解 説

赤 外 線 検 知 器

山 下 英 男

富士通研究所 明石市大久保町

(1975年10月 8 日受理)

Infrared Detectors

Hideo YAMASHITA

Fujitsu Laboratories Ltd.,
Okubo-cho, Akashi-shi

(Received Oct. 8, 1975)

Synopsis :

Based on photoconductive and photovoltaic effects of Semiconductors, a variety of infrared detectors such as InSb, GeAu and HgCdTe have been developed and widely used in industrial application, medical examination, weather observation and pollution measurement. To extend spectrum ranges, we are now studying infrared detectors using new materials such as PbSnTe.

In this paper, we have reported the outlines of InSb, GeAu and HgCdTe infrared detectors. The problems of the detectors may be summarized into five points, including (1) detector housing, (2) detector element sensitivity, (3) time constant, (4) cooling of element and (5) spectral response.

Binary semiconductors, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ and $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, have composition-dependent energy gaps which can be made arbitrarily small according to the proposed band model. The unique structure of the energy bands together with the ease in producing single crystals of excellent homogeneity and good quality have made these alloys particularly useful for long wavelength infrared detectors as well as lasers.

As described above, HgCdTe and PbSnTe crystals provide very interesting characteristics and are the most suitable materials for infrared detectors. A great many applications of HgCdTe and PbSnTe detectors may be expected in the near future.

1. ま え が き

赤外線は、電波、可視光線、などと同じように電磁波の一種で、一般に可視光線で用いる光学機械はそのほとんどが反射光の観測であるのに対して、赤外線領域では物体それ自身が赤外線を放出し、その光を直接観測するところに特長がある。このような赤外線のいわゆるパッシブ利用にはいろいろなおもしろい応用が考えられており、現在、工業用、医学用、気象用、公

害検知用、地質学用など各方面に利用され、その将来が期待されている。

赤外線検知器が実用されるようになってから相当の年月がたち、この間色々な種類の赤外線検知器が考案され、開発されてきたが、一口にいて、赤外線吸収による格子振動エネルギーの増加、すなわち温度上昇を利用する赤外線検知器と、赤外線吸収による電子励起やその再結合を利用した量子（半導体）赤外線検知器に大別できる。

前者は冷却を必要としない簡易型仕様の装置に使用され、後者は冷却を必要とするが高性能型仕様の装置に使用され、この二極化の傾向は加速されつつある。

ここでは、冷却を必要とするが将来非接触で、単に温度だけでなく、ひろがりをも有する温度パターンを知ることができる半導体赤外線検知器について、その概要を述べると共に、この種の新しい赤外線検知器の動向にふれてみたい。

2. 赤外線検知器の概要¹⁾²⁾³⁾

2.1 物体からの赤外線放射

すべての物体は、その温度が絶対温度 0K (すなわち -273°C) より少しでも高いと、その物体を構成している原子、分子の振動と回転により、その表面温度で可成るスペクトル分布を持った電磁波を放射する。表面温度が高くなるにしたがって熱放射は増加し、その波長は短くなる。この関係を導いた式(1)で示されるものがプランクの法則であり、図示すれば図1となる。

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} [\exp(-\frac{C_2}{\lambda T}) - 1] \dots\dots (1)$$

$E(\lambda, T)$: 温度 TK, 波長 λ の分光放射
発散度

λ : 放射される波長

T : 黒体の絶対温度

C_1 : $2\pi^5 C^2 h^2 / 15 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W}\mu\text{m}^2\text{cm}^{-2}$

C_2 : $hc/K = 1.438 \times 10^4 \mu\text{K}$

Kボルツマン定数

2.2 温度と波長および放射エネルギーの関係

物体の温度が高くなると熱放射は大きくなり、可視光として 500°C (773K) 付近で赤色を帯びた光を出し、 $1,000^{\circ}\text{C}$ ($1,273\text{K}$)、 $2,000^{\circ}\text{C}$ ($2,273\text{K}$) と高温になるにつれて橙色から黄色となり、 $3,000^{\circ}\text{C}$ ($3,273\text{K}$) ともなると白っぽく輝くようになる。

この輝度を測定するのがパイロメータである。しかし、 500°C 以下の物体からは可視光を出さないため、その温度を測定するには物体から放射される赤外線を測定しなければならない。この際測定を最も効率よく行なうためには、放射される赤外線の最も強い波長域に感度のよい検知器を使用する必要がある。

放射エネルギーが最大となる波長 λ_m は(1)式を波長 λ について微分し、最大値となる $\lambda_m T$ を求めたものが(2)式のウィーン(Wien)の変位則である。

$$\lambda_m T = 2,897 \mu\text{K} \dots\dots (2)$$

図1 黒体の分光放射発散度

すなわち λ_m は絶対温度に逆比例して短くなる。絶対温度 TK の物体から放射される全エネルギー W は、物体の放射率を ϵ として(1)式を全波長域について積分して求めた(3)式で計算でき、これが「熱放射の強さは絶対温度の4乗に比例する」というステファン・ボルツマン(Stefan・Boltzmann)の法則である。

$$W = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \epsilon E(\lambda, T) d\lambda = \epsilon \sigma T^4 \dots\dots (3)$$

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{deg}^4$$

: ステファン・ボルツマン定数

簡易型仕様の装置に使用されるボロメータなどの赤外線検知器は(3)式で可成る物体の放射エネルギーを受けて検知素子の温度変化を電気信号の変化に変換させ測定するもので時定数が大きく、感度が低いという欠点をもっている。高価であるがこの欠点を解消したのが、次に述べる半導体赤外線検知器である。

2.3 半導体赤外線検知器⁴⁾⁵⁾

半導体赤外線検知器の構造の一例を図2に示す。受光面が軸方向のものと、軸に垂直なものと二種類ある。これらの半導体を用いた赤外線検知器は一般に感度が高く、応答速度も速いが、感度に波長依存性があり、また不純物の熱イオン化を避け、その特性を充分に発

図 2 半導体赤外線検知器の構造

揮させるためには液体ヘリウムまたは液体窒素を用いて 30K, 77K に冷却しなければならない。

このため多くの赤外線検知器はその用途により、内筒に液体ヘリウム、液体窒素を注入し冷却するような構造になっている。

特に小型、軽量を必要とする場合は、電子冷却または図 3 に示すミニクーラー⁶⁾を利用している。これは高圧窒素ガスまたは高圧アルゴンガスの断熱膨張を利用し、半導体検知素子 (例えば InSb, GeAu, HgCdTe) を 80K に冷却し動作させる。

赤外線検知器の窓は検知素子の有効波長領域に応じ

図 3 ミニ・クーラー⁶⁾

てシリコン (Si), またはゲルマニウム (Ge) 板にそれぞれ反射防止膜コーティングを施したものを使用している。

(1) 真性光伝導形赤外線検知器

赤外線の入射により伝導帯の電子は、光量子を吸収して伝導帯に励起され、電気伝導度が増加する。半導体のエネルギーギャップ $E_g = Ch/\lambda$ に相当した波長 λ 以下の光に対して、キャリアの励起が可能である。光伝導形 InSb 赤外線検知器、光伝導形 HgCdTe 赤外線検知器がこの部類に属する。

光伝導形 InSb 赤外線検知器は InSb の光伝導効果を利用したもので、最大の波長感度を得るには、液体窒素温度(77K)に冷却する必要がある。有効波長領域は $1.2 \sim 5.7 \mu\text{m}$ をカバーしていて波長感度のピークは約 $5 \mu\text{m}$ である。

この種の赤外線検知器の応用範囲は広く、放射計、映像監視装置、赤外分光光度計、一酸化炭素の検出など $1.2 \sim 5.7 \mu\text{m}$ 位の赤外線の検出に使用されている。

光伝導形 HgCdTe 赤外線検知器は $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 検知素子単結晶の成分比 x 値を選ぶことによって、検知器の波長感度を目標物体が放射する赤外線のピーク波長に合わせて作ることができる。従って $x \div 0.2$ を選べば最大波長感度を約 $10 \mu\text{m}$ に合わせることができ常温目標物体からの赤外線を検知することが可能となる。

医学応用、警備防衛用など応用分野は広い。

(2) 外因性光伝導形赤外線検知器

半導体に不純物を添加し、エネルギーギャップ内に不純物準位を形成して、入射赤外線により、ドナー準位から伝導帯への電子の励起、あるいは伝導帯よりアクセプタ準位への電子の励起をはかることにより、電子または正孔の増加に伴う光伝導度の増加をさせるものである。光伝導形 GeAu 赤外線検知器がこの部類に属する。

この光伝導形 GeAu 赤外線検知器は GeAu の光伝導効果を利用したもので、最大の感度を得るには、やはり液体窒素温度(77K)に冷却する必要がある。

有効波長領域は $1.2 \mu\text{m} \sim 9 \mu\text{m}$ をカバーしていて、波長感度のピークは $5 \mu\text{m} \sim 6 \mu\text{m}$ である。

(3) 光起電力形赤外線検知器

PN 接合を形成した半導体素子を利用するもので、赤外線の吸収によって生じる少数キャリアが定常状態により過剰な電子および正孔となって、PN 接合部の障壁の両側に集って光起電力を発生する。このためバイアス電源が不要である。光起電力形 InSb、光起電力形 HgCdTe 赤外線がこの部類に属する。

なお InSb について、光伝導形(photo-Conductive)

表 1 光伝導形と光起電力形の比較 (InSb)

項 目	Photo-Conductive	Photo-Voltaic
構 成	Intrinsic Semiconductor	P-N Junction Conductor
外 部 電 圧	必 要	不 要
モ デ ル
作 動 原 理	$E = \frac{hc}{\lambda} = 1.24 \lambda^{-1} > E_g$ のエネルギーを持ったフォトンが入ってくると伝導帯の電子は伝導帯に上り伝導帯に電子、伝導帯に正孔が発生する。外部電圧がかけられると伝導帯の電子は $\oplus$ へ、伝導帯の正孔は $\ominus$ へ移動することにより電流が流れる。従って入射フォtonsの数に比例して抵抗が変化する。	電子正孔の発生はP、Cと同じ。ただしP-N接合部には内部電界があるため、電子はN層へ正孔はP層へ集まる。外部回路を接続すると電子はN層から外部回路を通してP層へ流れることにより電流が取り出される。従って入射フォtonsの数に比例した電圧が発生される。
V-I 曲 線

表 2 半導体赤外線検知器の主要性能

項 目	InSb(PC)	InSb(Pv)	GeAu(PC)	Hg _{0.8} Cd _{0.2} Te (PC)	単 位
有 効 波 長 領 域	1.2~5.7	1.2~5.5	1.2~9	1.2~1.4	μm
動 作 温 度	77	77	77	77	$^{\circ}\text{K}$
感 度 R	1,500	$0.3\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$	1,500	1,000	$\text{V}\cdot\text{W}^{-1}$
比検出能 (黒体感度) D^*	$\geq 8 \times 10^9$	$\geq 1.5 \times 10^{10}$	$\geq 2 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^{10}$	$\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$
最大波長感度 $D^*_{\lambda_{\text{max}}}$	$\geq 4 \times 10^{10}$	$\geq 7.5 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^9$	$\geq 2 \times 10^{10}$	$\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$
暗 抵 抗	2~10	ダイナミックインピーダンス $\left(\frac{dV}{dI}\right)_{V=0} > 10$	50~500	0.02~0.5	$\text{k}\Omega$
時 定 数	< 10	(測定条件による) < 5	< 1	< 1	μsec
検 知 面 積 (素子寸法)	$\geq 2 \times 2$	$\geq 2\phi$	$\geq 2 \times 2$	$\geq 1 \times 1$	mm^2
窓 材 料	Si (反射防止膜コーティング)	Si (反射防止膜コーティング)	Si (反射防止膜コーティング)	Ge (反射防止膜コーティング)	—
視 野 FOV	60	60	60	60	deg
液体窒素保持時間	> 4	> 4	> 4	> 4	hr
短 絡 電 流 I_{sc}	—	(面積に依存)8	—	—	$\mu\text{A}/\text{mm}^2$

と光起電力形(photo-Voltaic)の比較を表1に示す。

(4) 性能・波長感度特性

すべての用途に対して、その要求を満たす検知器はないので、それぞれの用途に適した検知器を選択する必要がある。この場合、選択の条件としては次項を配慮することが望ましい。

- i) 応答波長
- ii) 感度
- iii) 応答速度

iv) 動作温度

v) 検知器形状

vi) 受光面積

vii) 価格

これらの性能のほとんどがその検知器がどのような原理を利用しているかによって決まるので検知器の選択にあたっては、その動作原理まで理解しておく必要がある。

赤外線検知器は種々の用途に応じて要求される性能

スペクトラル・レスポンス InSb (PC)

スペクトラル・レスポンス InSb (PV)

図 4 分光感度特性 (InSb)

図 5 分光感度特性 (GeAu, HgCdTe)

表 3 赤外線温度計の仕様比較

No.	項目	仕様別	簡易仕様型	高級性能仕様型
1	被測定物		点 (スポット)	面 (温度パターン)
2	測温範囲 (波長領域)		$-50^{\circ}\text{C} \sim 2,000^{\circ}\text{C}$ ($3\mu \sim 20\mu$)	$-50^{\circ}\text{C} \sim 2,000^{\circ}\text{C}$ ($3\mu \sim 20\mu$)
3	検知器		サーミスタ ボロメータ素子 焦電形素子 PbS, PbSe 素子	InSb 素子 HgCdTe 素子 PbSnTe 素子
4	検知器動作温度		常温	液体窒素 (77K)
5	検知器感度		2×10^3 : サーミスタ $D^* 8 \times 10^8$: 焦電形 2×10^9 : PbS	4×10^{10} : InSb $D^* \lambda_{\max}$ 2×10^{10} : HgCdTe 2×10^{10} : PbSnTe
6	分解能		悪い	良い
7	表示方法		メータ直読 グラフ表示	写真撮影 ブラウン管(カラー)表示 等温表示
8	取り扱い		簡単	複雑
9	価格		安い (30万~100万)	高い (500万~2,000万)
10	用途		熱的非破壊試験 部品装置の保守と検査	各種工業プラントの内部 診断・臨床医学
11	将来性		非接触で、静止、回転体をとわず、 固体液体にかかわらず、物質の表面 温度が測定できる。	非接触で単に温度だけでなくひろが りを有する温度パターンを知ること ができる。

いろいろあるが、特に重視されるものは 1) 黒体感度、2) 応答波長、3) 時定数である。

黒体感度とは標準黒体炉から放射される放射エネルギーに対しての検知器の感度であり、一般に検知器の信号対雑音比が 1 になるときの検知素子に当たる放射エネルギーの量で示される。

波長感度は検知器感度のスペクトル分布を示すもの

である。時定数は放射線を急速に遮断したとき信号が $1/e$ に落ちるまでの時間で示される。

これらの主要性能をそれぞれの検知器についてまとめると表 2 になる。またこれら個々の検知器の分光感度特性の一例を図 4、図 5 に示す。

半導体赤外線検知器は光子検知器とも云われるように、半導体の内部光電効果を利用するものであるの

図 6 各種検知器の分光感度と大気窓

で、非常に速いレスポンスが得られる。例えば InSb, GeAu 検知器では 77 K で $10 \mu \text{ sec}$, 以下であり, HgCdTe 検知器では $0.01 \sim 0.1 \mu \text{ sec}$, である。この点, 検知素子の温度上昇を利用した熱起電力, あるいは電気抵抗変化を利用して信号をとり出していたサーミスタ・ボロメータでは 1.5 m sec . サーマカップルでは 36 m sec . 程度で、本質的に時定数が長いので赤外映像化(温度パターン化)が困難となる。

なお、参考に赤外線温度計の簡易、高性能型、仕様比較を表 3 に示す。

3. 赤外線検知器の応用⁷⁾⁸⁾⁹⁾

赤外線検知器は、工業用を始めとして、医学用、気象用、公害検知用、農業用、海洋地質用、土木建築用と応用範囲は広く利用されている。

InSb 赤外線検知器の場合、図 4 に示したごとく $1.2 \mu \sim 5.7 \mu$ 程度、GeAu の場合、図 5 に示したごとく、 $1.2 \mu \sim 9.0 \mu$ 程度の赤外線検出装置に利用できる。

しかし、これらの広い分野で用いられている赤外線のパッシブ的な利用法は非常に簡単なシステムの組合わせにほかならない。それは

- 1) 測定しようとする物体(すなわち光源にあたる)
- 2) 物体から放出される赤外光を集める光学系
- 3) 赤外光を電気信号に変換する赤外線検知器

4) データを表示する電気系

の 4 つに大別される。したがって一般的には応用分野が多岐にわたっていても、それに適合した光学系、検知器、表示系が付加されるだけで、本質的には変わらない。赤外線の利用の最大の特長は図 6 からわかるように対象物とその温度で決まる波長の光を出すことである。対象物の放射エネルギーが最大となる波長は、Wien の偏位法則より求まるので、対象物に応じて InSb, GeAu, HgCdTe, などの検知器を使いわけることにより、これらの検知器をより有効に利用することができる。InSb 検知器は $100^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 程度の対象物に対して有効であり、距離が近ければ人体にも充分感じる。また GeAu 検知器はさらに低い温度の対象物に対して有効であり、約 $30^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 付近の物体の検出に使用できる。HgCdTe 検知器は GeHg 検知器に比べて同じ常温物体の対象物を検知するのに 77 K の冷却動作温度で有効に利用することができる。また波長感度のピーク値は大気窓 ($8 \mu \sim 14 \mu$) に合わせてあるので、気象用、公害検知用、海洋地質用としての利用範囲は広い。

たとえば、 CO_2 ガスレーザを用いて、ヘテロダイン方式での光通信の研究が進められ、HgCdTe 検知器を使用して 100 MHz の通信が可能であり¹⁰⁾、さらに HgCdTe 検知器を光起電力形(photo-Voltaic)にすることにより検知素子を小さくし、素子の時定数を極端に小さくすることによって GHz の光通信が可能という報告もある¹¹⁾。

なお参考に非常によくまとめられた赤外線応用マトリクス¹²⁾を表 4 に示しておく。

4. あとがき

現在使用されている赤外線検知器にはサーミスタ・ボロメータ、パイロエレクトリック・ディテクタ、PbS, PbSe, InSb, GeAu, HgCdTe, PbSnTe, らがあり、これらの赤外線検知器が今後どのようにかは非常に予想しにくい。

ただ半導体赤外線検知器には数多くの特長をそなえており、

- 1) 感度が非常に高い。
- 2) 応答速度が非常に速い。
- 3) 振動、加速度に強い。
- 4) 強い光を急に与えても破損しない。
- 5) 増幅が容易である。

このように赤外線応用機器用として好条件を備えて

表 4 赤外線応用マトリクス¹²⁾

機能	応用分野	産業応用	医学応用	科学応用	警備防衛用
探 追 測	知 跡 距	森林火災発見 消防ミサイルの誘導 燃料点火のモニタ パーキングメークモ ニタ 違反者発見 航空機タンク火災発 見等	盲人安全誘導	人工衛星検出 宇宙船航行、姿勢制御 等 水平線センサ 方位決定用太陽追跡器 水平線構造研究等	船舶、航空機、侵入者 検出 ミサイル誘導 航行飛用制御 近接信管 火砲制御 航空機衝突警報
放 射 計 測		鉄道車輛のホットボ ックス 非接触物体の識別 プロセス制御 ブレーキ内張、送電 線、工具、熔接、イ ンゴット等の温度計 測、電子回路、IC の検査等	皮膚の温度計測 ガンの早期発見 繃帯の上から傷診断 感染モニタ 遠隔生物検出 皮膚加熱と温感の研 究	月惑星、恒星温度の測 定 天候状態の遠隔計測 太陽常数の測定 植物内熱伝達の研究 地球熱平衡の計測 火気の熱放射研究 熱絶縁の研究	目的物の標定
分 光 放 射 計 測		乱気流の検出 有機物、ガス等の分 析 呼吸のアルコール分 決定 パイプのリーク発見 水中の油検出 Ge, Si 中の酸素調節	空気汚染の検出とモ ニタ 血液や排気ガス中の Co ₂ の決定	地球、惑星の火気成分 の決定 惑星の動植物の検出 地表分析 宇宙船大気モニタ 気象観測 火気放射研究	地表分析 ガス検出 目標と背景の標定 燃料蒸気の検出 液体酸素管中の不純物 検出等
熱 映 像		各種非破壊試験検査 埋込みパイプ等の位 置決定 赤外線光学材料の検 査 熱絶縁効率の研究 マイクロ波電界パタ ーン	ガンの早期発見と同 定 火傷、凍傷等の診断 発病初期診断 手足切断の位置判定 胎盤の位置ざめ 極地衣服の効率研究	地球資源の探索 湾流の検出と地図作成 衛星からの山火事発見 火山研究、石油発見 水汚染の検出と研究 裂目の位置ざめ、氷山 偵察	偵察と監視 熱地図作成 潜水艦発見 車輛、人員、兵器、地 下ミサイル、陣地の発 見 損害評定
反 射 放 射 束 利 用		産業監視と防犯 製作中の写真フィル ム試験 樹木、作物の病害検 査 映写機の自動焦点	孔直径の測定 血管閉塞の位置判定 眼の動きのモニタ 不透明角膜を通して 眼の検査 その他治療過程の検 査	偽造の識別 月、惑星の表面構造調 査 宝石の鑑定 水質検査 エビタキシャル膜の厚 さ決定、病気作物の検 出	夜間運行 侵入者発見 地表監視 偽装発見 照準 ドッキングと着地
放 射 源 併 用		侵入者発見 盲着陸、衝突防止、 輸送物 計数、赤外線加熱と 乾燥 ケーブルポンド 乗物相互間の速度検 出 データ・リンク	盲人用測距と障害物 の検知 熱療法	宇宙通信 動物の通信機構の解明 計算機の周辺入力機器 動物の夜間習性研究 夜間写真照明	地上間通信 兵器誘導 赤外線系の逆探測距 侵入者発見

いる。しかし半導体赤外線検知器が従来の加熱形に比
べてすべての点でよいか、というとそうでなく、2~3
の欠点がある。それは感度に波長依存性があること
と、使用に際して冷却が必要なこと、さらに現状では
価格が高いことである。それゆえ当面は目的に応じた
赤外線検知器を選定する必要がある。

しかし、将来は前述したように赤外線応用機器用と
して、簡易型、高性能型の二極分化の傾向が著しくな
り、非冷却型のサーミスタ・ボロメータはパイロエレクト
リックディテクタによって置換されるだろうし、後
者の要冷却型の半導体赤外線は三元合金半導体の物性
が明らかになるに従い HgCdTe, PbSnTe, のいずれか

に落着くだろう。とくに公害対策, 歩留りの点でPbSn Te 赤外線検知器の置換され, この $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ の x 値をコントロールすることにより, 今迄の PbS, PbSe, InSb, GeAu らの波長が十二分にカバーされた $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 検知器に集約, 置換される可能性はある。

参 考 文 献

- 1) 小林駿介：日本物理学会誌 20, 686 (1965)
- 2) 植田陽一：エレクトロニクス 8, (1966)
- 3) R. A. Smith, T. E. Jones and R. P. Chasmar: The Detection and Measurment of Infrared Radiation, Oxford Univ. Press, (1957)
- 4) 植田陽一, 山下英男：Fujitsu 23, 2, (1972)
- 5) 富士通半導体赤外線検知器カタログ
- 6) 山下英男：低温工学協会 冷凍部会年間講演集 14, 185 (1972~1973)
- 7) 高木 亨：エレクトロニクス 8, 894, (1968)
- 8) 応用物理学会, 光学懇話会：最近の赤外技術第 10回サマー・セミナー (1971)
- 9) 山下英男：真空協会 関西支部 (1973)
- 10) H. W. Mocker: Appl. Opt., 8, 3, p. 677 (1969)
- 11) C. Verie and M. Sirieix : IEEE J., QE-8, 2, (1972)
- 12) 高木 亨：赤外線技術研究会資料