

## 最近の技術から

# 遠赤外検知器

高井 正 弘

関西大学工学部電気工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-65

遠赤外検知器は、熱検知器 (thermal detector) と光子検知器 (photon detector) に大別できる。熱検知器は温度による物質の物理特性の変化を利用するもので、熱電対、ゴレーセル、ボロメーター、焦電検知器等があり、光子検知器は入射光子と物質中電子の相互作用にもとづくもので、光起電検知器、光導電検知器、ホトンドラグ検知器等がある。これらのほかに、非常に応答速度の速い点接触ダイオードがある。

近年、遠赤外レーザーの開発ならびにその多方面への応用の進展に伴い、使用目的に応じて最適の性能 (分光感度、検知能  $D$ 、感度  $R$ 、応答時間  $\tau$  等) をもつ検知器が必要になってきた。ここでは、波長  $100 \mu\text{m}$  以上の光に対して、とくに高感度、高速応答性をもつ検知器として注目されている「電子ボロメーター」(electron bolometer) について概説する。

電子ボロメーターは、光導電型検知器の一種であるが、従来のもとは、その機構が異なる。光導電検知器は、一般に固有励起 (真性半導体検知器) と不純物励起 (不純物半導体検知器) による光伝導が用いられている。前者は、価電子帯から伝導帯への電子励起で生成された、自由電子と自由ホールによるものである。この励起が生じるためには、価電子帯と伝導帯のエネルギーギャップ以上のエネルギーが必要であり、通常  $10 \mu\text{m}$  よりも短波長の光に有効である。後者は、不純物半導体中のドナー準位から伝導帯へ、または価電子帯からアクセプター準位への励起で生成される自由電子または自由ホールによるものである。この場合の励起には、ドナーと伝導帯または価電子帯とアクセプター間のエネルギーギャップ以上のエネルギーが必要で、大体波長  $10 \mu\text{m}$  から  $120 \mu\text{m}$  の光に対応する。一方、電子ボロメーターは、伝導帯中に存在する自由電子が光を直接吸収して生じる、移動度の変化を利用するもので、波長  $100 \mu\text{m}$  以上の光に対して有効である。

半導体中の自由電子は、結晶格子とエネルギー交換を行なって熱平衡状態になっており、過剰なエネルギーが自由電子に入射されても、結晶全体の温度は上昇する

が、自由電子と格子は新たな熱平衡状態になる。ところが低温になると自由電子と格子の結合が弱くなり、熱平衡状態よりも大きなエネルギーをもつ電子 (hot electron) が存在するような定常状態が可能になる。電子間のエネルギー交換が有効に行なわれるならば、電子の平均温度は、格子温度よりも大きくなる。いま、電子密度を一定とすれば、電気伝導度は移動度に比例するので、電子温度とともに変化することになる。この過程を用いる検知器は、格子の熱吸収による抵抗変化から、入射光を検出するボロメーターとの類似で、「電子ボロメーター」と呼ばれている。電子ボロメーターとして動作するには、入射光を効率よく吸収することが必要である。自由電子による光の吸収は、波長の2乗に比例して増加し、 $\omega\tau_e < 1$  で一定になる ( $\omega$ : 入射光の角周波数、 $\tau_e$  は電子の散乱時間)。たとえば、n-InSb で、 $\omega\tau_e = 1$  になる波長は約  $1.5 \text{mm}$  であり、電子ボロメーターが長波長帯の検出に適することがわかる。

hot electron による電気伝導は、オームの法則からのずれ (non-ohmic) を示す。このときの電気伝導度  $\sigma$  は、

$$\sigma = \sigma_0(1 + \beta E^2) \quad (1)$$

で与えられる。ここで  $E$  は印加電界、 $\sigma_0$  は電界が0のときの伝導度、 $\beta$  は次式で決定される定数である。

$$\beta = (1/\sigma_0) [d\sigma/d(E^2)] \quad (2)$$

電子ボロメーターの電圧感度  $R$  および応答時間  $\tau$  は、

$$R = \beta V / v\sigma \quad (3)$$

$$\tau = (3/2)(k/e)\beta(d\mu/dT)^{-1} \quad (4)$$

で示される<sup>1)</sup>。ここで、 $V$  はバイアス電圧、 $v$  は検知器の体積、 $k$  はボルツマン定数である。

(3)、(4)から  $\beta$  を消去して次式をえる。

$$R = (2/3)(\tau/nk) \{ (1/\mu)(d\mu/dT) \} (v/V) \quad (5)$$

上式 ( $n$  はキャリアー密度) により、感度と応答時間は、相反する関係にあることがわかる。

最初の電子ボロメーターには、Putley<sup>2)</sup> によって InSb が用いられた。この素子は、インピーダンスが低く、信号検出にあたっては、実効的にインピーダンスを

表 1 InSb 電子ボロメーターの性能  
(測定波長: 1,000  $\mu\text{m}$ )

検知器	動作温度 (K)	NEP (W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )	応答時間 (s)	感度 (V/W)
Putley	1.5	$5 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-7}$	1,000
Rollin	4.2	$6 \times 10^{-13}$	$\sim 10^{-3}$	
Nakajima	4.2	$4 \times 10^{-13}$	$\sim 10^{-7}$	

表 2 ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x$ ) Te 素子の物理定数  
(温度 77 K)

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$	$x$	移動度 $\mu$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	キャリアー密度 $n$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
B 2228/1	0.44	$1.7 \times 10^4$	$1.6 \times 10^{14}$
B 2228/4	0.43	$1.5 \times 10^4$	$2.0 \times 10^{14}$
B 2228/5	0.39		$3.0 \times 10^{14}$

増加させる工夫がなされている。Putleyは、弱磁場を印加し (Putley detector), Kinch と Rollin<sup>3)</sup> は、液体ヘリウムで冷却した step up トランスを用い (Rollin detector), Nakajima<sup>4)</sup> らは、新しい電子回路を考案した。これらの性能を表 1 に示す。

InSb 以外の素子としては、今のところ  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  が最も秀れている。このことは、すでに 1963 年<sup>5)</sup> に指摘されていたが、最近<sup>6)</sup> まで、そのために必要な特性をもつ結晶がえられなかった。電子ボロメーター用としては、自由電子の有効質量  $m^*$  が小さく、大きな移動度  $\mu$  をもち、さらに温度  $T$  に対する変化率  $d\mu/dT$  が大きいことが必要である。InSb (4 K 以下) では、 $m^*$ ,  $\mu$ ,  $d\mu/dT$  は温度の関数であるが、 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  の場合には、さらに成分  $x$  に依存する。したがって、 $x$  値の選定が重要であるが、 $x \approx 0.4$  が適当であると考えられる<sup>7)</sup>。

筆者<sup>8)</sup> らが研究中の  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  電子ボロメーターについて、以下に紹介する。まず代表的な素子の物理定数は、表 2 のようなものである。素子は、単結晶を 4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  2 mm の板状に切り、4 mm  $\times$  2 mm の両面に電極をインジウム付けし、4 mm  $\times$  4 mm 面へ光を入射させるようにして、液体ヘリウムで冷却したクライオ

スタット内に取り付けて用いている。たとえば、2,228/4 の場合、電気抵抗は、室温での 53  $\Omega$  から、1.2 K では 2.5 k $\Omega$  に上昇し、吸収係数は、波長 200  $\mu\text{m}$  で  $2 \text{ cm}^{-1}$  から、1,000  $\mu\text{m}$  では  $40 \text{ cm}^{-1}$  に増加した。これらのことから、長波長帯での高感度が予想されるが、代表的な性能は、次のとおりである。

$$\tau \leq 2 \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$R = 100 \text{ V W}^{-1} (\text{at } 100 \mu\text{m}), 1,000 \text{ V W}^{-1} (\text{at } 1,000 \mu\text{m})$$

$$D = 5 \times 10^{10} \text{ W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2} (\text{at } 100 \mu\text{m}), 5 \times 10^{11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2} (\text{at } 1,000 \mu\text{m})$$

InSb に比べて、感度は、ほぼ同じであり、応答時間は 1 桁以上速く、またインピーダンス変換の工夫が不要で、装置が簡便になる等の利点がある。

素子に高磁界を加えると、自由電子のサイクロトロン周波数近辺の入射光に対して、共鳴吸収が生じる<sup>9)</sup>。この現象を利用して、入射光に応じて、選択的なピーク感度をもつ、tunable 電子ボロメーターについても、目下研究中である。

## 文 献

- 1) S. M. Kogan: Sov. Phys.-Solid State, **4** (1963) 1386.
- 2) E. H. Putley: Proc. Phys. Soc. (London), **76** (1960) 802.
- 3) M. A. Kinch and B. V. Rollin: Br. J. Appl. Phys., **14** (1963) 672.
- 4) F. Nakajima, M. Kobayashi and S. Narita: Jpn. J. Appl. Phys., **17** (1978) 149.
- 5) M. A. C. S. Brown, M. F. Kimmitt and V. Roberts: Proc. IRIS (August 1963) p. 117.
- 6) B. A. Weber and S. M. Kulpa: Jpn. J. Appl. Phys., **19** (Suppl. 19-3) (1980) 345.
- 7) M. F. Kimmitt: 9th Int. Conf. on IR and MM Waves M 6-1 (1984).
- 8) M. F. Kimmitt and M. Takai: 8th Int. Conf. on IR and MM Waves T 2-5 (1983); 高井正弘, M. F. Kimmitt: 電気関係学会 (関西) G 10-26 (1984).
- 9) M. A. C. S. Brown and M. F. Kimmitt: Infrared Phys., **5** (1965) 93.

(1985 年 2 月 1 日受理)