線を熱に変換し、素子温度の上昇に伴う電気的性質の変化を検知するものである。動作原理から、強誘電体の焦電効果を用いた焦電型、抵抗の温度変化を利用したボロメータ、熱起電力（ゼーベック効果）を用いた熱電対やサーモパイル、気体の熱膨張変化を利用したニューマチック検出器（ゴーレイセル）などに分類される。焦電型は、強誘電体の自発分極が温度依存性を示し、素子温度が変化すると自発分極の変化した分の電荷が素子表面に誘起される現象（焦電効果）を用いており、熱型のなかでは最も高感度であり、近年、量産化され低価格になり、人体検知、非接触温度測定などに広く利用され、ポイントセンサなどの0次元センサだけでなく、走査型リニアアレーセンサなどの一次元センサや焦電型CCDのような2次元イメージセンサの研究開発も活発である。

量子型は、内部光電効果型、外部光電効果型、ならびにフォトンドラッグ効果型に分類される。内部光電効果型は、入射したフォトンエネルギーにより、半導体内部に過剰な電子や正孔を発生させ、その動きを用いるもので、光導電型（Photoconductive型）と光起電力型（Photovoltaic型）に更に分かれる。光導電型は、内部光電効果により発生した電子と正孔により導電率が増大することを利用し、価電子帯から伝導帯への電子励起による電子と正孔の発生を用いた真性型と、半導体に適当な不純物をドーブして価電子帯と伝導帯のいずれかと、禁制帯中の不純物準位との間の電子励起を用いた外因性型がある。前者のセンサ材料としては、主として挟禁制帯幅半導体、 $\text{PbS}$ 、 $\text{PbSe}$ 、 $\text{HgCdTe}$ などが、後者のセンサ材料としては、 $\text{Ge}$ 単結晶に $\text{Au}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Hg}$ などをドーブしたものが用いられる。キャリア寿命が長く移動度が大きいほど導電率の変化は大きく、感度が高くなる。一方、光起電力型は、半導体のpn接合などに赤外線を入射

させた場合に発生する起電力を利用している。半導体の界面や表面には、接する物質との電子親和力やフェルミ準位の相違によって、強い内部電場が形成され、逆バイアスを接合に加えるとさらに強くなる。赤外線入射により励起された電子と正孔は、強い電場によって互いに反対方向にドリフトして電荷の分極を誘起し、起電力が生じる。赤外領域では、バンド幅が小さいため、pn接合以外にショットキー接合やヘテロ接合も用いられる。センサ材料としてはInSb、InAs、HgCdTe、PbSnTe、PtSiなどがある。内部光電効果を用いた量子型赤外線センサは最も高感度であるが、エネルギー幅が小さいため熱エネルギーによるキャリア励起が加わるため、検出素子を冷却する必要がある。

外部光電効果型は、赤外線入射により価電子帯から伝導帯に励起された電子が真空中へ放出される現象、即ち光電子放出効果を利用している。禁制帯幅よりも大きいエネルギーが必要のため短波長の光しか検知できず、Csなどを表面につけ長波長化が試みられているが、真空管構造で冷却が困難なこともあり、実際は約1 $\mu$ m程度の赤外線測定にしか用いられない。光電管(Ag-Cs)、光電子増倍管(Cs系)が代表的なものである。

その他、フォトンのもつ運動量によりGeなどの半導体中のキャリアが引きずられて起電力が誘起される現象、フォトンドラッグ効果を用いたものも、量子型では例外的に室温動作が可能のため、超高速応答センサとして期待されている。

近年では、0次元のポイントセンサから、多素子リニアセンサや素子に信号処理機能を持たせたSPRITE (Signal Processing In The Element) 型などの1次元センサ、CCDと組み合わせた二次元イメージセンサの研究開発が活発である。

赤外線センサの性能は様々な性能評価指数で表わされるが、代表的なものとしては、感度R (Responsivity)、比検出能D\* (D star) ならびに雑音等価パワーNEP (Noise Equivalent Power) などが挙げられる。

感度Rは入力エネルギー(P) 単位あたりの出力信号電圧(Vs) であり、次式で表わされ、大きいほど性能が良好である。

$$R = V_s / P \quad [V/W]$$

雑音等価パワーNEPは、雑音信号電圧(Vn) に対してセンサが同じ強度の出力信号電圧を出すのに必要な赤外線パワーのことである。言い換えれば、センサが検出可能な最小赤外線入射パワーのことであり次式で表わされる。

$$NEP = P / (V_s / V_n) = V_n / R \quad [W]$$

NEPが小さいほどセンサ性能が優れているが、感度Rの大きさと逆の関係にあり、分かりづらい。そこで、NEPの逆数を取り、また、素子面積や測定周波数帯域の相違を規格化した比検出能D\*がNEPよりもよく用いられ、次式で表わされる。

$$D^* = (A \cdot \Delta f)^{1/2} / NEP = (A \cdot \Delta f)^{1/2} R / V_n \quad [cm \cdot Hz^{1/2} W^{-1}]$$

ここで、Aはセンサの素子面積[cm<sup>2</sup>]、 $\Delta f$ は測定周波数帯域幅[Hz]である。

### 3. 2 赤外線センサの種類と特徴

#### 3. 2. 1 熱型赤外線センサ

本節では、赤外線入射によるセンサ素子の温度上昇に伴う電気的特性の変化を用いた熱型赤外線センサについて概説する。

##### (1) 焦電型赤外線センサ

赤外線吸収による温度変化を利用する熱型は、量子型に比較して、感度は低く応答速度も遅い。しかし、紫外光から遠赤外光まで広い波長領域に亘って感度の波長依存性がなく、室温動作が可能で、しかも安価であるという特長を持っている<sup>1)~4)</sup>。強誘電体の焦電効果を利用する焦電型赤外線センサは、熱型のなかでも、感度、応答速度に優れており、侵入者警報機、自動ドアなどの人体検知、火災報知器、非接触温度測定、環境（工場排水等）モニタ、リモートセンシング、医療などへの利用のため、活発な研究開発がおこなわれている。

ここでは、最も広く用いられているPbTiO<sub>3</sub>系焦電型赤外線センサについての筆者らの研究<sup>1)5)~9)</sup>、薄膜化によるセンサ特性の向上<sup>2)~4)10)11)</sup>や、赤外線イメージセンサへの展開<sup>12)13)</sup>について述べる

結晶の対称性により、すべての結晶は32の点群に分類される。この中で、10群は、結晶格子中、定まった極軸を持ち、極軸結晶または焦電結晶と呼ばれ、すべての双極子が平行に配列した自発分極を持っている。焦電体の温度が定常状態にある場合には、自発分極による結晶表面の電荷は空気中の浮遊電荷の吸引あるいは表面や内部の電気伝導により中和されている。赤外線などにより焦電体の温度を変化させると、自発分極には温度依存性があるため、その大きさが急激に変化する。しかし、表面電荷はそれほど早く追従できないので、表面では自発分極の変化した分の電荷が誘起される。この現象が焦電効果である。この際、焦電体に外部回路が接続されていれば、これに電流が流れ、赤外光が検出される。これが焦電型赤外線センサの原理である。

自発分極 $P_s$ の温度 $T$ による変化率を焦電係数 $p$ と呼び、次式で定義される。

$$p = dP_s / dT \cdots \cdots (1)$$

$p$ が大きいほど赤外線による温度変化の電気変換効率が高い。しかし、一定光強度の赤外線を連続的に焦電体に照射した場合、焦電体の温度は初期には上昇するが、時間とともにある一定値に飽和してしまう。焦電電流は、分極電荷の変化、つまり、温度変化に比例するため、時間経過とともに減少し、ついにはゼロになる。このため、焦電型赤外線センサを用いる際には、入射光をチョッピングして断続的な光とし、交流応答により赤外線を検出する場合が多い。

周波数 $f$  ( $=\omega/2\pi$ ) でチョッピングした赤外線を焦電体に照射した場合、温度変化の周波数成分 $\Delta T$ は次式で表される。

$$\Delta T = \eta I_w (G^2 + \omega^2 H^2)^{-1/2} \dots (2)$$

ただし、 $\eta$ は輻射率、 $I_w$ は赤外線強度の $\omega$ の角周波数成分、 $G$ は熱放散、 $H$ は熱容量を表す。(2)式より感度つまり温度変化を大きくするためには、輻射率を大きくし、熱容量及び熱損失を小さくすればよい。そのためには、赤外線をよく吸収する電極を使用したり、厚さを薄くしたり、検知部を空中に浮かせたりすることが有効となる。

焦電電圧 $V_p$ は $\Delta T$ に焦電係数 $P$ 、面積 $A$ と外部 $CR$ 回路のインピーダンスをかけたもので次式で表される。

$$V_p = (\eta \omega P A R I_w) / \{G (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2} (1 + \omega^2 \tau_E^2)^{1/2}\} \quad (3)$$

ただし、 $\tau_T$ 、 $\tau_E$ は焦電素子の熱時定数および電気時定数である。赤外線センサの電圧感度 $R_V$ は出力電圧と入射光強度との比で表され、外部回路の入力抵抗 $R$ が大きい場合、 $\tau_E \gg 1$ となり、焦電体の物性定数と次式のような関係がある。

$$R_V = \eta P / (C \epsilon A \omega) \propto P / (C \epsilon) \dots (4)$$

また、入力抵抗 $R$ が小さい場合には $\tau_E \ll 1$ となり電流モードで検出され、その電流感度 $R_i$ は次式で表される。

$$R_i = \eta P / (C d) \propto P / C \dots (5)$$

ただし、 $C$ は体積比熱、 $\epsilon$ は比誘電率である。

(4)式及び(5)式の右辺は材料固有の物性できまり、電圧検出及び電流検出に対応した材料評価指数として、それぞれ、 $F_V$ 、及び $F_i$ として定義されている。赤外線センサの性能評価指数としては、 $R_V$ の他に、検出能 $D^*$ がある。 $D^*$ は雑音電力と同じ出力を与える入射光強度の逆数と $A^{1/2}$ の積であり、大きいほど良い。雑音まで考慮した材料評価指数 $F_D$ として次式で定義されるものも用いられる。 $F_D = p / C (\epsilon \tan \delta) \dots (6)$

これらの評価指数から、焦電材料としては焦電係数 $p$ が大きく、体積比熱 $C$ 及び $\tan \delta$ が小さいことが望ましい。 $\epsilon$ は、外部電気回路の静電容量を考慮すると100~400程度が適している。また、 $\tan \delta$ に関しても、実際には外部負荷抵抗に起因する熱雑音の方が、焦電体の熱雑音よりも大きい場合が多い。表3-2に代表的な焦電材料の諸物性定数及び材料評価指数を示す<sup>5)</sup>。 $F_V$ は $TGS$ 、 $LiTaO_3$ 、 $PbTiO_3$ が大きく、キュリー温度は $LiTaO_3$ 、 $PbTiO_3$ 、 $PZT$ が高い。通常、焦電型赤外線センサは電圧モードで使用されること、 $TGS$ はキュリー温度が低いうえに潮解性があることから、 $LiTaO_3$ 単結晶や $PbTiO_3$ などのセラミックスが焦電材料としてよく用いられている。

本報告では最も広く用いられている $PbTiO_3$ 系焦電型赤外線センサ<sup>1)5)~9)</sup>について概説する。

$PbTiO_3$ 系セラミックスは大きな焦電係数、低い誘電率を持つと同時に、安価で、単結晶に比較して取扱いも容易なため、優れた焦電材料として期待されている。 $PbTiO_3$ セラミックスの $Pb$ の一部を、結晶格子の $c$ 軸と $a$ 軸の比 $c/a$ の減少により焼結しやすくなると同時に、イオン半径の大きな差から焦電特性を向上させると考えられる $Ca$ で置換、その焦電特性及び試作赤外線センサのセ

ンサ特性が検討されている<sup>1)5)8)</sup>。図3-1に  $(Pb_{1-x}, Ca_x) [(Co_{1/2}W_{1/2})_{0.04}Ti_{0.96}]O_3$  における焦電係数  $p$ 、比誘電率  $\epsilon$ 、ならびに材料評価指数  $F_v$  と  $Ca$  量との関係を示す。なお、焼成温度の低下、粒径成長を抑制するため、 $Pb (Co_{1/2}W_{1/2})O_3$  が、4 mol% ほど固溶されている。 $Ca$  の導入とともに焦電係数  $p$  は増大し、 $Ca$  を含まない場合の  $1.8 \times 10^{-8} C cm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$  に対して、 $Ca$  量 0.28 mol では  $4.43 \times 10^{-8} C cm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$  に達し、2倍以上の向上が得られている。しかも、この値は後述する  $c$  軸配向した  $PbTiO_3$  薄膜の値  $2.5 \times 10^{-8} \sim 3.0 \times 10^{-8} C cm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ <sup>4,10)</sup> をも上回っている。また、比誘電率は、ほぼ一定の値 190~220 と低い値を保っている。材料評価指数  $F_v$  も、 $Ca$  量 0.24~0.28 mol で  $0.61 \times 10^{-10} C cm J^{-1}$  に達し、 $PbTiO_3$  セラミックスの値  $0.3 \times 10^{-10} C cm J^{-1}$  に比較し2倍の向上が得られている。

焦電特性の向上を明らかにするため、自発分極の大きさが Sawyer-Tower 法により測定されている。図3-2に  $(Pb_{1-x}, Ca_x) [(Co_{1/2}W_{1/2})_{0.04}Ti_{0.96}]O_3$  における自発分極  $P_s$  と  $Ca$  濃度との関係を示す。 $Ca$  濃度の増大とともに自発分極は急激に増大し、 $Ca$  濃度 30 mol% 付近で最大になり、 $42 \mu C / cm^2$  の値が得られた。この値は、単結晶  $PbTiO_3$  の自発分極  $80 \mu C / cm^2$  の約半分であり、 $c$  軸配向スパッタリング  $PbTiO_3$  薄膜の自発分極  $33 \mu C / cm^2$  を上回っている。 $Pb$  の一部を  $Ca$  で置換した  $PbTiO_3$  系セラミックスの焦電特性の向上は、自発分極の増大によるものである。 $Ca^{+2}$  イオン (イオン半径:  $1.03 \text{ \AA}$ ) はペロブスカイト構造の  $A^{+2}B^{+4}O_3$  形化合物の  $A$  サイトに入る最小のイオンである。イオン半径が  $1.24 \text{ \AA}$  と大きい  $Pb$  の一部を  $Ca$  で置換すると、イオン半径の差により格子の変形が生じ、自発分極が増大すると考えられる。

図3-3に試作した赤外線センサの負荷抵抗を変化させた場合の電圧感度の周波数依存性を示す。この焦電体は  $1 \times 10^{11} \Omega$  の固有抵抗を持ち、負荷抵抗を省略することができた。また、1 Hz 以下の低周波数領域で高感度が得られ、0.1 Hz で  $2040 V / W$  に達した。人体が移動するときの赤外線センサの変化は 1 Hz 以下なので、このセンサは人体検知センサとして期待できる。

焦電型赤外線センサは、赤外線による温度変化を利用しているため、素子自体の熱容量を小さくすることで、その性能を向上させることが出来る。そのため、焦電材料の薄膜化、特に、優れた焦電特性を持つ  $PbTiO_3$  系の薄膜化によるセンサ特性向上の研究が活発である<sup>3)4)10)11)</sup>。

薄膜化の方法としては、ゾルゲル法、CVD法なども用いられているが、作製された薄膜の結晶学的、電気的性質が良好で、装置入手の容易なスパッタリング法が最もよく用いられている。 $PbTiO_3$  系のスパッタリング法による薄膜化においては、焦電性を示すペロブスカイト構造を得るために約  $500 \sim 600 \text{ } ^\circ C$  以上の高い基板温度を必要とし、 $Pb$  の蒸気圧が高いこともあり、組成制御が難しい。そこで、粉末あるいは焼結ターゲットを用いる場合には  $PbO$  を 10% 程度

過剰に加えている<sup>3)4)10)</sup>。成長基板としては、白金板、白金薄膜、Si、MgO等がよく用いられる。図3-4に、熱伝導性及び熱容量が小さい薄いマイカ板(～20μm)上に、下地基板となる白金をスパッタリングで成膜し、その上にRFスパッタリング法でPbTiO<sub>3</sub>薄膜を成長させた薄膜型焦電センサの構造を示す<sup>3)</sup>。～2μm厚のPbTiO<sub>3</sub>薄膜を～500℃で成長させ、さらにAlと金黒を赤外吸収電極として形成し、この両端を支持して空中に浮かせている。図3-5にPbTiO<sub>3</sub>薄膜型焦電センサの焦電電圧の周波数依存性を示す<sup>2)</sup>。入力抵抗及び周波数が大きい場合、出力電圧は周波数に逆比例し、入力抵抗及び周波数が小さい場合には、ほぼ出力電圧が一定になるという焦電効果特有の特性を示している。これより求めた電圧感度は15Hzで465V/WとPbTiO<sub>3</sub>セラミック(バルク)に匹敵する値となっている。

最近、(100)MgO単結晶基板上、あるいはその上に(100)配向Pt膜を形成、さらに、RFマグネトロンスパッタリング法によりPb<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>Ti<sub>1-x/4</sub>O<sub>3</sub>(x=0.05～0.15)を形成させた赤外線センサが試作された。<sup>10)</sup>図3-6にその構造を示す。熱容量低減のため、焦電薄膜直下のMgO基板を、エッチングにより除去してある。基板温度550～650℃、過剰ターゲットPbO濃度20mol%で、c軸配向率0.6～0.9の値が得られる。焦電係数pは $5.3 \times 10^{-8} \text{C cm}^{-2} \text{C}^{-1}$ 、材料評価指数Fvは $0.83 \times 10^{-10} \text{C cm J}^{-1}$ 、また、電圧感度Rvは2400V/Wと高い値を得ている。

信号処理などの容易化のため、SiMOSFETのゲート上にPbTiO<sub>3</sub>スパッタリング薄膜を成長させたSiモノリシック赤外線センサ、即ち、IROPFET(Infrared Optical FET)が試作された。図3-7にIROPFETの構造を示す<sup>3)</sup>。赤外線照射によるPbTiO<sub>3</sub>薄膜の電気分極の変化が、チャネル部のSi表面ポテンシャルを変化させ、ドレイン電流の変化により赤外線を検出する。試作した素子は分極処理をし、ゲート電極を基板と結線してDepletion形動作をさせる。図3-8に、IROPFETの電圧感度R<sub>v</sub>と検出能D\*の周波数依存性を示す<sup>3)</sup>。R<sub>v</sub>は焦電効果特有の周波数に逆比例する現象を示し、20Hzで390V/Wと小さい。FETで出力が増幅されているにもかかわらず、電圧感度があまり大きくなっていないのは、吸収された赤外光エネルギーが熱伝導でSiへ逃げることで、FETの入力の静電容量がPbTiO<sub>3</sub>と並列に入り焦電電圧が減少すること、スパッタリング膜形成時のFETゲートへのダメージなどが原因と考えられる。

そのほか、セラミックと同じく、PbTiO<sub>3</sub>のPbサイトをCaで置換した薄膜の作成も試みられている<sup>11)</sup>。MgO単結晶上のPt薄膜上に、RFマグネトロンスパッタリング法により、630℃の基板温度で最適ペロブスカイト構造が得られ、焦電係数が $6 \times 10^{-8} \text{C cm}^{-2} \text{C}^{-1}$ と高い値が得られている。

スパッタリング法やCVD法では高温加熱する必要があり、Siデバイスやインテリジェントセンサなどにデバイス化する際、不利となる。また、作製した膜の組成制御がむずかしい。そこで、最近、作製温度の低減、組成制御性の向上のため、レーザーアブレーション法を用いてPbTiO<sub>3</sub>薄膜を作製することも試み

ている<sup>12)</sup>。その結果、 $1 \times 10^{-3}$  torrの酸素雰囲気中では、スパッタリング法よりも低い400°Cの温度でPbTiO<sub>3</sub>薄膜が作製できることが判明し、今後、赤外線センサへの応用が期待される。

焦電型赤外線センサの発達とともに、赤外面像センシングのための走査型リニアアレーセンサや、2次元アレーセンサの研究が、近年、盛んに行なわれている<sup>13)14)</sup>。リニアアレーセンサとしては、上述したIR-OPFETを発展させ、図3-9に示すような16素子のものが試作された<sup>13)</sup>。16個のMOSFETスイッチアレーのあるSiウエハ上の厚さ20~50μmのマイカ板上に、厚さ約2μmのRFスパッタリングPbTiO<sub>3</sub>薄膜を形成し、ドレインとPbTiO<sub>3</sub>薄膜上の電極を結んだ構成である。検知部直下のSi基板の一部を裏側から異方性エッチングにより除去し、熱損失を減少させている。図3-10にこのリニアアレーセンサを用いたW形状のニクロムワイヤの熱イメージを示す。

2次元アレーセンサとしては、焦電体をSiMOSFETアレイと接合したものや、焦電体とSi-CCDを組み合わせたIR-CCDが注目されている<sup>13)14)</sup>。図3-11にSiMOSFETを用いた2次元赤外線イメージセンサの画素の構造を示す<sup>13)</sup>。素子数は64x64個、画素の大きさは50x50μm<sup>2</sup>、チップの大きさは8x8mm<sup>2</sup>である。ゲートダメージ、焦電効果の大きさ、入手の容易さを考慮して、焦電体はLiTaO<sub>3</sub>単結晶を用いている。5mmx5mmx80μmに切断したLiTaO<sub>3</sub>単結晶を、Inバンプを介してSiFETアレイと結合している。図3-12にSi-CCDを用いた2次元イメージセンサの画素の構造を示す<sup>14)</sup>。画素数は64x32個、画素の大きさは80x133μm<sup>2</sup>で、チップ全体で4x5mm<sup>2</sup>である。Si-CCD上にLiTaO<sub>3</sub>やPZT等の焦電体を、低融点で柔軟性があり、高い誘電率を持つグリセリンやビニリデンフルオライドトリフルオロエチレン共重合体 [P(VDF-TrFE)] により誘電的に結合している。そのため、焦電体に画素ごとの電極を形成する必要がない。LiTaO<sub>3</sub>やPZTの片面には赤外線を吸収するNiCr膜電極を形成してある。IR-CCDに赤外線像が結合すると、焦電体の温度が上昇し焦電電荷が生じる。この電荷が焦電ゲート下のSi表面ポテンシャルを変化させ、注入電極から蓄積ゲートへの注入電荷を変化させる。この蓄積電荷は転送ゲートを通り、CCD部で転送され出力となる。試作した素子の出力信号は、増幅され、A/D変換された後、マイクロコンピュータへ取り込まれた。図3-13にスポット光を照射した直後と遮断直後の一つの水平ラインの信号列を示す<sup>14)</sup>。スポット光照射直後と遮断直後の信号は極性が逆で、焦電効果特有の現象を示している。A/D変換し、マイクロコンピュータ内で信号処理した後、単純なスポット像をCRT上に映像化することができた。

多品種少量生産の多い各種のセンサのなかで、焦電形赤外線センサは、ポイントセンサとして、人体検知、エアコン等の家電製品などに応用され、近年、急激にその生産量が拡大した数少ない例である。しかし、二次元赤外イメージセンサ

としては、研究開発が始まったばかりであり、室温駆動という大きな利点があるのにも係わらず、焦電体薄膜の焦電特性の不足、CCDとの結合などのデバイス化に問題点を抱えている。今後、優れた焦電薄膜の開発とデバイス化技術の飛躍的な進展を期待したい。

### (2) サーモパイル

赤外線吸収による素子の温度上昇に基づく熱起電力を用いたセンサとしては、熱電対およびサーモパイルがある。熱電対は、銅・コンスタンタン、ビスマス・銀などの熱起電力の異なる2種の金属接合から形成されており、接合部は感度及び応答速度を高めるため、細線を用いて溶接する。機会的強度、信号出力、抵抗も小さい。そのため一般に増幅がしにくい。また、時定数も数m秒～数秒と遅いものが多い。

サーモパイルは熱電対を改良し、熱電対を幾つか直列に接続したものである。出力信号および抵抗が熱電対より大きく、増幅しやすくなっている。また、ビスマス・アンチモンの蒸着膜を用いた場合には接合部の熱容量を小さくでき、時定数が数m秒と短くなる。近年、小型化、高性能化のため、Si半導体作製プロセスを用いたサーモパイルの研究が活発になり、Siを支持構造材として用いたもの<sup>15)</sup><sup>16)</sup>や、マイクロマシニングも併用してSiを支持構造材のみならず、熱電対の一方の材料として用いたものも試作されている。<sup>17)</sup> 図3-14にSiマイクロマシニングで作製したカンチレバービーム上に、サーモパイルおよび赤外線吸収膜を形成させた赤外線センサの構造図を示す。<sup>17)</sup> また、図3-15にサーモパイル部の拡大図を示す。カンチレバービームの大きさは、4 x 8 mmで厚さは10 μmである。カンチレバー自体はヒートシンクの役割を果たす支持リムで囲まれている。カンチレバーの片側に赤外線吸収層を形成し、他方にp-Si/Alサーモパイルが形成されている。幅30 μm、長さ2 mm、深さ6 μmのp-Siストライプがnエピ層に44本、20 μmピッチで拡散形成され、それぞれ、10 μm幅のAlストライプと接合された構造になっている。ゼーベック係数は約0.7 mV/Kである。センサ特性としては、 $D^*$  (500 K, *in air*) で  $5 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 、真空中での感度  $R$  10 V/Wが得られており、今後、この技術を用いた他のタイプのサーモパイルの試作などに期待がもてる。

### (3) サーミスタボロメータ

ボロメータは、入射した赤外線による素子温度上昇で電気抵抗が変化する効果を用いたものである。Ptなどの金属薄膜も当初用いられたが、現在では、Mn、Ni、Co、Feなどの複合酸化物が用いられている。薄膜型、厚膜型などがあるが、通常 $D^*$ は $10^7 \sim 10^8 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ である。近年、マイクロマシニング技術を用いて240 x 336素子の室温動作2次元赤外線イメージ

ャーが試作された。18) 図 3-16 に用いられているマイクロボロメータの要素の構造、図 3-17 にその作製プロセスの概略図を示す。マイクロボロメータは  $50 \times 50 \mu\text{m}$ 、厚さ  $0.5 \mu\text{m}$  の SiN のプレートからなり、約  $100 \text{nm}$  の厚さの多結晶半導体サーミスタ薄膜が形成され、全体は Si ウェーハ上に SiN の脚 2 本で支持されている。抵抗の温度変化は約  $-2\%/^{\circ}\text{C}$  である。SiN の脚で熱分離されているため、プレートと周囲との熱抵抗は大きい。熱容量 C は  $1 \times 10^{-9} \text{J}/^{\circ}\text{C}$ 、熱コンダクタンス g は  $1 \times 10^{-7} \text{W}/^{\circ}\text{C}$ 、熱応答時間  $C/g$  は約  $10 \text{ms}$  と遅い。 $1 \times 10^{-10} \text{W}$  の赤外線入射パワーの変化に対して  $1 \text{mK}$  の温度上昇が得られる。この素子を用いて室温駆動の赤外線カメラ画試作され、近接した 2 点間での最小検出温度差 NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) として  $0.039^{\circ}\text{C}$  が得られている。

(中本 正幸)

### 3. 2. 2 量子型赤外線センサ

近年、赤外放射\*の有用性が広く認識されるようになってきた。これに伴って高性能な赤外線センサの開発が進展している。赤外放射は可視光よりも波長の長い電磁波であるので光量子 (フォトン) の持つエネルギーは可視光域の場合より小さく、その検知には技術的に多くの困難を伴う。赤外線域で用いられるセンサについて、材料・デバイス技術からは量子型赤外線センサと熱型赤外線センサの二つに大別できる。量子型赤外線センサは赤外線をフォトンとしてとらえ、光電効果を利用する。熱型センサに比べ応答速度が一般に速く、感度が 1~2 桁高いことから、最近の赤外線画像用センサに広く用いられている。量子型赤外線センサを動作原理で分けると代表的なものは、光導電型 (PC 型: Photo-Conductive) と光起電力型 (PV 型: Photo-Voltaic) である。PC 型はフォトンで励起されたフォトキャリアによって半導体の電気伝導度が増大することを利用する。これに対し PV 型は、フォトンによりフォトダイオードの p n 接合に生じる光起電力を利用する。一方、熱型センサはフォトンのエネルギーによる物性変化を利用するもので、サーモパイル、ボロメータ、焦電型などがあり、量子型とは異なり特別の冷却を必要とせず、波長感度特性がフラットであるなどの特長がある。

ここでは、量子型赤外線センサなかでも化合物半導体を用いた量子型赤外線センサの開発経緯を概観し、現在の開発の主流である、赤外画像用の赤外線電荷結合デバイス (IRCCD: Infra-Red Charge Coupled Devices) について開発動向を報告する。

---

\* IEC 国際電気標準用語、電気専門用語集、JIS 用語集では「赤外放射」であるが、同じ意味で通称「赤外線」が用いられるので本稿では以下使用する。

赤外放射を利用するシステム側から見ると、目標と背景の赤外放射波長特性および伝播路である大気の特徴を考慮する必要がある。物体はその温度が低いほど赤外放射のピークは長波長域にあり、人体・室温付近の物体は8-10 μm帯に、また室温以上の高温物体になると3-5 μm帯にその放射ピークがある。一方大気の透過特性として、3-5 μm帯と8-14 μm帯に「大気の窓」と呼ばれる透過率の高い波長域があり、この帯域を目的により使い分けて利用する。従って赤外線センサの開発もこの双方を念頭に開発を進められてきた。

量子型赤外線センサ用材料としてはHgCdTe、InSb、PbSnTe、PtSi-Si、Ge:Auなど不純物半導体、PbS、PbSe、多重量子井戸型GaAsなど多くの材料が開発されている。中でも、HgCdTeはHgTeとCdTeの混晶比を変えることによって、検知できる限界波長（カットオフ波長： $\lambda_c$ ）を変えることができ、またキャリア濃度が制御し易いなど特長があり実用化が進展している。ここではHgCdTe、InSbを用いた光導電型と光起電力型センサについて述べる。主要な赤外線センサの波長感度特性を図18に示す。

#### (1) 光導電型赤外線センサ

リアルタイムな赤外画像を得るために用いられる量子型センサの多くはHgCdTe光導電型（PC型）センサである。厚さ10 μm程度のHgCdTe結晶の両端にバイアス電流を加え、赤外線で励起された電子・正孔対による電気伝導度の変化を素子端間の電圧変化として取り出す。信号はコンデンサを通して交流電気信号として取り出される。

赤外線センサの特性は、単位入力パワー当たりの信号の大きさを表すレスポンスィビティや、規格化された信号／雑音比を表す比検出能で表現される。それぞれを式で示すと次のようである。

$$\text{レスポンスィビティ } R_\lambda = V_s / (P_\lambda \cdot A_D)$$

$$\text{比検出能 } D^* \lambda = (V_s / V_n) \cdot \sqrt{\Delta f} / (P_\lambda \cdot \sqrt{A_D})$$

$V_s$  : 信号電圧

$V_n$  : 雑音電圧

$P_\lambda$  : 波長 $\lambda$ の入射光のパワー密度

$A_D$  : 検知素子の感光部面積

$\Delta f$  : 測定系の帯域幅

高い $D^* \lambda$ や $R_\lambda$ を得るためには、低キャリア濃度のn型結晶を用い、過剰キャリアのライフタイムを長くすることが必要である。過剰キャリアの結晶表面での再結合を抑制するために、結晶表面には陽極酸化膜などのパッシベーション膜が形成されている。

$D^* \lambda$ にはBLIP (Background Limited Infrared detector's Performance) と呼ばれる理論的な限界がある。これは、熱的な雑音が無視でき、雑音が赤外線で励起したキャリア濃度の揺らぎで制限されている赤外線センサの $D^* \lambda$ を表しており、PC型センサのBLIPは、 $D^* \lambda_p (BLIP) = (\lambda_p / 2hc) / \sqrt{\phi_B}$ で表される。 $\lambda_p$ は最大応答波長、 $h$ はプランク定数、 $c$ は真空中の光速、 $\phi_B$ は背景入射フォトン密度である。 $R \lambda$ も赤外線の入射量が増えると低下する。BLIPに近い性能を実現するため、素子は真空容器の中に実装され、液体窒素温度程度に冷やされる。

赤外線画像装置においては、センサの素子数が多いほど画像信号の周波数帯域幅が狭くできるので、高い信号/雑音比が得られる。HgCdTe-PC型センサでは50-180素子の一次元多素子センサが報告されている<sup>19)</sup>。PC型一次元多素子センサの構造を図19に示す。その特性例を表1に示す。感度の向上、低周波雑音の低減などが進められてきたが、すでに完成期に達しており今後大きな性能改善はないと考えられる。素子数についても検知器真空容器に実装した各素子から外部へ信号を取り出すリード線が必要であり、構造上限界がある。

高い $D^* \lambda$ を得るために素子内部に信号処理機能を持たせるPC型センサとして、SPRITE (Signal PRocessing In The Element) 型センサが開発されている<sup>20, 21)</sup>。光学系の機械的な走査による検知素子面上の像の移動速度と、素子内に発生したフォトキャリアの電界によるドリフト速度が一致するように素子に電圧を印加することにより、素子内で信号電荷がTDI (時間遅延積分: Time-Delay and Integration) され通常のPC型赤外線センサに比べ数倍高い感度が得られる。赤外線によって発生したキャリアの濃度や分布は、キャリアの再結合や拡散によって変化するため、蓄積時間が長くなると検知器のMTF (Modulation Transfer Function) が低下し、画像における解像度の低下を招く。フォトキャリアをドリフトさせるため印加する電界によるジュール発熱が結構大きくこの点から素子数が制限される。欧州では8~24素子(行)のセンサが開発され、画像装置も実用化されている。今後、素子形状の改良によるMTFの改善や結晶の高純度化によるジュール熱の低減が進められると考えられる。SPRITE型センサの素子構成を図20に示す。

## (2) 光起電力型赤外線センサ

光導電型センサが光抵抗体であるのに対して、光起電力型(PV型)センサは光電池の構造で、光が入射すると光起電力が発生するものである。一般にはpn接合ダイオードの構造を持ち、例えばp型半導体を基板とし、その上にn型の層をつくり、接合部にキャリアの少ない空乏層を形成する。この低キャリア層に赤外線が吸収され、電子正孔対が発生すると接合部に過剰電荷による電位が形成され、光起電力となって出力される。pn接合ダイオードの電圧-電流特性を図21に示す。

結晶材料としては、3 - 5  $\mu\text{m}$ 帯ではInSb、HgCdTeが用いられ、8 - 10  $\mu\text{m}$ 帯ではHgCdTeが用いられる。8 - 10  $\mu\text{m}$ 帯のP V型センサは3 - 5  $\mu\text{m}$ 帯に較べいくつかの課題がある。それは、光電変換を行う10  $\mu\text{m}$ 帯HgCdTe結晶のエネルギーギャップ ( $E_g$ ) が0.1 e Vと小さいため、熱的に発生する暗電流が増加し、ダイオードのゼロバイアス抵抗 ( $R_0$ ) が3 - 5  $\mu\text{m}$ 帯ダイオードに較べると3桁程度低くなることが一因である。ダイオードの $R_0$ が低いと発生した光電荷をSi-CCDなど外部への出力回路に効率良く注入できなくなると共に $R_0$ の熱雑音の影響も無視できなくなり、感度が低下する。このため、HgCdTe結晶特性の改善と共に、陽極硫化膜など接合部のパッシベーションの改良による $R_0$ の向上が進められている。

光起電力型センサにおいても、その特性は光導電型センサと同じように $R\lambda$ 、 $D^*\lambda$ で表すことができる。性能上限であるBLIP値は $D^*\lambda_p$ 、 $(BLIP) = (\lambda_p / \sqrt{2} \cdot hc) / \sqrt{\phi_B}$ となり光導電型センサに較べ $\sqrt{2}$ 倍大きいエネルギーギャップ ( $E_g$ ) が小さい場合、熱雑音の影響が現れ易く、カットオフ波長12  $\mu\text{m}$ を越えるP Vセンサは余り用いられない。赤外線画像装置の高性能化を図るため、センサの画素数の増大が要望されている。特に、二次元センサが開発されると機械的走査機構が不要になり、装置の小型・軽量化が大幅に進展する。

検知素子にP V型センサを用いた、次世代赤外線センサであるIRCCDは多数の検知素子からの信号をセンサ内部で多重化して時系列信号として出力する赤外線検知器の総称である。開発の初期、Si-CCDを用い信号をマルチプレクス後、順次転送し時系列の出力信号としていた。従ってIRCCDと呼ばれているが、現在ではマルチプレクスに必ずしもCCDを用いてないので、第二世代のIRFPA (Infrared Focal Plane Arrays)と呼ばれることもある。ここでは内部マルチプレクサ型赤外線センサの総称としてIRCCDを用いる。Si読み出し回路への信号電荷の注入において、注入効率を高めるためには、インピーダンスの高い、ダイオード特性で言うと $R_0$ の大きいダイオードを用いることが必要である。ダイオードで発生した光電流はSi読み出し回路の入力部に一旦蓄積された後、CCDなどでマルチプレクスされ読み出される。信号/雑音比は蓄積時間の平方根に比例して向上する。

IRCCDは素子配列から、一次元と二次元に大別される。一次元IRCCDは、PC型多素子一次元センサと同じく線状に検知素子を配列したりニアセンサであり、赤外画像を得るために機械走査を必要とし、「走査型IRCCD」とも呼ばれる。P V型素子からの信号電荷は内部で多重化されるため、ジュール発熱や取り出しリード線の問題はなく、200素子以上の大規模なセンサが開発されている。一方、二次元IRCCDは機械走査に代わって素子内部でSi-CCDなどによる電子走査により信号電荷を多重化して出力する構成であり、目標を長時間見続けることができ「凝視型IRCCD」と呼ばれている。PtSi-Siショットキ型赤外線センサを除き素子の集積度がまだ十分でなく解像力において一次元におよばないが、小型・軽量・高感度な特長があり、開発が進展している。

ハイブリッド型 I R C C D は検知部と転送部に異なる材料を用いるもの、あるいは同種の材料であっても異なる基板上に構成する形式であり、実用化開発が進展している。図22にハイブリッド型 I R C C D の構造を示す。赤外線を検知するフォトダイオードアレイ基板と信号電荷を多重化し転送する信号読み出し回路基板を貼合わせた構造をしている。基板間の各画素接続にはインジウム金属による bumps で接続するフェイスダウンボンディング方式を採っている。ハイブリッド型の長所は、検知部と信号処理部が別基板構成となっているため、各基板に対し最良の技術が適用できることにある。検出部においては開口率（フィルファクタ）が大きくとれ、感度を高め、信号の欠落を防ぐことができる。複雑な回路構成を必要とする信号処理部においては Si 集積回路技術を用いることで、電荷蓄積量の増大や信号処理の高速化が図れる。ハイブリッド型の課題は、二種の基板の熱膨張係数の相違により常温と冷却温度である 77 K の間の温度変化による熱歪を生じ、素子寸法の上限が制限されることである。

検知素子の材料としては、3 - 5  $\mu\text{m}$  波長域では InSb、HgCdTe が代表的なものであり、8 - 10  $\mu\text{m}$  波長域では HgCdTe が代表的材料である。以下、ハイブリッド型 I R C C D を中心に最近の開発動向について紹介する。

### ① ハイブリッド型一次元 I R C C D

一次元 I R C C D の基本構造は、フォトダイオードアレイと信号処理用のマルチプレクサをサファイアなどの配線基板上に配置し、両チップ間をワイヤボンディングまたは bumps で接続した、間接ハイブリッド構造が一般的である。

最近報告・発表された主要素子を表4に示す。検知材料としては、ほとんど HgCdTe で、波長域は 8 - 10  $\mu\text{m}$  帯であり、長波長域での高精細な赤外画像を得ることが目的である。開発方向としては、画素数について、240画素から1000画素程度へ増大を図るとともに、感度を向上させるためリニアセンサ部を複数配置しその出力信号を素子内部または外部で T D I 処理を行い、S/N を改善する方法が一般化してきた。走査方向に n 列配置した場合、信号成分は n 倍になり、雑音は  $\sqrt{n}$  倍になり、S/N 比は  $\sqrt{n}$  倍改善される。

100画素×4列<sup>22)</sup>、300画素×4列<sup>23)</sup>など報告されており、感度改善が確認されている。図23に100画素×4列 T D I - I R C C D の写真を示す。中央に50画素×4列の HgCdTe フォトダイオードアレイを2チップその上下に Si - C C D を配置しサファイア配線基板の上に実装したものである。288画素×4列は T D I 処理を Si 信号読み出し回路内で行っている例で、信号電荷を C C D に転送し、走査に同期して遅延加算して出力している<sup>25)</sup>。出力信号速度を遅くできる利点があるが、素子間で電荷を蓄積・転送する必要があり面積的に蓄積電荷量を大きくするのが難しい。また、この素子は配線基板を介せず、HgCdTe ダイオ

ードアレイとSi信号読み出し回路を直接バンプ接続した、直接ハイブリッド構成を採っている。画素配列では、画素間を補間するようにセンサ部をスタガ配列とし、インターレース走査なしで欠落のない画像を得る構成や1024画素をオーバーラップインターレース配列とし、256画素×4列や512画素×2列の構成として切り換えて使用するセンサも開発されている<sup>26)</sup>。衛星用センサに必要な一体型の長尺センサを実現する技術として、8μm間隔で $\lambda_0 = 12.5\mu\text{m}$ のダイオードアレイ3チップをライン上に並べる突き合せ型リニアアレイ (Buttable Linear Arrays) が開発されている<sup>27)</sup>。

## ② ハイブリッド型二次元IRCCD

二次元については、64×64-256×256画素のものが開発中である。背景光量・画素数の増大に対応すべく、種々の素子構造、読み出し回路方式が検討されている。直接ハイブリッド構造でフォトダイオードアレイとSi信号読み出し回路の接続に、Inバンプを用いるものとループホール技術を用いるものがある。Inバンプで貼合わせるタイプの素子は、画素ピッチに対し感光部面積を大きくできる利点がある。反面、ダイオードに対し裏面から赤外線を入射することによる感光面積の拡がりを生ずる。図24にバンプ構造、図25にループホール構造を示す。ループホール技術は、薄層化したHgCdTeウェハに画素対応の穴をあけ、その周囲にpn接合を形成したものである。この技術はバンプを必要としないため画素ピッチの縮小に有効である。今後の方向としては、両接続法ともチップサイズの増大によるSi信号読み出し回路とフォトダイオードアレイ間の熱歪の克服が課題となる。表5に最近の二次元IRCCDの報告例を示す。

3-5μm帯でInSb、HgCdTeなど化合物半導体を用いた64×64-256×256画素が各所で開発されている。

InSbについては、128×128画素で信号読出にCMOSを使ったセンサが報告されている<sup>23)</sup>。 $D^*\lambda_0$ は $4 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 以上である。画素ピッチ30μmで256×256画素、画素ピッチ20μmで480×640画素の素子が報告されている<sup>23)</sup>。

HgCdTeについてはHgCdTe/CdTe/サファイア基板を用いた、1-2.5μm、3-5μm帯の256×256画素の報告がある<sup>29)</sup>。サファイア基板を用いることにより、Si読み出し回路との熱膨張係数の差による熱歪を小さくでき画素数の増大が実現している。

3-5μm帯IRCCDの別な開発方向として、冷却温度の上昇(高温動作)への試みが各種検討されている。量子型センサの一般的な動作温度である77K動作に対する実用面の問題は冷却器のサイズ・消費電力にあり、これをいかに下

げることが課題である。高温動作へのアプローチの一つは電子冷却温度（200 K前後）で高感度・安定な素子の開発である。動作温度200 K、 $128 \times 128$ 画素の報告がある<sup>30)</sup>。カットオフ波長（ $\lambda_c$ ）は $3.2 \mu\text{m}$ で  $D^* \lambda_c = 7 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$  が得られている。また、動作温度180 Kで $\lambda_c = 5.0 \mu\text{m}$ で $128 \times 128$ 画素の報告がある<sup>24)</sup>。 $D^* \lambda_c$ は $1 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 以上（ $F = 1.6$ ）である。電子冷却の場合、固定パターン雑音など画質にはまだ課題があるが、今後の開発の一つの方向である。

8-10  $\mu\text{m}$ 帯については、HgCdTeを用いた素子が開発の中心である。 $64 \times 64$ 画素IRCCDについては報告例がいくつかある<sup>32,33)</sup>。 $128 \times 128$ については、ループホール型のものが開発されている<sup>26)</sup>。信号読み出し方式は、8-10  $\mu\text{m}$ 帯では入射光子密度が高いため、インターライン型のCCDでは処理しきれない場合が多く、ラインアドレス方式とCMOSスイッチアレイを組み合わせた方式が主流である。また、画素数の増大に伴い、分割読み出し構成など工夫が進んでいる。

10  $\mu\text{m}$ 帯の新しいセンサとしてGaAlAs/GaAsの超格子による多重量子井戸構造を持つセンサが注目されるが<sup>34)</sup>、暗電流低減のためHgCdTeなどより低温に冷却する必要があるなど課題がある。

MOCVD法やMBE法など気相成長技術を用い、SiやGaAsなど異種基板上にHgCdTe/CdTeを成長させる技術など新しい技術<sup>35)</sup>を適用することにより、より一層、大規模、高性能化が進展すると考えられる。

### (3) 赤外撮像デバイス

IRCCDを用いたリアルタイム赤外撮像装置の構成を図26に示す。

図26(a)は、一次元IRCCDを用いた場合の構成で、画像を得るために水平方向にミラーなどによる光学走査を行う。この場合、1垂直ラインの蓄積時間は、(フレーム時間-掃線時間)/水平画素数となり、量子効率の高いセンサを用いる必要がある。また、信号をマルチプレクスする読み出し回路は高速性を要求される。しかし、一次元センサの画素数は二次元に較べ多く高精細な赤外画像が得られる特長を持つ。

(b)は二次元IRCCDを用いた構成である。通常の可視のビデオカメラと同じく光学系は集光系だけであり、装置全体を小型・コンパクトにできる。

また、対象をフレーム時間見続けることができる「凝視型」であり、従って量子効率の低いセンサでも、高感度な赤外画像を得ることができる。二次元センサを用いて撮像した人の顔の赤外画像例を図27に示す。白い部分の温度が高く、黒い部分の温度が低いことを示している。温度分解能は $0.1^\circ\text{C}$ 以下である。

(石崎 洋之)

### 3.3 赤外線センサの応用

赤外線センサは当初、米国などの先進国において軍事対応の用途を中心に開発が進められてきたが、現在では広く様々な分野に応用されている。表6に用途別の分類を示す。これら用途のなかで赤外線センサは通信分野を除けば、対象に接触することなく、その存在、形状、温度等を計測することを目的にしている。赤外線を媒介として非接触で計測する技術を総称して、ここでは赤外線リモートセンシングと呼ぶ。赤外線リモートセンシングは赤外放射源<sup>\*1</sup>の有無によってアクティブ方式とパッシブ方式に分けられる。前者は赤外放射源と赤外線センサを組合せ、対象に照射した赤外線の散乱、反射、透過、吸収を検出して応用する技術であり、後者は対象が放射する赤外線を検出して応用する技術である。現在、パッシブ方式が主流であり、人工衛星による地球規模の観測から家電製品における人体検知まで幅広く応用されている。

また赤外線センサの研究は、通信分野では大容量長距離伝送といった要求のためポイント検出器の高性能化に重点が置かれるが、リモートセンシングではイメージングという要求に応えるためアレイ化技術にも重点が置かれる。

ここでは赤外線センサの応用として、赤外線リモートセンシングにおける応用と、通信分野における応用について述べる。前者では近年、注目されつつある環境計測を、また後者では光通信を例に取り上げて説明する。

#### 3.3.1 赤外線リモートセンシング

##### (1) 環境計測

近年、化石燃料の燃焼による炭酸ガスの増加が引き起こす地球温暖化現象、フロンガスの拡散によるオゾン層の破壊など地球環境問題が注目されてきており、地球規模での環境計測システムの確立が急がれている。このような地球規模での環境計測には人工衛星によるリモートセンシングが不可欠である。これまでにランドサットでは可視光によるリモートセンシング、気象衛星“ひまわり”では可視光CCDと $10\mu\text{m}$ 帯のHgCdTeセンサを用いた、可視光と赤外線によるリモートセンシングが行われてきた。ここでは現在打ち上げが計画されている地球観測プラットフォーム技術衛星を例に取り上げながら環境計測を目的とした赤外線リモートセンシングについて述べる。

大気を構成する分子はそれぞれ特定の波長域に吸収帯を持っている。このうち $4.3\sim 5.2\mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\mu\text{m}$ 帯は水や炭酸ガス分子による吸収が無く、高い透過率を示すために“大気の窓”と呼ばれている。人工衛星による赤外線リモートセンシングでは、この大気の窓を利用して地表面、海表面等の温度分布を観測する方式と、大気ガスの吸収領域を利用して温度、成分ガスなど大気の状態の高度分布を観測

---

\*1 レーザ、黒体炉のような人工放射源を指す。

する方式と、レーザ光を大気中へ出射し、その散乱光を受信して対象までの距離、対象の物理的性質を観測する方式が考えられている。これらの中で二番目の方式が環境破壊を引き起こす成分ガスを直接計測する方法である。以下、それぞれの方式について概説する。

#### ①大気の窓を利用する観測方式<sup>36)</sup>

地表面からの放射を黒体放射と仮定して地表面の輝度を求め、必要とする温度分解能を雑音等価温度差に等しいと置いて等価雑音輝度を求めることで、地表面の温度計測ができる。宇宙からの観測では、広い領域の観測を行うために、走査機構が付加されている。このような観測装置を放射計と呼ぶ。図 28 は可視光から熱赤外領域までを約 1km 程度の空間分解能で広域にわたり同時に観測する対物面走査方式の放射計の概観であり、グローバルイメージャ(GLI:Global Imager)と呼ばれている。

#### ②大気ガスの吸収を利用する観測方式<sup>36) - 39)</sup>

大気ガスの成分のほとんどは赤外領域に分子の振動、回転に起因するスペクトルをもつため、その放射、吸収を測定することによって組成や温度の計測ができる。この放射、吸収を利用した計測の概念を図 29 に示す。(a)は大気分子の直接の放射を測定する方法である。(b)は太陽を光源として地球周縁部(Limb方向)の大気を透かしてその光路にある大気分子の吸収を高度方向に精度良くはかる方法であり、太陽掩蔽法(Solar occultation method)と呼ばれる。この方法では衛星が軌道を一周する間に二回(地球の陰から衛星が出る「日の出」と、陰に入る「日の入り」の場合)測定が行われる。1996年2月に打ち上げが計画されている地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS:ADvanced Earth Observing Satellite)にはこの方法を原理とするセンサの搭載が予定されている。このセンサは改良型大気周縁赤外分光計<sup>\*2</sup>(ILAS:Improved Limb Atmospheric Spectrometer)と呼ばれるもので、地球の陸域、海域、大気環境観測を目的にしている。表 7 に ILAS の測定対象範囲を示す。赤外、可視の二種類の分光器を設置しており、赤外分光によりオゾンを中心としたガス濃度測定を行う。図 30、表 8 に構成ブロック図と光学系の仕様を示す。太陽を追尾する追尾系、入射光を集め分光する集光・分光光学系等から構成されており、赤外分光器にはチタン酸鉛(PbTiO<sub>3</sub>)を材料とする 44 素子焦電型赤外リニアアレイ検出器が使用されている。この検出器は量子型と比べると感度は劣るものの冷却不要、波長選択性がないという利点を持っている。なおその他の衛星からの大気観測方式と赤外センサの一覧を表 9 に示す。

<sup>\*2</sup>1984年打ち上げの EXOS-C “おおぞら” に搭載した大気周縁赤外分光装置(LAS:infrared Limb Absorption Spectrometer)の改良版

### ③大気成分による散乱、周波数変移を利用する観測方式<sup>36)</sup>

レーザーレーダ(Laser Radar)、またはライダー(LIDAR:Light Detection And Ranging)は、レーザー光をプローブとして大気中や地球表面にパルス状に出射し、その散乱光を受信し、往復時間や受信光の性質から反射物の物理的性質を計測する方法である。宇宙からのレーザーレーダによる観測の概念を図 31 に示す。またレーザーレーダ出射光と物質の相互作用と計測対象を表 10 に示す。現在、全水蒸気量、境界層高度、エアロゾルの相対的な高度分布、雲頂高度、雲の光学的厚さなどが測定可能な量であるが、将来的には水蒸気鉛直分布、地表面温度、全エアロゾルの光学的厚さ、オゾン濃度の鉛直分布なども測定可能になる。

#### (2) その他

その他の分野における赤外線リモートセンシングについて述べる。

近年、ホームエレクトロニクスの分野でも、家電機器にマイコンやセンサを搭載し、全自動、快適制御などのインテリジェント化が図られるようになった。家電機器に搭載されるセンサは安価で、簡便であることが優先される。熱型素子は冷却が不要で、波長選択性が無く、安価であるため、この用途に適合している。焦電型素子が電子レンジの温度センサやエレベータのドア開閉用センサとして使われている。また図 32 に示すようにエアコンでは焦電型アレイ素子を用いて室内の人数、位置、活動量を検出し、快適制御することが検討されている<sup>40)・41)</sup>表 11 に焦電型素子による用途別の応用例を示す。<sup>39)</sup>

また産業分野では赤外レーザと赤外線センサを組合せたアクティブ方式による公害監視などが挙げられる。<sup>42)</sup>

### 3. 3. 2 光通信

光通信は伝送媒体によって(1)光空間伝送、(2)光ファイバ伝送 の二つに大別することができる。それぞれ信号の伝送路を自由空間に選んだ場合、光ファイバに選んだ場合に対応する。前者は屋外では気象条件により回線が影響を受ける、見通し通信になるため伝送路の間に障害物の介在が許されない等の制約を受けるため、あまり一般的ではない。屋内の限定された空間において壁等で散乱された間接光を利用する方法<sup>43)</sup>や宇宙空間において衛星間通信に利用すること<sup>44)</sup>などが考えられている。一方、後者は従来の電気ケーブルによる方式と比べ、①低損失・広帯域伝送、②無誘導伝送、③可とう線路、④軽量・微小断面積伝送 等の優れた特徴を有しているため、急速に実用化が進んでいる。

図 33 に石英系光ファイバの伝送損失を示す。損失には、電子がフォトンを吸収して遷移することによって起こる紫外吸収と、格子振動による吸収で起こる赤外吸収と、分子と弾性散乱することによって起こるレイリー散乱がある。波長1.55  $\mu\text{m}$ において損失が最小(0.2dB/Km)になるため、この領域を利用した大容量長距離

伝送が検討されている。この1-1.6 $\mu\text{m}$ (1 $\mu\text{m}$ 帯)における光通信用受光素子としてゲルマニウム・アバランシェフォトダイオード(GeAPD)をはじめ、より高感度を目指したInGaAs APDが開発されている。APDはp<sup>+</sup>n接合の一部を10<sup>5</sup>V/cm以上の高電界にし、アバランシェ現象を利用して光励起によって生じたキャリアに増倍作用が起こるようにしたものである。その性能を表すパラメータとして1)量子効率、2)増倍雑音、3)周波数特性、4)暗電流特性等がある。表3-7に各種APDとその特性を示す。この他にも超格子や、傾斜バンドギャップや、共鳴電離現象等を利用した新規なAPDが研究されている。一方、アバランシェ現象には数十~百VのDC電圧が必要でシステム構成が複雑になる。低動作電圧、小型軽量といった面からInGaAs PINフォトダイオード、またそれとFETを一体化したPIN FETが研究されている。これら素子は数百Mbps以下の低・中ビットレート、短距離の簡便なシステムに利用される。図34に受光素子の受信レベルのビットレート依存性の計算結果を示す。このように光通信用受光素子の研究は引き続き、APDの高感度・低雑音化と、低動作電圧、小型、軽量を指向したモノリシック化を柱に展開していくものと考えられる。<sup>45, 46)</sup>

### 3. 4 赤外線センサの周辺技術

図35は赤外線リモートセンシングにおける構成ブロック図である。構成要素として赤外放射源、光学系、検出系、電気系が挙げられる。ここでは電気系を除いた構成要素について概説する。まず赤外放射源について述べ、次に光学系(赤外光学材料と光学素子)について述べ、最後に検出系(冷却系)について述べる。

#### 3. 4. 1 赤外放射源

赤外放射源としては黒体炉、熱放射源、天然放射源、レーザなどがある。以下それぞれについて述べる。

##### (1) 黒体炉<sup>47, 48, 49)</sup>

入射したあらゆる光を完全に吸収する物質のことを黒体と呼ぶ。黒体(完全吸収体)は厳密には存在せず、理想状態を示したものである。黒体はその温度によって決まる放射を持っており、これを黒体放射と呼ぶ。黒体放射の分光放射輝度Mはプランクによって導出され、次式によって表される。

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(ch/\lambda kT) - 1} \quad [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (3-1)$$

ここでc:光速、h:プランク定数、k:ボルツマン定数、T:絶対温度、 $\lambda$ :波長である。

また図 36 は式(3-1)に基づき、黒体温度をパラメータに採り、放射波長と分光放射輝度の関係を計算したものである。

このような黒体を近似的に実現する方法として、キルヒホッフは温度が一様な物質に囲まれた閉空間に微小な穴をあけることを提言している。現在市販されている黒体炉はこの考えに基づいている。代表的な黒体炉の構造を図 37 に示す。

## (2) 熱放射源<sup>47, 49)</sup>

グローバ、ネルンストグローア(Nernst glower)、高圧水銀灯などが赤外分光用放射光源として使用されている。グローバは炭化珪素の焼結体であり、シリコニットという商品名で市販されている。通常、6~10A、200~300Wの消費電力で1100~1500Kの温度が得られる。ネルンストグローアはジルコニアを主成分とし、希土類酸化物を含む焼結体である。比較的少ない消費電力で高温が得られるが、半導性があり、導電性を出すために400℃以上の予熱が必要である。高圧水銀ランプは100 $\mu\text{m}$ 以下の波長域では約1000Kの石英管壁からの熱放射が主であるが、これより長波長では管壁は透明となるため、内部プラズマからの放射が主になる。その他にカートリッジヒータ、ニクロムヒータ、カーボンアークなども知られている。

## (3) 天然放射源

太陽、星、人などがある。太陽は6000Kの黒体として近似でき、宇宙空間では人工衛星に搭載された分光計を校正する基準光源に利用される。

## (4) レーザ

レーザはコヒーレントな光源であるため黒体炉や熱放射源などのインコヒーレントな光源に比べて単色性、指向性、強度、干渉性などの点で優れている。発振波長は鉛カルコゲナイドレーザや自由電子レーザなど一部を除けば、固定されている。ここではレーザ媒質ごとに分類し、それぞれについて概説する。

### ① 気体レーザ

赤外領域の気体レーザとしてCO<sub>2</sub>レーザ、HFレーザ、DFレーザなどが知られている。CO<sub>2</sub>レーザはCO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、Heの混合ガスをグロー放電で励起し、気体循環で動作させるものである。波長10.6 $\mu\text{m}$ の光が得られる。HFレーザはH<sub>2</sub>気体とF<sub>2</sub>気体との連鎖反応の熱エネルギーで励起するもので2.6~3.3 $\mu\text{m}$ 領域で多モード発振する。DFレーザはH<sub>2</sub>気体の代わりにD<sub>2</sub>(重水素)を用いたもので3.8~4.3 $\mu\text{m}$ 領域で多モード発振する。

## ② 固体レーザー

Nd:YAGレーザーなどが知られている。YAG(Yttrium Aluminum Garnet)ロッドは $Y_3Al_5O_{12}$ 結晶中の $Y^{3+}$ イオンの一部を $Nd^{3+}$ イオンで置換した結晶である。このロッドをランプで励起し、発振波長 $1.06\mu\text{m}$ の光が得られる。

## ③ 半導体レーザー<sup>50)</sup>

近赤外半導体レーザーとしてGaAlAs/GaAsレーザーやInGaAsP/InPレーザーが知られている。前者は $0.78\sim 0.85\mu\text{m}$ で発振し、光ディスク用光源として用いられる。後者は $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$ で発振し、光通信用光源として用いられる。

波長 $2\mu\text{m}$ を越えた中・遠赤外半導体レーザーとしてSbを含むⅢ-V族材料によるものと、鉛カルコゲナイド系材料によるものが知られている。これらレーザー材料と発振波長域の関係を図38に示す。GaInAsSb系レーザーは $1.7\mu\text{m}$ 以上の発振が可能であり、将来の光通信用光源として重要である。図39はATTベル研究所のCaneau等によって報告された素子の構造である。

PbSnTe、PbSSeなどの鉛カルコゲナイドレーザーは $4\mu\text{m}$ 以上で発振する。鉛カルコゲナイドはエネルギーギャップ、屈折率の温度依存性が大きいいため、温度、駆動電流、磁場等により簡単にチューニング(波長を変えること)ができる。また組成の選択でも $4\sim 20\mu\text{m}$ の領域で発振波長が自由に設定できる。図40はテルアビブ大のShani等によって報告された分布反射(DBR)構造であり、図41はこのレーザーの77Kにおける電流チューニングである。分布反射(DBR)構造の採用によりチューニング時のモードホップが抑止されている。このように鉛カルコゲナイドレーザーは分子分光やガスモニターの光源として有用である。

## ④ 自由電子レーザー<sup>51)</sup>

鉛カルコゲナイドレーザー以外に赤外を含む幅広い領域において波長が可変なレーザーとして自由電子レーザー(FEL:Free Electron Laser)が知られている。1977年、米国スタンフォード大学にて $3.4\mu\text{m}$ の発振に成功して以来、ミリ波から軟X線まで幅広い領域にわたり大出力のコヒーレント光が確認されている。FELは光速に近い相対論的電子ビーム(REB:Relativistic Electron Beam)の運動エネルギーをヴィクラ(またはアンジュレータ)と呼ばれる周期磁場によって電磁波に変換するものである。図42はFELにおけるREBの運動を示したものであり、REBは加速度を受けて軌道の方向を変える時、赤外からX線までの連続スペクトルをもつシンクロトロン軌道放射光を放射する。FELではこのREBに周期的な加速度を与え、多周期の干渉効果によって特定周波数のスペクトルを選択するようになっている。加速度周期の周期長によって発振波長が変えられ、従来の気体レーザーや固体レーザーのように二つのエネルギー準位間の遷移によって発振波長が固定されることはない。またレーザー媒質は電子のみであるため、従来のような媒質の破壊は起こらず、大出力化が可能となる。

### 3.4.2 赤外光学材料と光学素子

#### (1) 赤外光学材料<sup>52, 53, 54)</sup>

赤外領域で使われる光学素子も可視領域で使われる光学素子と同様、反射型と透過型に分けることができる。それぞれについて述べる。

##### ① 反射型

反射面に使われる材料は基本的には可視で使われるもの（アルミニウム、金など）と同じであるが、波長が長い分、反射面の表面精度の許容値が大きくなる。このためガラス研磨面に金属蒸着したものに代わってアルミニウム合金などを切削加工したものも使用される。

##### ② 透過型

窓やレンズなどに使用されるため、熱的機械的強度が要求される。理想的には次の条件を満たすことが望まれる。

- (a) 吸収係数が小さく、透明領域が広いこと
- (b) 潮解性、毒性が無いこと
- (c) 熱的衝撃や応力に強いこと
- (d) 大口径のものが安価に得られること

現在使われている材料は(I)アルカリハライド、(II)アルカリ土類フロライド、(III)半導体、(IV)非晶質体（主としてカルコゲナイドガラス）に分類される。表13にこれら材料の光学的、熱的、機械的性質を示す。アルカリハライドは透明領域が最も広く、屈折率が小さく、大口径の結晶が得られるなどの特長をもつ反面、硬度が低く、へき開性が著しい、熱伝導度が小さく線膨張係数が大きいため熱衝撃に弱い、潮解性を有すなどの欠点をもつ。またアルカリ土類フロライドはアルカリハライドに比べ機械的強度は強く潮解性もほとんどもたないが透明領域がやや狭い。半導体は熱的機械的強度は良いが、 $n$ 及び $dn/dT$ が大きい。カルコゲナイドガラスは casting が容易であるためレンズ、ファイバの材料に適している。また水や化学薬品にも強いのでレンズなどのコーティング材として有用である。欠点は軟化温度が低いことがあげられる。この他にも高分子は遠赤外領域で有用な光学材料である。特にポリエチレンは $16\mu\text{m}$ 以上では $140\mu\text{m}$ にある吸収バンドを除けばほとんど透明である。

また表12より可視領域から赤外領域まで透過する材料として $\text{ZnSe}$ 、 $\text{CaF}_2$ 、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ などが挙げられる。このような材料は可視から赤外まで含むマルチスペクトル光学系に使われるだけでなく、赤外領域のみに用いる光学系においても部品製作や組立調整においてメリットがある。光学的性能（屈折率が低く、分散が大き

い) が良くない場合が多く、レンズ材料にはあまり使われてない(主に窓材として使われる)。レンズ材料としては現在でもゲルマニウムとシリコンが使われている。これら材料は可視領域で不透明であるため製作精度を機械的測定に頼る、材料内部のホモジニティの測定が難しいなどの課題を有しているが、光学的性能、サイズ、価格等の総合評価で他の材料に比べ優れているため選ばれる。ゲルマニウムの特長は以下の通りである。

- 1) 4.3~5.2 $\mu\text{m}$ 帯、8~12 $\mu\text{m}$ 帯のいずれの領域(大気の窓)でも使用可能。
- 2) 幅広い波長域で屈折率の分散が小さいため通常の用途では色収差の補償が省略できる。
- 3) 硬度、機械強度が強く、幅広い環境で使用出来る。大口径の結晶が得られ易い。
- 4) 屈折率が大きい。

## (2) 光学素子

### ① レンズ<sup>55)</sup>

ここでは赤外線撮像装置に使われるレンズについて述べる。撮像装置の用途では3~5 $\mu\text{m}$ 帯、8~14 $\mu\text{m}$ 帯の波長域が主力となる。前記のとおりGeは分散が小さく、大型の結晶も得られるため、8~14 $\mu\text{m}$ 帯において主材料として使われる。また3~5 $\mu\text{m}$ 帯ではSiやGeの分散が無視できなくなるため、色消しが必要になる。可視領域でも透明な材料を用いた2~3枚構成の色消しレンズや、ズームレンズなどが研究されている。

また、赤外領域には可視領域にはない、次のような特有の問題がある。

- 1) 対象と背景の温度差が0.1 $^{\circ}\text{C}$ ~数 $^{\circ}\text{C}$ とコントラストが非常に低いため光学系のフレアが性能を左右する。
  - 2) 常温近傍の対象物の像の上に、レンズ界面の反射で形成された、冷却されたセンサ像が重なり、赤外像の中に欠損が生じるナルシサス現象がある。
- これらを考慮した光学設計が必要である。

### ② 鏡<sup>55)</sup>

赤外領域では反射鏡がレンズの代わりに汎用される。平行光線の結像は古くから天体反射望遠鏡などで研究されてきた。主な構成を図43に示す。(a)はニュートン(Newton)式と呼ばれるもので、主鏡で反射された光線の経路に小さな平面鏡をおいた構成になっている。(b)、(c)はカセグレン(Cassegrain)式、グレゴリー(Gregorian)式と呼ばれるもので、それぞれ副鏡に凸面鏡、凹面鏡を用いた構成になっている。

### ③ 回折格子<sup>56)</sup>

分光用の分散素子に使われる。赤外透過結晶(NaCl、KBrなど)を用いたプリズ

ムによる分光と比べ、1)安定である（潮解性がない）、2)分散の温度依存性がない、3)分光範囲の制約を受けない（結晶材料では物性的な透過限界により制約を受ける）などの特長を有している。赤外領域で用いられる回折格子を図 44 に示す。針金格子は格子定数より大きな波長の光に対して針金に平行な偏光成分は反射し、垂直な偏光成分は透過する特性があるので、ビームスプリッタとして使われる。エシェレット格子（またはブレード回折格子）はルーリングエンジン（ruling engine）と呼ばれる格子溝刻線専用工作機によって製作される。近赤外用で1mm当たり数百本の溝が、また遠赤外用で1mm当たり数十本の溝が刻線される。

#### ④ 窓板<sup>53)</sup>

高出力レーザーの窓板について述べる。赤外の高出力レーザーとしてYAG(1.06 μm)レーザー、HF(2.7 μm)レーザー、DF(3.8 μm)レーザー、CO(5.25 μm)レーザー、CO<sub>2</sub>(10.6 μm)レーザーなどが知られている。これらの窓板に用いる材料では、1)熱的破損と、2)光学的ゆがみ（窓板のレンズ作用）が問題になる。熱的破損はレーザー光の吸収により不均一に加熱されることによって生じる応力が原因である。また光学的ゆがみは非一様加熱により窓板の各部位を通過する光に光路差が生じることに起因する。これらに関し、次のような評価指標が提案されている。

$$\text{熱的破損の評価指標} : Ft = K \sigma_c / (\beta \alpha E) \quad (3-2)$$

$$\text{光学的ゆがみの評価指標} : Fo = K / (\beta \chi) \times 10^{-6} \quad (3-3)$$

ここでK:熱伝導度、 $\alpha$ :線膨張係数、 $\beta$ :バルクの吸収係数、E:ヤング率、 $\sigma_c$ :降伏応力、 $\chi$ はoptical distortion parameterと呼ばれる量で、ポアソン比 $\nu$ 、光弾性定数 $\langle \pi \rangle$ の平均値を用いて

$$\chi = dn/dT + (1 + \nu) \alpha (n-1) + n^3 \alpha E \langle \pi \rangle / 2 \quad (3-4)$$

と表される。

表 14 に代表的な窓材の熱的破損、光学的ゆがみに対する計算値を示す。熱的破損は半導体が最も強く、フッ化物がそれに続き、アルカリハライドが最も悪い。一方、光学的ゆがみはアルカリハライド、フッ化物が強く、半導体が最も悪い。

#### ⑤ フィルタ<sup>55)</sup>

フィルタは不要な波長域の光をカットしたりするために使われる。通過帯域によって次の三種類に分けられる。

- 1)長波長パスフィルタ (LWPF:Long Wave Pass Filter)
- 2)短波長パスフィルタ (SWPF:Short Wave Pass Filter)
- 3)帯域フィルタ (BPF:Band Pass Filter)

このようなフィルタ作用は選択吸収、反射、干渉、回折、散乱、偏光などの物理的性質を利用して作られる。

##### (a)干渉を利用するもの

干渉を利用するフィルタとしてガラス、石英、ゲルマニウムなどの基板上に誘電体多層膜を蒸着したものが使われる。誘電体多層膜は高屈折率の材料 $n_H$ と低屈

折率の材料  $n_L$  の  $1/4$  波長層のスタック HL (または LH) を積層した  $(HL)^N$  (または  $(LH)^N$ ) 構造が基本になる。  $n_H/n_L$  やスタック数  $N$  を適当に選択することにより L WPF や S WPF ができる。またファブリー・ペロー構造 (HLHLHLHL) を採用することにより BPF ができる。なお遠赤外領域では蒸着膜の厚みが増大し、製作が困難になるため、誘電体多層膜に代わって金属メッシュを用いたものが開発されている。

(b) 選択吸収、反射を利用するもの

Si、Ge、PbS、InSb などの半導体はバンドギャップより長波長で急に透明になるため L WPF に利用される。

#### ⑥ 偏光素子<sup>59)</sup>

直線偏光を作る素子と円偏光を作る素子がある。直線偏光子はブリュースター (Brewster) 角における反射透過特性を利用したものと、針金格子 (Wire Grid) を利用したものが知られている。円偏光は  $1/4$  波長板と直線偏光子の組合せ (直線偏光が  $1/4$  波長板の光軸に対して  $45^\circ$  傾いて入射し透過した場合) によって得られる。赤外領域の全ての波長において  $1/4$  波長の位相差を得るために、CdS、水晶、サファイアなどの一軸性結晶を用いたソレイユ補償板が使われる。

#### ⑦ ファイバ<sup>55, 58)</sup>

光ファイバの損失はレイリー散乱、紫外吸収、赤外吸収などの物質固有 (intrinsic) の要因と、不純物や加工プロセス等によって導入される外的 (extrinsic) な要因から決まる。このうち赤外吸収は構成元素の質量や元素間の結合力によって決まる intrinsic な損失で、石英より赤外吸収が長波長にある物質を選定することにより石英系光ファイバより低損失が期待できると予想された。図 45 に現在研究されている赤外ファイバの理論損失を示す。石英系より  $1\sim 2$  桁低い損失が期待されている。

一方、光ファイバの実用化には低損失性の他に、機械的強度、可とう性、対候性なども要求される。これに対し、赤外透過材料は基本的に質量が重く、元素間結合力が弱いため機械的強度が弱く、熔融温度が低く、ガラス形成ににくいという傾向がある。現在、赤外ファイバの材料としてハライド結晶、カルコゲナイドガラス、重金属フッ化ガラスについて研究が行われている。

##### 1) ハライド結晶

波長  $10\mu\text{m}$  付近を透過できる材料は現在、金属ハライド結晶系ファイバしかない。製造上、細径・長尺が困難なこともあり、 $\text{CO}_2$  レーザのパワー伝送に主眼が置かれている。損失は現在、理論値  $0.01\text{dB/Km}$  に対して銀ハライドでの  $70\text{dB/Km}$  ( $10.6\mu\text{m}$ ) がベストである。

##### 2) カルコゲナイドガラス

損失要因として水素化合物や酸化物等の不純物吸収、紫外吸収、赤外吸収、ガラス中の荷電欠陥による吸収 (Weak Absorption Tail) などが見られる。現在、損失は  $\text{As}_2\text{S}_3$  ファイバで  $35\text{dB/Km}$  ( $2.44\mu\text{m}$ ) がベストとされている。

3) 重金属フッ化ガラス  
フッ化ジルコニウム系、フッ化ハフニウム系、バリウム・トリウム系が研究されている。1dB/Kmをきる損失も得られている。大容量長距離伝送光通信等を目的としており、今後大きな期待がもたれている。

なお赤外ファイバの応用は図 46 に示す。長距離光通信の分野で大きな需要が期待される他、産業分野でも温度計測、熱画像伝送、パワーレーザのエネルギー伝送等が期待される。

### 3.4.3 赤外線センサ用冷却系<sup>59 - 62)</sup>

量子効果を利用した中・遠赤外線センサは冷却して使用するため、寒剤もしくは冷却装置が必要である。寒剤は基本的に消耗品であり、長期間の連続使用に耐えられない。また冷却装置にはペルチェ効果を利用した電子式と、気化潜熱や断熱膨張を利用した機械式があるが、冷却能力の優れた機械式が注目されている。

機械式による低温発生の原理として次の三つが知られている。

- (1) 液体の蒸発潜熱を利用する方法  
フロンなどの冷媒ガスの蒸発気化熱を利用して低温を発生させる方法（冷蔵庫、空調機器はこの方法による）。
- (2) 気体の理想状態からのズレを利用する方法  
気体の膨張（等エンタルピー膨張）によるジュール・トムソン効果を利用して冷凍を発生させる方法。
- (3) 気体に膨張仕事をさせる方法  
圧縮ガスを膨張エンジンで膨張させ、気体に膨張仕事（等エントロピー膨張）を行わせることによって冷凍を発生させる方法。

赤外線センサを70K前後まで冷却するのに(2)または(3)の方法が使われる。この方法に基づいた、ギフォード・マクマホン、スターリング式の冷却器は既に実用化されている。特に、70K前後では小型軽量化に有利なスターリング冷却器が精力的に開発されている。

スターリング冷却器は、外燃機関として知られているスターリングサイクルの逆サイクルである。この効率はカルノーサイクルに等しく、種々の冷凍サイクルの中で最も効率が高く、機構がシンプルであるため小形、軽量化が容易である。図 47 に圧縮部分と冷凍部をフレキシブル配管によって分離した形態のスプリット型のスターリング冷却器を示す。この形態は圧縮部分と冷凍部が一体化されたものに比べて受光素子に対する圧縮器の振動や電氣的な影響が小さいため、主流になりつつある。スターリング冷却器の基本構成は冷凍部のシリンダ、蓄冷器を収納したディスプレイサ、ディスプレイサ位置を中立に保つバネ、冷凍部と連結

する配管、圧縮部からなる。基本サイクルは図 48 に示すように①等温圧縮、②等容移送、③等温膨張、④等温移送の四行程から成り立っている。それぞれの行程では以下の動作が行われている。

#### ①等温圧縮

ピストンの上昇により内部ガスは圧縮され、圧力が上昇する。この時発生する熱はシリンダ表面より大気に放散される。

#### ②等容移送

ニューマティック空間と作動空間の圧力差によりディスプレイサが下降する。ディスプレイサ下部に存在していた作動ガスは、ディスプレイサ内部の蓄冷器を通り上方へ移る。これに伴って蓄冷器による冷却効果が生じる。

#### ③等温膨張

ピストンが下降して内部ガスが膨張し、冷却作用が生じる。ガスはこの間外部からの熱流入によって一定温度に保たれる。

#### ④等温移送

作動ガスの圧力低下に伴って、ニューマティック空間との圧力差によりディスプレイサが押し上げられ上昇する。冷凍発生部のガスは再び蓄冷器を経て下方に移動する。この時ガスは蓄冷器を冷却しながら、自らは常温となって移動する。

このスターリング冷却器の特徴は、小型軽量、低騒音、低消費電力の他、連続運転が可能にある。装置に組み込んだ状態で消費電力は約50W、常温から-196℃までに冷却する時間は約10分である。またランニングテストにおいて5000時間以上の実績がある。

### 3.5 赤外線センサの技術動向

最新トピックスとして超電導光センサを取り上げ、技術動向について説明する。超電導材料はペロブスカイト型結晶構造を母体にした酸化物高温超電導体の発見を契機に、新しい材料系が次々に発見されるなど目覚ましい進展を遂げている。このような状況のなかで、新しい材料系による光応答機構の研究や、ボロメータへの応用が注目されている<sup>63, 64)</sup>ここでは、新しい材料系による光応答を中心に超電導光センサについて概説する。

#### 3.5.1 超電導光センサの原理と特徴<sup>65)</sup>

超電導薄膜を用いた赤外線センサは、図 49 に示すように光波吸収による温度上昇を検出する熱型と、準粒子の励起やジョセフソン効果等を利用する量子型に大別できる。前者は超電導材料の抵抗値が転移温度で急激に失われる現象を利用したもので、転移端ボロメータ(transition-edge bolometer)と呼ばれている。

後者は、さらに超電導接合に特有な量子効果（光子誘起トンネル現象、交流ジョセフソン効果）を利用したものと、超電導性が弱められた状態における非平衡超電導現象を利用したものとに分けられる。第一のタイプの素子は熱型と同様、古い歴史をもっており、'60年代後半に点接触型ジョセフソン接合を用いたビデオ検出（交流ジョセフソン効果）が報告されている。また第二のタイプの素子は酸化物高温超電導体の多結晶薄膜における光応答の実験からその可能性が見い出されたもので、<sup>63)</sup>近年、精力的な研究がなされている分野である。

### (1) 熱型超電導光センサ

超電導材料の温度を下げていくと、抵抗値は漸減するが、その材料に特有の転移温度に達すると抵抗値は急激に0に近づく。転移端ボロメータはこの抵抗値の急激な変化を利用したものである。この素子では超電導薄膜の温度は常電導から超電導に転移する中間に設定されている。転移する温度幅が非常に狭いため、設定温度を1/1000K以下という高い精度で制御する必要がある。図50は1977年、J. Clark等によって報告された超伝導薄膜を温度センサとして用いたコンポジットボロメータ（放射の吸収体にその温度を検出する温度センサを付けた構造のもの）の構成を示したものである。近年、Richards等はこのような転移端ボロメータに酸化物高温超電導体を適用した場合の理論的検討を行い、液体窒素の沸点(77K)以上の動作温度において、20 $\mu$ m以上の波長域では、この素子が半導体型や焦電型素子に対し、優位であることを示している。<sup>64)</sup>この結果に基づきサファイア基板上にYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>(YBCO)膜を厚さ20 $\mu$ mにエピタキシャル成長させ、放射吸収体として金ブラックを蒸着させたボロメータを試作し、He-Neレーザの波長632nmにおいてNEP $2.4 \times 10^{-11}$ W/Hz<sup>1/2</sup>(at10Hz)、応答感度17V/Wの値を得ている。<sup>65)</sup>

### (2) 量子型超電導光センサ

量子型は金属系超電導体による光子誘起トンネル現象や交流ジョセフソン効果を利用したものと、酸化物超電導体による非平衡超電導現象を利用したものとに分けられる。

#### ① 金属系超電導体

これまで電磁波の検出方法としてトンネル型接合(SIS:Superconductor-Insulator-Superconductor)、点接触型、マイクロブリッジなどのジョセフソン接合を利用した、交流ジョセフソン効果に起因するシャピロステップ(Shapiro Step)を検出する方法（ビデオ検出）が研究されてきた。これに対し、近年、観測天文学の分野においてSIS接合のミクサーが注目されている。<sup>67)</sup>これは“宇宙からの微弱な電波をいかによい感度で検出するか”という課題に対し、SIS接合のミクサーが極限的な感度をもつ受信器として働いたことによる。電磁波の検出には光子誘起トンネリング効果(PAT:Photon Assisted Tunneling)と呼ばれる現象を利用しており、

ギャップ電圧近傍で光子が入射することによってPATステップと呼ばれる階段状の電流電圧特性ができる。SIS接合は他の接合よりもギャップ電圧が大きいためこの効果が顕著に現れる。図 51 はミクサーに用いられているSIS接合の光学顕微鏡写真で、8個のSIS接合が直列に連結されている。また図 52 はこのSIS接合(1個)の断面図である。これらSIS接合のミクサーを用いて名大の福井等は波長3ミリメートル帯において理論限界に匹敵する低雑音を確認している。

## ②酸化物超電導体

酸化物高温超電導体には、金属系超電導体と比べて以下のような大きく異なる特徴がある。<sup>63)</sup>

- 1)層状の結晶構造を有し、二次元性が強い。
- 2)結晶粒界がジョセフソン結合している。
- 3)コヒーレンス長が短く、しかも結晶方位による異方性がある(コヒーレンス長は、結晶のab面方向では数nm、c軸方向では数十分の1nmといわれている)。

この小さなコヒーレンス長は、マイクロブリッジやSIS接合などのジョセフソン素子の製作に困難をもたらしている。

このような酸化物超電導体において、光センサの期待が膨らむキッカケになったのは、酸化物超電導体 $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$  (以下BPBOと略す)の多結晶薄膜における光応答の実験である。<sup>63)</sup> この材料は、半金属の $BaPbO_3$ と半導体の $BaBiO_3$ の固溶体で、ペロブスカイト型結晶構造を有している。 $X < 0.35$ の組成領域では超電導を示し、 $X > 0.35$ では半導体になる。転移温度は $X = 0.25 \sim 0.3$ の場合に最も高い値が得られている。また、金属系超電導体と比較して1桁以上小さなキャリア密度やクーパー密度をもち、低キャリア濃度超電導体と呼ばれている。このような低キャリア濃度超電導体は転移温度が低いのが通常であるが、この物質は最高13Kにも達し、また低キャリア濃度に由来する半導体に似た構造敏感性を併せもっている。<sup>69)</sup>

このような物性をもったBPBOの多結晶薄膜は粒界ジョセフソン接合を形成している。一般に結晶粒界には、結晶周期の乱れなどに基づく表面準位に由来して、粒界ポテンシャルが形成される。このポテンシャルは半導体の場合には数千Å程度と厚く、金属では非常に薄い。BPBOのような半金属ではこの厚さは $\sim 2\text{nm}$ となり、丁度ジョセフソン接合の厚みに適合する。このためBPBO多結晶薄膜の全ての粒界はジョセフソン接合として働き、薄膜全体が二次元ジョセフソンアレイになっている。図 53 の(a)と(b)はこの様子を模式的に示したものである。このBPBOによる粒界ジョセフソン接合に光を照射すると非平衡超電導現象が生じる。この現象は、超電導体にギャップエネルギー $2\Delta$ より大きなエネルギーの光を照射した場合に起こり、クーパー対が壊れて準粒子が生成し、準粒子密度 $n$ が熱平衡時の密度より $\delta n$ だけ大きくなり、エネルギーギャップが $\delta \Delta$ だけ減少する結果を生み出す。これらの量の間には近似的に次の関係が成立する。<sup>63), 69)</sup>

$$\delta \Delta = -\delta n / 2N(0) \quad (3-5)$$

ここで、 $N(0)$ はフェルミレベルにおける電子の状態密度である。BPBOでは $N(0)$ が一桁以上小さく、非平衡超電導効果が大きく現れる。この $\delta \Delta$ は粒界ジョセフソン接合における電流-電圧特性の変化として取り出すことができる。NTTの複本等の報告<sup>63)</sup>に基づいてこれを紹介する。彼等は図54に示す実験系を用いて電流-電圧特性の変化を調べ、図55の結果を得ている。(a)の場合、電磁波が入射することにより特性は実線から点線へと変化し、動作点もAからBに移動し、電圧が出力される。 $n$ 番目のステップがバイアスされていたとすると出力電圧は1個の場合の $n$ 倍となり、高感度化が可能となる。臨界温度付近では電流-電圧特性は(b)の形となることから、電流バイアスを選ぶことにより高感度な検出が可能になる。また図56はBPBO感度の波長依存性を示したもので $\sim 0.8 \mu\text{m}$ 以上の波長で感度を有し、最大 $2 \times 10^4 \text{V/W}$ の感度が得られている。この値は波長とともに増加する傾向を示している。感度は超電導エネルギーギャップ相当の波長(数百 $\mu\text{m}$ )までであると推定される。応答時間は非平衡超電導効果を利用しているため、フォノンの緩和時間( $\sim 100\text{ps}$ )によって限界が決定される。10GHz程度まで周波数応答は延びると予測される。なお、非平衡現象に基づく材料としてはクーパー対密度の小さなBPBO、BKBOなどのビスマス酸化物系超電導体が優れている。<sup>65)</sup>

### 3.6 まとめ

酸化物高温超電導体の発見によってポロメータへの応用の他、非平衡超電導現象を利用した光センサが期待されるようになった。これら素子の比検出能を予測値を含めて、図57に示す。<sup>65)</sup>ここで非平衡型素子の上限値は、ノイズの主要因が粒界ジョセフソンによるショットノイズであると仮定した場合の計算値である。低温冷却された半導体型素子では、それぞれの材料毎に、特定の波長域で、背景輻射限界に達する高い感度を示すが、非平衡型素子ではたった一つの素子により、これら全ての半導体型素子の性能をカバーすることが可能になる。このように非平衡型素子の実用化は赤外線を利用した様々な分野に大きなインパクトを与えることが予想される。

(江頭 信正)

参考文献

- 1) 中本、平尾、山下、岩瀬：PbTiO<sub>3</sub>系焦電形赤外線 センサ、照学誌 68-10 p. 534 (1984)
- 2) 奥山雅則ほか、日本材料科学会誌 38,89(1989)
- 3) 奥山雅則ほか、電子材料 p.1 (1982)
- 4) Iijima, K., Kawashima, S. and Ueda, I.: A Pyroelectric Infrared Detector Made of C-axis Oriented PbTiO<sub>3</sub> Thin Film, Proc. 3rd Sensor Symposium p133(1983)
- 5) Nakamoto, M., Hirao, Y., Yamashita, Y. and Iwase, N.: Pyroelectric Infrared Sensor Using (Pb,Ca)[(Co<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>)Ti]O<sub>3</sub> Ceramics, Proc. 4th Sensor Symposium p209(1984)
- 6) 中本、平尾、山下：PbTiO<sub>3</sub>系セラミックスの焦電特性とセンサへの応用 (I) 第32回応用物理学会春季大会 31aA47 (1985)
- 7) 中本、平尾、山下：PbTiO<sub>3</sub>系焦電形赤外線センサの基礎特性 (I) 照学全大 50 (1985)
- 8) Ichinose, N., Hirao, H., Nakamoto, M. and Yamashita, Y.: Pyroelectric Infrared Sensor Using Modified PbTiO<sub>3</sub> and Its Applications, Jpn. J. Appl. Phys. Spl 24-3 p178(1985)
- 9) Ichinose, N., Hirao, H., Nakamoto, M. and Yamashita, Y.: Pyroelectric Infrared Sensor Using Modified Lead Titanate Ceramics, 6th International Meeting on Ferroelectricity P8-RH-26(1985)
- 10) Takayama, R., et. al.: Ferroelectrics, 95 p195(1989)
- 11) Yamaka, E., et. al.: J. Vac. Sci. Tech., A 6 p2921(1988)
- 12) Imai, T., Okuyama, M. and Hamakawa, Y.: Jpn. J. Appl. Phys. 30, p2163 (1991)
- 13) Togami, Y. et. al.: OPTOELECTRONICS 6, p205(1991)
- 14) M. OKUYAMA et. al., IEEE TRANS. on Electron Devices 38, 1145(1991)
- 15) Shibata, C., et. al.: Proc. 1st Sensor Symp., Japan P221(1981)
- 16) Sarro, P.M., et. al.: J. Electrochem. Soc., vol133, p1724(1986)
- 17) Sarro, P.M., et. al.: SPIE vol807, p113(1987)
- 18) Wood, R.A.: Proc. IEDM, p175(1993)
- 19) Nomura, S.,: Multi-element HgCdTe Infrared Detectors, Denshi Tokyo, 24, (1985)92.
- 20) Elliott, C. T., :Electron. Lett., 17, 312(1981)
- 21) Severn, J., :The Design and Performance Options for SPRITE Arrays, Int. Conf. on Advanced Infrared Detectors and Systems, 9(1990)
- 22) 谷川, 他: 電学研資, LAV-87-6, 11(1987)
- 23) Nicolas, P., :Recent Developments in PV MCT Infrared Detectors, Proc. SPIE, Vol. 686, 26(1986)

- 24) Kasai, I., :Second-Generation Infrared Focal Plane Arrays,  
日本赤外線学会第3回研究発表会資料(1993)
- 25) Destefanis, G. L., :HgCdTe Infrared Diode Arrays, *Semicond. Sci. Technol.*  
6, C88(1991)
- 26) Baker, I. M., :Hybrid CdHgTe-Sillicon Infrared Focal Plane Arrays,  
*Int. Conf. on Advanced Infrared Detectors and Systems*, 78(1990)
- 27) Chamonal, J-P., :Recent Developments on 12.5  $\mu$ m Infrared Detection  
Buttable Linear Arrays, *Proc. SPIE*, Vol. 1685, 205(1992)
- 28) Blackwell, J., :An Affordable 128  $\times$  128 InSb Hybrid Focal Plane Array,  
*Proc. SPIE*, Vol. 1157, 243(1989)
- 29) Bailey, R. B., :256 $\times$ 256 Hybrid Focal Plane Arrays,  
*IEEE Transactions on Electron Devices* Vol. 38, No. 5, 1104(1991)
- 30) Mottin, E., :128 $\times$ 128 3-5  $\mu$ m Focal Plane Arrays at 77K and 200K Operation  
*Int. Conf. on Advanced Infrared Detectors and Systems*, 54(1990)
- 31) Kozlowski, L. J., : 128 $\times$ 128 PACE- I HgCdTe Hybrid FPAs for Thermoelectrically  
Cooled Applications, *Proc. SPIE*, Vol. 1685, 193(1992)
- 32) Kanno, T., :Development of MBE-Grown HgCdTe 64 $\times$ 64 FPA for Long-  
Wavelength IR Detection, *Proc. SPIE*, Vol. 2020(1993)
- 33) Kanno, T., :Development of LPE-Grown HgCdTe 64 $\times$ 64 Element FPA  
with a cutoff Wavelength of 10.6  $\mu$ m, *Proc. SPIE*, Vol. 2020(1993)
- 34) Levine, B. F., : New 10  $\mu$ m Infrared Detector Using Interband Absorption in  
Resonant Tunneling GaAlAs Superlattices, *Appl. Phys. Lett.*, 50, (1987)1092.
- 35) Arias, J. M., : Infrared Diodes Fabricated with HgCdTe grown by MBE on GaAs  
Substrates, *Appl. Phys. Lett.*, 54, , 1025(1989)
- 36) 森山 隆:宇宙観測の動向 日本赤外線学会誌 1-2 pp.19-34(1991)
- 37) 竹内 延夫, 鈴木 睦:地球大気微量成分の衛星赤外分光計測 赤外線技術 18 pp.  
2-12(1990)
- 38) 荒木 信博, 木村 教夫 他:衛星搭載用ワノ層観測センサ National Technical Repo  
rt 39-4 pp.105-113(1993)
- 39) 石垣 武夫:焦電形赤外検出器の宇宙への応用 光学技術コタクト 30-6 pp.319-326  
(1992)
- 40) 吉池 信幸, 森仲 克也 他:2次元赤外線センサ “ハナイ” National Technical Repo  
rt 39-4 pp.114-121(1993)
- 41) 高山 良一, 富田 佳宏 他:焦電型赤外線画像センサ National Technical Report  
39-4 pp.122-130(1993)
- 42) 山香英三:赤外線リモートセンシング 精密工学会誌 56-11 pp.32-37(1990)
- 43) Fritz R. Gfeller, Urs Bapst:Wireless In-House Data Communication via Dif  
fuse Infrared Radiation *Proc. of the IEEE* 67-11 pp.1474-1486(1979)

- 44) 安川 交二:光衛星間通信技術の研究開発動向 信学技報 SAT87-3 pp. 17-24 (1987)
- 45) 三川 孝, 金田 隆夫:1 $\mu$ m帯光通信用受光素子 レーザ研究 13-1 pp. 103-122(1985)
- 46) 中門 孝:計測用光センサ・受光素子 レーザ研究 13-1 pp. 78-90(1985)
- 47) 赤外線技術研究会編:赤外線工学-基礎と応用-, オーム社, pp. 145-152(1991)
- 48) 佐久間 史洋:放射計測の基準としての黒体炉 赤外線技術 17 pp. 2-11(1990)
- 49) 久保田 広, 浮田 祐吉, 會田 軍太夫:光学技術ハンドブック増補版, 朝倉書店pp. 961-962(1984)
- 50) 篠原 宏爾:長波長赤外半導体レーザー レーザ研究 17-11 pp. 788-791(1989)
- 51) 綱脇 恵章, 大東 延久:赤外領域における自由電子レーザー 日本赤外線学会誌 2-1 pp. 34-55(1992)
- 52) 阿竹 宏, 阿形 富男:赤外用光学部品 赤外線技術 13 pp. 31-36(1988)
- 53) 真鍋 惇:最近の赤外光学材料 赤外線技術 4 pp. 2-13(1979)
- 54) 前島 善文, 小日向 貢, 川崎 宏一:赤外線用ケルマニウム光学材料 赤外線技術 17 pp. 41-47(1990)
- 55) 赤外線技術研究会編:赤外線工学-基礎と応用- オーム社 pp. 95-113(1991)
- 56) 井上 克, 原田 達男, 遠山 恵夫:赤外回折格子 赤外線技術 13 pp. 3-12(1988)
- 57) 久保田 広, 浮田 祐吉, 會田 軍太夫:光学技術ハンドブック増補版, 朝倉書店pp. 974-976(1984)
- 58) 山内 一寿, 高橋 謙一:赤外ファイバの現状 赤外線技術研究会 第67回定例研究会 No. 178(1987)
- 59) 渡辺 紀久:赤外線受光素子用冷凍機 精密工学会誌 56-11 pp. 28-31(1990)
- 60) 北原 照義, 藤野 正太郎, 三好 哲夫:高性能、赤外線撮像装置の開発 光プロシス 8 pp. 131-136(1989)
- 61) 金沢 克明:小型冷凍機の現状とその応用 赤外線技術 15 pp. 43-49(1989)
- 62) 林田 茂, 深野 隆:極低温小型冷凍機—最近の展望 応用物理 54-8 pp. 773-780 (1984)
- 63) Y. Enomoto, M. Suzuki and T. Murakami:High Sensitive Optical Detector Using Superconducting Oxide BaPb<sub>0.7</sub>Bi<sub>0.3</sub>O<sub>3</sub>(BPB), Jpn. J. Appl. Phys. 23-5 pp. L333-L335(1984)
- 64) P. L. Richards, J. Clarke, R. Leoni, Ph. Lerch and S. Verghese:Feasibility of the high Tc superconducting bolometer, Appl. Phys. Lett. 54-3 pp. 283-285 (1989)
- 65) 田辺圭一, 榎本陽一:高温超電導体の赤外光検出素子への応用, 応用物理 61-5 pp. 480-483(1992)
- 66) S. Verghese, P. L. Richards, K. Char, S. A. Sachtjen:Fabrication of an Infrared Bolometer With a High Tc Superconducting Thermometer, IEEE Trans. Magn. MAG-27-2, pp. 3077-3080(1991)

- 67) 福井康雄:極限的な高感度ミ波検出と宇宙の観測, 日本物理学会誌, 48-12, pp. 958-965(1993)
- 68) 高田進:高温超伝導電子デバイスの現状, 応用物理, 62-5, pp. 443-454(1993)
- 69) 鈴木実:超電導新セラ材料(酸化物超電導体), セラ技術, 6-5, pp. 55-57(1986)

表3-1 赤外線センサの分類

検出原理	基本赤外線センサ	1次元、2次元センサ
熱型	焦電型センサ	ハイブリッドリニアアレイ ハイブリッドCCD 焦電ビジコン
	熱起電力(ゼーベック効果) 抵抗温度変化	サーモパイル ボロメータ
量子型	内部光電効果 光導電効果 光起電力効果	光導電型センサ PN接合型センサ ショットキーバリア
	外部光電効果 光子放出効果	光電管・光電子増倍管 撮増管(PbS ビジコン)
	フォトン ドラッグ効果	P-Ge

表3-2 焦電材料の焦電特性

焦電材料	キュリー温度 (°C)	比誘電率	焦電係数 (C/cm <sup>2</sup> ·K) ×10 <sup>-8</sup>	電圧評価指数 (Ccm/J) ×10 <sup>-10</sup>
TGS	49	35	4.0	4.6
Li TaO <sub>3</sub>	618	54	2.0	1.3
PZT	200	320	5.3	0.67
Li NbO <sub>3</sub>	1200	30	0.4	0.46
Pb Ti O <sub>3</sub>	470	190	1.8	0.3
Sr Ba Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	115	380	6.5	0.8
PVF <sub>2</sub>	120	11	0.24	0.9

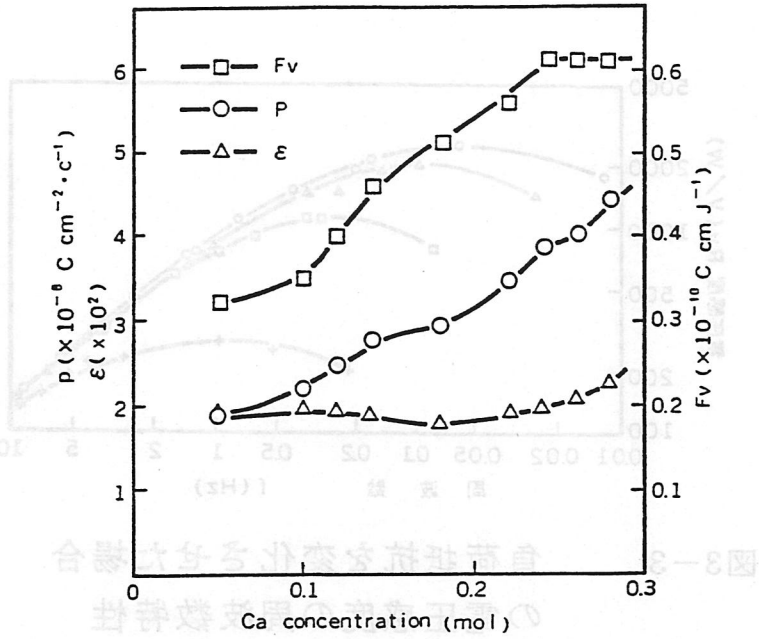


図3-1  $(\text{Pb}_{1-x}, \text{Ca}_x)[(\text{Co}_{1/2} \text{W}_{1/2})\text{Ti}] \text{O}_3$  の焦電係数P、比誘電率 $\epsilon$ 、材料評価指数FvとCa量との関係

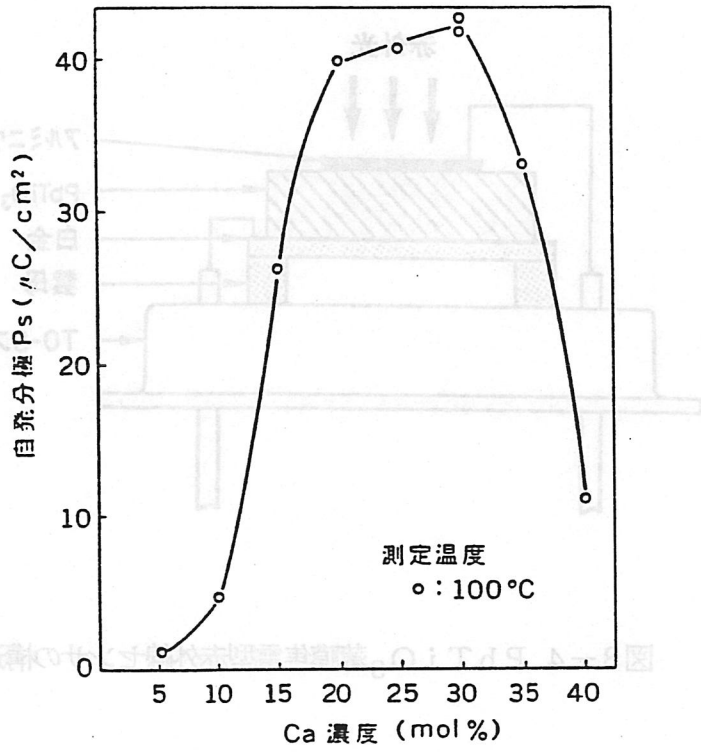


図3-2  $(\text{Pb}, \text{Ca})[(\text{Co}_{1.2} \text{W}_{1.2})\text{Ti}] \text{O}_3$  セラミックスの自発分極とCa濃度との関係

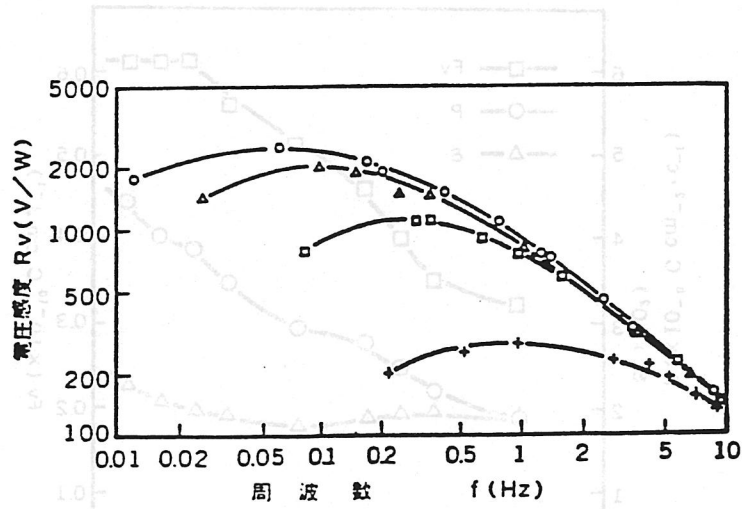


図3-3 負荷抵抗を変化させた場合の電圧感度の周波数特性

○ :  $1 \times 10^{11} \Omega$  (負荷抵抗なし)    □ :  $5 \times 10^9 \Omega$   
 △ :  $5 \times 10^{10} \Omega$     + :  $5 \times 10^8 \Omega$

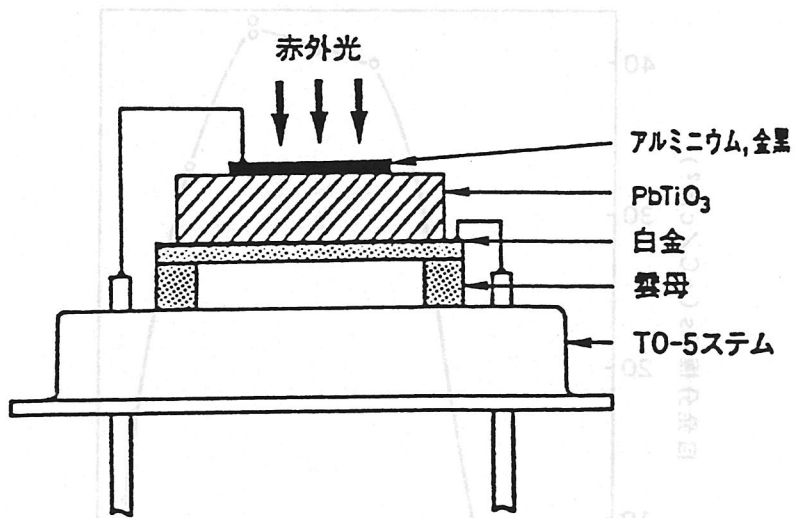


図3-4 PbTiO<sub>3</sub>薄膜焦電型赤外線センサの構造

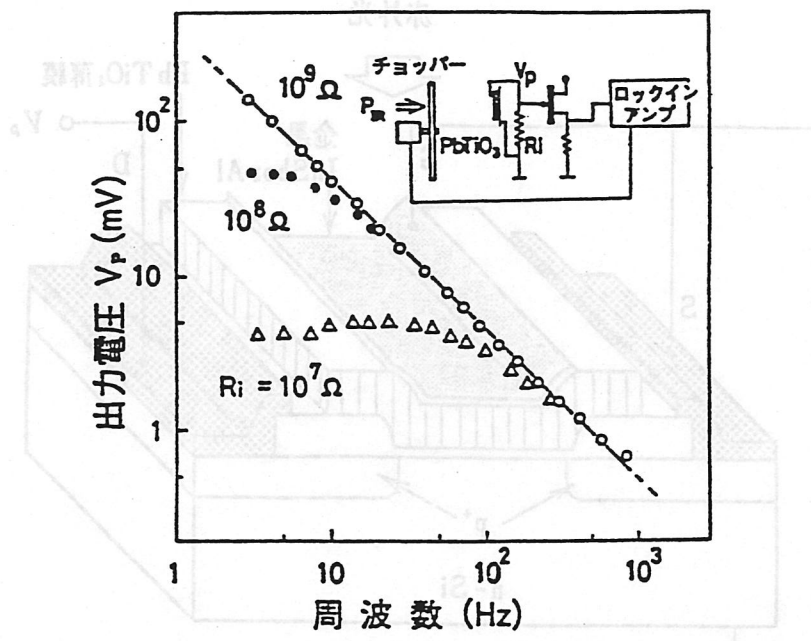


図3-5 PbTiO<sub>3</sub>薄膜の焦電電圧の周波数依存性

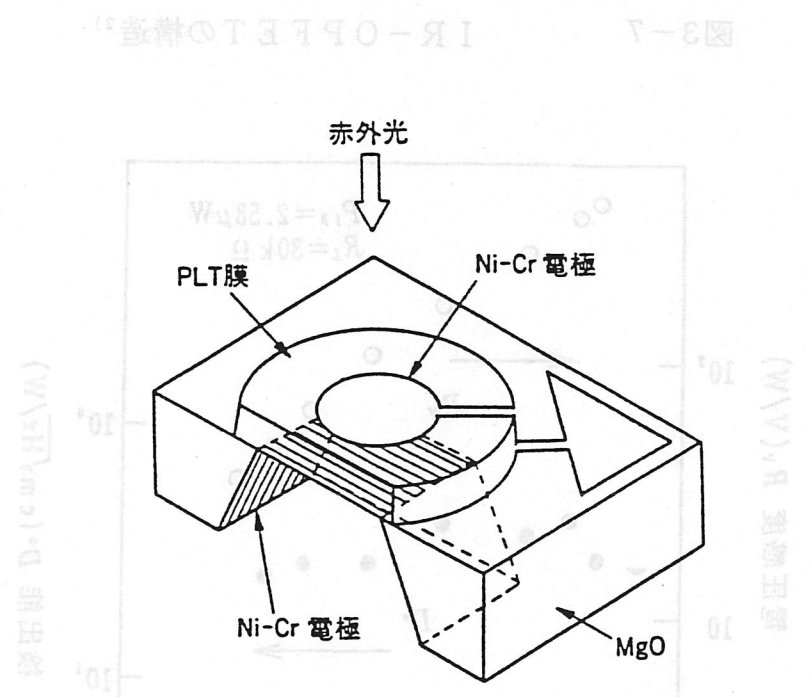


図3-6  $Pb_{1-x}La_xTi_{1-x/4}$ 薄膜焦電型赤外線センサの構造

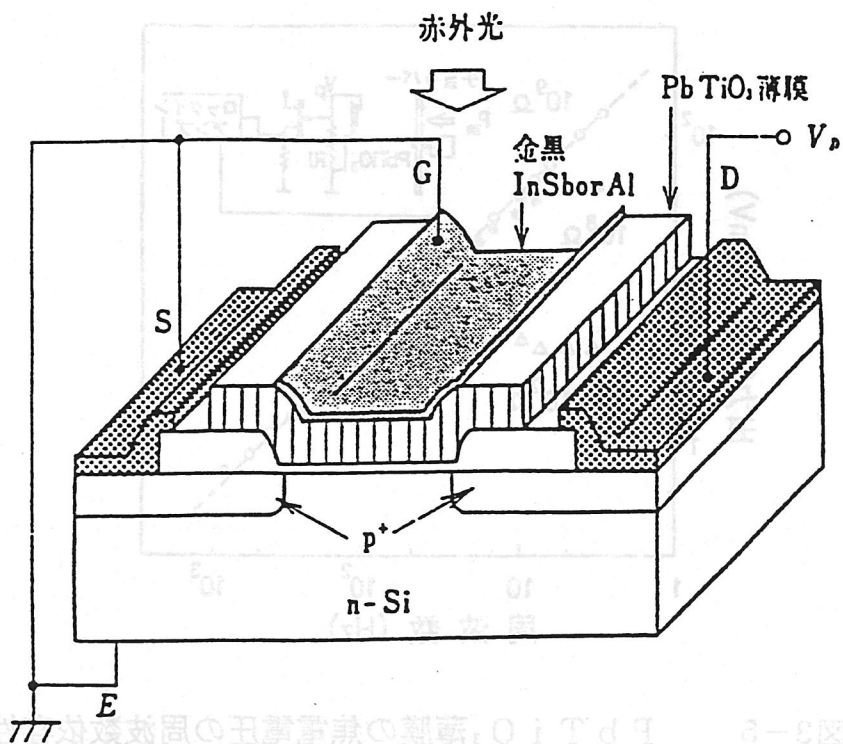


図3-7 IR-OPFETの構造<sup>2)</sup>

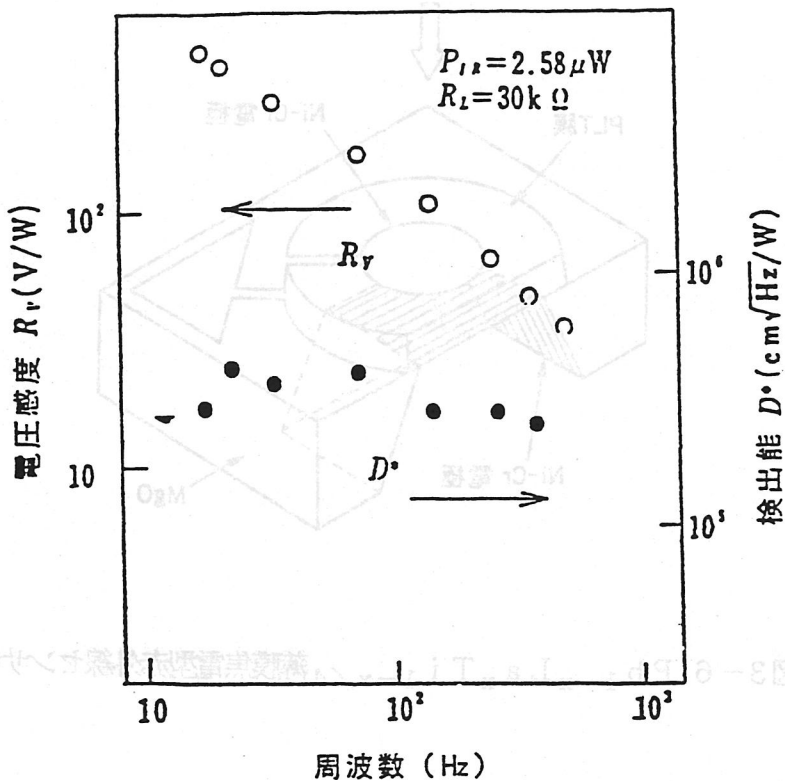


図3-8 IR-OPFETの電圧感度 $R_v$ と検出能の周波数依存性

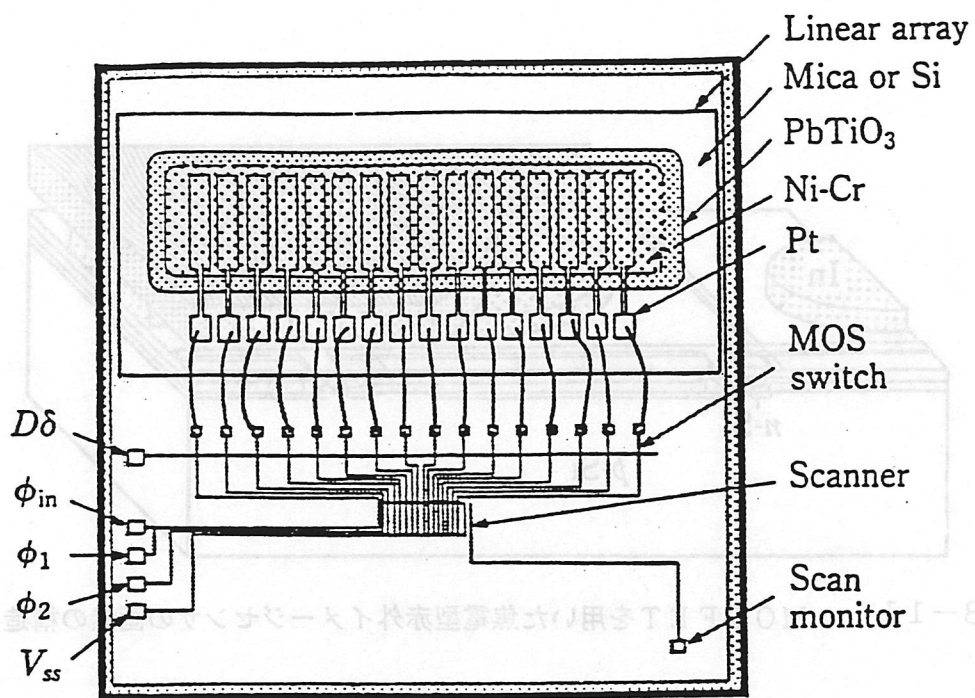


図3-9 16素子ハイブリッドリニア赤外線センサ

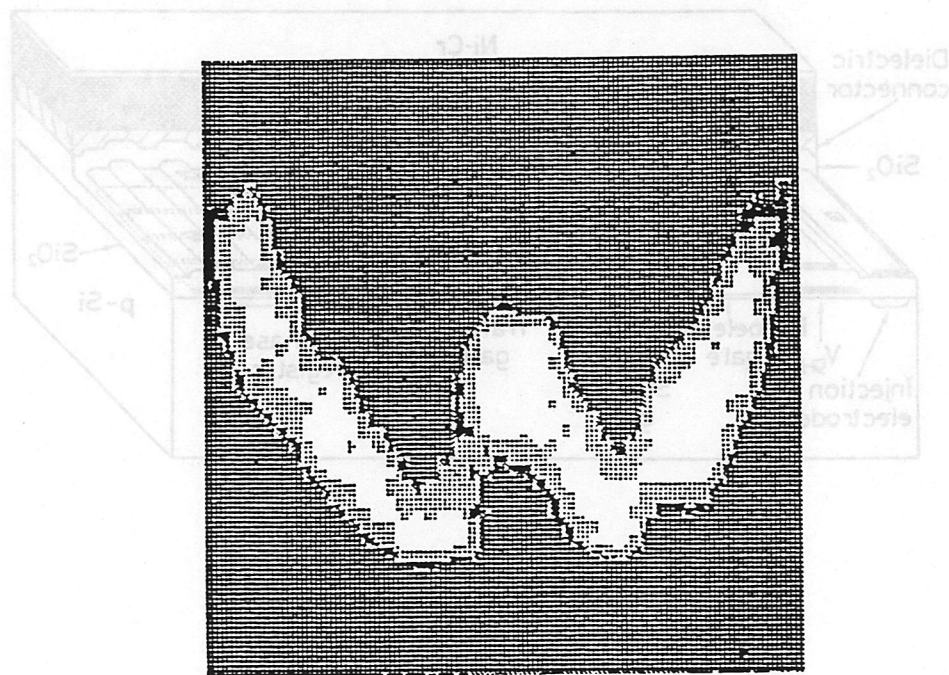


図3-10 W形状ニクロムワイヤの熱イメージ

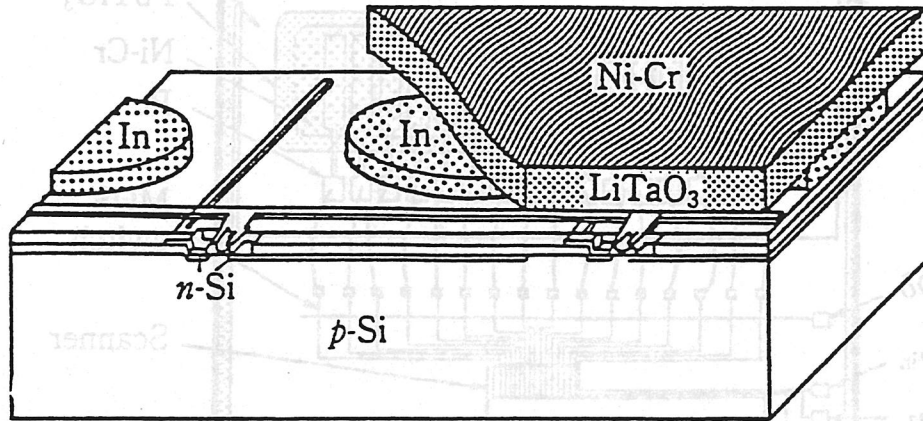


図3-11 MOSFETを用いた焦電型赤外イメージセンサの画素の構造

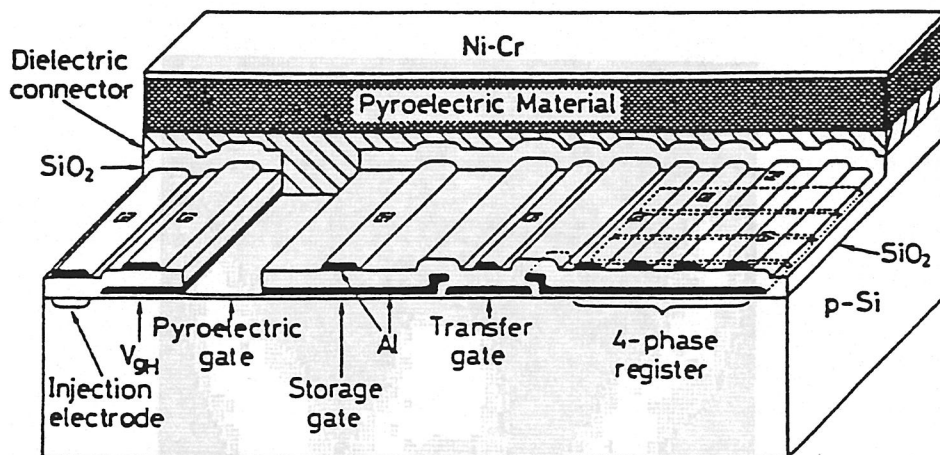
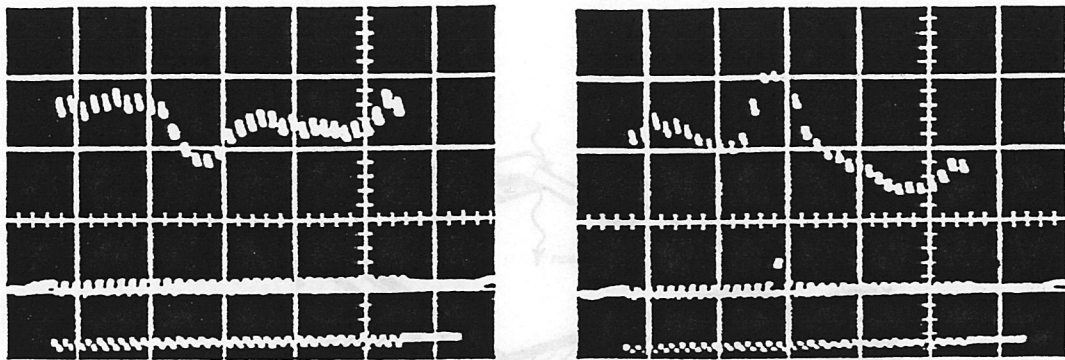


図3-12 焦電型赤外線CCDの画素の構造



(a)スポット光照射

(b)スポット光照射直後

縦軸：5 V/cm/div, 横軸：0.5 ms/div

図3-13 赤外線CCDの出力信号<sup>9)</sup>

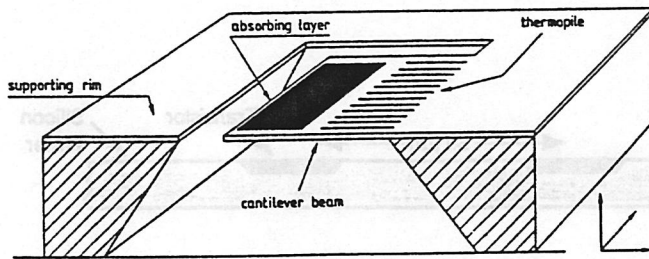


図3-14 カンチレバービーム赤外線センサの構造図

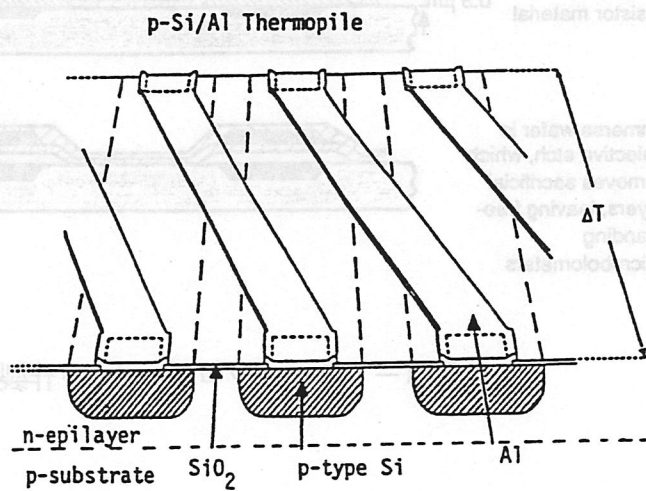


図3-15集積化Si/Alサーモパイルの構造図

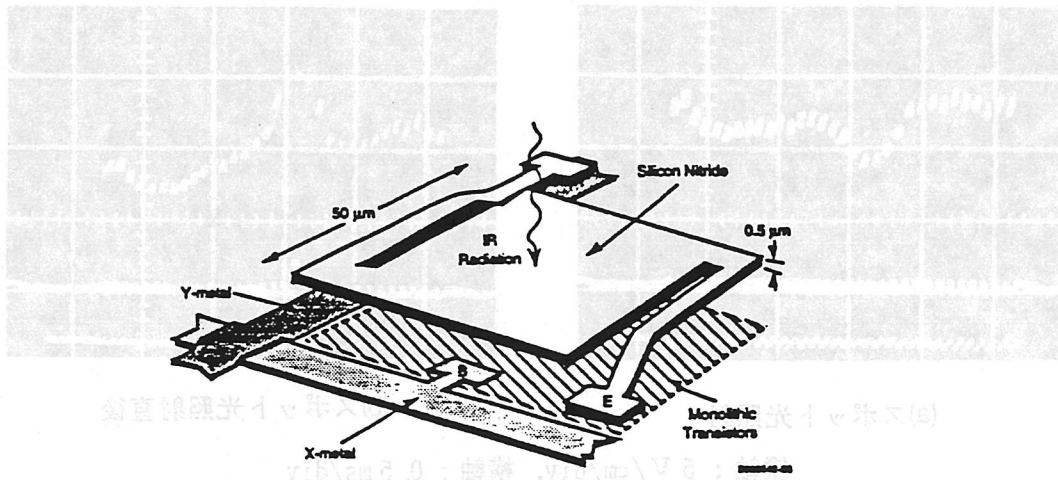


図3-16 マイクロボロメータの画素構造

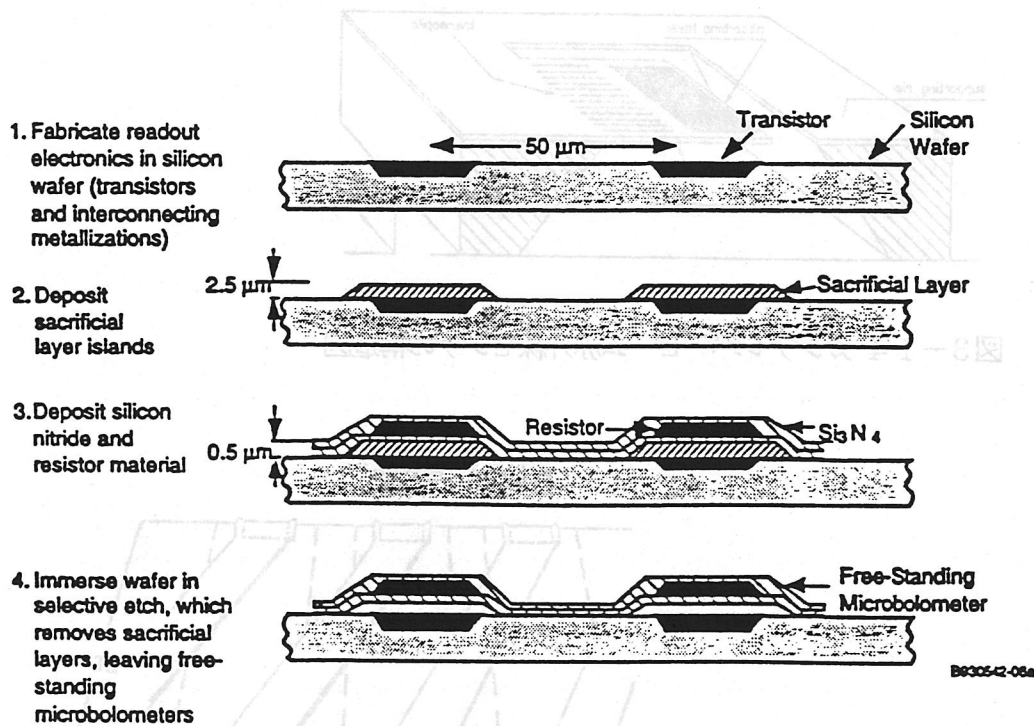


図3-17 マイクロボロメータ作製プロセス

表 3 HgCdTe光電導型一次元センサの特性

センサの種類	3 - 5 $\mu\text{m}$ 帯用	10 $\mu\text{m}$ 帯用
素子温度 (K)	220	80
ピーク波長 ( $\mu\text{m}$ )	5	11.5
素子数	16	100
素子サイズ ( $\mu\text{m}$ )	50 $\times$ 50	50 $\times$ 50
素子ピッチ ( $\mu\text{m}$ )	100	100
素子抵抗 ( $\Omega$ )	200	50
バイアス電流 (mA)	0.3	3
測定周波数 (kHz)	1	1
$D^* \lambda_p$ ( $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ )	$5 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{10}$
$R \lambda_p$ (V/W)	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^5$
時定数 ( $\mu\text{s}$ )	<2	<1

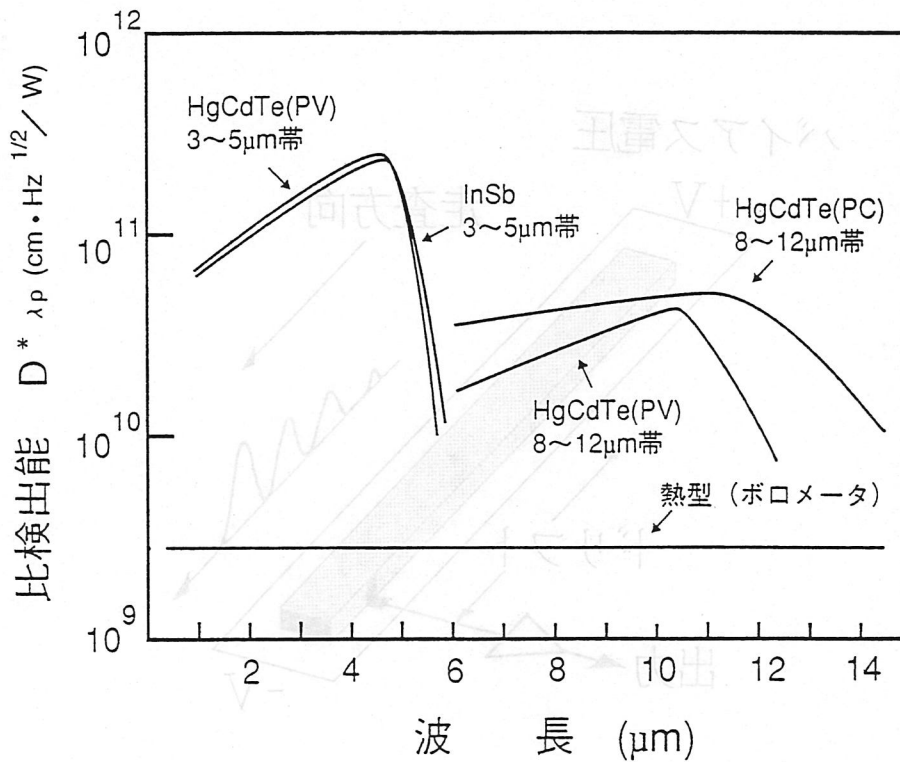


図 18 主要な赤外線センサの感度特性

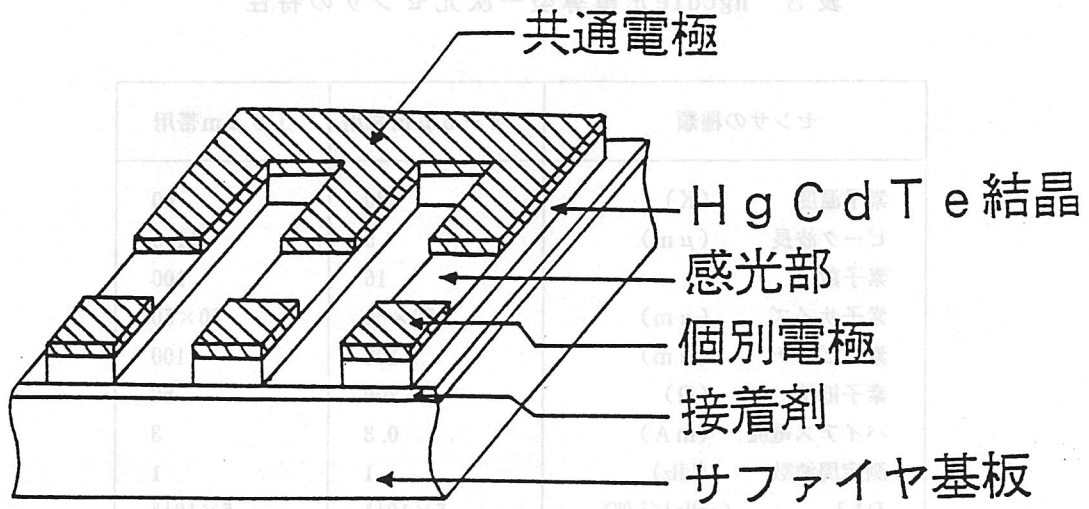


図19 HgCdTe光導電型一次元アレイの構造

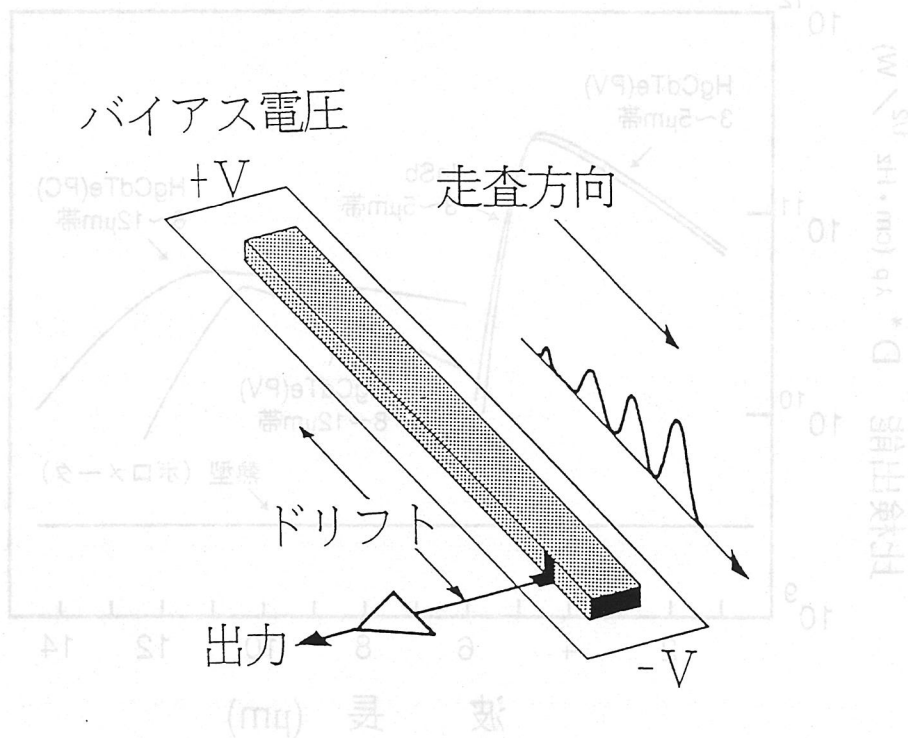


図20 SPRITE型センサ<sup>21)</sup>

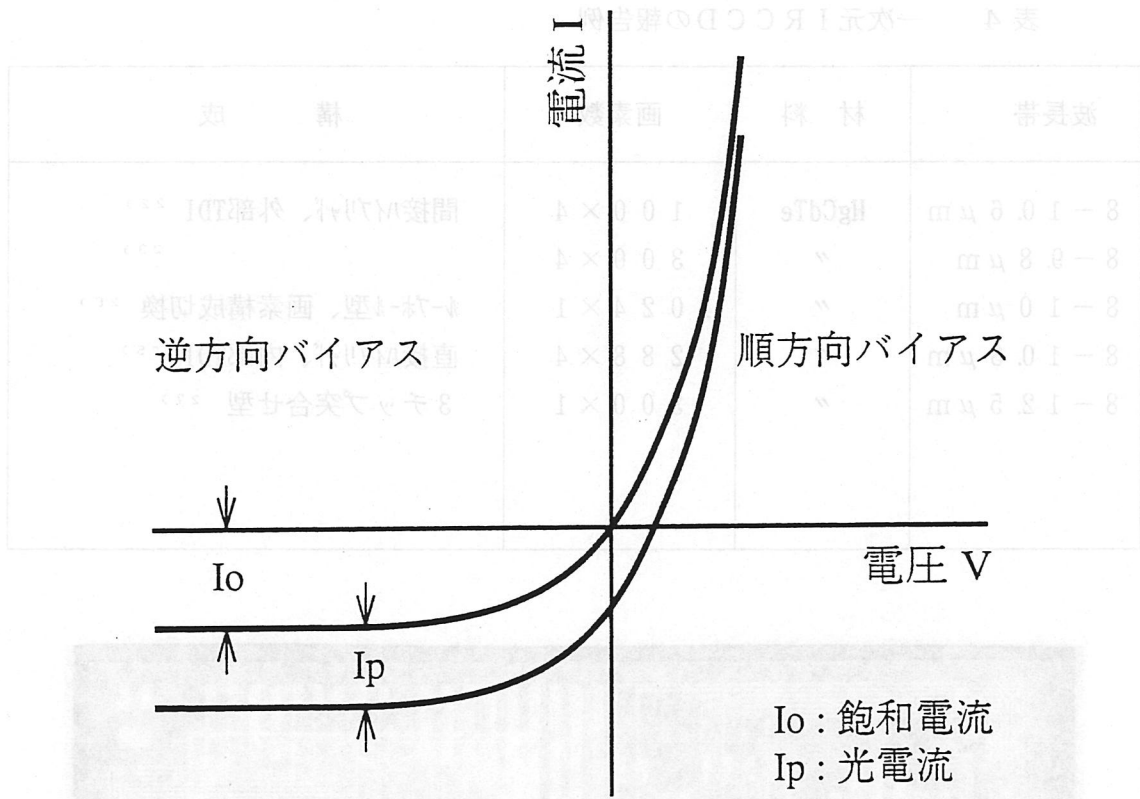


図 2 1 p n 接合ダイオードの電圧-電流特性

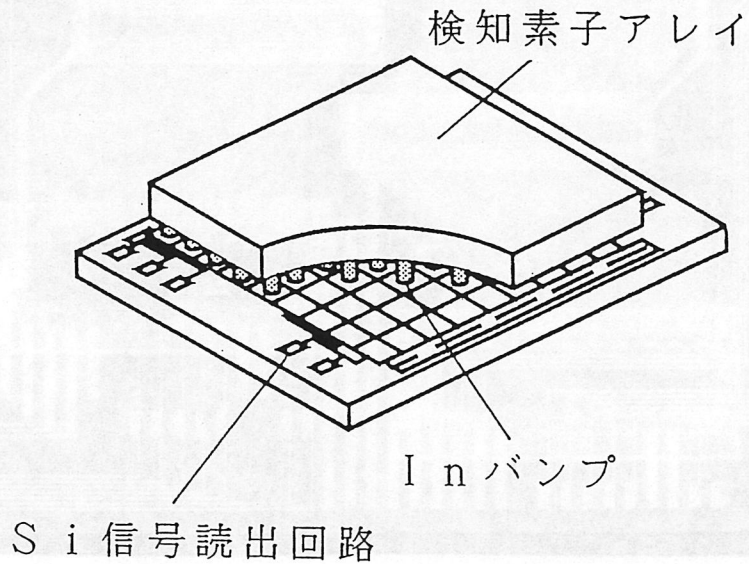


図 2 2 ハイブリッド IRCCD の構成

表 4 一次元 IRCCD の報告例

波長帯	材 料	画素数	構 成
8 - 10.6 $\mu\text{m}$	HgCdTe	100 $\times$ 4	間接ハイブリッド、外部TDI <sup>22)</sup>
8 - 9.8 $\mu\text{m}$	"	300 $\times$ 4	<sup>23)</sup>
8 - 10 $\mu\text{m}$	"	1024 $\times$ 1	ループホール型、画素構成切換 <sup>26)</sup>
8 - 10.3 $\mu\text{m}$	"	288 $\times$ 4	直接ハイブリッド、内部TDI <sup>25)</sup>
8 - 12.5 $\mu\text{m}$	"	300 $\times$ 1	3チップ突合せ型 <sup>27)</sup>

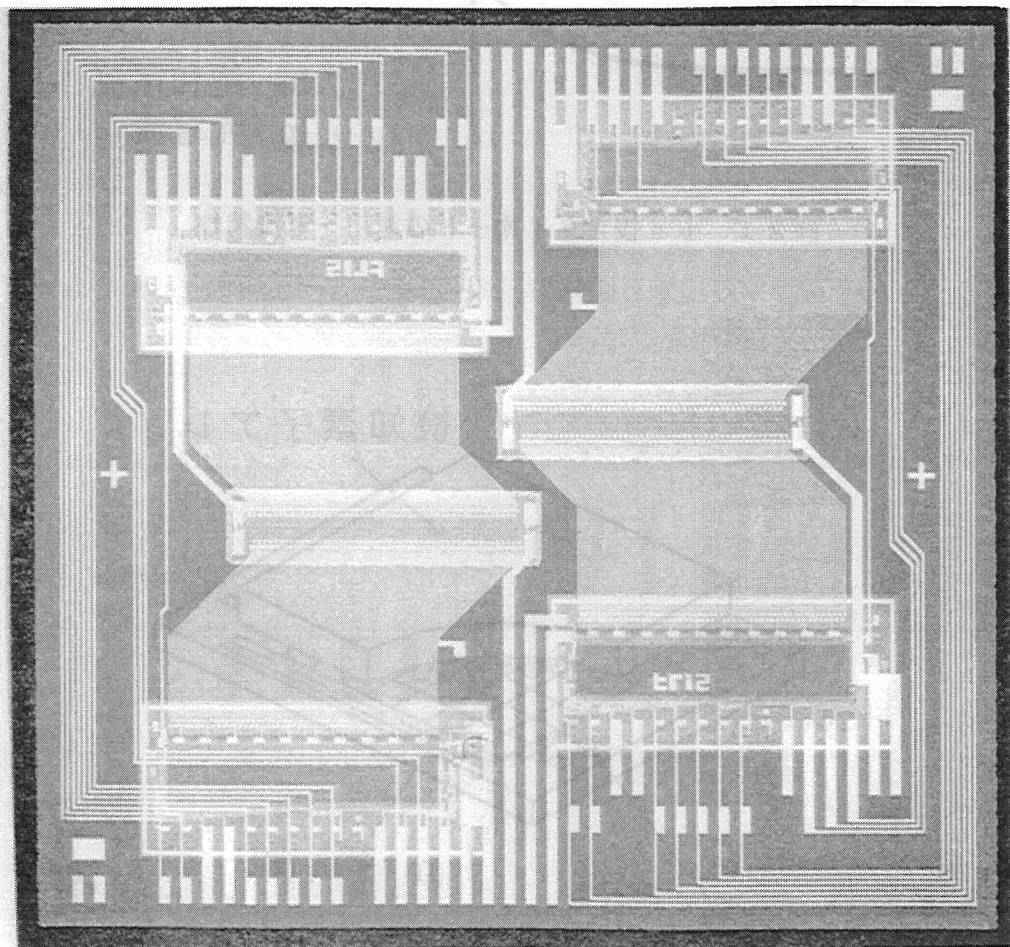


図 23 100画素4段TDI-IRCCD

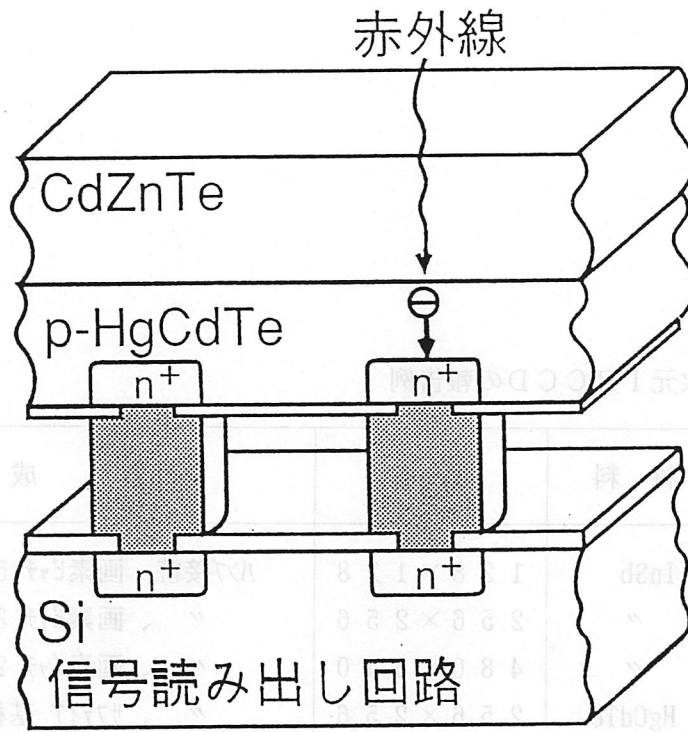


図24 バンプ接続構造

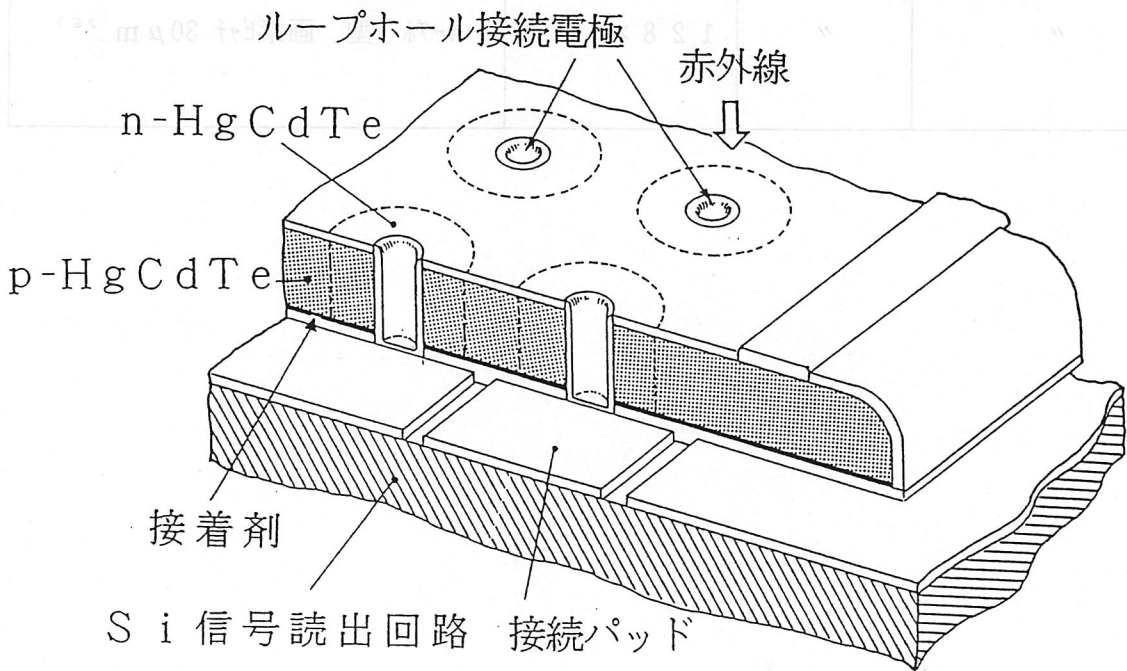


図25 ループホール接続構造<sup>26)</sup>

図 2-2

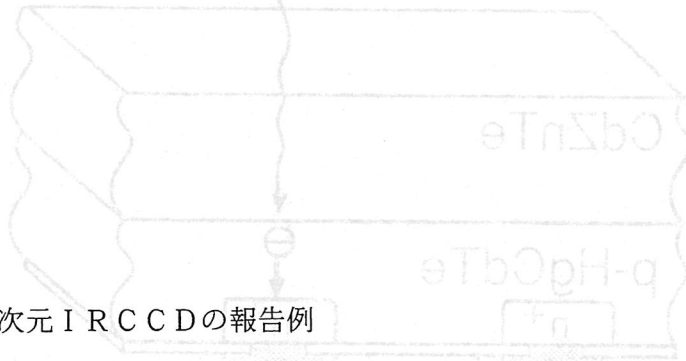
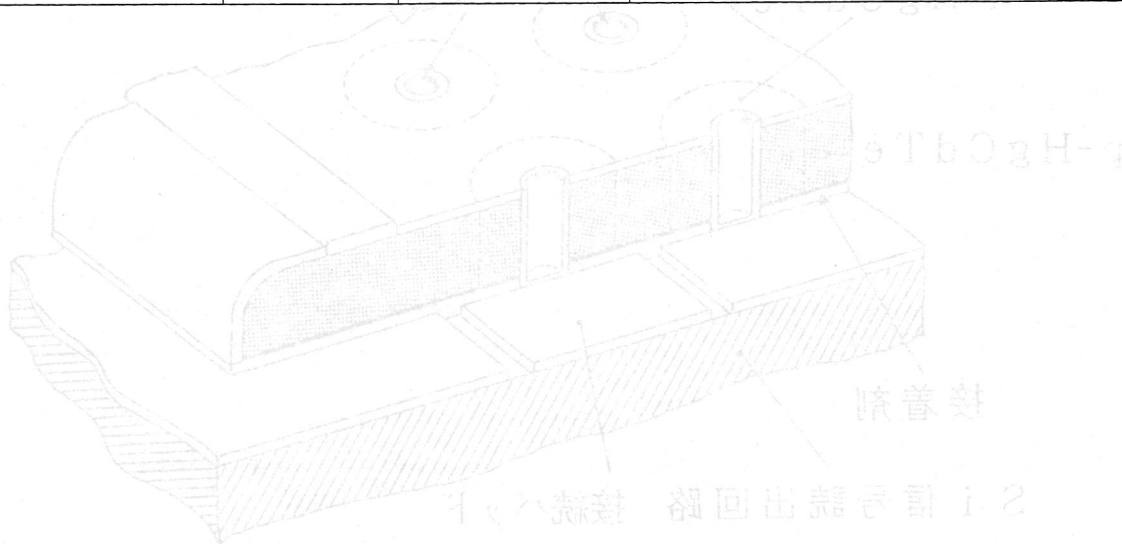
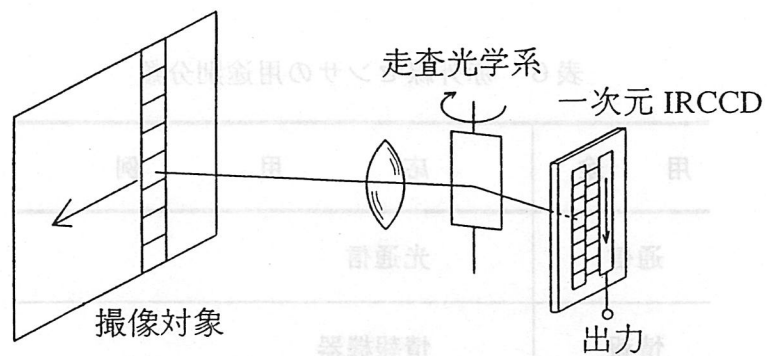


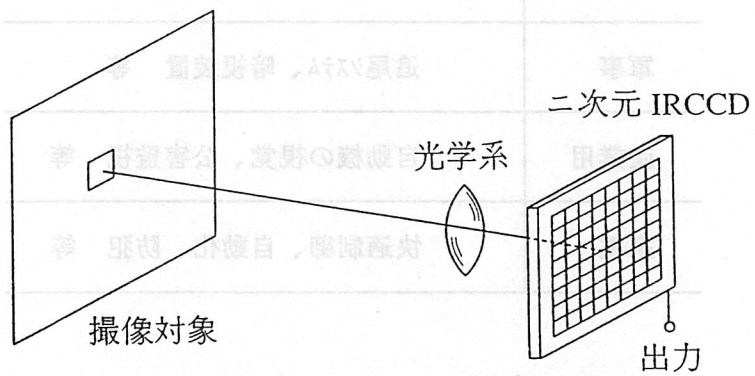
表 5 二次元 IR CCD の報告例

波長帯	材 料	画素数	構 成
1 - 5.5 $\mu\text{m}$	InSb	1 2 8 $\times$ 1 2 8	バンパ接続 画素ピッチ 50 $\mu\text{m}$ <sup>28)</sup>
0.5 - 5.4 $\mu\text{m}$	"	2 5 6 $\times$ 2 5 6	"、画素ピッチ 30 $\mu\text{m}$ <sup>24)</sup>
"	"	4 8 0 $\times$ 6 4 0	"、画素ピッチ 20 $\mu\text{m}$ <sup>24)</sup>
1 - 2.5 $\mu\text{m}$	HgCdTe	2 5 6 $\times$ 2 5 6	"、サファイア 基板使用 <sup>29)</sup>
3 - 5 $\mu\text{m}$	"	2 5 6 $\times$ 2 5 6	"、サファイア 基板使用 <sup>29)</sup>
$\lambda_c = 3.2 \mu\text{m}$	"	1 2 8 $\times$ 1 2 8	電子冷却(200K) <sup>30)</sup>
$\lambda_c = 5.0 \mu\text{m}$	"	1 2 8 $\times$ 1 2 8	" (180K) <sup>24)</sup>
$\lambda_c = 4.6 \mu\text{m}$	"	1 2 8 $\times$ 1 2 8	" (180K) サファイア 基板使用 <sup>31)</sup>
8 - 10 $\mu\text{m}$	"	6 4 $\times$ 6 4	バンパ接続 <sup>32, 33)</sup>
"	"	1 2 8 $\times$ 1 2 8	ループホール型、画素ピッチ 30 $\mu\text{m}$ <sup>26)</sup>





(a) 一次元 IRCCD を用いた構成



(b) 二次元 IRCCD を用いた構成

図 26 赤外線撮像装置の構成

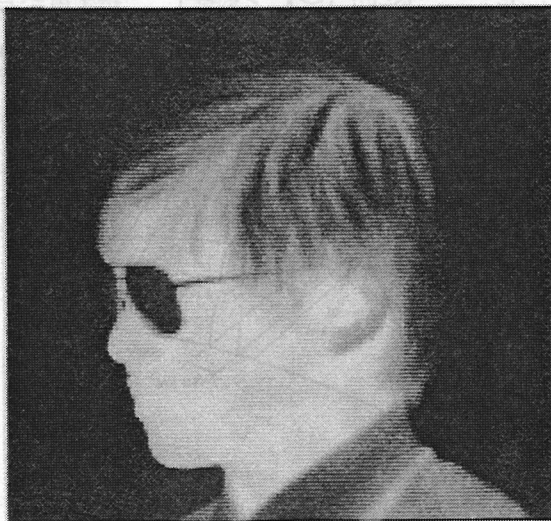


図 27 赤外面像例

表6 赤外線センサの用途別分類

用途	応用 例
通信	光通信
情報	情報機器
宇宙	気象衛星、資源探査衛星
軍事	追尾システム、暗視装置 等
産業用	自動機の視覚、公害監視 等
家電	快適制御、自動化、防犯 等

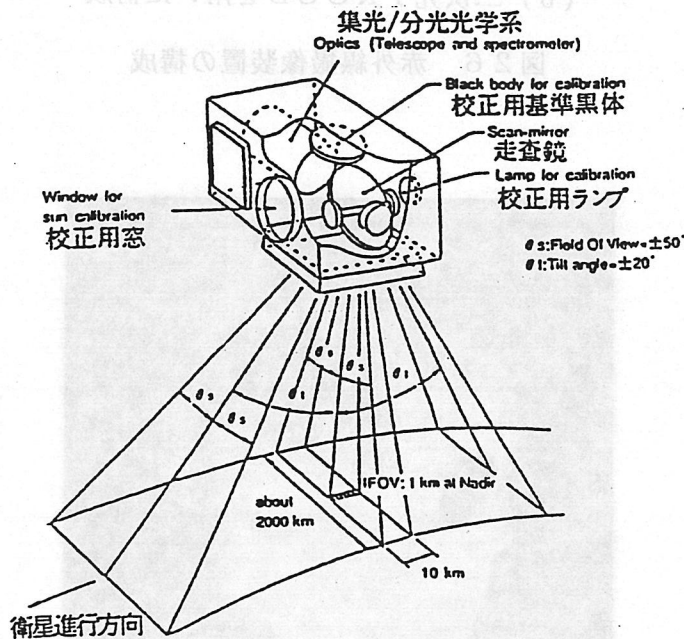


図28 GLI (Global Imager)の概観<sup>36)</sup>

図解面代表 7 2 図

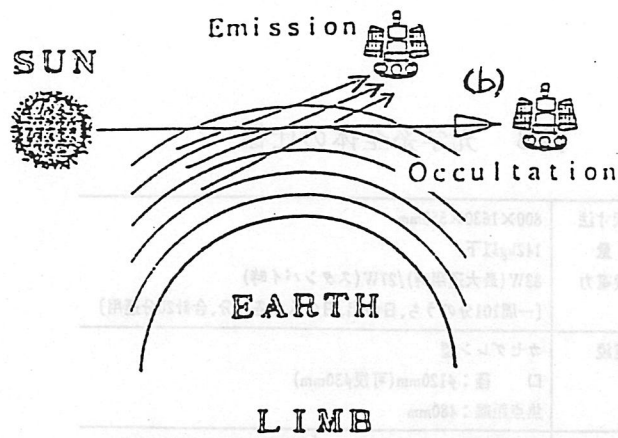


図 2 9 分子の放射、吸収による大気環境観測の概念図<sup>37)</sup>

表 7 I L A S の測定対象範囲<sup>38)</sup>

	チャンネル 1	チャンネル 2
波長域	6.2~11.8 $\mu\text{m}$ (1610~850 $\text{cm}^{-1}$ )	0.753~0.784 $\mu\text{m}$ (13280~12755 $\text{cm}^{-1}$ )
測定対象項目	O <sub>3</sub> 、HNO <sub>3</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、 H <sub>2</sub> O、NO <sub>2</sub>	大気温度・密度 エアロゾル
測定高度	10~60km	
高度分解能	2 km	
視野	2 km×13km	2 km×2 km

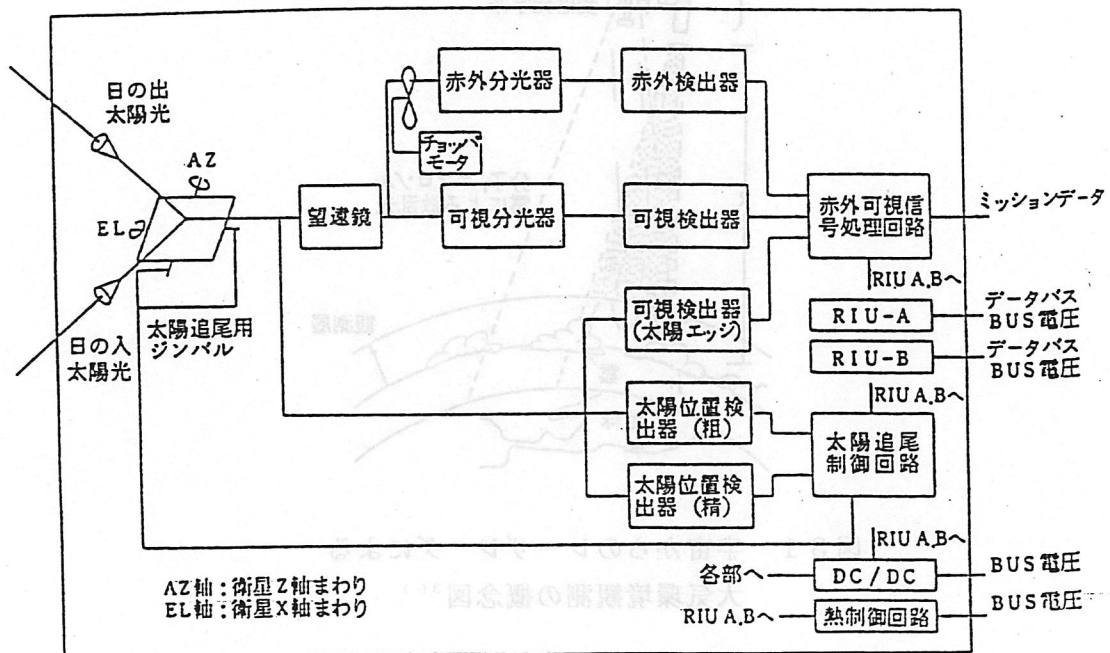


図 3 0 I L A S 全体構成ブロック図<sup>38)</sup>

表8 光学系全体の仕様<sup>38)</sup>

全 体 構 成	形状寸法	800×1630×550mm	
	重量	142kg以下	
光 学 系	消費電力	83W(最大運用時)/27W(スタンバイ時) [一周101分のうち、日の出、日の入り各10分、合計20分運用]	
	望遠鏡	カセグレン型 口 径：φ120mm(可視φ30mm) 焦点距離：480mm	
分 光 器	赤外分光器(チャネル1)	可視分光器(チャネル2)	
	形式	クロスツェルニーターナー型 グレーティング：30本/mm F/4.0	凹面ホログラフィックグレー ティング：1803本/mm相当 F/8(出射側)
検 出 器	44素子焦電型リニア検出器 (PbTiO <sub>3</sub> セラミックス) 素子ピッチ：0.4mm 0.38×2mm/1素子	1024素子ホットダイオード アレイ 素子ピッチ：0.025mm 0.02×2.5mm/1素子	
	波長分解能	0.129μm/1素子	0.030nm/1素子

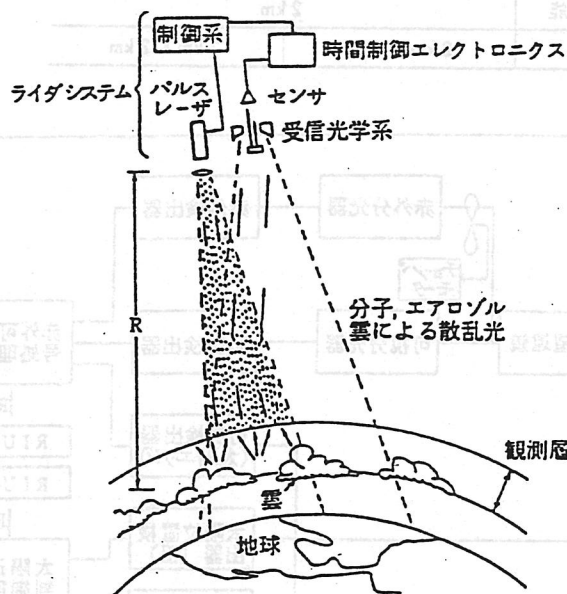


図31 宇宙からのレーザーレーダによる  
大気環境観測の概念図<sup>36)</sup>

表9 衛星からの大気観測方式 (passive)と赤外センサ<sup>37)</sup>

観測方向	光源	センサー	搭載衛星	検出法/分散系	測定対象
地心 (nadir)	熱放射	HIRS	NOAA	回折格子	温度・水分鉛直分布 温度・水分・CH <sub>4</sub> ・N <sub>2</sub> O CO・O <sub>3</sub> 鉛直分布 温室効果気体 対流圏汚染気体
		AIRS	EOS-A	高分解回折格子	
地球周縁 (limb)	太陽 (solar occultation)	ATMOS	STS	FT-IR	微量気体 CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , エアロゾル
	熱放射	ILAS	ADEOS	回折格子/焦電センサー	
地球周縁 (limb)	熱放射	LIMS	NIMBUS-7	回折格子	H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> 温度 成層圏微量気体 O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CFC, HCl, ClO, ClONO <sub>2</sub> 温度, CO, H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub> , エアロゾル
		TES	EOS-B	FT-IR	
		CLAES	UARS	回転エタロン	
地球周縁 (limb)	熱放射	ISAMS	UARS	圧力変調セル	

(センサー名)

- HIRS : High Resolution Infrared Vertical Sounder  
 AIRS : Atmospheric Infrared Sounder  
 IMG : Interferometric Monitor of Greenhouse Gases  
 TES : Tropospheric Emission Spectrometer  
 ATMOS : Atmospheric Trace MOlecule Spectroscopy Experiment  
 ILAS : Improved Limb Atmospheric Spectrometer  
 LIMS : Limb Infrared Monitor of the Stratosphere  
 CLAES : Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer  
 ISAMS : Improved Stratospheric And Mesospheric Sounder

(衛星名)

- NOAA : 米国気象海洋庁 (NOAA) が打上げている極軌道気象衛星  
 ADEOS : Advanced Earth Observation Satellite (科技厅)  
 EOS-A, B : Earth Observation System, -A, -B series  
 STS : Space Transportation System (Space Shuttle の正式名)  
 Nimbus-7 : 乱雲 (Nimbus) にちなんだ実験衛星シリーズ7号  
 UARS : Upper Atmosphere Research Satellite

表10 レーザレーダにおける光と物質の相互作用と計測対象<sup>36)</sup>

(◎は人工衛星観測に適した項目)

計測する変化量	相互作用	測定物理量	導出される状態量
強度 (波長不変)	ミー散乱	◎ エアロゾル密度 汚染粒子 ◎ 雲・霧・水晶密度 雲底・ ◎ 雲頂高度	視程, 風向, 風速 ◎ 大気境界層高度・構造 移流・拡散 降雪・降雨状況
	(多波長) レイリー散乱	◎ 超高層大気密度 対流圏大気分子密度	組成, 粒径分布 ◎ 密度重力波 ◎ 超高層温度 大気温度
	共鳴散乱	◎ 原子密度 (Na, K, Ca, Na <sup>+</sup> , Ca <sup>+</sup> ...)	
	差分吸収	◎ 水蒸気密度 ◎ 大気分子密度 ◎ 汚染分子密度 (NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , ...)	◎ 気圧, 気温
(波長変化)	蛍光	海洋廃油, 水中の藻, クロロ フィル, 鉍物 分子密度(OH, NO <sub>2</sub> ...)	植生・活性度
	ラマン散乱	大気分子密度 汚染分子密度 (N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , ...)	大気温度, 湿度, 視程, 水温
周波数(位相) (ドブラ)	ミー散乱	◎ 風速, ◎ 物体移動速度	◎ 風向
偏光	レイリー散乱		大気乱流, 渦流形状
時間	ミー散乱		組成, 形状
	幾何光学反射	◎ 距離, ◎ 高度	◎ 物体形状, ◎ 表面特性 水深, 地殻変動, 重力分 布, 月面振動
(他のレーザセンサ)			
長光路吸収分光計 強度	吸収	原子・分子の平均密度 (Hg, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , ...)	
レーザヘテロダイン放射計 強度	放射	分子密度, 物体放射温度, 天体放射	

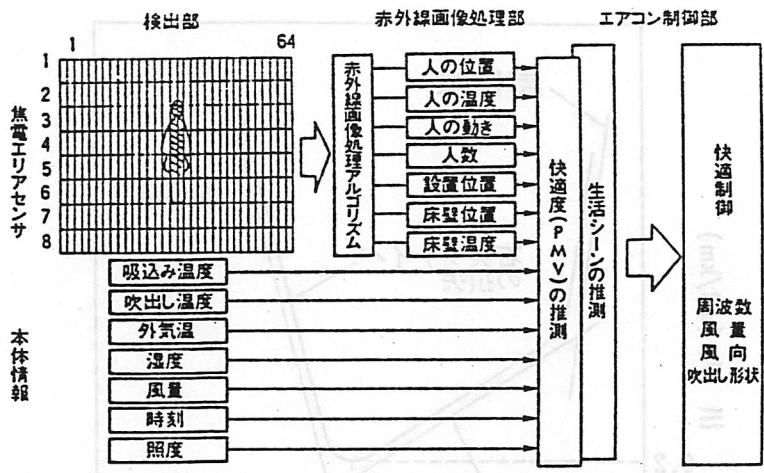


図32 エアコンの快適制御方法<sup>40,41)</sup>

表11 焦電形赤外検出器の応用例<sup>39)</sup>

[ ] ; 開発中

用途	ポイント検出器	一次元検出器	二次元検出器
軍用		[ 対戦車用 ]	[ ミサイルの眼 ]
宇宙用	衛星姿勢センサ (地球センサ) スピン形 三軸安定形	分光分析観測機器 (オゾンセンサ)	
産業用	放射温度計 排ガス測定器 公害ガス測定器 大気垂直温度分布 測定装置 測定器ON/OFF エレベータ位置測定器	工程温度管理装置 (鉄鋼)	パイロピシコン
民生用	人体検知用センサ 侵入警報器 家電用 電子レンジ 扇風機 火災警報器	[ エアコン ]	

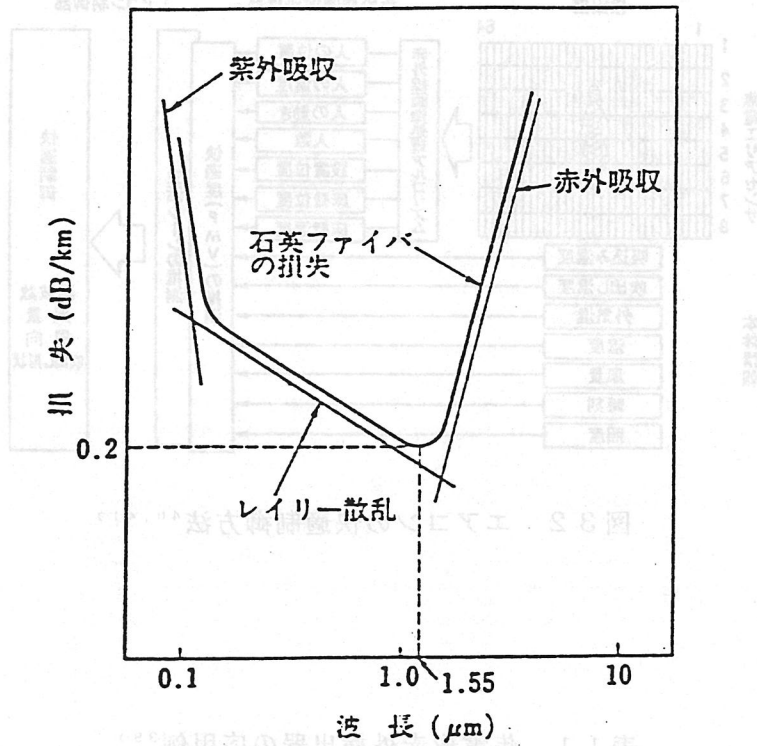


図 3 3 石英系光ファイバの伝送特性

器出射光二	器出射光一	器出射光三	器出射光四
[器出射光二]	[器出射光一]		

表 1 2 A P D の 特 性 <sup>46)</sup>

	Si-APD n <sup>+</sup> -π-p-π	Si-APD p <sup>+</sup> -p-π	Ge-APD p <sup>+</sup> -n	InGaAs-APD ホモ接合	InGaAs/InP- APD(SAM)
受光径, μm	150	150	100	100	140
降 電圧, V	100	140	30	50	80
暗電流, A	3 × 10 <sup>-11</sup>	1.4 × 10 <sup>-9</sup>	1.5 × 10 <sup>-7</sup>	>10 <sup>-6</sup>	8 × 10 <sup>-8</sup>
量子効率, %	65	90	80	60	52
(波長, μm)	(0.85)	(0.81)	(1.3 - 1.5)	(1.6)	(1.6)
静電容量, pF	1.5	2.4	<1.5	<1	<1
イオン化係数比, k	0.03	0.035	0.7	-	0.35
雑音指数, dB	3.3	3.4	8.8	-	6.8
パルス応答, ps	270	330	200	200	225
周波数帯域, GHz	1.5	0.6	>2	>2	1.5

\* 降伏電圧の90%

\*\* 増倍率10

$$k = \begin{cases} \beta/\alpha & (\text{電子注入}) \\ \alpha/\beta & (\text{正孔注入}) \end{cases}$$

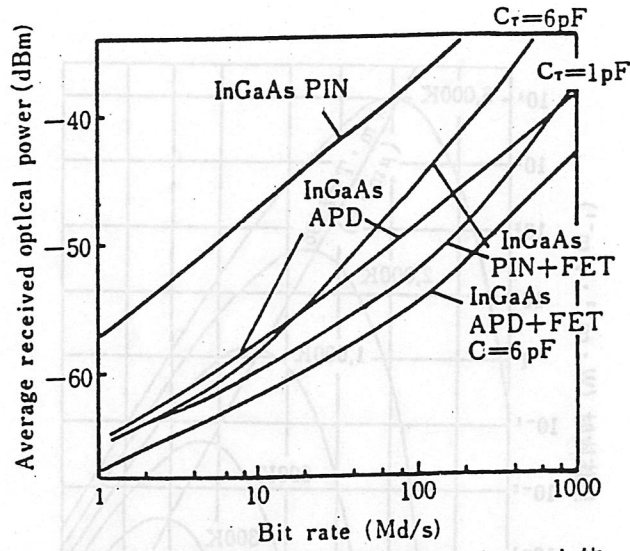


図 3 4 各受光素子の受信レベルのビットレート依存性<sup>4) 5)</sup>(計算値),  $C_r$ はInGaAs PIN+FETの全容量値で, 1pF, 6pFの場合について計算してある。

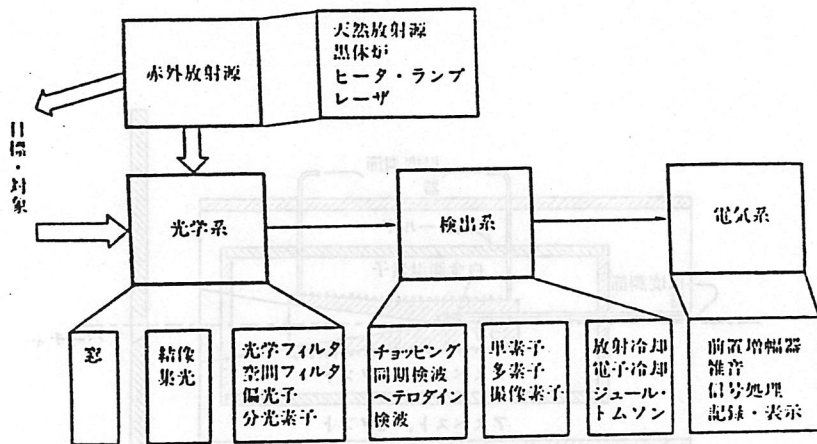


図 3 5 システムの構成要素<sup>4) 7)</sup>

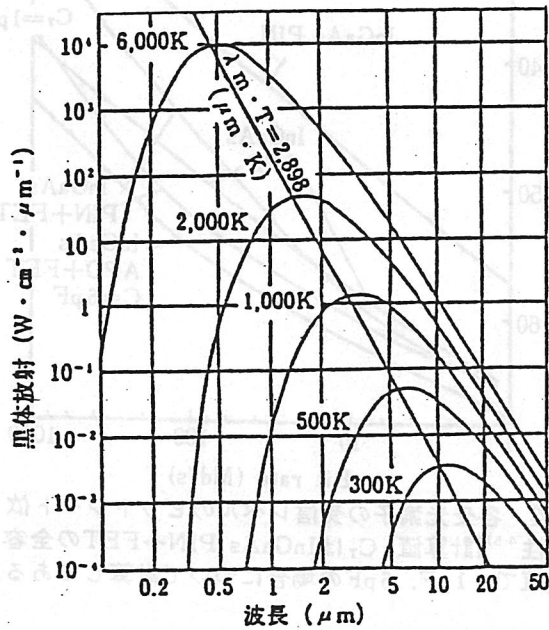


図 3 6 黒体放射分布

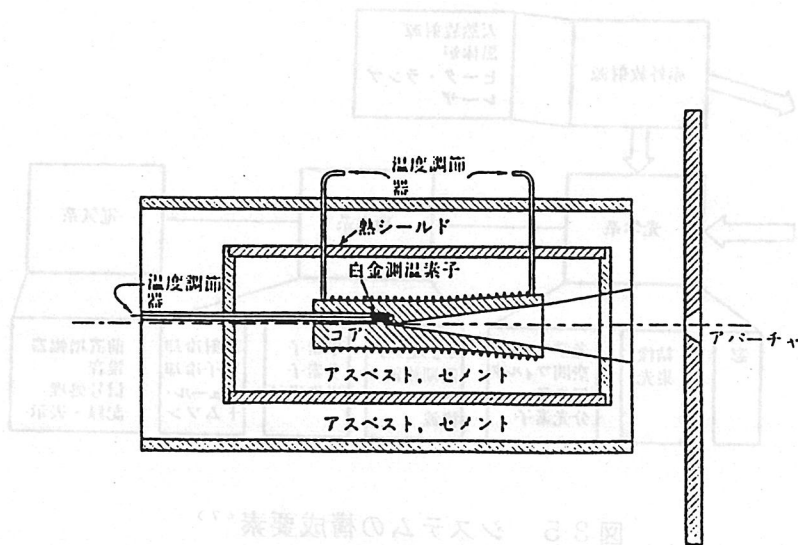


図 3 7 代表的な黒体炉の構造<sup>47)</sup>

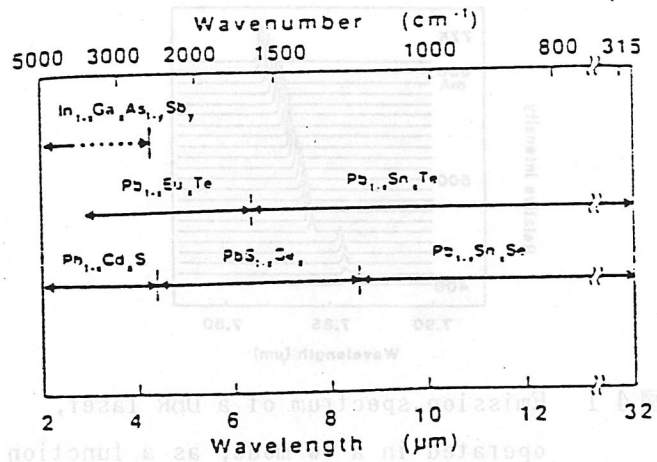


图 38 Wavelength ranges for semiconductor lasers made from different alloys and compositions<sup>50)</sup>

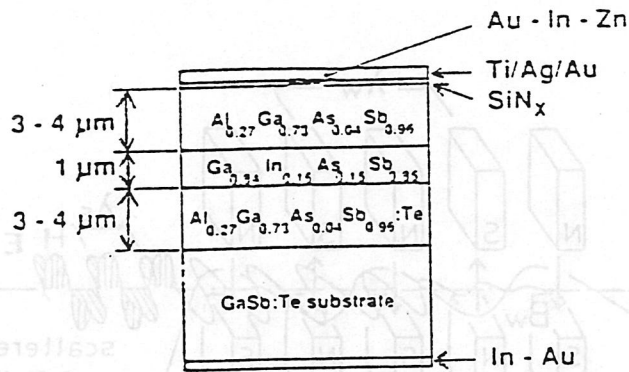


图 39 Schematic representation of a GaInAsSb stripe lasers<sup>50)</sup>

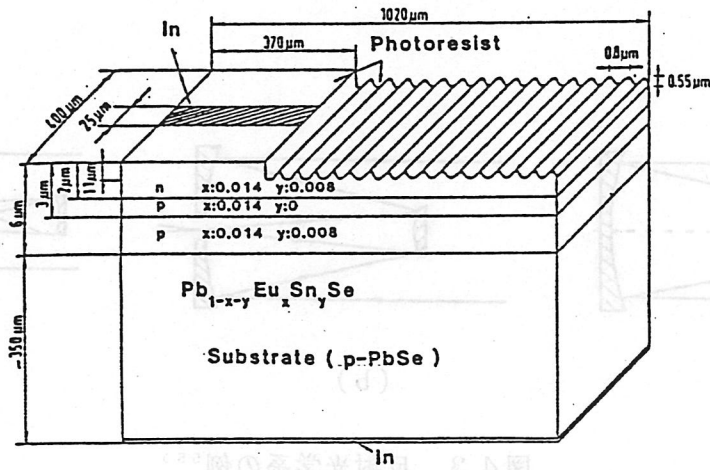


图 40 Schematic description of a distributed Bragg reflection (DBR) laser<sup>50)</sup>

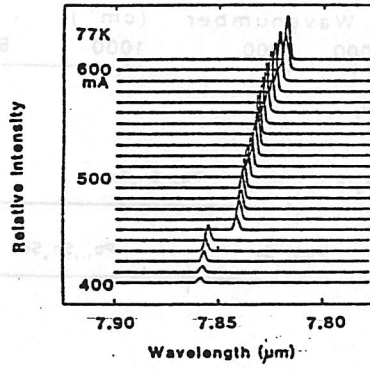


図 4 1 Emission spectrum of a DBR laser, operated in a cw mode, as a function of the injection currents (10mA steps) at 77K<sup>50)</sup>

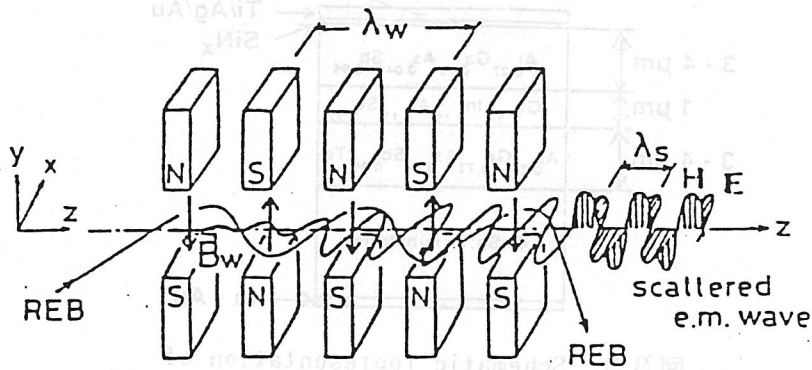


図 4 2 Static periodic magnetic field wiggler and scattered c.m. wave<sup>51)</sup>

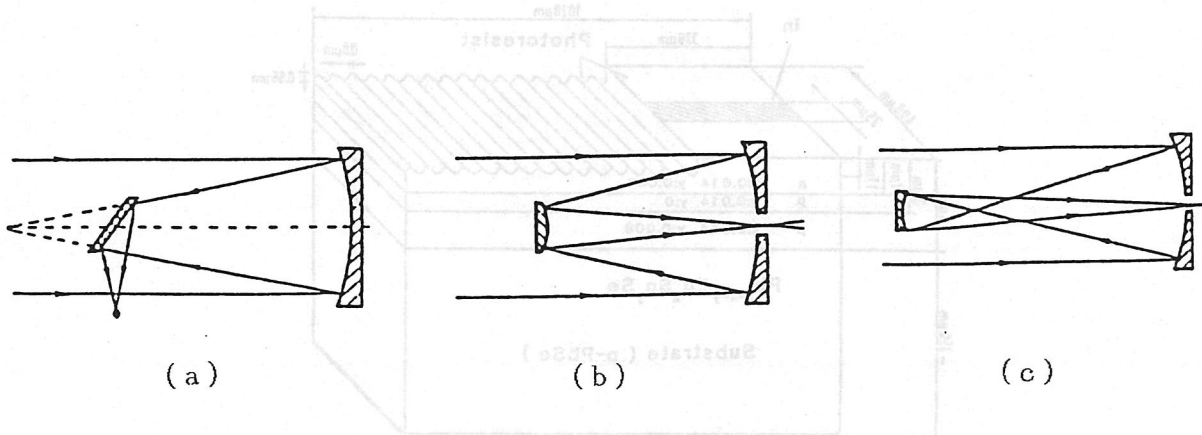


図 4 3 反射光学系の例<sup>55)</sup>

表13 主な赤外透明結晶の諸性質<sup>53)</sup>

(I) アルカリハライド

光学材料	透明領域 μm	屈折率 (5μm)	dn/dT 10 <sup>-5</sup> ·C <sup>-1</sup>	線膨張係数 10 <sup>-6</sup> ·C <sup>-1</sup>	熱伝導度 w/cm <sup>2</sup> ·C	硬度 Knoop	ヤング率 10 <sup>6</sup> psi	降伏力 psi	溶解度 (20°C) g/100g水
NaCl	0.2~15	1.52	-2.5	4.4	0.065	15	5.8	570	36
KCl	0.4~21	1.47	-2.7	3.6	0.065	7	4.3	640	34.7
KBr	0.2~27	1.54	-4.0	4.3	0.048	6	3.9	480	65.2
KI	0.3~31	1.63	-5.0	4.3			5		144
CsBr	0.2~40	1.67	-7.9	4.8	0.010	20	2	2390	124
CsI	0.2~50	1.74	-8.5	5.0	0.011	Very soft	8		85.5
KRS5	0.6~40	2.61		5.8	0.054	40	2.3	3800	5×10 <sup>-2</sup>

(II) アルカリ土類フロライド

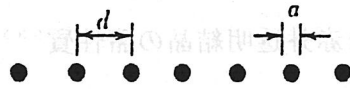
光学材料	透明領域 μm	屈折率 (5μm)	dn/dT 10 <sup>-5</sup> ·C <sup>-1</sup>	線膨張係数 10 <sup>-6</sup> ·C <sup>-1</sup>	熱伝導度 w/cm <sup>2</sup> ·C	硬度 Knoop	ヤング率 10 <sup>6</sup> psi	降伏力 psi	溶解度 (20°C) g/100g水
CaF <sub>2</sub>	0.1~12	1.43	-1.2	19.7	0.092	158	11.0	5300	0.13×10 <sup>-2</sup>
SrF <sub>2</sub>	0.3~11	1.44	-1.2	15.8	0.1		14.7	6100	
BaF <sub>2</sub>	0.3~8.5	1.47	-1.7	18.4	0.12	82	7.7	3900	0.12

(III) 半 導 体

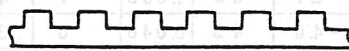
ダイヤモンド	0.25~80	2.41	+0.8	0.8	20		145	6×10 <sup>5</sup>	不溶
Ge	1.8~23	4.02	+2.8	6.0	0.59	700	15	13,500	不溶
Si	1.2~15	3.42	+1.6	2.3	1.48	1150	19	9,000	不溶
GaAs	0.9~18	3.34	+1.9	5.7	0.48	750	12	20,000	0.005
ZnS	0.4~12	2.26	+5.2	7.8	0.17	354	10.8	11,000	6.5×10 <sup>-5</sup>
ZnSe	0.5~22	2.45	+4.9	8.5	0.18	150	9.7	8,000	<0.001
CdTe	0.9~30	2.67	+1.2	5.9	0.06	45	3.4	4,500	

(IV) カルコゲナイトガラス

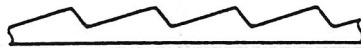
光学材料	透明領域 μm	屈折率 (5μm)	dn/dT 10 <sup>-5</sup> ·C <sup>-1</sup>	線膨張係数 10 <sup>-6</sup> ·C <sup>-1</sup>	熱伝導度 w/cm <sup>2</sup> ·C	硬度 Knoop	ヤング率 10 <sup>6</sup> psi	降伏力 psi	軟化温度 °C
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	1~11	2.41	-1.0	2.5	0.0036	109	2.3	85	210
As <sub>10</sub> Se <sub>90</sub>	1~19	2.48		3.4					70
As <sub>39</sub> Se <sub>61</sub>	1~15	2.79		1.9		114	3		202
Ge <sub>33</sub> As <sub>12</sub> S <sub>55</sub>	0.8~16	2.49		1.3		171	3		300
Ge <sub>10</sub> As <sub>20</sub> Te <sub>70</sub>	2~20	3.55		1.8		111			178
Si <sub>25</sub> As <sub>25</sub> Te <sub>50</sub>	2~9	2.93	+1.0	1.3		167			317
Ge <sub>30</sub> P <sub>10</sub> S <sub>60</sub>	2~8	2.15		1.5		185			520
Ge <sub>28</sub> Sb <sub>12</sub> Se <sub>60</sub>	1~14	2.62	+8.0	1.5	0.0030	150	4.2	2500	200



(a) 針金格子



(b) ラメラ格子



(c) エシェレット格子

図44 3種類の回折格子<sup>55)</sup>

表14 レーザ窓用材料の吸収係数と評価指数<sup>53)</sup>

窓材	吸収係数 $\text{cm}^{-1}$		評価指数			
	$10.6 \mu\text{m}$	$5.25 \mu\text{m}$	$\sigma_c K / \beta \alpha E$		$K / \beta \alpha \times 10^{-6}$	
			$10.6 \mu\text{m}$	$5.25 \mu\text{m}$	$10.6 \mu\text{m}$	$5.25 \mu\text{m}$
NaCl	$1.3 \times 10^{-3}$		108		83	
KCl	$7 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$	3860	18000	186	867
KBr	$4.2 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$	309	619	32	63
KRS-5	$22 \times 10^{-3}$		682		0.025	
CaF <sub>2</sub>	3.5	$5.0 \times 10^{-4}$		4400		53
SrF <sub>2</sub>	0.7	$4.1 \times 10^{-5}$		63400		243
BaF <sub>2</sub>	0.19	$< 3 \times 10^{-5}$		$> 105$		$> 2200$
Si		$5.9 \times 10^{-3}$		50800		1.8
Ge	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.8 \times 10^{-3}$	7800	52200	0.155	1.0
GaAs	$8 \times 10^{-3}$	$9.4 \times 10^{-3}$	17100	14600	0.37	0.32
CdTe	$25 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-4}$	53800	27500	2.05	1.0
ZnSe	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	17300	10800	2.6	1.7
ダイヤモンド	$6 \times 10^{-2}$		$1.7 \times 10^6$		34	

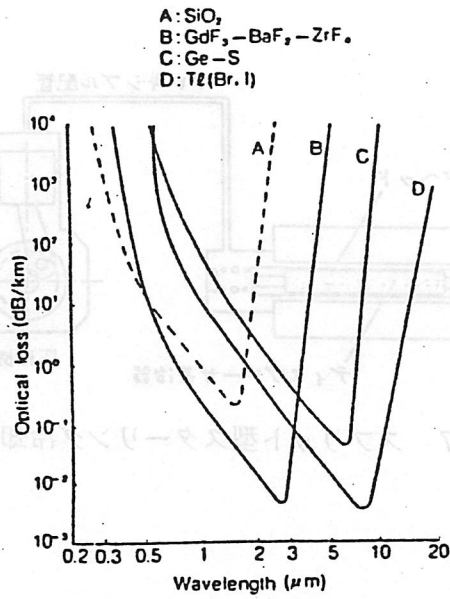


図45 理論伝送損失<sup>58)</sup>

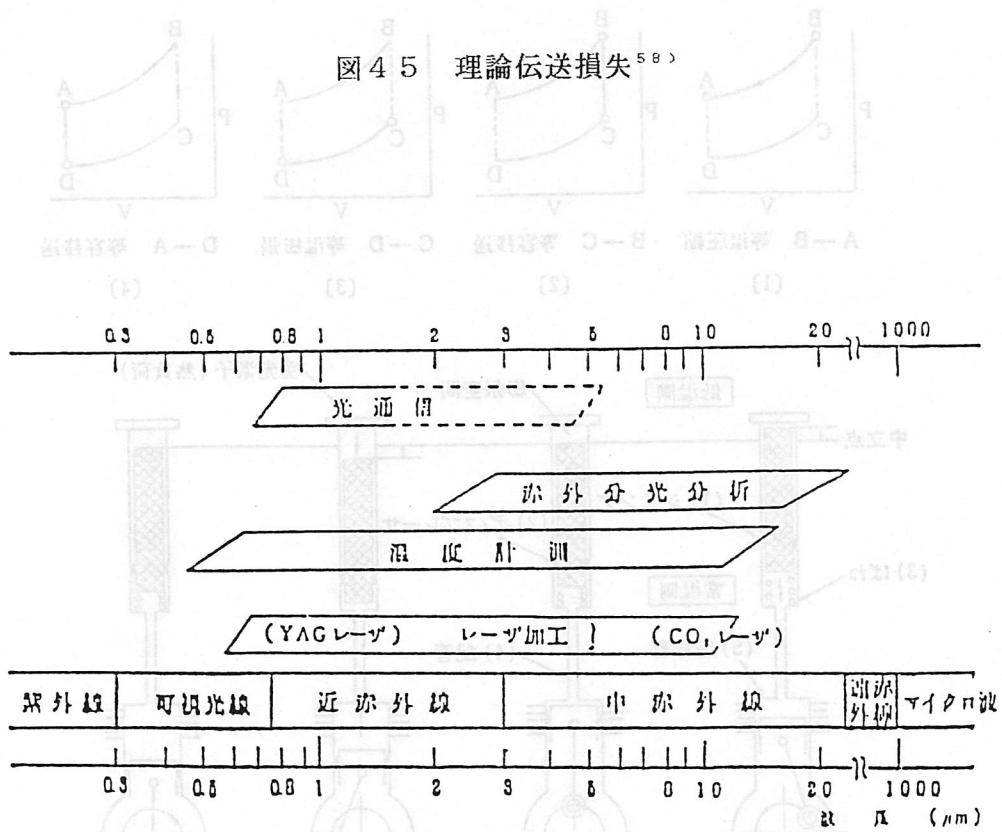


図46 赤外ファイバの応用<sup>58)</sup>

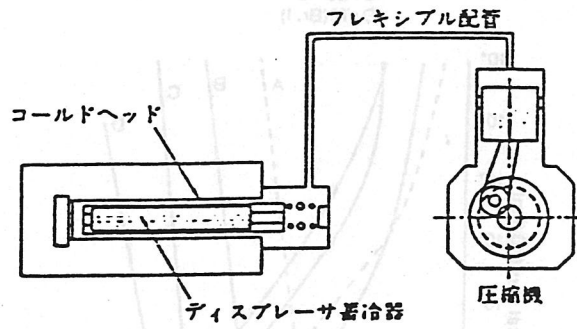


図47 スプリット型スターリング冷却器<sup>59)</sup>

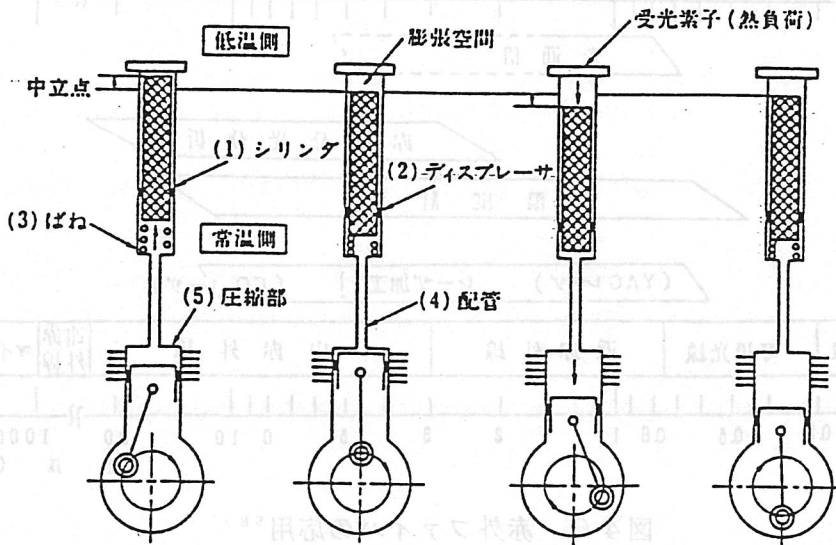
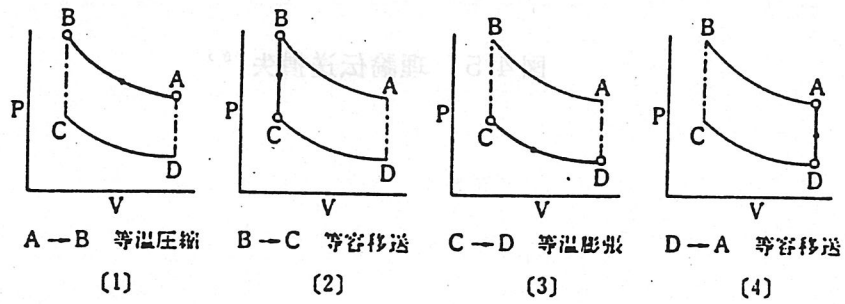


図48 スターリングの動作原理<sup>59)</sup>

	紫外	可視・近赤外	遠赤外	マイクロ波
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$10^{-2}$	1	$10^2$	$10^4$ $10^6$
量子型	非平衡現象	境界波長 $\lambda$ $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$	光子誘起トンネル効果 Nb/AlO <sub>x</sub> /Nb etc	高T <sub>c</sub> 超伝導体 高T <sub>c</sub> 超伝導体 etc
熱型	温度上昇 (超伝導抵抗転移)			
型	高T <sub>c</sub> 転移端ポロメータ			

$$\lambda_c = hc / 2\Delta$$

但し  $h$ : プランク定数,  $c$ : 光速,  $2\Delta$ : 超伝導体のエネルギーギャップ

図49 超伝導体を用いた赤外線センサの分類<sup>61)</sup>

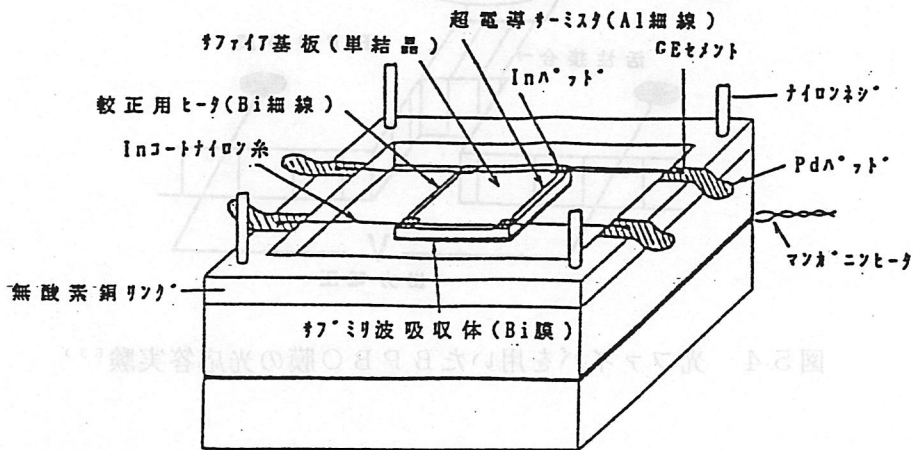


図50 転移端ポロメータの構造<sup>55)</sup>

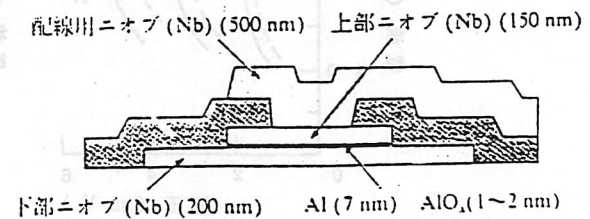
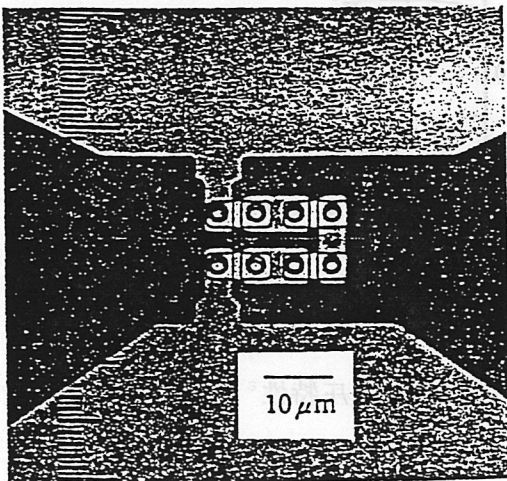


図52 SIS接合部(1個)の断面図<sup>63)</sup>

図51 SIS接合部の光学顕微鏡写真<sup>63)</sup>

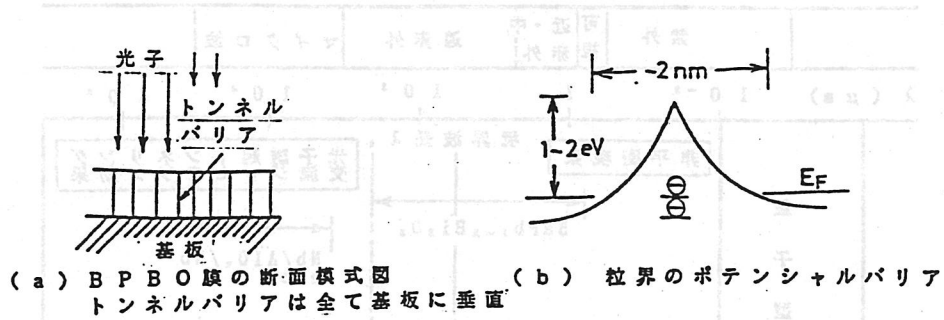


図53 BPBO膜の構造と粒界接合<sup>63)</sup>

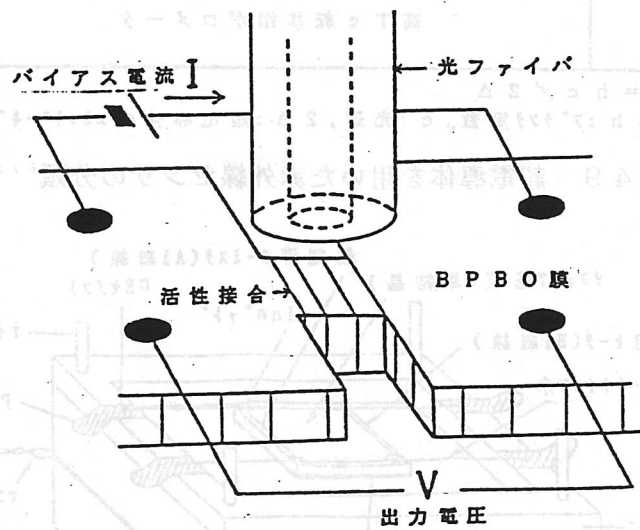
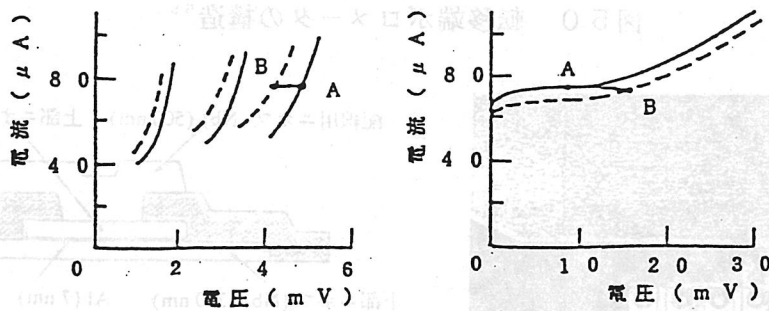


図54 光ファイバを用いたBPBO膜の光応答実験<sup>63)</sup>



- ① 実線は電磁波の照射が無い場合
- ② 点線は電磁波を照射した場合

図55 電磁波を照射した場合の電流-電圧特性<sup>63)</sup>

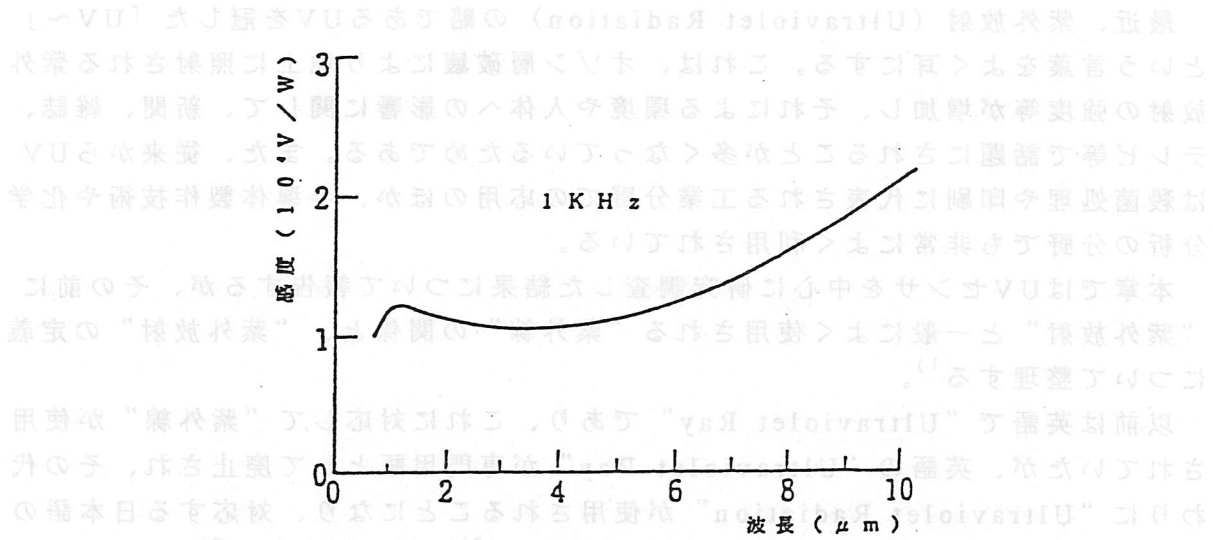


図56 BPBOセンサにおける感度の波長依存性<sup>63)</sup>

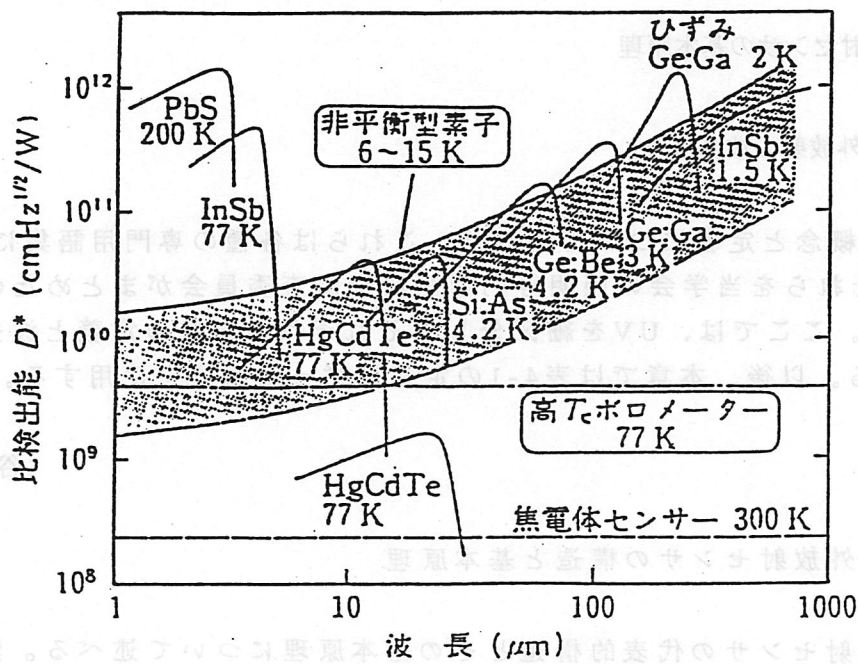


図57 超電導光センサの比検出能(予測値)と従来センサの性能との比較<sup>65)</sup>

## 4. 紫外放射センサ

最近、紫外放射 (Ultraviolet Radiation) の略であるUVを冠した「UV～」という言葉をよく耳にする。これは、オゾン層破壊により地上に照射される紫外放射の強度等が増加し、それによる環境や人体への影響に関して、新聞、雑誌、テレビ等で話題にされることが多くなっているためである。また、従来からUVは殺菌処理や印刷に代表される工業分野での応用のほか、半導体製作技術や化学分析の分野でも非常によく利用されている。

本章ではUVセンサを中心に研究調査した結果について報告するが、その前に“紫外放射”と一般によく使用される“紫外線”の関係と、“紫外放射”の定義について整理する<sup>1)</sup>。

以前は英語で“Ultraviolet Ray”であり、これに対応して“紫外線”が使用されていたが、英語の“Ultraviolet Ray”が専門用語として廃止され、その代わりに“Ultraviolet Radiation”が使用されることになり、対応する日本語の専門用語も“紫外放射”に訂正された (JIS用語<sup>2)</sup>, 電気専門用語<sup>3)</sup>など)。日本では、“紫外線”が一般にすっかり定着してしまい、現在でも新聞や雑誌ではまだそれを使用している。ここでは、専門用語である“紫外放射” (以後、UVの略語も併用する) を使用する。

### 4. 1 紫外放射センサの基本原則

#### 4. 1. 1 紫外放射の波長区分

まず、UVの概念と定義について述べる。これらは各種の専門用語集に示されており<sup>2), 4)</sup>、それらを当学会の照明専門用語研究調査委員会がまとめたのが表4-1である<sup>3)</sup>。ここでは、UVを細区分し、それぞれの領域の定義と波長区分を明確にしている。以後、本章では表4-1の定義に従った用語を使用する。

(谷治 環)

#### 4. 1. 2 紫外放射センサの構造と基本原理

次に、紫外放射センサの代表的構造とその基本原理について述べる。紫外放射センサをその構造によって分類すると表4-2のようになる。大きく「電子管型」と「半導体型」に分けられ、更にそれぞれが、その受光面の構成によって「0次元」(ポイント型)、「1次元」(ライン型)、「2次元」(面型)に分類される。「電子管型」は光電子放出効果を応用したものであり、「半導体型」は光起電力効果を応用したものである (但しCdSは光導電効果を応用)。

次に、それぞれの動作原理について述べる。

## (1) 光電子放出効果を利用したもの = 「電子管型」

図4-1にその動作原理を示す。図に示すように、紫外線を透過する真空容器内に対向する2つの電極を設け、両電極にバイアス電圧を印加する。+極をアノード、-極をカソードと呼び、ここで、カソード(光電面)に光(紫外光)を照射すると、電子が放出される。すると放出された電子は、両極間の電界によってアノード側に移動し、外部に、電流として検出される。この電流は、光の量に比例して変化する為、電流値から光の量(紫外線量)を測定することが出来る。

以上のように、真空中にある物質に光が当たり、その表面から電子が放出される現象を光電子放出と言い、放出された電子は光電子と呼ぶ。

又、図4-2に示すように、光電子を放出する光電面の材料、及び真空容器のガラス材料を、種々選択することで、目的の波長に合った波長感度特性を実現することが出来る<sup>37)</sup>。

この効果を応用した撮像管紫外線センサは、紫外線の吸収係数が大きいことを利用して、表面状態の検査や光化学反応のモニターとして、例えば物に付着した指紋の鑑定、生体細胞の非染色検査、等精密な分析、測定に用いられている。

## (2) 光起電力効果を利用したもの = 「半導体型」

図4-3(A)にその動作原理を示す。図に示すように、半導体のPN接合に、逆バイアス電圧を印加すると、ほとんど電流は流れない(この微小電流は、「暗電流」「漏れ電流」と呼ばれる)。しかし、PN接合付近に光(紫外光)を照射すると、照射した光の量に比例した電流が流れ始める。この電流を「光電流」と呼び、半導体の光起電力効果によるものである。

次に光電変換の原理を、図4-3(B)を用いて説明する。光が半導体に吸収されると、その消滅した光子のエネルギーによって、P層、N層、空乏層それぞれに於ける禁止帯の電子が導電帯へ励起される。この結果、ホールと自由電子が生成されるが、その挙動は、各層に於て異なる。P層に於ては、ホールは逆バイアスによって移動できないが、自由電子は空乏層まで拡散移動した後、空乏層中を電界によりN層に移動し光電流を生じる。空乏層では、ホール、自由電子共に電界により移動し、光電流を生じる。N層でも、自由電子は逆バイアスによって移動できないが、ホールは空乏層まで拡散移動した後、空乏層中を電界によりN層に移動し光電流を生じる<sup>37)</sup>。

以上の原理によって、光電流は入射する光の量に比例し、この電流を測定することで、紫外線量を計測することが出来る。但し、Siフォトダイオードは、200~1100nmの波長感度を有している為、紫外線のみを検出する為には、フォトダイオードへ入射する光の波長帯域を、干渉フィルター等を用いて制限する必要がある。

(高田 裕治)

## 4. 2 紫外放射センサの種類と特徴

### 4. 2. 1 電子管形センサ

ここでは、光電子放出を利用した光電管、光電子増倍管及びUVtronの最近の研究調査について紹介する。

光電管は光電面あるいは光電陰極（カソード）と呼ばれる光電子放出面と、放出された光電子を収集するアノードからなる二極管である<sup>5)</sup>。これまでUV用としてはCs-Te光電面の光電管が一般に使用されてきた。これは、SPDほど小形にはできないが、ソーラブラインドなので、用途によっては帯域フィルタを入れる必要が無いためである。しかし、強い放射に対してはSPD同様何らかの減光措置を施す必要がある。そこで強いUV用に開発されたのが単金属光電面を持つ光電管である<sup>6)</sup>。図4-5にその構造例を示す。単金属光電管は、Cs-Teなどの複数の元素で構成されている光電面と比べると、応答度が非常に低く実用的ではないとされていたが、図4-2に示すように、光電面の金属とガラス容器の種類により応答波長範囲と応答度のある程度選択できるという特徴がある。長波長側のカットオフ $\lambda_0$ は金属の仕事関数 $\Phi$ から次式により計算される。

$$\lambda_0 \text{ (nm)} = 1240 / \Phi \text{ (eV)} \quad (1)$$

また、単金属光電管は強いUVの連続照射に対してもほとんど劣化しないことから、殺菌灯の連続放射量モニタとして注目されている<sup>7)</sup>。

光電子増倍管（以後、PMと略）<sup>8),9)</sup>微弱な放射を検出する場合、外部回路でこれを増幅して検出する方法は雑音や応答速度などの点で問題が多い。PMは管内に二次電子増倍器を内蔵した光電管であり、特に微弱光を高利得、低雑音、高速、広いダイナミックレンジで検出できる。PMには大きく分けてサイドオン形とヘッドオン形がある。サイドオン形は放射光がバルブ側面より入射するタイプ、ヘッドオン形はバルブ頭部より入射するタイプである。応答波長は光電面の材料により決まり、UV用にはCs-Te, Cs-Iがある。光電管と同様にソーラブラインドであり、Cs-Teは320nm以上、Cs-Iは200nm以上にはほとんど応答しない。PMは多くの長所を持っているが、PDSに比べそのサイズと高電圧が必要であることが欠点である。

UVtronは、UVの入射によって管内に放電が起こるように作られたガス入り電子管である<sup>8),10)</sup>。図4-1にUVtronの構造を示す。容器はUVの透過の良い石英ガラスやUV透過ガラスで作られ、光電面はNi, Moなどの単金属が用いられる。基本的には単金属光電管と似ているが、管内にガスを封入し高電圧を印加して放電させることにより電流を増幅し検出能力を上げている。これをガス増倍と呼び、最少検出能力は単金属光電管の $10^4 \sim 10^5$ 倍高い。応答波長は160~260nmであり、太陽光や一般照明などの背景放射に全く影響されずに炎からの微弱なUVを検出できるので、火災報知器やバーナ燃焼監視装置に利用されている。

(谷治 環)

## 4. 2. 2 半導体センサ

半導体センサとして、その材料による種類は、次のように大別される。

- (1) 単結晶シリコン (Si)
- (2) アモルファス-シリコン (a-Si)
- (3) ガリウム・ヒ素・リン (GaAsP)

それぞれの特徴について、以下に述べる

### (1) 単結晶シリコン (Si)

紫外放射センサの基本原理で述べたように、半導体の光起電力効果を応用して、紫外光を電流に変換する。単結晶シリコンの分光感度特性は、紫外領域～可視～近赤外領域にまで及び、可視・近赤外の受光素子として広く応用されていることから、その種類も豊富である。しかし半面、 $0.2\sim 1.1\mu\text{m}$ までの広い範囲の分光感度を持つことから、紫外光のみを検出する場合は、干渉フィルター等の光学フィルターを必要とし、不必要な波長帯域を急俊にカットしなければならない。従って、UVA ( $320\sim 400\text{nm}$ ) やUVB ( $290\sim 320\text{nm}$ ) といった、特定の波長を検出することは困難である。

### (2) アモルファス-シリコン (a-Si)

アモルファス-シリコンを光センサに応用することのメリットは  
波長感度特性が、人間の目の視感度曲線に一致している為、光学的フィルター構成が容易

プロセスが膜形成のため大面積化、低コスト化が可能  
が上げられる。通常の a-Si 光センサは短波長の感度が小さく、紫外放射検出用としては不十分である。これは、P層で紫外光が吸収されて、効率よくI層に到達しない為であるが、P層の構造にアモルファス超格子構造膜 (a-Si/a-SiC) を採用し (図4-18、19 参照)、短波長領域に於ても高感度を得ているセンサが開発されている<sup>38)</sup>。

### (3) ガリウム・ヒ素・リン (GaAsP)

前述のように、通常の単結晶シリコンではその波長感度特性が広帯域である為、特定の波長を検出することが困難であった。これは、図4-4に示すように、通常の光学フィルターには、必要な透過帯域以外に二次透過光が存在するからで、この二次透過光を受光素子が検出すると、紫外光以外の可視・赤外光にも感度を有する検出器になってしまうからである。

そこで、受光素子自体の分光感度特性が、 $650\text{nm}$ 以上の波長域で感度を有さないGaAsP素子を用いることで、紫外放射用の検出器 (受光素子) を容易に得ることができる。しかも、その分光感度特性は、図4-10に示すように、UVA ( $320\sim 400\text{nm}$ ) やUVB ( $290\sim 320\text{nm}$ ) といった、特定の波長を検出することが可能である<sup>39)</sup>。

(高田 裕治)

### 4.3 紫外放射センサの応用

#### 4.3.1 紫外線照度計

##### (1) 紫外線照度計とは

照度というのは、ある微小面に入射する光束の面積密度であり、その定義はともかく、単位である [1 x ルクス] や、その測定器である照度計は広く知られている。その分光応答度特性（分光感度特性）は標準比視感度  $V(\lambda)$ （人間の目の明るさに対する波長特性を国際的に標準化したもの（図4-6 参照）に合うように近似されている。一方、紫外線照度計は紫外領域の照度（厳密には放射照度）測定する計測器である。

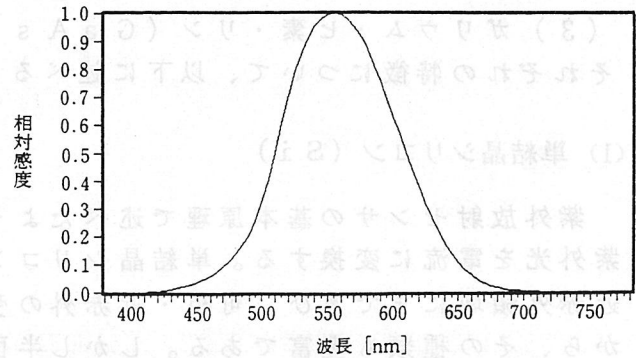


図 4-6 標準比視感度  $V(\lambda)$

##### (2) 放射照度の考え方

照度、放射照度の関係は以下ようになる。

$$\text{放射照度 } E_e = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{照度 } E_v = K_m \cdot \sum_{\lambda_a}^{\lambda_b} V(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad [1 \text{ x}] \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 $E(\lambda)$  : 分光放射照度 [例えば  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (\text{5 nm})^{-1}$ ]

$\Delta\lambda$  : 例えば 5 nm

$\lambda_1, \lambda_2$  : 波長積分の下限と上限。特に決まりはない。

$K_m$  : 最大視感度 683 [ $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$  ルメン・ワット<sup>-1</sup>]

$\lambda_a, \lambda_b$  : 波長積分の下限と上限。それぞれ 380 nm、780 nm とするのが一般的であるが、それぞれ 400 nm、700 nm としても実用上、ほとんど問題ない。

簡単に言えば、放射照度というのは、各波長ごとのパワーを単純に足し込んだものであり、照度というのは、各波長ごとに標準比視感度  $V(\lambda)$  の重みを掛けて足し込んだものと考えてよい。放射照度測定の場合、測定波長範囲を明記しなければ意味のない測定になるので注意が必要である。

### (3) 基本構造

市販されている紫外線照度計の光電素子としては、通常のPN型SPDを用いたものが大半であり、これに拡散透過板、メッシュフィルタ、光学フィルタを組み合わせた構造となっている。拡散透過板で斜入射光特性を余弦法則に近似させ、メッシュフィルタで減光し、光学フィルタで感度波長領域を限定することになる。市販の紫外線照度計の構造例を図4-7に掲げる。

測定波長帯の中心波長として、水銀ランプの輝線スペクトルである254nm、305nm、365nm、405nmが選ばれることが多いが、紫外放射の工業応用としては365nmいわゆるi線を測定対象とするものの機種が最も多い。

(1)式に掲げた特性を実現するには、図4-8に示すような分光応答度特性、すなわち、着目している波長帯においては波長選択性が無く、その他の波長については全く感度を有しないという特性が必要となるが、このような特性を光学フィルタで実現することは不可能であり、ピーク感度波長を頂点とし左右に向かうに従って感度が低下していく特性となる。図4-9参照。

### (4) 紫外線照度計の校正の考え方

紫外線照度計の使われる分野は工業、医療、生化学など多岐に亘るが、各分野ごとに校正の考え方が異なっている<sup>36)</sup>。ここでは代表的な校正の考え方を述べる。

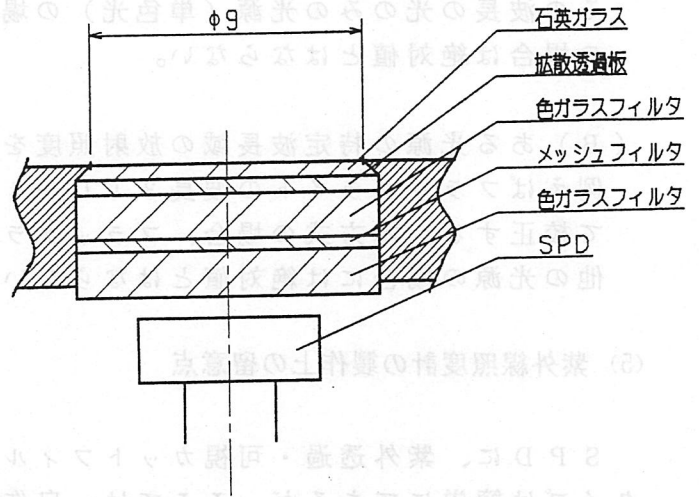


図4-7 紫外線照度計の構造例

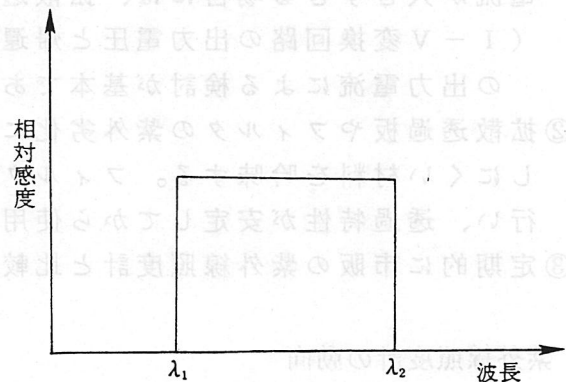


図4-8 放射照度の定義に従った紫外線照度計の分光応答度

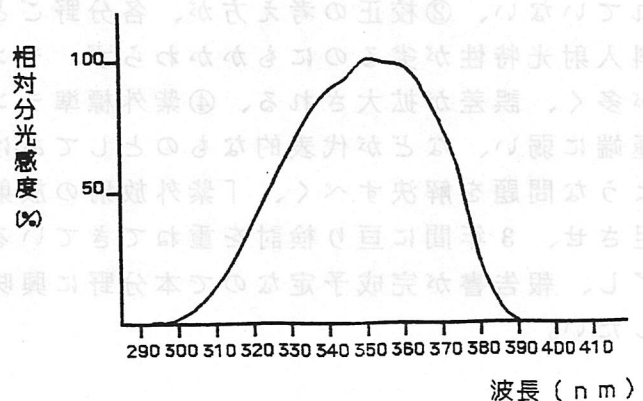


図4-9 市販紫外線照度計の分光応答度の一例

(A) 特定波長の感度を校正する。

特定波長とは、通常ピーク感度波長である場合が多い。本方式で校正した場合、その波長の光のみの光源（単色光）の場合には正しい結果となるが、それ以外の場合は絶対値とはならない。

(B) ある光源の特定波長域の放射照度を基準として校正する。

例えばブラックライトの波長310～400nmの範囲の放射照度を基準として校正する。本方式の場合、ブラックライトを測定した場合のみ絶対値となり、他の光源の場合には絶対値とはならない。

#### (5) 紫外線照度計の製作上の留意点

SPDに、紫外透過・可視カットフィルタを実装すれば紫外線照度計のプロトタイプは簡単にできるが、ここでは、自作する上での留意点を述べる。

① SPDはメーカーが出力電流の直線性を保証している範囲で用いる。

電流が大きすぎる場合には、拡散透過板やメッシュファイルで減光する。

(I-V変換回路の出力電圧と帰還抵抗だけで検討してはならない。SPDの出力電流による検討が基本である。)

② 拡散透過板やフィルタの紫外劣化に気を付ける。拡散透過板については劣化しにくい材料を吟味する。フィルタについては、紫外線によるエージングを行い、透過特性が安定してから使用するようにする。

③ 定期的に市販の紫外線照度計と比較校正する。

#### (6) 紫外線照度計の動向

紫外線照度計は、同一波長帯を測定するもの同士でも、メーカー間、機種間において、値が異なるという問題がある。この原因として、①分光応答度が標準化されていない、②校正の考え方が、各分野ごとに異なる、③可視用の照度計に対し、斜入射光特性が劣るのにもかかわらず、ランプに対して至近距離測定を行う場合が多く、誤差が拡大される、④紫外標準ランプのパワーが実用領域の千分の1と極端に弱い、などが代表的なものとしてあげられる。(社)照明学会では、このような問題を解決すべく、「紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会」を発足させ、3年間に亘り検討を重ねてきている。平成6年5月には委員会活動が終了し、報告書が完成予定なので本分野に興味のある方はご一読されることを推奨したい。

(戸沢 均)

#### 4. 3. 2 紫外放射撮像システム

これまで紹介した検出器は全てポイントセンサであった。ここでは、紫外放射撮像センサの中からCCD (Charge Coupled Device) とイメージインテンシファイアについて紹介する。

CCDは、一般に、pn接合フォトダイオード、あるいはMOS形キャパシタから成る受光部 (蓄積部でもある)、CCDアナログシフトレジスタから成る転送部、及び出力回路部により構成される。これは印加電圧によって半導体基板内に生ずる空乏層を利用して電荷を蓄積し、それをクロックパルスによって順次移動させることを基本動作とするデバイスである<sup>11)</sup>。特に、UV用に開発された一次元のCCDの構成図を図4-10に示す<sup>12)</sup>。反転層形のダイオードに似てSi/SiO<sub>2</sub>界面に固定した正電荷がp層でバンドベンディングさせ、空乏層を生じさせている。UVが素子に入射すると、電子-正孔対が生成され、分離する。電子は界面付近に残り、ここで最少のポテンシャルエネルギーをとる。電子は、最初、高速に隣の細いA1線まで拡散し、次に蓄積ゲートまで拡散しCCDの読み出し信号として収集される。界面の正電荷は深い空乏状態を作らないことから、各素子は極めて熱平行状態に近い状態で動作し、その暗電流は非常に小さい。また、細いA1線の下と蓄積ゲートの下の電子は深い空乏状態で動作するので、電子は再結合する前に高い正孔密度の領域の外へ拡散する。従って、内部量子効率 $\eta_{int}$ は90%以上になる。このデバイスの最大の欠点は、細いA1線によって有効受光面積が小さくなることである。

また、イオン注入とレーザアニールにより10~300nmの波長域における安定性と量子効率を向上させる報告がある<sup>13)</sup>。一般に、剥き出しのSi表面には極めて薄い酸化膜が自然に形成される。この酸化膜は、先に述べたように、CCD内の数千Åの深さまでの領域を空乏状態にするのに十分なトラップされた正電荷を容れている。UVが照射されると、この領域で生成された光電子はSi/SiO<sub>2</sub>界面に向かってドリフトし、そこにトラップされるか再結合してしまうので、UVにおける量子効率は急激に減少する。イオン注入を行うことによって、ドーパントの濃度勾配に応じた内部ポテンシャルが形成され、高いドーパント濃度はCCDの表面電荷効果を抑制する。ここでは、UVでの量子効率を改善するためにこのイオン注入の技術を使用している。使われたCCDは520×64のウエハーであり、標準的なCCD回路を製作した後、基板を薄くする工程を行い、10~30Ωの抵抗率を持つ10~14μmの厚さに調整する。そして、ドーパントとしてBF<sub>2</sub> (ドーザ量 $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>, 20keV) を~500Åの極めて浅い所に注入し、同時に20nsec以下の高速のレーザアニール (YAGレーザ, 波長530nm, レーザパルスエネルギー0.9~1.5J/cm<sup>2</sup>) を行い、注入された材料の再結晶化とBドーパントの活性化を行っている。その結果、波長150~300nmの量子効率は15~22%となり、素子の分光応答の均一性も向上する。

次に、UV用イメージインテンシファイアを紹介する。イメージインテンシファイアは人間の目にみえない紫外放射や赤外放射の像を可視の像に変換するイメージ管の一種である<sup>14)</sup>。構造は、真空管の中に光を電子に変換する光電面、電

子レンズ、電子を増倍するマイクロチャンネルプレート（MCP）、及び電子を光に変換する光電面が組み込まれている。従って、光電管などと同様に、光電面にCs-TeなどのUV用材料を用いることによりUV用のイメージインテンシファイアを製作できる。

特殊な用途として、ロケットに搭載して地球や太陽からの極端紫外（EUV）をリモートセンシングするために構成されたEUVセンサがある<sup>15)</sup>。KBrをコートしたMCPは、くさび形と縞形のイメージ読み出しシステムをZ状に組み合わせたアノードを持っており、98～104nm、130～136nm、25～140nmの三つの波長領域にわけて計測する。その特性は高ゲイン、密度の高いパルス高分布、及びこのタイプでは最高の空間分解能を示している。

VUV用の1m垂直入射分光器と組み合わせて用いる、2000チャンネルのインテンシファイア付きダイオードアレイ検出器が開発されている<sup>16)</sup>。これはDITEトカマクの30～170nmにわたる発光スペクトル分布を20msec間隔で観測できる。分光器からの出力は膜厚1000ÅのCuI光電面に入射し、そこからの二次電子をMCPで増倍して蛍光面を光らせる。この光信号を光ファイバ結合器を通じて、1024チャンネルのダイオードアレイ素子2個に振り分ける。分解能は一回折光に対して0.01Åである。使用するチャンネル数を制限することにより、2msecの周期で個々のスペクトル分布を読み取ることができる。

(谷治 塚)

#### 4.3.3 天体観測用センサ

紫外領域の天体観測を行う装置としては、光学系に紫外域の帯域通過フィルタ、紫外線レンズを用い、受光部にはCCDを使用した組み合わせが多く用いられている。しかし、装置が大がかりになること及び費用と時間がかかることから報告例はまだ少ないようである。以下にその例を示す。

1989年にHOOVERら<sup>40)</sup>は、垂直入射多層膜光学系を使用し、太陽のコロナ放射から軟X線／極端紫外線の高分解能画像をスペクトロヘリオグラフによって得ている。検出方法は、望遠鏡をアレイ状に搭載し、80～2560nmの波長範囲で多くの画像を同時に得ている。画像はXUVに感度の良い写真用フィルム（イーストマンコダック社製）を使用している。

紫外線検出用の望遠鏡は3種類で、種類と検出波長域は次の通りである。

- 1) Hershelian望遠鏡：中心波長443nm、コーティングはW(タンク\*ステン)／C(カーボン)の多層膜である。

- 2) Wolter-Cassegrain望遠鏡：中心波長439nmと442nmの2種類、コーティングはW/C多層膜である。
- 3) Wolter-Schwarzschild望遠鏡：中心波長120nm、Wolter-Schwarzschildの前面にAlのフィルターが設置されている。

また、X線の検出はMo/Si多層膜反射鏡で中心波長1730nmと2560nmを持つ四種類の望遠鏡が用いられている。

図4-11は、Wolter-Cassegrain望遠鏡で16秒間露光して得られたコロナ放射の結果である。

BECHIS<sup>41)</sup>は1991年に計画されているSTARLAB計画について述べている。STARLAB計画はSDI計画の要請に関連した技術の実証が目的で、光学的収差やレーザー光伝搬に対する大気の影響の測定と補正、及び宇宙から潜水艦とレーザー通信することの可能性の探求のための実験を行う予定である。

STARLABで使用しているUVカメラは、感度波長帯域が200~320nmで20nm毎6個の波長範囲に分かれたフィルタ、マイクロチャンネルプレート、およびファイバプレートで構成されており、検出素子にはCCDを使用している。光学系はf/25.5、口径20cm、焦点距離5.1mのカセグレン望遠鏡である。

図4-12は測定例で、UV領域での昼夜における大気のゆらぎのレベルなどである。

金田らは<sup>42)</sup>、1989年に、オーロラ粒子の加速領域の様相を物理的に解明する目的で、スピン型衛星である人工衛星「あけぼの」にオーロラ撮像装置を搭載し、紫外領域と可視領域で撮像を行っている。撮像装置は、真空紫外(VUV)光と可視光の2チャンネルのセンサを有するTVカメラで、センサの構成は、結像系、イメージンシファイア、およびイメージンシファイア-の出力窓にファイバプレートを介して取り付けられたCCDからなる。VUVの光電面物質にはKBrを、入力側窓材にはMgF<sub>2</sub>を用いており115~139nm(1% of peak)の分光波長範囲で、測定対象光はN<sub>2</sub>L B H bands、原子酸素輝線およびH Ly- $\alpha$ である。CCDは488×376画素で、受光部は4.88mm×6.39mm、時間分解能は最高1/8秒で、通常は平均16秒間隔の撮像である。また、視野は36°×36°である。

観測は、1989年4月中旬から行われており、この装置により、オーロラの活動状態の変化や大規模変動が観測されている。図4-13は1989年6月に南極上空の遠地点付近で観測されたオーロラの大規模変動の様子である。

直接天体観測は行ってはいないが、1989年にJOHNSONらによって太陽からの紫外線による物質からの反射をとらえる試みもなされている<sup>43)</sup>。使用したカメラはUVソーラブラインドフォトカウンティングカメラで254nmの波長を中心とする紫外領域の狭帯域通過フィルタ（波長帯域は240～280nm）と反射型のUVレンズとで構成されており、視野角は20度である。検出器は紫外線に感度のあるフォトカソードを有するフォトカウンティングイメージセンサで、位置情報が得られるコンピュータと連動して画像を出力するシステムである。

紫外線を検出するための実験で使用した材料は、紫外線を放射する物質であるローソク、プロパンガスのトーチランプ、紫外光を発するMineralightなどで十分検出が行えている。また、図4はこの装置により屋外において撮像を行った結果で、太陽放射のソーラブラインド帯の紫外線像が得られている。

(小野 隆、日本大学)

#### 4.4 紫外放射センサの周辺技術

##### 4.4.1 紫外放射源<sup>17)</sup>

###### (1)重水素ランプ

重水素中の放電発光を利用した放射源であり、190nm以上の波長域に連続スペクトルを持ち、分光測光や分析機器に用いられる。

###### (2)殺菌ランプ

紫外放射透過ガラスを外管に使用した低圧水銀ランプであり、殺菌に有効な253.7nmの放射を主に出す。水、空気、物体表面の殺菌に広く利用されている。

###### (3)石英製低圧水銀ランプ

殺菌ランプと類似のランプであるが、外管に熔融石英ガラスを使用しており、185.0nmと253.7nmの放射を主に出す。ランプ電力を数百ワットと高出力化したものであり、大規模な水処理や殺菌、半導体製造プロセスでの洗浄・分解作用などに使用されている。

#### (4)ブラックライト

可視光と300nm以下のUVをカットした特種外管ガラスに近紫外発光蛍光体を被着し、300～430nm（ピーク350nm付近）の近紫外放射のみを放射するランプである。蛍光ランプ形と高圧水銀ランプ形があり、検査鑑別、蛍光装飾照明などに使用される。

#### (5)光化学用・捕虫用ランプ

360～370nm付近に発光ピークのある蛍光体を使用した蛍光ランプで、発光スペクトルを光化学反応の作用曲線、昆虫類の走光性反応曲線に合わせている。UV樹脂硬化や捕虫などに使用される。

#### (6)日焼用ランプ

主に280～320nmのUVのみを放射する蛍光ランプである。日光浴の代用として、あるいは健康医療用として広く使用されたが、UV発ガンの危険性が指摘されており、医師の指示で使用されている。

#### (7)キセノンショートアークランプ

キセノンガス中の放電を利用するショートアーク形のランプで、高輝度で安定性に優れている。300～1200nmの波長域に連続スペクトルを持ち、特に1000nm付近に強いラインスペクトルを持つ。最近では、フィルタを組み合わせるソーラーシミュレータとして広く使用されている。

#### (8)メタルハライドショートアークランプ

高い放射エネルギーを得るために、発光管内に金属ハロゲン化合物を封入し、その原始分子発光を利用するショートアーク形の高輝度高圧放電ランプである。UVAに強いスペクトルを持ち、印刷や複写機関係で使用されている。

#### (9)UVレーザー

UVレーザーとしては窒素レーザーとエキシマレーザーがある。エキシマレーザーはUVレーザーリソグラフィ用放射源などに使用されている。

#### 4.4.2 紫外放射光学部品

##### (1) 外管, 入射窓<sup>9)</sup>

光電管、PM、半導体UVセンサなどの外管, 入射窓あるいはUV源の外管としては、透過するUVの波長域により、硼硅酸ガラス、UV透過ガラス、UV用フューズドシリカ、サファイアガラス、 $MgF_2$ 結晶などが使用される。図4-15にそれらの分光透過特性を示す。分光測定などで使用される拡散板は、190nm以上のUV域では可視域と同様に $BaSO_4$ 粉末の圧着面を使用する。

##### (2) フィルタ

UV用のフィルタとしては、帯域フィルタと遮断フィルタ（シャープカットフィルタ）がある。帯域フィルタはUVを透過して可視域をカットするフィルタで、赤外域にも透過帯を持つことが多い。遮断フィルタは遮断波長よりも短波長側を遮断し、長波長側は通常近赤外域まで透過する。共に、材料はガラス中に金属塩などを拡散したものである。

##### (3) レンズ<sup>18)</sup>

180nmより長い波長域ではUV用フューズドシリカが使用される。これはこの波長域で高い透過率を示し、蛍光も比較的小さいためである。また、反射防止として $MgF_2$ コーティングされたものもある。その他、150nmから使用できるサファイアガラスのレンズもある。

##### (4) ミラー

一般に、重水素ランプやエキシマレーザ用に使用されるミラーとしてUV用高反射Alミラーがある<sup>18)</sup>。これはAlミラーに $MgF_2$ コーティングし、UVでの反射率を高めたものである。200~400nmでの反射率は88%以上である。 $MgF_2$ はAl表面の酸化を防止し、耐磨耗性を高める。

シンクロトロン放射などの大強度高輝度のVUVに対しては、一般のミラーは使用できない。VUV用ミラーとしてSiCミラーが開発された<sup>19)</sup>。ここでは用途により2種類のミラーが開発された。一つはグラファイト基板にクリヤーカーボンSiCをコートした偏向反射ミラーであり、もう一つは再結晶及び焼結SiC基板の上にCVD-SiCがコートされた構造である。ミラー表面には1000Åの厚さに白金が蒸着されている。このミラーは耐久試験を行った結果、kW級のエネルギーを持つシンクロトロン放射用ミラーとして使用可能であることが確認された。

#### 4.4.3 紫外放射標準

250nmより長い波長域での連続スペクトル放射標準に、電子技術総合研究所の目盛りに基づいて日本電気計器検定所で検定しているハロゲン電球を使用できることが知られているが<sup>20)</sup>、1990年に紫外域での値が修正された<sup>21)</sup>。250nmより短い波長域での連続スペクトル放射標準は定められていないが、電子技術総合研究所<sup>22)</sup>と埼玉大学<sup>23)</sup>で200~250nmの波長域で重水素ランプに値付けした結果が報告された。また、NISTでは1987年に重水素ランプの値付けが行れた<sup>24)</sup>。

ラインスペクトルによる標準としては、シリコンフォトダイオード（以後、SPDと略）について、可視域で自己校正法又は標準電球からの全放射で絶対応答度を値付けできるので、その値を相対分光応答度と組み合わせて、254nmの絶対応答度を求めることができる<sup>25)</sup>。185nmの応答度は、窒素雰囲気中で合成石英低圧水銀ランプからの放射を254nm及び185nm透過用の帯域フィルタをとおして熱形放射検出器とSPDに交互に照射し、254nmと185nmの応答度の比を求め、これに254nmの応答度を乗ずることで求めることができる。

電総研では、電子蓄積リングTERASからのシンクロトロン放射を一次標準放射源とし、透過波長が約254nmのフィルタを用いてSPDの分光量子効率の校正が行われた<sup>26)</sup>。また、NISTにおいても、シンクロトロン放射を一次標準放射源にし、特性評価した分光器を用いて110~300nmの波長域で近い将来標準を確立する予定とされている。しかし、これらには克服すべき問題があり、これからの研究に期待する。

#### 4.4.4 紫外放射分光測定システム

UVにおける放射測定の技術も、その基本は可視放射の場合と変わらないが、可視域では無視されるか、あるいは測定対象から除外されていたパラメータが重要になってくる。例えば、185nmのラインスペクトルを空気中で測定しようとする、10cmで50%以上が吸収される<sup>27)</sup>。このようなことから、モノクロメータを使用した波長200nm以下の測定では、モノクロメータを含む測定系を真空又は窒素雰囲気中に配置しなければならない。このためには、超小形のモノクロメータが便利である。また、この波長域では光学系の透過率、反射率が低下するので、できるだけ簡素化した光学系にする必要がある<sup>28)</sup>。

#### 4.5 紫外放射センサの技術動向

4.2で取り上げなかったセンサとして、真空紫外VUV (Vacuum Ultraviolet Radiation, 1~200nm位の波長域)における熱形検出器として、冷却形マイクロボロメータが開発されている<sup>29)</sup>。これはVUVにおいて、10nW~1μWの放射

パワーを高い精度で検出するための絶対放射計である。高い検出能力と低ノイズを達成するために、低い熱容量で熱伝導率の高いサファイア板（直径～6mm、厚さ0.15m）を吸収体として使用し、液体ヘリウム温度で動作する。VUVはサファイア表面で吸収され、その放射パワーは表面に取り付けられた電熱ヒータの電気的な入力パワーで校正することにより絶対測定される。測定は全て真空中で行われる。ノイズの主要原因である赤外放射（IR）の迷光については、冷却したBeのIRカット窓を使用するDC形とチョッパを利用するAC形のボロメータを製作することにより対処した。また、このデバイスの最小検出能力はDC形で～1nWであり、その確度誤差は3%程度である。この誤差の主な原因は温度ドリフトである。一方、AC形の最小検出能力は～30pW、時定数は1.5msecである。このデバイスによるSPDの絶対応答度の校正結果とSPDの自己校正法<sup>30)</sup>による結果はよく一致している。熱形検出器は放射を熱エネルギーに変換して、熱エネルギーによる温度上昇を電気信号として検出する。このタイプの検出器は一般に放射を吸収する黒化面（カーボンブラックやゴールドブラックなどの吸収材を付着した受光面）に、温度検出素子（熱電対や焦電素子など）を接触させた構造になっている。従って、UV域で安定した吸収特性と熱伝導特性を示す黒化面を開発することはUV用の熱形検出器を開発することにつながり、現在研究開発が行われている<sup>31)</sup>。但し、一般に熱形検出器は検出能力が低く、応答速度も遅いことを考慮しなければならない。

次に、半導体センサに外部周辺機器を組み合わせる特殊な用途に利用するために開発したセンサを紹介する。

GaAsPフォトダイオードと290nmに透過ピークを持つ帯域フィルタを組み合わせたUV-B（280～315nm）測定専用のセンサが開発されている<sup>32)</sup>。図4-16にその分光応答特性を示す。6.6×4mmのセラミックパッケージ内に0.8mm角のGaAsPチップを入れ帯域フィルタを被せたもので携帯用測定器に組み込めるように小形に作られている。

同一Si基板上に、UVに応答するPDと応答しないPDを交互に配置し、その出力差を求めることによってUVのみを検出するセンサが開発されている<sup>33)</sup>。その受光面と動作原理の模式図を図4-17に示す。受光面A、Bの出力差はそれぞれの出力電流を抵抗で電圧に変換し、OPアンプにより差動増幅する。このセンサはその構造上、受光面全体に均一にUVを入射させる必要がある。また、受光面A、Bの可視域での応答を完全に一致させるか、あるいは可視域の出力が小さい光源を使った測定に向いている。検出応答波長範囲は200～400nmであり、400nm以上はシャープにカットされている。

光CVDにより作製されたa-Si/a-SiCの超格子構造膜を応用して、UV域の応答度を大幅に改善したアモルファス紫外放射センサが開発されている<sup>34)</sup>。図4-18にその構造を示す。a-Si/a-SiC超格子構造のp層は、ワイドバンドギャップで優れた導電特性を持ち、更に接合部における発電領域として働く。a-Si/a-SiCはc-Siに比べ可視より長波長での応答が小さいため、入射側に可視光を吸収する紫外透過フィルタを設けることにより容易にUVセンサとして機能する。図4-19にこのセンサの分光応答度を示す。

$Pb_2CrO_5$  薄膜を用いたUVセンサが開発されている<sup>35)</sup>。その構成図を図4-20に示す。 $Pb_2CrO_5$ は電子ビーム蒸着法によりガラス基板上に作製された後、2時間熱処理される。その上にAu電極を一对400Åの膜厚で蒸着し、その橋渡し部分を電子ビームリソグラフィで楕形に整形し電極を形成する。このデバイスは薄膜表面に一組の平面電極を設けた横形構造をしており、表面の極めて薄い層でのみ吸収が生じるUVを有効に検出する。 $Pb_2CrO_5$ のUVにおける分光応答度は可視での値より高いということから、入射放射から可視光をカットするためのフィルタリング技術が非常に簡単になる。作製されたデバイスのUV分光応答特性を図4-21に示す。このように、適当なフィルタを組み合わせることにより容易にUVセンサを開発することができる。

(谷治 環)

#### 参考文献

- 1) 照明学会：UV特集，照学誌，87，3（平5）118-123
- 2) JIS Z 8113-1988：照明用語（1988）
- 3) 照明学会：照明専門用語研究調査委員会報告書（1988）（電気学会：電気専門用語集No.13「照明」〔改正案〕）
- 4) IEC Publication 50(845)：International Electrotechnical Vocabulary（1987）
- 5) 浜松フォトニクス(株)ソーラブラインド光電管カタログ
- 6) 伊藤 守行：照明学会・光放射の応用・関連計測研究専門部会公開研究会資料，AR-92-24（平4）6-13
- 7) 池戸 智之：センサ技術，9，6（1989）235-237
- 8) 片岡 照栄ほか編：センサハンドブック，培風館（昭61）
- 9) 浜松フォトニクス(株)光電子増倍管カタログ
- 10) 浜松フォトニクス(株)UVtronの使い方技術資料
- 11) Boyle, W.S. et al.：Bell Syst. Tech. J., 49（1970）587
- 12) Kothe, J. and Nunch, W.V.：Solid State Electronics, 36, 1（1993）69-74
- 13) Stern, R.A. et al.：Optical Engineering, 26, 9（1987）875-883
- 14) 浜松フォトニクス(株)イメージインテンシファイアと関連製品センサカタログ
- 15) Siegmund, O.H.W., Chakrabarti, S., Cotton, D.M. and Lampton, M.：IEEE Trans. Nucl. Science, 36, 1（1989）916-920
- 16) Hawkes, N.C. and Peacock, N.J.：Rev. Sci. Instrum., 57, 8（1986）2035-2037

- 17) 照明学会編：ライティングハンドブック，オーム社（1987）
- 18) 日本メレスグリオ(株)：レーザ&オプティクスガイド（1986）
- 19) 佐藤 繁：放射光，4，1（1991）11-27
- 20) 鈴木 守ほか：電総研研報，742（1978）
- 21) 羽生 光宏ほか：第24回照明学会全国大会講演予稿集，144（1991）194
- 22) 長坂 武彦ほか：昭和51年照明学会東京支部大会講演予稿集，25（1976）
- 23) 中川 靖夫ほか：照学誌，59，9（1975）196
- 24) NBS Special Pub. 250，10（1987）
- 25) 照明学会 紫外放射照度測定研究調査委員会資料（1992）
- 26) 斎藤 輝文：照明学会 光放射の応用・関連計測研究専門部会公開研究会資料，AR-92-23（1992）6-13
- 27) 中川 靖夫ほか：照学誌，72，6（1988）319-
- 28) 中川 靖夫ほか：照明学会 光放射の応用・関連計測研究専門部会公開研究会資料，AR-92-23（1992）14-23
- 29) Ahr, N. and Tegeler, E. : Metrologia, 28, 3 (1991) 189-192
- 30) Zalewski, E,F and Geist, J. : Appl. Optics, 19, 8 (1980) 1214
- 31) 馬淵 裕之：埼玉大学工学部電子工学科卒業論文（1994）
- 32) 浜松フォトニクス(株)半導体UVセンサカタログ
- 33) 浜松フォトニクス(株)SiUVセンサモジュールカタログ
- 34) 野口 繁ほか：機能材料，8，5（1988）25-32
- 35) 戸田 耕司ほか：照明学会・光放射の応用・関連計測研究専門部会公開研究会資料，AR-93-17（平5）36-43
- 36) 戸沢 均：照学誌，87，3（1993）124-127
- 37) 高浜 圀彦：最先端のオプトエレクトロニクス，12（1985）52-57
- 38) 野口 繁ほか：機能材料，8，5（1988）25-32
- 39) 高橋 秀夫ほか：センサ技術，11，9（1991）81-85
- 40) Hoover, R.B., Walker, A.B.C.Jr., Lindblom, J.F., Vanpatten, R.A., Gill, J.P., Barbee, T.W.Jr., Powell, F. and Steele, G. : Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol.1140 (1989) 112-125
- 41) Bechis, K.P. : Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol.1158 (1989) 232-241
- 42) 金田 栄祐ほか：宇宙科学研究所報告 特集 No.25(1990) 75-84
- 43) Johnson, C.B. and Herte, R.J. : Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol.1158 (1989) 336-345

表 4-2 紫外放射センサ分類表

	0 次 元	1 次 元	2 次 元
電子管型	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 光電管</li> <li>・ 化合物光電面 (Cs-Te, NaSb)</li> <li>・ 単金属光電面 (Au, Sn など)</li> <li>・ 光電子増倍管</li> <li>・ UVtron</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ イメージンテンシファイア + フォトダイオード</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ イメージンテンシファイア</li> <li>・ マイクロチャンネルプレート</li> </ul>
半導体型	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ フォトダイオード</li> <li>・ Si系 (結晶、アモルファス)</li> <li>・ PN接合</li> <li>・ ショットキー接合</li> <li>・ 化合物系 (GaAsP, GaP, ZnCdS, SiC など)</li> <li>・ PN接合</li> <li>・ ショットキー接合</li> <li>・ 光導電型</li> <li>・ CdS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ CCD</li> <li>・ フォトダイオードアレイ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ CCD</li> </ul>

表 4-1 「照明専門用語集」における紫外放射 (UV) 及び関連用語の概念と定義<sup>3)</sup>

番号	用語	英語	定義
1.1.02	光放射 (光学(的)放射)	optical radiation	<p>X線の波長より長く、電波の波長より短い波長をもつ放射。</p> <p>【備考】</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>赤外放射, 可視放射, 紫外放射の総称として使用する。</li> <li>X線との境界波長はおおよそ1nm, 電波との境界波長はおおよそ1mmである。</li> </ol>
1.1.05	紫外放射	ultraviolet radiation	<p>波長が可視放射の波長より短い光放射。</p> <p>【備考】一般照明光源の放射束に含まれる紫外放射束を評価する場合には、400nmより短波長の放射を紫外放射とする。</p> <p>【参考】IEC国際電気標準用語集 (CIE国際照明用語集) では以下のような細区分を示しているが、これは過去にある技術委員会が示したものであって、IEC (CIE) が公式に決めたものではない。</p> <p>(IEC国際電気標準用語集 第3版 45-05-035 注参照)</p> <p>UV-A 315-400nm UV-B 280-315nm UV-C 100-280nm</p>
8.1.01.	近紫外放射 (アブックライ)	near ultraviolet radiation; black light	<p>可視域に隣接した波長域の紫外放射。</p> <p>【備考】波長範囲については色々な用例があるが、300-320nmから400nmまでの波長域とするこ とが多い。北米照明学会 (Illuminating Engineering Society of North America ; IESNA) で は、320-400nmをアブックライト域として区分している。</p>
8.1.02	中紫外放射	mean [middle] ultraviolet radiation	<p>真空紫外域より長波長で、近紫外域より短波長の波長域の紫外放射。</p> <p>【備考】波長範囲については色々な用例があるが、200-220nmから300-320nmまでの波長域と することが多い。一般的には、CIEの技術委員会が議論されたとして、IEC国際電気標準用語集 に例示されている UV-B (280-315nm) より広い範囲をとる。</p>
8.1.03	遠紫外放射 (真空紫外放射、 極端紫外放射)	far ultraviolet radiation; vacuum ultraviolet radiation extreme ultraviolet radiation deep ultraviolet radiation	<p>空気による吸収が始まる波長域から軟X線波長域までの紫外放射。</p> <p>【備考】</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>波長範囲については色々な用例があるが、1nmから200-220nmまでの波長域とすることが多 い。</li> <li>遠紫外領域を、真空紫外領域よりも長波長域まで含め、250nm位までとすることもある。</li> <li>英語の deep ultraviolet radiation を、波長250nm以下の紫外放射に対して使用することもある。</li> </ol>
8.1.10.	オゾン生成放射	ozone producing radiation	<p>大気中の酸素O<sub>2</sub>を分解して、オゾンO<sub>3</sub>を生成する効力のある紫外放射。通常は波長220nm以下 である。</p> <p>【備考】水銀放電の184.9nm共鳴放射はオゾン生成に利用される。</p>

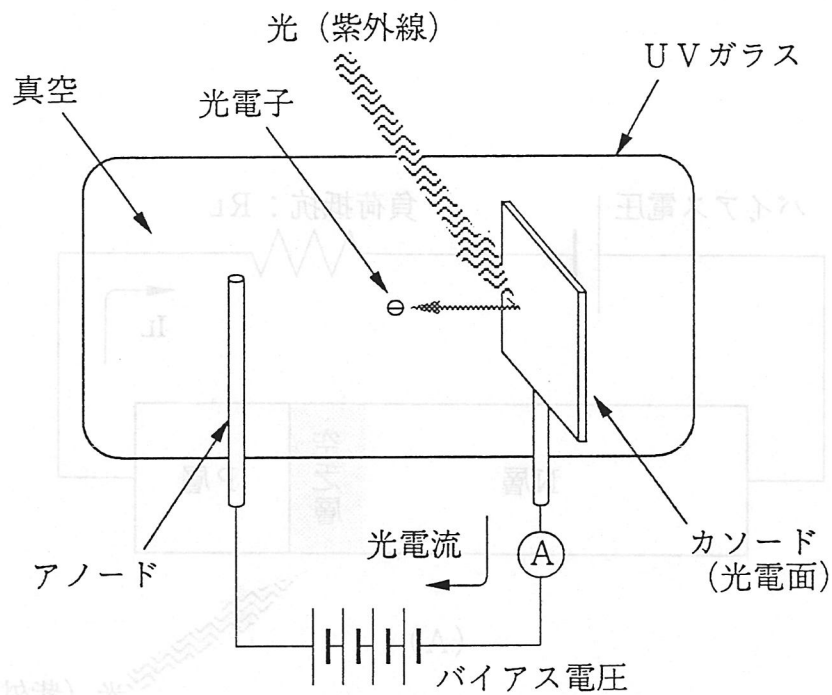


図4-1 UVtronの構造<sup>13)</sup>

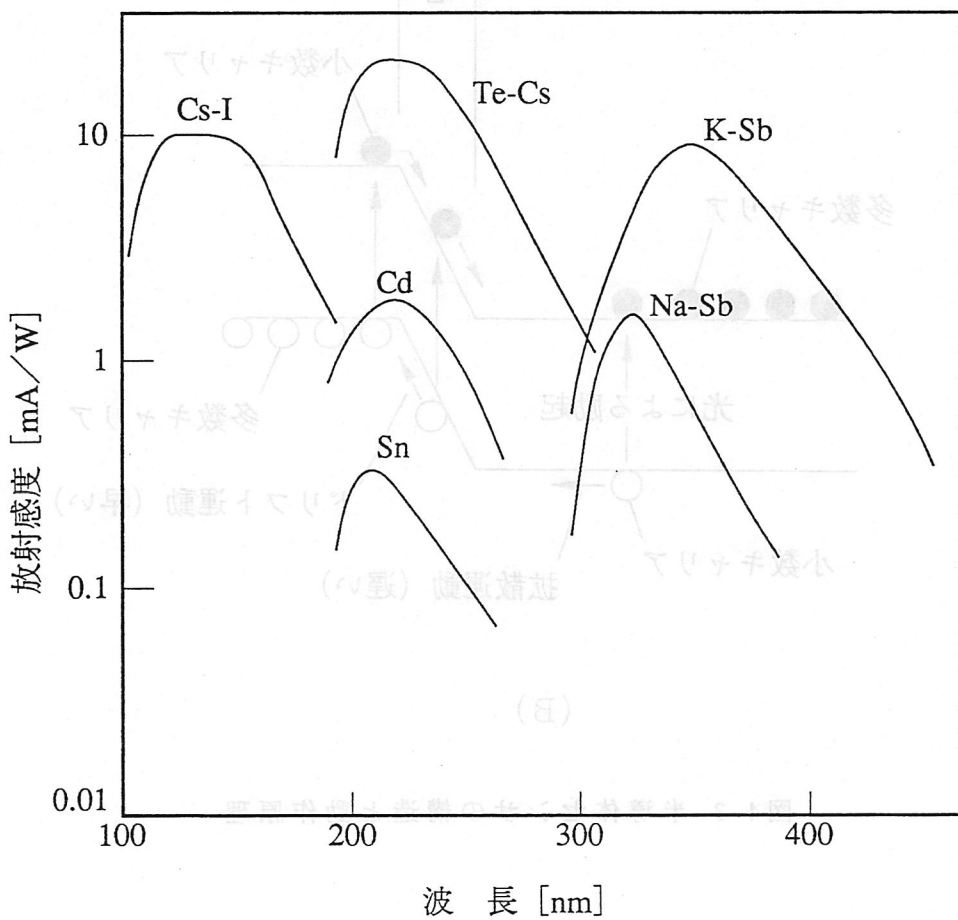


図4-2 各種紫外用光電面の分光応答特性<sup>11)</sup>

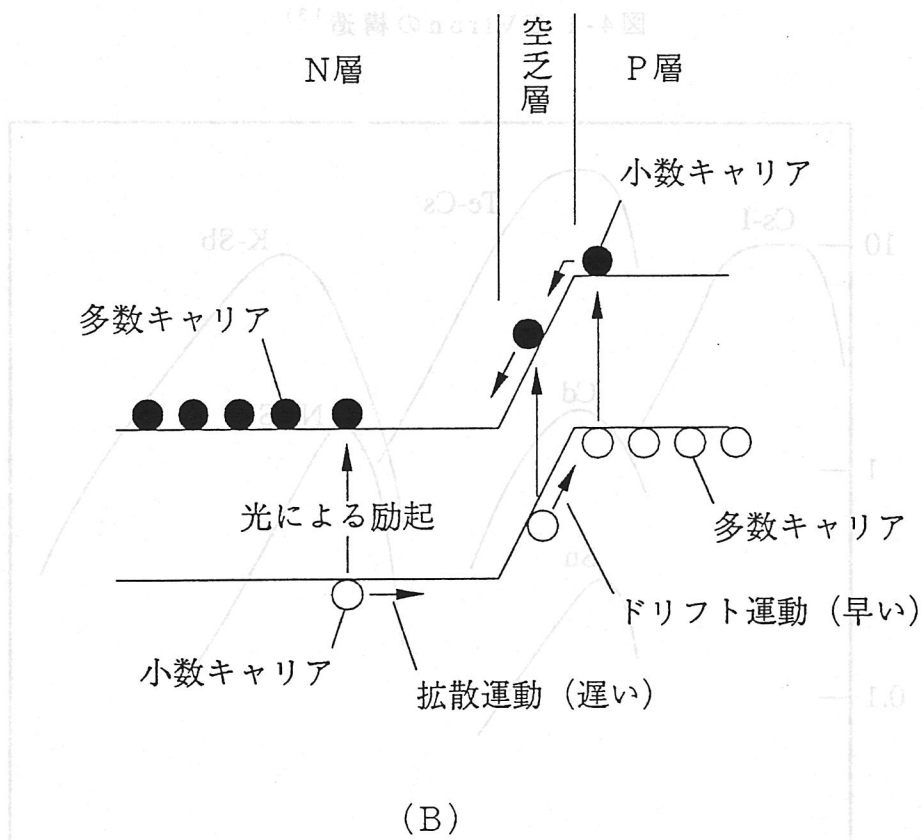
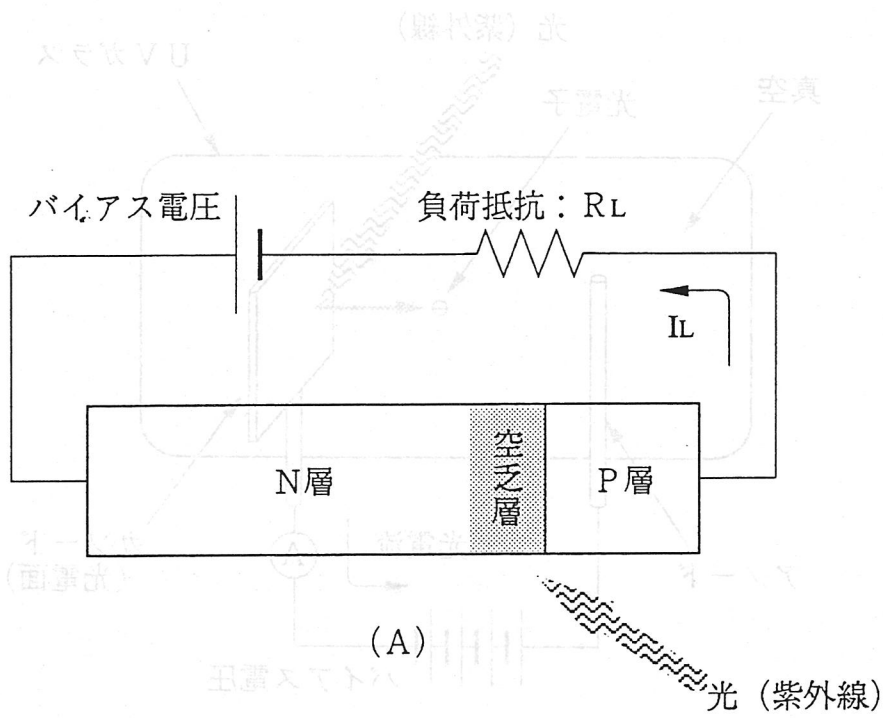


図4-3 半導体センサの構造と動作原理

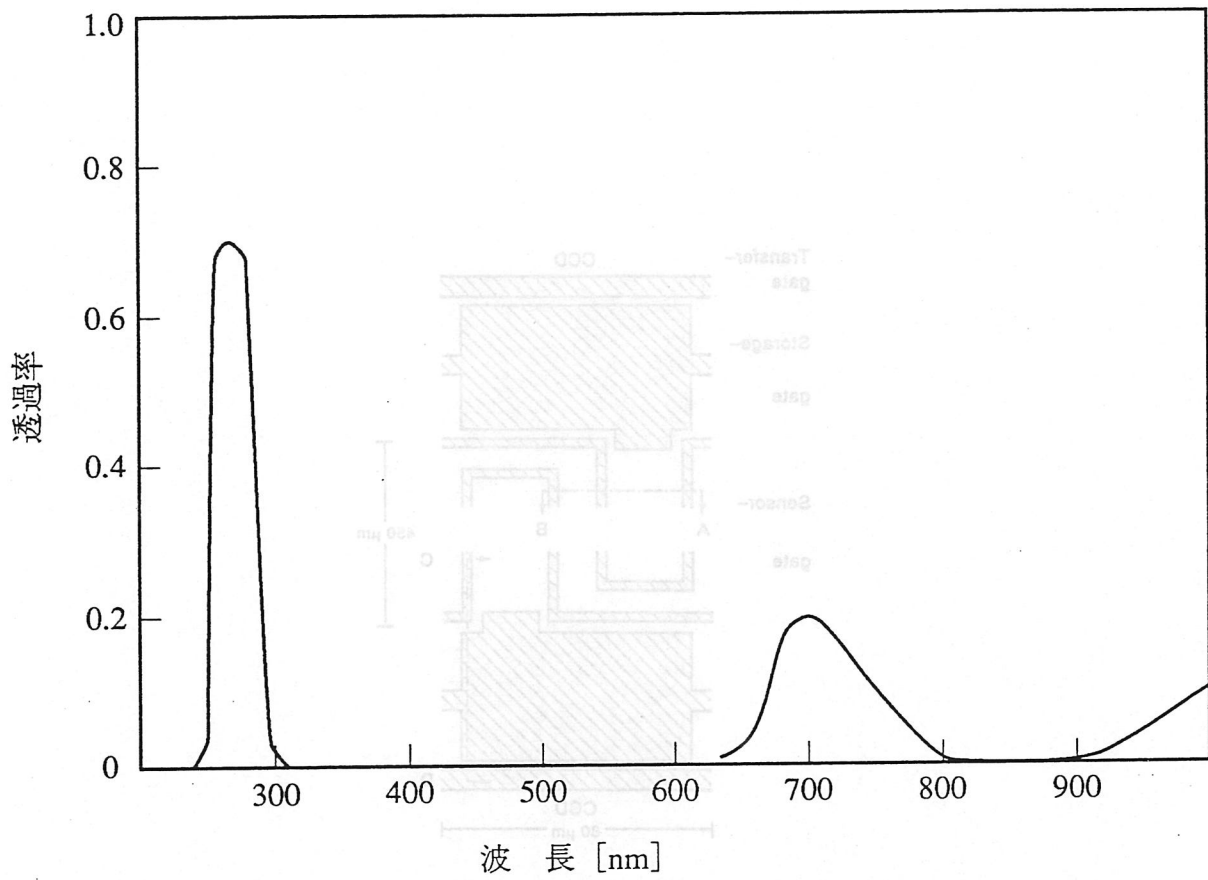


図4-4 UV用帯域フィルタの分光透過特性

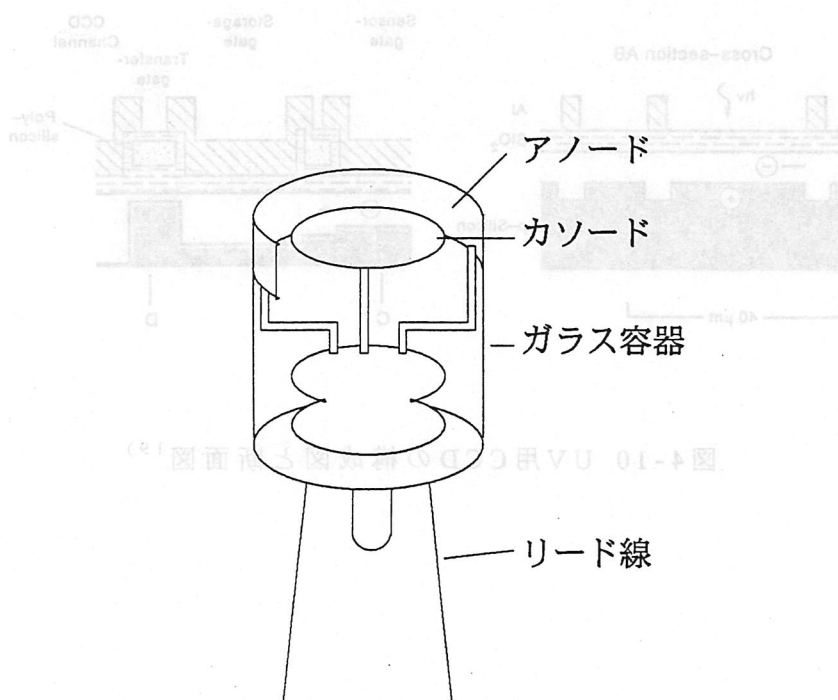


図4-5 光電管の構造<sup>10)</sup>

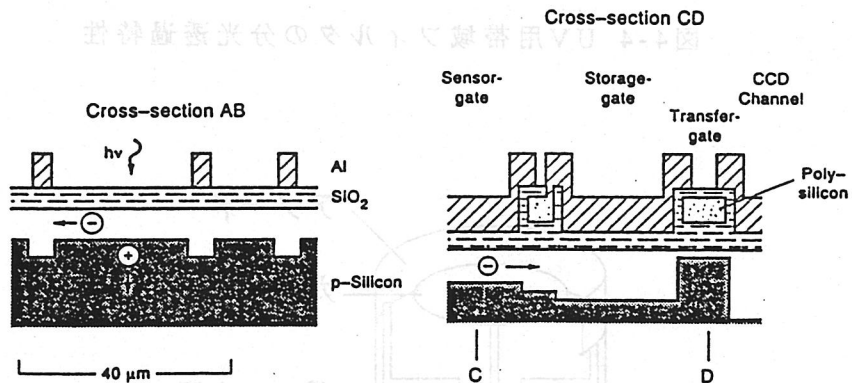
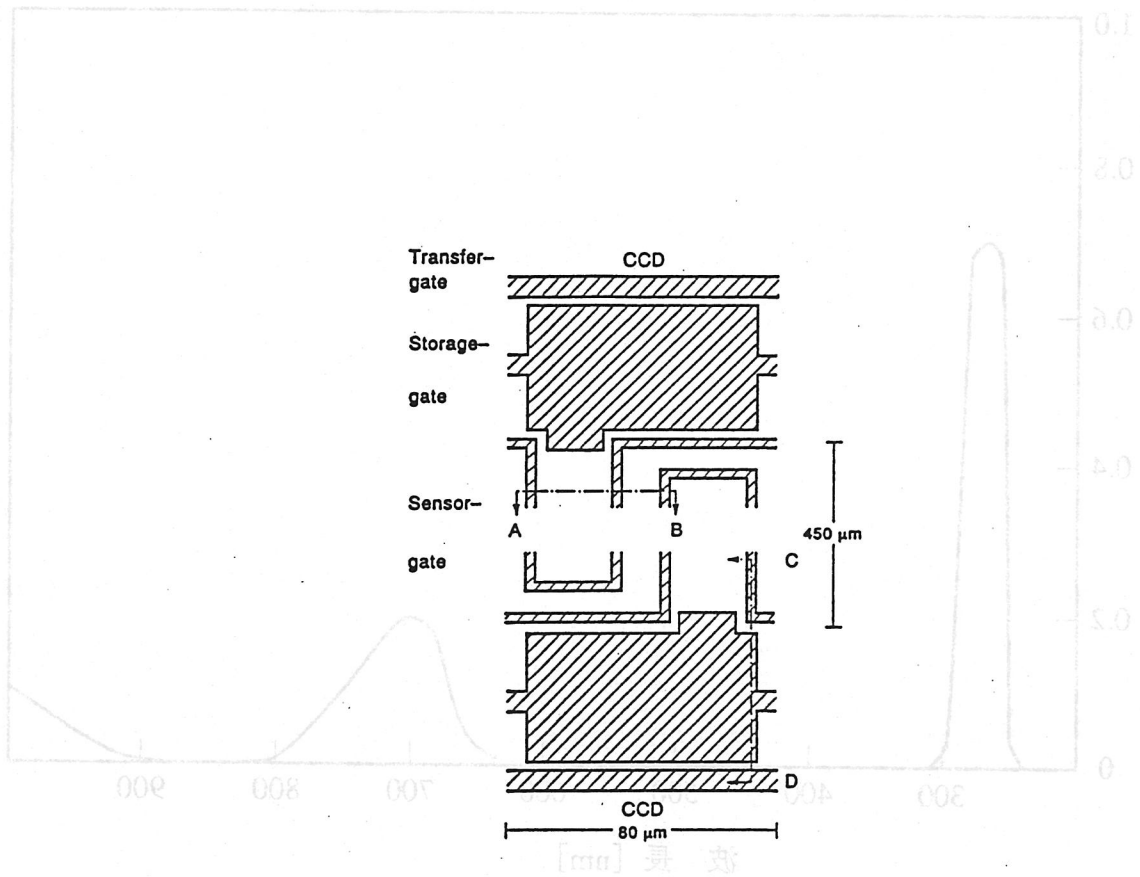


図4-10 UV用CCDの構成図と断面図<sup>19)</sup>

FIG 4-11 16 second exposure of the Sun with the 44 Å Wolter-Cassegrain Spectral Slicing Telescope. Due to a last minute problem with the flight filter for this system, an "aluminum-only" filter was substituted for the primary flight filter. Since this filter did not have a carbon component to eliminate longer wavelength radiation, there is some contamination from longer wavelengths in the  $\lambda$  44 Å data due to specular reflection from the multilayer. The bright streak in the lower left half of the image is due to a visible-light leak.

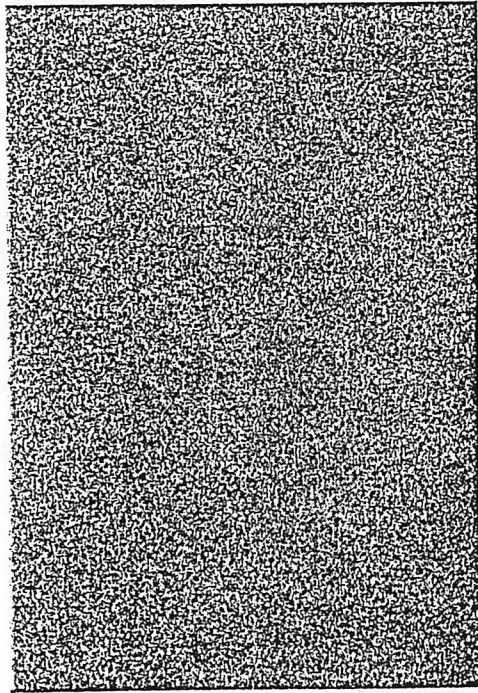
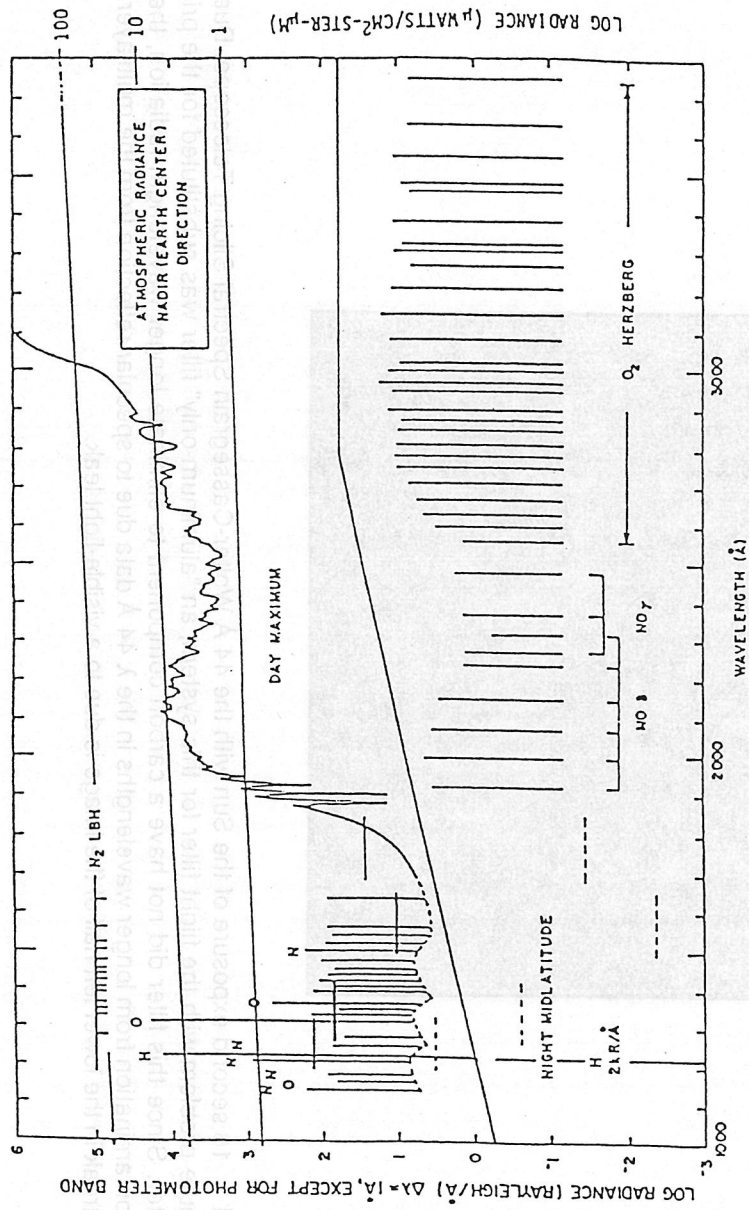


FIG 4-11 16 second exposure of the Sun with the 44 Å Wolter-Cassegrain Spectral Slicing Telescope. Due to a last minute problem with the flight filter for this system, an "aluminum-only" filter was substituted for the primary flight filter. Since this filter did not have a carbon component to eliminate longer wavelength radiation, there is some contamination from longer wavelengths in the  $\lambda$  44 Å data due to specular reflection from the multilayer. The bright streak in the lower left half of the image is due to a visible-light leak.



4-12 UV radiances for nadir viewing

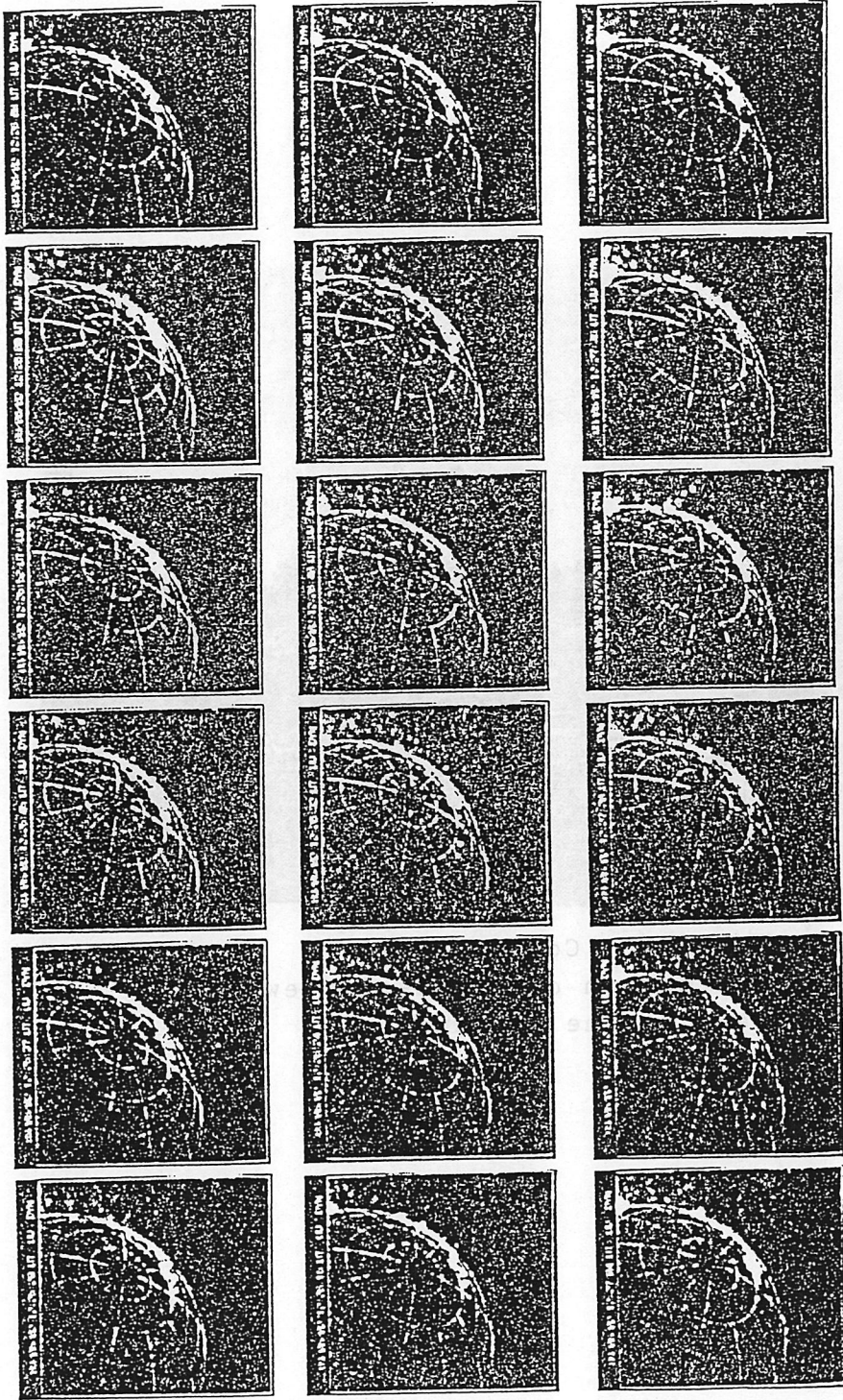


図 4-13 繰り返して発生が観測される VUV オーロラの大規模変動. 1989年6月2日 12:25:29-12:27:44 (UT)  
 (撮像間隔: 8秒モード, 衛星高度: 約 10300km)



图 4-14 Conventional  
photograph of field-of-view  
seen by the uv camera.

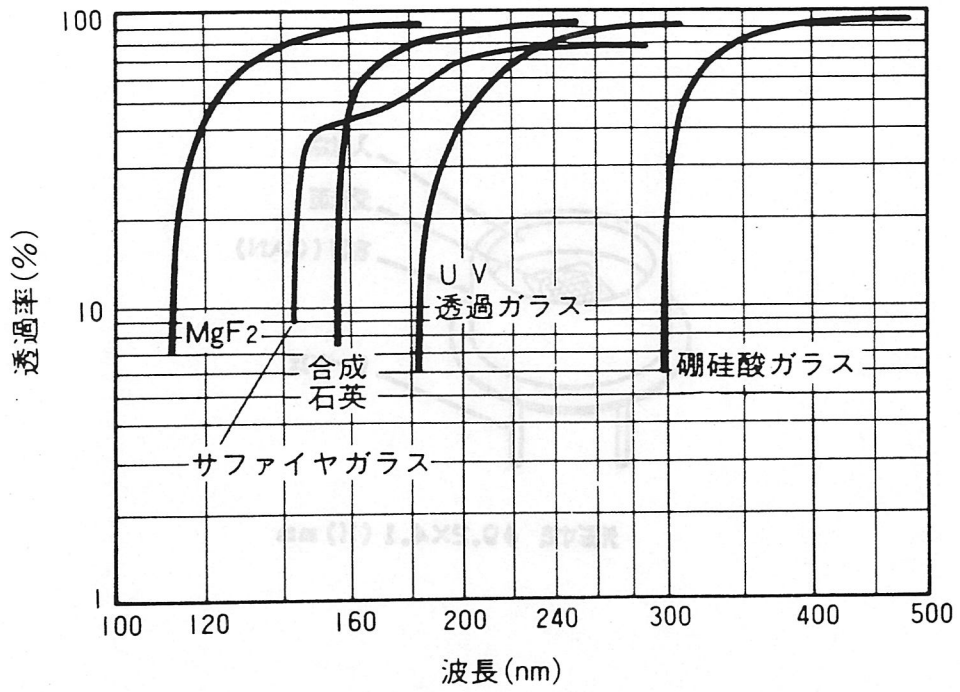


図4-15 UV入射窓材料の分光透過特性<sup>15)</sup>

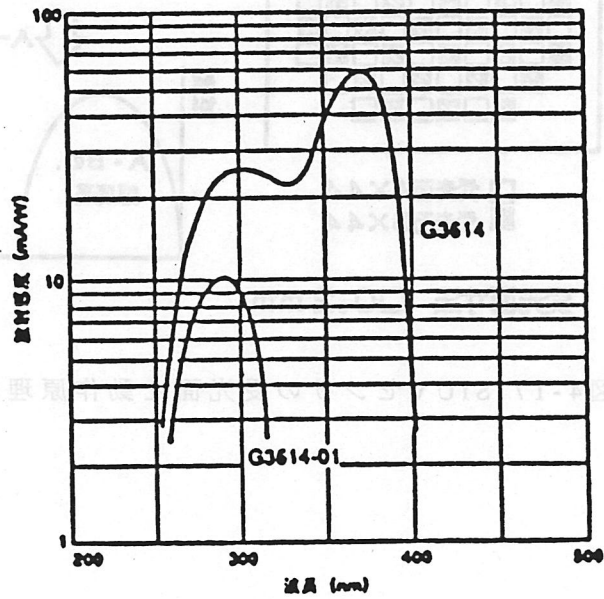


図4-16 半導体UVセンサの分光応答特性<sup>24)</sup>

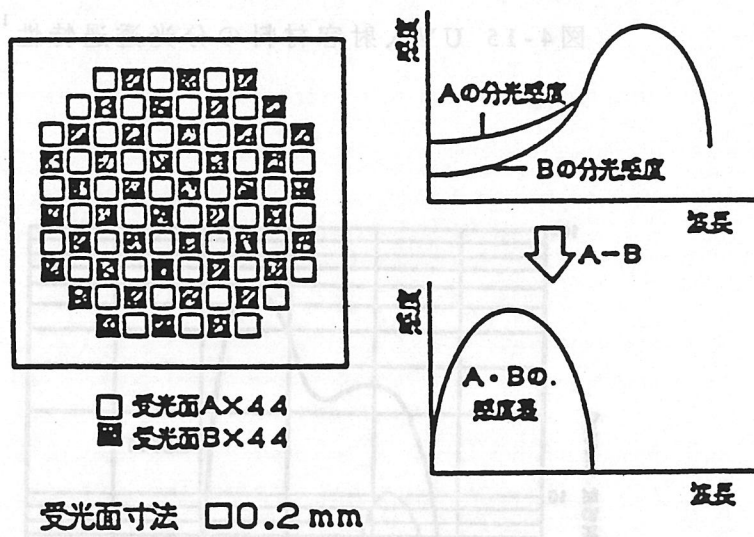
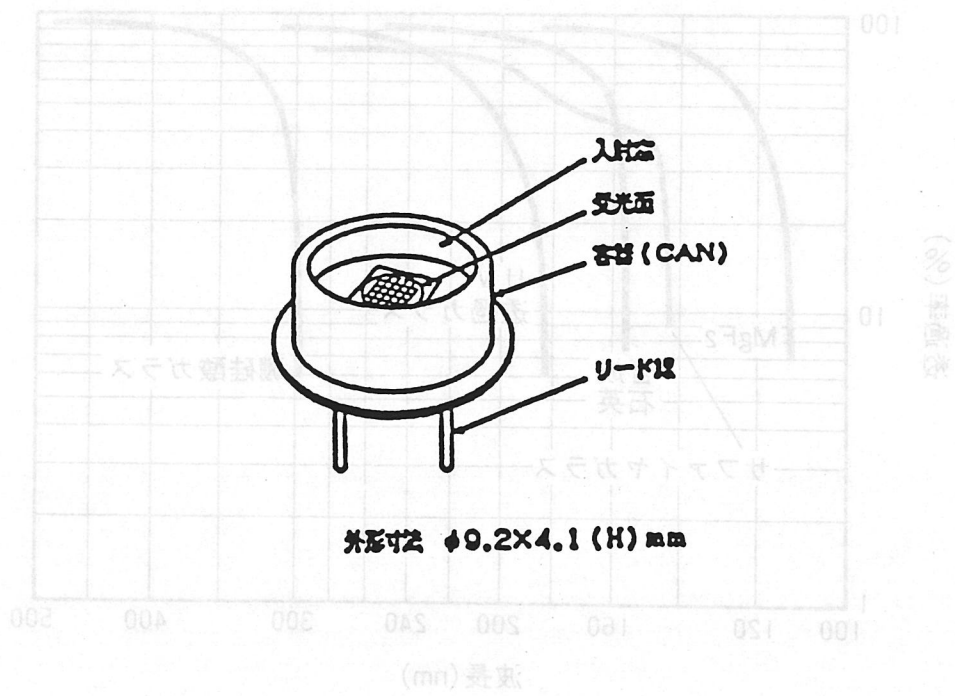


図4-17 SiUVセンサの受光面と動作原理模式図<sup>25)</sup>

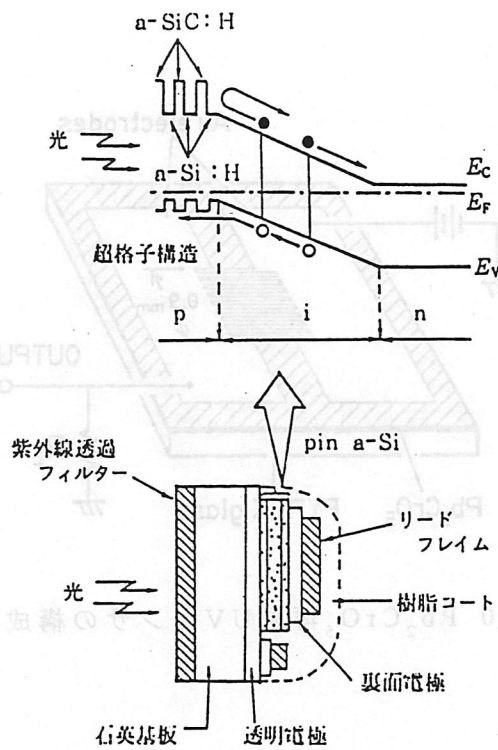


図4-18 a-Si/a-SiC超格子構造UVセンサの構造<sup>26)</sup>

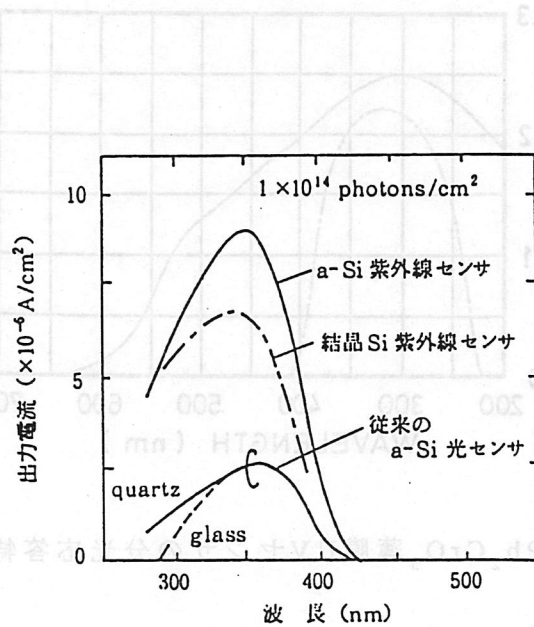


図4-19 a-Si/a-SiC超格子構造UVセンサの分光応答特性<sup>26)</sup>

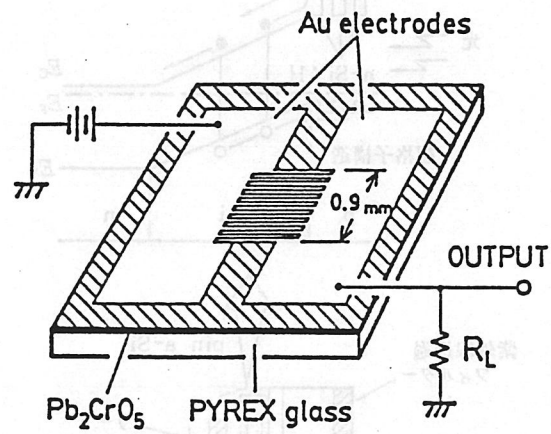


図4-20 Pb<sub>2</sub>CrO<sub>5</sub>薄膜UVセンサの構成図<sup>27)</sup>

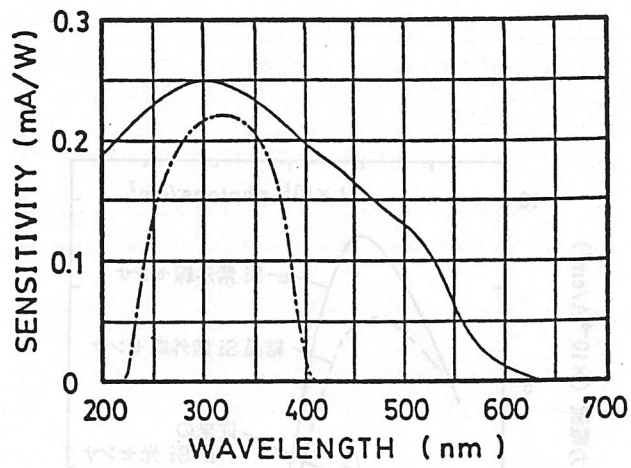


図4-21 Pb<sub>2</sub>CrO<sub>5</sub>薄膜UVセンサの分光応答特性<sup>27)</sup>

## 5. あとがき

以上、最近約5年間に渡る可視、赤外および紫外の各領域における光センサの研究開発動向についてまとめた。本報告書が有効に活用されることを切望する。

しかし、本文中でも述べているように、この分野の進展は日進月歩であり、社会の要求に答えて今後益々発展を続けることは確実である。その発展の中から、学会と密接に係わる関連分野への応用・研究も充分期待される。

したがって、これらの技術動向並びにその応用の可能性を引き続き調査しまとめていくことが学会にとって重要と思われる。本学会がこのような活動を通して活性化され、さらに一層の躍進を遂げることを切望する。

(増田 千尋)

