

光検出デバイス

電磁波を検出する方法は、熱的検出、整流検出、量子効果による検出の3種類に大別できよう。サーモパイルはいくつかの熱電対を重ねたもので、光照射による温度上昇を測定する。焦電素子は、温度変化による誘電体内の自発分極の変化(焦電効果:pyroelectric effect)が誘起する電圧を検出する。ゴーレイセルは、温度上昇による容器内の気体の膨張が引き起こす容器の形状変化を検出する。また、検波用ダイオードは、ダイオードの持つ非線形な電流・電圧特性によって交流を整流して検出するもので、電磁波のマイクロ波、ミリ波の領域まではよく使われるが、現在の高周波限界はサブミリ波程度である。光検出素子としては高感度であることと同時に、特に最近の情報処理に用いるものとしては高速性が基本的特性である。熱的方法は高感度ではあるものの高速性に乏しく、整流検出は高速にできるが感度をあまり高くできない。この点、量子効果による検出法には原理的に高感度、高速性が期待できる。しかし、フォトンエネルギーが検出素子の温度における熱エネルギーと同程度になってくると、熱効果による雑音で S/N(signal-to-noise ratio)が悪くなるので検出素子を冷却することが必要となる。

光の検出法		
熱的検出		熱電対(サーモパイル),焦電素子,ゴーレイセル,ボロメータ
整流検出		検波用ダイオード(自乗検波)
量子効果による検出	外部光電効果(光電子放出)	光電管,光電子増倍管,イメージオルシコン
	内部光電効果(光導電,光起電効果)	光導電素子,光導電形撮像管 フォトダイオード,フォトトランジスタ, APD, CCD
	光化学効果	写真

量子効果によって励起された電子が、固体内部に留まったままで引き起こす効果を内部光電効果と呼び、固体の外部に飛び出して引き起こす効果を外部光電効果と呼ぶ。光電管は、この外部光電効果を利用したもので、真空中におかれた光電面への光照射によって放出された電子をコレクタに集めて電流として検出する。さらに、この光電子を加速して2次電子放出面にあてて増倍して検出するのが光電子増倍管(photo-multiplier)である。光電管にガスを封入し、加速された光電子によるガス分子の電離を用いた増倍法もガス入り光電管として用いられた。最近は少なくなったが、同じ原理を固体中で実現しているのが後に述べるアバランシェ・フォトダイオードである。これらの外部光電効果を利用する真空管は、いずれも小型にするのは難しい。半導体の内部光電効果(光導電効果,光起電効果)を用いた検出素子は高感度、高速応答に加えて小型軽量で、普通は低電圧で動作するからICとの結合性もよく高機能化、多機能化も期待できる。ここでは、量子効果を利用した半導体検出素子を中心に述べる。

光検出素子の性能指数

高感度光検出素子としては、微弱な光を検出できることが望ましく、その感度(re-sponsivity)は単位入力当たりの出力電圧(あるいは出力電流)で表すことができる(V_o/P_{in})。光の検出ができるためには、この出力電圧が検出器のもつ雑音電圧より大きいことが必要である。検出できる最低の入力レベルは(パワーで)それらが等しいとき、すなわち $S/N = 1$ のときである。これを雑音等価入力(noise equivalent power:NEP)という。

$D=1/NEP$ を単位受光面積、単位バンド幅あたりに換算した量を比検出度(detectivity: D^*)と呼ぶ。単位バンド幅とは、ノイズはバンド幅が広ければ広いだけ沢山とりこまれるからである。検出器面積を A 、検出バンド幅を $\Delta\nu$ とする。 $D^*=(A \Delta\nu)^{1/2}/NEP$ [$cmHz^{1/2}W^{-1}$]の値が大きい検出器ほど良い検出器といえる。励起されたキャリア数と入射光子数の比を量子効率という。検出素子からの出力は、キャリアが励起される量子効率とその励起されたキャリアがいかに有効に利用されるかで決まる。一方、雑音としては、検出器のおかれている背景雑音、電流が電子のばらばらな流れであることによるショット雑音、検出素子の暗電流、熱雑音などがある。

スペクトル分布

量子効果を用いる光検出素子が検出しようとする光のスペクトル幅を必要以上にとることは得策ではない。例えば、電子・ホール対生成によるキャリア励起を用いる場合には、バンドギャップをある値以下にすれば検出は可能であるが、バンドギャップが小さくなるほど暗電流が増加するので、検出する光の最低周波数を ν_m とすれば $h\nu_m = E_g$ となるようにした方がよい。それより高い周波数の光は吸収されて検出されるが、吸収係数が大きくなるので、さらに波長が短くなると、キャリアの寿命が短い表面付近で生成されるキャリアの割合が増え、一般に、感度は落ちてくる。

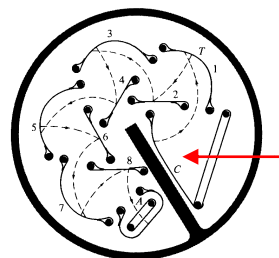
高遠応答

応答速度を決める最も本質的な要因はキャリア走行時間である。したがって、キャリアが走行する領域をなるべく狭くし、高い電場をかけてキャリアの速度を高くすればよいが、前者は入射光を受ける面積を小さくするし、後者は暗電流を増加させて感度を低下させるので両者のかねあいで設計が決まる。材料定数としては、キャリア移動度が大きく、飽和速度の大きい方がよい。また、少数キャリアの蓄積効果が問題となる場合があり、多数キャリアデバイスの方が一般に応答速度が速い。さらに、検出回路の RC 時定数が応答速度を決める場合も少なくなく、検出素子の直列抵抗や容量を小さくすることも大事である。

培風館：電子情報工学講座 10 光エレクトロニクスデバイス 針生尚 より

光電子増倍管

この受光デバイスは、真空管の中に、光電効果による電子放出を行う photocathode と、その後には 2 次電子放出をカスケードで行うためのダイノード(加速電圧は 100～数 100V)、最後に集電極が配置されている。その特徴は、高い電流増幅率($G=\delta^N$, N はダイノード段数、1 個の入射電子から平均 δ 個の 2 次電子が放出される。典型的な値として、 $\delta=5$ 、 $N=9$ とすると $G=2 \times 10^6$) と低ノイズであり、非常に有用なデバイスとして長年つかわれている。Photocathode の材料を変えることで、紫外から近赤外の光領域で使える。冷却、出力パルスの弁別などを行えば、光エネルギーとして 10^{-19}W 程度まで測定できる(近赤外の光子 1 個のエネルギーが 1eV だから 1 光子の検出が原理的には可能である)。アナログ的に用いるとき、時間分解能は電子の運動経路のばらつきで決まり、ナノ秒程度である。



光電子増倍管のノイズは次のとおり：

- (1) Photocathode 起源のショットノイズ ($\langle I_N^2 \rangle = G^2 2e \{ \langle i_c \rangle + i_d \} \Delta \nu$), ただし $\langle i_c \rangle$ は Photocathode から放出される信号光起源の電流の平均値で、入射光量に比例する。 i_d は暗電流といわれ、光入射無しに熱電子放出や宇宙線入射などで放出される電流である。熱電子の部分は冷却により減少する。ダイノード起源のノイズは寄与が小さい。
- (2) 信号電流から電圧を得るためにつける外部抵抗によるジョンソンノイズもあるが、Photocathode からのショットノイズに比べるとはるかに小さい。

- 問 1. 波長 $0.6 \mu \text{m}$ の光が $P=10^{-10} \text{W}$ で Photocathode に入ったとき、効率 $\eta=10\%$ で光電子が出るとすると、平均的には 1 秒にどれくらいの電子が Photocathode から飛び出すか。(参：射光子数の η 倍が Photocathode 放出電子数となる。)
- 問 2. Photocathode 起源のショットノイズが $\langle I_N^2 \rangle = G^2 2e \{ \langle i_c \rangle + i_d \} \Delta \nu$ となることを示せ。
- 問 3. Photocathode へ入射する光の周波数が ν 、パワーが P 、Photocathode の量子効率が η 、電流増幅率が G 、出力電流を R の抵抗(絶対温度 T)に流して電圧信号を求めるとき、信号光起源および暗電流起源のショットノイズとジョンソンノイズによる S/N が

$$S/N = \frac{\langle I_s^2 \rangle}{\langle I_{NS}^2 \rangle + \langle I_{NI}^2 \rangle} = \frac{([P/(h\nu)]e\eta)^2 G^2}{2G^2 e(\langle i_c \rangle + i_d)\Delta\nu + (4kT/R)\Delta\nu} \quad \text{となることを示せ。}$$

- 問4. 問1において、フォトカソードから出る暗電流 $i_d=10^{-15}\text{A}$ 、電流増幅率が $G=10^6$ のとき、バンド幅 1Hz で検出可能な最小の光パワーはどれだけか。終端抵抗は $1\text{k}\Omega$ で室温。
- 問5. 以上の検出の仕方をビデオ方式と言うのに対して、ヘテロダイン方式というやりかたがある。非常に弱いコヒーレンスのある信号光(振幅= $E_s \cos \omega_s t$ 、パワー P_s)に局部発振としてレーザー光(振幅= $E_L \cos(\omega_s + \omega)t$ 、パワー P_L)を重ねてフォトカソードに入射する。 $E_L \gg E_s$ 、 $\omega_s \gg \omega$ とせよ。カソード電流が $i_c = [eP_L \eta / (h\nu)] [1 + 2(P_s/P_L)^{1/2} \cos \omega t]$ と書けることを確認せよ。次に、最終段のアノードで $S/N = (P_s P_L) (e\eta/h\nu)^2 [e\{i_d + P_L \eta / (h\nu)\} \Delta\nu]^{-1}$ となることを確認せよ。 S/N と P_L の関係を論じ到達極限を求めよ。問4の数値を用いると、最小検出限界はどうなるか。