光センサの技術動向・総 説†

専門会員 増田 千尋* 専門会員 石井 弘允**

1. はじめに

光センサは光と電気量間の相互変換としての考えから、光波を媒体とした計測情報処理をも含めた情報変換モジュールとして理解される傾向にある。また、光の波長領域は380nm~780nmの可視光を中心に、数百 μm の遠赤外から数十nmの紫外域、さらにX線にまで及んでいる。

このように広範な光波を一つのセンサで扱うのは不可能であるが、半導体中に発生する量子力学的な励起電子を適当な方法で電子回路の信号として、また電磁波としての性質を直接物質との相互作用で誘起した、例えば光ヘテロダイン検出のように、信号で直接検出するもの、光の吸収による発熱量を温度や体積の変化として間接的に測定するものとに分類される。前者の量子型変換には多くの方法があり、回路との親和性がよく、集積化や高速信号処理に適しており、後者は光吸収率に波長依存性が少ないので絶対測定に適している。

現在、光センサは金属や半導体などのアモルファス膜の出現によってバルク結晶から多層薄膜結晶へ、結晶育成技術や微細加工技術を駆使した集積化でポイント計測から1次元あるいは2次元計測を可能にし、さらには信号を目的に応じて知的に処理するインテリジェント化、スマート化へと発展しつつある。

また、光を媒体とした計測に共通する利点是非接触性、高密度性、電磁的無誘導性などがあげられる。また、その測定対象としては時間、波長、振幅、位相、空間等の各領域とこれらの複合領域の情報検出があげられる。これらセンシング技術は新素材、デバイス並びに情報処理システム等の開発分野にも広く利用される展開を見せている。

2. 光センシングに利用される現象・効果

はじめに、光波に作用してその性質を変える光現象の幾つを列記する。スペクトル線の分岐間隔や強度が磁界の強さで変わるゼーマン効果はプラズマ内の磁界の強さ、プラズマ中の電子やイオンの温度、密度等の測定に応用される。

同様な効果は電界によっても起こり、シュタルク効果と呼ばれている。ポッケルス効果とカー効果は電気光学効果で、ファラデー効果、フォークト効果、コットン・ムートン効果及びカー磁気光効果は磁気光学効果でそれぞれ光の偏光面が変わる。また、光波と物質の格子または分子振動との相互作用で入射光と異なるスペクトルを提するラマン効果は分子構造の解明、分子の成分や密度の測定に利用される。このような散乱現象はブリルアン効果として音波との相互作用によっても起きる。ここで述べた現象は光電変換ではないが、光吸収係数、光学異方性、発光強度、スペクトルシフトなどの光学的性質の変化に還元して光の制御や分析に利用されている。

一方、光電効果は入射光子と物質中の束縛あるいは自由電子との量子効果に基づくもので、光導電効果、光起電力効果、光電磁効果、デンバー効果、ホトンドラッグ効果等の内部量子型や光電子を外部に放出する外部量子型を利用した多くの量子型光センサが開発されている。一般的に、内部量子型は赤外域に有効なものが種々開発されており、特に、光導電効果を用いているものが多く、また、Ge結晶中で光の進行方向に起電力を誘起するホトンドラッグ効果を用いたものは室温付近に最高感度があり、電源を必要とせず超高速応答が可能な小型センサとして期待される。これとは対比的に、外部量子型は紫外領域向きとされており、さらに、撮像管などの多チャンネルセンサにも有効に利用されてきたことは言うまでもない。

他方、金黒などを表面にもつ光吸収部を受光面とし、その温度上昇を熱起電能の大きなゼーベック効果による熱電対で検出するもの、また温度上昇を抵抗温度計で検出するボロメータなどは熱電効果を利用している。n形InSb中の自由電子の吸収で生ずるホットエレクトロン効果の自由電子光伝導もボロメータの一種と考えられるが、複雑なイオン結晶または分子性結晶で構造の非対称な結晶が温度上昇した結果、結晶内の電荷の配置に変化が起こり表面に正負の自発分極の生ずる焦電効果を利用したパイロセンサは赤外域で広く普及している。また、受光面の温度上昇を気体温度計の原理で検出するゴーレイセルは常温動作する熱電型光センサの中で可視光からミリ波域まで広範囲に使用できるデバイスとして親しまれてきた。

その他、超電導光センサは酸化物高温超電導材料の開発を契機に、熱電型から超電導接合に特有なジョセフソン効果等を利用した量子型へと移行しつつある。また、近年の

† An Overview of Optical Sensors

* 芝浦工業大学 システム工学部 電子情報システム学科
Chihiro Masuda

** 日本大学 理工学部 電気工学科

生体・生理工学分野の研究には目覚ましいものがあり、バクテリオロドプシンのような光機能素子としての新しい素材も幾つか発見されており、これらの中には安定度、解像力、製膜の容易さなどで液晶や結晶をしのぐ利点もあると報告されているが¹⁾、個体素子と融合させた実用的なデバイスとしての今後の動向に注目したい。

3. センサの多チャンネル化

TVの登場以来永く親しまれてきたイメージオルシコンなどの撮像管は明らかに多チャンネル光センサの部類に入る。現在では半導体集積回路技術によって種々の改良が加えられ、個体化されてイメージあるいはエリアセンサの名称で広く利用されるに至っている。結果として、検出限界NEPやD*に相当するSNR、動作光量域や直線性、空間分解能等は改善され、受光部寸法と配列が固定されるので画像歪の少ないことと共に、微弱光でのパターン計測へのニーズの高まりから注目されているデバイスである。

多チャンネル光センサの光電変換原理は先に述べた単素子センサのそれと同じものがほとんどであり、非蓄積型と蓄積型とがあるが、入射光をキャリアに変換しながら次の走査時間まで電荷を蓄積する後者が高感度化に対して有利である。また、走査方法にはMOS形センサに代表されるMOS-FETによるアドレス方式とSi-CCDのような電荷転送方式とがある。なお、材料によっては集積化や電荷読み出しに対して新しい製作プロセスや手法を取り入れないと実現が難しいものもある。

可視光域ではP形Siを基体とするCCD撮像素子が全盛時代であり、民生用では36～41万画素の高精細度化を達成し、1/2インチから1/4インチへと高密度化が進んでいる。

また、放送用では2/3インチで60万画素、ハイビジョン用では実に2/3インチで200万画素の開発へと向かっており、詳細は他の論文を参照頂きたい²⁾。

赤外領域ではInSb、 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (MCT) などや焦電結晶 $LiTaO_3$ などMOS-FET、Si-CCD (アナログ) の組合せからなるハイブリッド形がある。MCTは量子型デバイスの中でも構造の簡単な光導電(PC)形が光起電(PV)形より早く実用化された。単素子から始まって1次元アレイへと進んだが、バイアスを必要とするPC形は発熱と電極の多さから2次元までは至らなかった。しかし、長方形の一個の素子内で生成された寿命の長いキャリアの移動と走査の方向及び速度を一致させて遅延補償とキャリアの積分を同時に行かせたSPRITE (Signal Processing In The Element)の発明で、 $10\mu m$ 帯のPV形2次元アレイ 256×256 より優れた空間分解能を有している³⁾。一方、Siを基体とする光電変換機構はpn接合型とショットキバリア (BS)型に大別される。SB型は半導体と金属を接触させたときに生ずるショットキ障壁を、内部光電子放出効果により、越えた光電子を利用するタイプで、確立されたSi基板プロセス技術が使えるため、モノリシック化、高集積化を安定に低価格で実現できる。単純な構成と低雑音を特徴とするインライン転送方式を採用した2次元IRCCDはpn接合型可視光用検出部をSi-SB型に置き換えたものであるが、開口率 (転送部の検出部面積に対する割合) に難点がある。これと同等の低雑音を維持したまま開口率を改善した電荷掃き寄せ (Charge Sweep Device)方式はチップサイズ $16\times 12mm^2$ に 512×512 素子、開口率39%を実現している⁴⁾。他方、n形InSbウエハ上にプレーナ法によって背面入射型pn接合ホトダイオードアレイ 64×64 の受光部チップと同一ピ

表1 可視光センサ

	0 次 元	1 次 元	2 次 元
電子管型	・ 光電管 ・ 光電子増倍管	・ イメージintensifier + ダイオードアレイ	・ 撮像管 (Harp管など) ・ イメージintensifier ・ 特殊管 (ストリーク管など) ・ 複合素子 (電子管 + 半導体センサ)
半導体型	・ フォトダイオード Si系 PN接合 (含APD、PSD)、 MOSダイオード 化合物系 GaAsPN接合、積層膜 ・ 光導電性セル	・ 単結晶 CCD型、MOS型、BASIS型 ・ 多結晶、a-SiTFT	・ CCD型 FTCCD、FFCCD、ILCCD FITCCD、積層形CCD ・ X-Yアドレス型 MOS (含TSL、積層形)、CID CPD、CSD ・ 増幅型 バイポーラ形、AMI (含積層形)、 PCD、SIT、BASIS、CMD FGA、BCMD ・ インテリジェントセンサ PPCCD、ロドプシン

ツチ電極数の Si-CCD 信号転送部チップを別々に作成し、In パンプで圧接したハイブリッド IRCCD は開口率約100 %、 $D^* \approx 4.4 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ を達成している⁵⁾。また、HgCdTe でも同様な試みがなされているが、ハイブリッドタイプは異種半導体接続部の熱歪から最大素子数に限界が来ると予想される。

紫外領域では紫外線 (UV) の吸収を最小にするような材料の選択と構造の工夫が重要となる。単結晶 Si、アモルファス Si (a-Si) は PV 形として一般的であるが、UV センサとしては可視光域カットフィルタなどと組み合わせて使用

される。GaP, GaAsP は SB 形にして表面から接合部までの距離を短くしている。光電子放出型には Cs-Te を光電面とする光電子増倍管、Ni, Mo などの単金属光電面をガス封入してガス増倍作用で検出能力を上げた UVtron が開発されている⁶⁾。また、熱電型では真空紫外 VUV (Vacuum Ultraviolet Radiation) における冷却形マイクロボロメータが開発されている。一方、多チャンネル化に対しては Si-pn 接合を受光部とする 520×64 の UVCCD 等が報告されている⁷⁾。

表2 赤外放射センサ

	0 次 元	1 次 元	2 次 元
電子管型	<ul style="list-style-type: none"> ・ 光電管 ・ 光電子増倍管 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 撮像管 (焦電ビジコン、PbS ビジコンなど)
半導体型	<ul style="list-style-type: none"> ・ 光導電 (PC) 型 不純物ドーパ Si、Ge、PbS、PbSe、InSb、$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (MCT) など ・ 光起電力 (PV) 型 Si、Ge 系 PN 接合 (PIN、APD など) 化合物系 PbSnTe、InSb、InAs InGaAs、$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (MCT) など ・ 光電磁型 InSb、InAs など 	<ul style="list-style-type: none"> ・ SPRITE ・ CCD ・ 1次元走査光学系 + 単一検出器 	<ul style="list-style-type: none"> ・ CCD モノリシック 反転モード形、蓄積モード形、ショットキーバリア形 ハイブリッド 直接注入形 (PV 型センサ + CCD) 間接注入形 (PC 型センサ + CCD、焦電型センサ + CCD)
熱 型	<ul style="list-style-type: none"> ・ 起電力型 熱電対、サーモパイル ・ 導電型 サーミスタボロメータ、極低温ボロメータ (Ge など) ・ 焦電型 単結晶 (LiTaO_3、TGS など) セラミック (PbTiO_3、PZT 等) 有機系フィルム (PVF2 など) ・ 気体膨張 ゴーレイ・セル 		<ul style="list-style-type: none"> ・ CSD ショットキーバリア形 ・ MOS ショットキーバリア形 ・ CID 電荷注入形 ・ CIM ・ 1次元走査光学系 + リニアアレイセンサ ・ 2次元走査光学系 + 単一検出器
超電導型	<ul style="list-style-type: none"> ・ ジョセフソン接合 トンネル (SIS) 形、点接触形、ブリッジ形 ・ ボロメータ 		

表3 紫外放射センサ

	0 次 元	1 次 元	2 次 元
電子管型	・光電管 化合物光電面 (Cs-Te、NaSb) 単金属光電面 (Au、Snなど) ・光電子増倍管 ・UVtron	・イメージインテンシファイア + フォトダイオード	・イメージインテンシファイア ・マイクロチャンネルプレート
半導体型	・フォトダイオード Si系 (結晶、アモルファス) PN接合 ショットキー接合 化合物系 (GaAsP、GaP、 ZnCdS、SiCなど) PN接合 ショットキー接合 ・光導電型 CdS	・CCD ・フォトダイオードアレイ	・CCD

4. おわりに

集積化技術の進歩が電子回路の設計思想を大きく変えた様に、安価なマイクロプロセッサ (MPU) の普及はセンサの概念にも少なからず影響を与えようとしている。また、多チャンネルセンサの応用範囲が広がり、さらにバイオセンサが現実のものとなれば、従来のように信号変換部から伝送され処理するのではなく、処理の後のデータ、あるいはインタフェースや伝送部をも含めたインテリジェント化、やがて MPU をも内包したスマート化への要求度が高まるものと予想される。このような分散処理の考え方は計測の高精度化、高信頼化、高速化を可能にする。それに各々の分野における更なる技術革新と高速対応の総合的なアーキテクチャーの確立に期待したい。

参 考 文 献

- (1) オプトロニクス社：特集 光と生物，オプトロニクス，134(1993)47-71
- (2) 情報調査会：特集 機能分化を続ける CCD，センサ技術，13，7(1993)18-31
- (3) 藤野芳男：SPRITE デバイス，センサ技術，11，9(1991)60-64
- (4) 瀬戸俊樹：シリコン・ショットキバリア赤外線センサ，センサ技術，11，9(1991)65-71
- (5) 白水俊次：InSb 赤外イメージセンサ，センサ技術，11，9(1991)72-76
- (6) 浜松ホトニクス㈱：UVtron の使い方技術資料
- (7) Stern, R.A. et al.: Optical Engineering 26, 9(1987)875-883
(受付日 1994年1月25日)

ますだ ちひろ
増田千尋 (専門会員)

昭和16年11月21日生まれ。昭和40年3月芝浦工業大学工学部電子工学科卒業。昭和40年4月同大電子工学科電波研究室助手，昭和49年同科光電応用研究室勤務，昭和50年専任講師，昭和58年助教授，平成3年同大システム工学部電子情報システム学科情報伝送システム研究室勤務，平成6年教授。この間，アンテナ，光通信，光機能デバイス，分光計測，3次元画像表示，情報伝送，情報処理等の研究に従事。工学博士。電気学会，電子情報通信学会，テレビジョン学会，SPIE，日本分光学会，レーザー学会各会員。

いし い ひろまさ
石井弘允 (専門会員)

昭和11年3月11日生まれ。昭和33年日本大学工学部 (現理工学部) 電気工学科卒業。同大理工学部助手，専任講師，助教授を経て，昭和63年教授，現在に至る。主として光応用，画像処理，防災システムなどに関する研究に従事。工学博士。電気学会，計測自動制御学会，日本循環器学会などの会員。