

宇宙観測用遠赤外・サブミリ波検出器の現状と将来

若木 守明¹・土谷 淳一²・阿部 治³・村上 浩⁴

Recent Development of Far Infrared and Submillimeter Detectors for Astronomical and Astrophysical Observations

by

Moriaki WAKAKI, Junichi TSUCHIYA, Osamu ABE and Hiroshi MURAKAMI

(Received on Sep. 28, 2001)

Abstract

Ge:Ga photoconductors and Si₃N₄ micromesh bolometer are the most successful detectors in the field of far infrared astronomy. In this report, the recent advances in photon detectors for direct detection at far infrared(FIR), submillimeter and millimeter wavelengths are reviewed. Quantum Hall and quantum dot FIR photodetectors, superconductor-insulator-superconductor(SIS) photon detectors, superconducting hot-electron bolometers(HEB's), GaAs photoconductors, Ge and GaAs blocked impurity band(BIB) detectors are described.

Keywords: Ge:Ga photoconductor, Si₃N₄ micromesh bolometer, Far infrared, Submillimeter, Astronomy, Quantum Hall, Quantum dot, SIS, HEB, GaAs photoconductor, Ge BIB, GaAs BIB, Blocked impurity band detector

1. はじめに

現在の天文学において、赤外線観測を最も特徴づけているのは、宇宙にある固体物質からの熱放射観測であろう。星間空間には、ケイ酸塩やグラファイトなど、地球上でもなじみの深い鉱物を核とした固体微粒子(宇宙塵)が存在する。典型的な大きさは0.1 μm、温度は通常の星間空間では20K程度である。

宇宙塵観測は、塵自身の成因・変性という興味以外に、その赤外放射が天体現象のプロープとして使えるという意味が大きい。宇宙塵は可視・紫外光を散乱・吸収し、天体を観測者から隠してしまうが、逆に可視・紫外光で加熱された宇宙塵の赤外放射を観測すれば、そこで起きていることが推定できる。例えば2つの銀河が重力相互作用(衝突、合体)すると、銀河の中心核の周りをケプラー運動していたガスは、角運動量を失って中心に落ち込んだりガス雲同士の衝突で圧縮され、爆発的に星が生成されて宇宙塵を暖める。この時赤外線として放射されるエネルギーは、大きいものでは太陽の放射の10¹²倍以上にもなる。このような赤外線銀河の発見は、銀河の誕生と進化に、銀河間相互作用が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

また銀河の誕生時には、10億年程度の間10¹¹個もの星が作られたはずである。最初はほとんど水素ガスだけでできていた銀河は、星が生まれ、そして死んでいく過程で重い元素がばらまかれ、10億年程度で宇宙塵に汚染される。そのため可視光では見えなくなり、赤外線では明るくなっている可能性がある。Figure 1は、ヨーロッパの赤外線天文衛星 ISO を使って得られた天球の遠赤外線画像である。ここには予想を越える数の銀河

が写っていた。その中には誕生まもない銀河が含まれているかもしれない¹⁾。

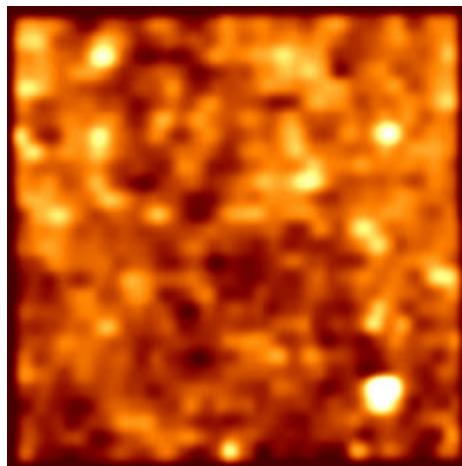


Fig.1 Far infrared map of LHEX obtained with ISO(Kawara et al. 1998, 2000). This map is an image obtained at wavelength of 170 μm. Size of view is about 40 × 40(arcmin.). (提供：宇宙科学研究所および東京大学天文学教育研究センター)

このような固体微粒子は、波長 100 μm 帯を中心に熱放射を出す。しかしこの波長帯の天文用赤外線検出器は、波長 30 μm 以下の領域で 1024X1024 ピクセル規模のアレーセンサーが実用化されつつあるのに比べると、まだまだ開発が遅れている。波長 200 μm までは、日本でも通信総合研究所を中心に高性能の Ge: Ga 光伝導素子が開発されているが、アレー化のレベルは、今のところ数十素子レベルである。さらに長い波長帯では、実用化されているのは熱的なセンサーであるボロメーターだけとなる。

* 1 工学部応用理学科光工学専攻教授
* 2 工学研究科光工学専攻博士課程前期
* 3 ジャスコオプト(株)素子二課
* 4 文部科学省 宇宙科学研究所 宇宙圏研究系

Table 1

Advanced far infrared, submillimeter and millimeter detectors in use for astronomical observations

Detectors	Wavelength	Operating temperature	NEP	Laboratory
Si ₃ N ₄ micromesh bolometer	~ mm	0.3K	~ 10 ⁻¹⁷ W/ Hz	Caltech/JPL
Ge:Ga (Stressed)	100-200 μm	2K	~ 10 ⁻¹⁸ W/ Hz	通信総合研究所
Ge:Ga (BIB)	50-200 μm	2K	?	Rochester Univ.
Ge:Sb (BIB)	~ 170 μm	~ 2K	?	Lawrence Berkeley
GaAs	~ 300 μm	1.3K	~ 10 ⁻¹⁶ W/ Hz	MPI, 宇宙科学研究所、東海大学 (開発中)
GaAs (BIB)	~ 350 μm	1.3K	?	"
SIS	~ 400 μm	~ 1.5K	~ 10 ⁻¹⁷ W/ Hz	国立天文台野辺山
HEB	~ mm	~ 0.1K	~ 10 ⁻²⁰ W/ Hz	JPL
Quantum Hall	50-400 μm	4.2K	~ 10 ⁻¹⁴ W/ Hz	東京大学
Quantum dot	170-210 μm	0.4K	~ 10 ⁻²² W/ Hz	東京大学

天文学では、新しい観測波長帯の開拓は常に新しい発見を生んできた。その意味で、検出器の開発の遅れた波長帯の一つである遠赤外・サブミリ波帯の高感度検出器開発が急務である。現在、上述のような赤外領域のフォトン検出技術によるアプローチと同時に、電波領域で用いられているヘテロダイン検波技術の両方から開発が進められている。

E.Haller²⁾によるレビューが 1994 年に出版されているが、新規なアイデアによる検出技術も最近出てきている。本稿で紹介する検出器の一覧を Table 1 にまとめた。広い帯域を効率よく分光する、あるいは広領域で撮像を行うというような観測において有利なフォトン検出器という観点に立って着目しており、今後の実用化が大変期待されている。以下に、これらの遠赤外・サブミリ波検出器について概観し³⁾、我々の天文用遠赤外 GaAs 検出器の開発状況も簡単に報告する。

2. フォトン検出とヘテロダイン検出法

光検出法には大別してフォトン検出とヘテロダイン検出がある⁴⁾。ある波長領域の光の強度を検出するものを(ここでは総称して)フォトン検出と呼び、主として不純物半導体の光伝導検出器とボロメーターが使用される。前節で述べたように、広スペクトル帯域観測(遠方天体・矮小天体の検出)や広空間領域のイメージング(サーベイ観測、銀河の空間構造研究)に対して有利である。光応答はあまり重視されていない(~ 1ms)。

一方、微弱信号と振動数が僅か異なる局部発振器の高強度光で検出器を照射し干渉させ、差周波成分を中間周波増幅し検出する方式をヘテロダイン検出といい、微弱信号光の強度と位相の変化が検出できる特徴がある。ショットキー・ダイオードとジョセフソン接合ダイオードが主に使用されている。この検出法は高分解能スペクトル観測(宇宙物理化学、ガスダイナミクス)や高空間分解能干渉計(太陽系外惑星、コンパクト天体)に応用される。フォトン検出器と異なり高速光応答性が要求される(< 1ns)

3. 実用化されている天文用遠赤外検出器

3.1 Si₃N₄ マイクロメッシュボロメーター

Caltech/JPLグループが開発したボロメーター⁵⁾を Fig.2 に示す。これを用いて 2.7K 宇宙マイクロ波背景放射が観測された。ミリ波帯(90 - 400GHz)で温度ゆらぎ $T \sim 10^{-4}$ を気球搭載の 0.3K ボロメーター(NEP=1X10⁻¹⁷ W/ Hz)で観測し、初期宇宙の小スケールの物質密度ゆらぎを発見した。

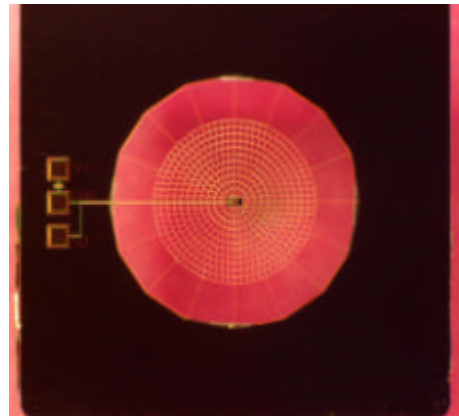


Fig.2 Silicon Nitride micromesh bolometer developed by Caltech/JPL.

3.2 Ge:Ga 光伝導型検出器

通信総合研究所(CRL)⁶⁾を中心として、宇宙科学研究所(ISAS)、東大、名大が共同で開発したこの検出器は世界トップクラスの性能を誇る。CRL 製の圧縮型 Ge:Ga(Fig.3)の性能は感度(R)が 111A/W で、2K の動作温度で NEP=2X10⁻¹⁸W/ Hz である。宇宙赤外線望遠鏡 IRTS/FILM、気球搭載望遠鏡 BICE の検出器として使用され、星間電離炭素からのライン放射や星間ダストからの熱放射を観測し、星間物質の成り立ちと物理過程を解明しつつある。また、2004 年打ち上げ予定の赤外天文衛星 ASTRO-F/FIS に搭載し、全天サーベイして宇宙初期の赤外銀河などを観測する予定である。

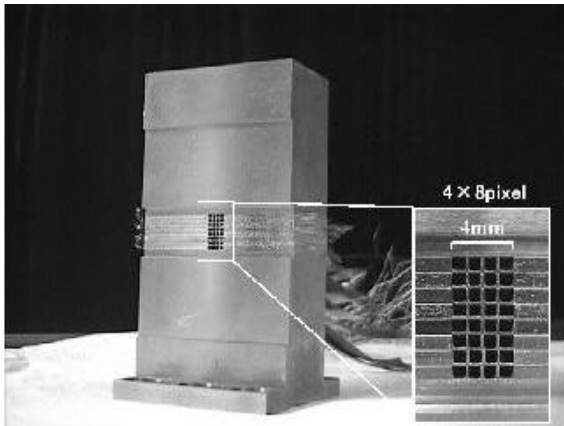


Fig.3 4×8 elements stressed Ge:Ga detector developed by CRL and its enlarged aperture.

4. 実用化が期待される天文用遠赤外検出器

4.1 量子ホール効果、量子ドット検出器

1999年に東大の小宮山、平川らのグループにより発表されたこれらの検出器は、従来の遠赤外線検出器の概念を越えた画期的な検出器である。

量子ホール効果はシリコン MOS 反転層や半導体ヘテロ構造界面に蓄積する二次元電子系に強磁場を印加することにより発現するが、その特異な電子状態を積極的に利用することにより、超高感度の遠赤外光検出が可能であることが明らかになった⁷⁾。彼らは、AlGaAs/GaAs ヘテロ構造中の二次元電子系の遠赤外光に対する光伝導性を強磁場(1~10 Tesla)において詳細に検討した。その結果、応答機構はサイクロトロン吸収による電子温度の上昇と試料端における局所的なポテンシャル変化によるものであることが分かった。性能としての感度は $R \sim 10^{17} \text{V/W}$ で市販の 4.2K ボロメーターの約 1000 倍にも達し、 $\text{NEP} \sim 2 \times 10^{-14} \text{W/Hz}$ 、 $D \sim 4.0 \times 10^{13} \text{cm}^2/\text{Hz}$ 、また半値幅が $2 \sim 4 \text{cm}^{-1}$ の狭帯域で、 $50 \mu\text{m} \sim 400 \mu\text{m}$ の波長範囲でチューナブルのため検出器自身で分光測定が可能である。Figure 4 にその性能をまとめた図を示す。

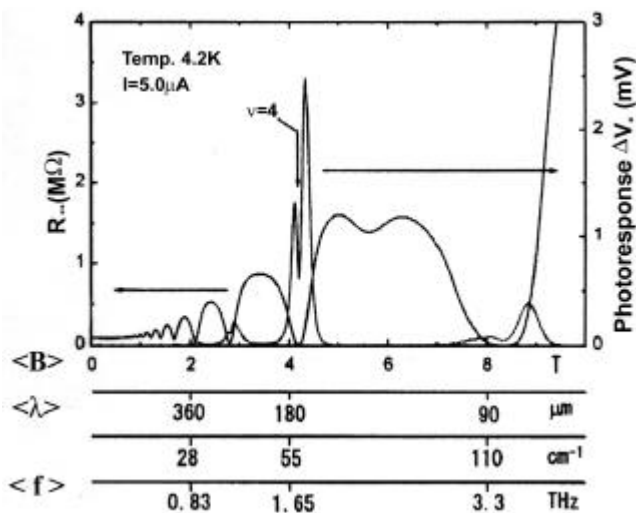


Fig.4 Magnetic field , wavelength <λ> and frequency <f> dependencies of sensitivity of Quantum Hall detector.

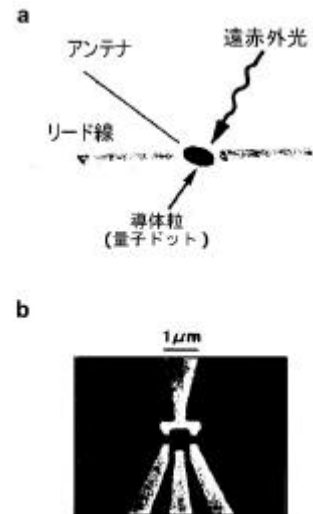


Fig.5 Schematic figure of quantum dot type far infrared single photon detector using SET (a) and SEM image (b).

次に、遠赤外線領域でフォトンカウントを可能にする画期的な単一光子検出器である量子ドット検出器⁸⁻⁹⁾について簡単に述べる。検出の原理は、1個の遠赤外光子を小さな伝導体の粒に吸収させて電荷分極を引き起こし、それを単電子トランジスタ(Single Electron Transistor:SET)と呼ばれる作用で巨視的な電流に増幅するというものである。Figure 5はSETによる遠赤外光子検出器の概念図(a)と実際に AlGaAs/GaAs ヘテロ構造結晶を用いて作製した試料の電子顕微鏡写真(b)である。写真中央部の直径 $0.5 \mu\text{m}$ 程度の領域に残った二次元電子系が量子ドットを形成する。0.4K 以下に冷却して 3.7T の磁場を印加した時、波長 $200 \mu\text{m}$ の遠赤外光に対して単一光子が検出された。NEP では $\sim 10^{-22} \text{W/Hz}$ 、 $D^*は \sim 10^{20} \text{cm}^2/\text{Hz}$ に及び超高感度であることが確認された。光子検出器としての性能は実証されたが、波長範囲が狭い(170~210 μm)、極低温・強磁場が必要、入射強度に対するダイナミックレンジが狭い、などの点は改良の余地が残されている。

4.2 SIS フォトン検出器

超伝導体 絶縁体 超伝導体(S-I-S)のサンドイッチ構造で(Fig.6 a)、その一方の超伝導薄膜にエネルギーギャップより大きいエネルギーの電磁波フォトンが入射した場合、その入射フォトンによりクーパ対が壊され準粒子が生成される。この準粒子はバイアス電圧のかけられた超伝導トンネル接合を通して流れる(Fig.6 b)。この準粒子電流を読み出すことにより、入射強度を測定することができる(Fig.6 c)。低電圧バイアスをトンネル接合両端にかけておくことにより、入射強度に比例した出力信号が得られる。なお、電磁波の入射がない場合でも熱励起による準粒子の発生、あるいは絶縁膜の不完全性によりリーク電流が観測され、これが検出器のノイズの原因となる。

検出器ノイズがショットノイズのみとした場合の理論値は、リーク電流が 1nA、量子効率 100%とすると、波長 $400 \mu\text{m}$ で $\text{NEP} = 3 \times 10^{-17} \text{W/Hz}$ である。現段階ではまだ感度は悪いが、入射フォトンとの結合効率を向上させることにより高感度化が期待される。国立天文台野辺山グループの松尾らが精力的に開発を行っている¹⁰⁾。

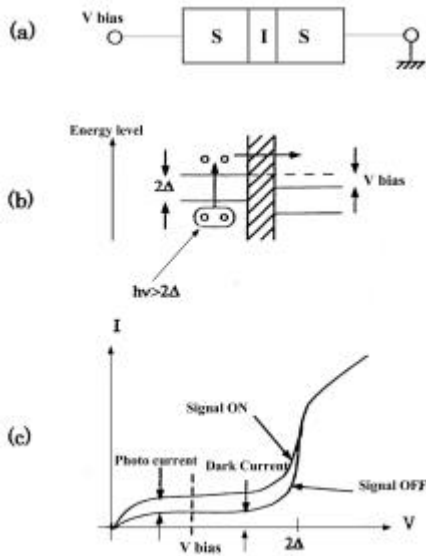


Fig.6 (a)Schematic diagram, (b)band diagram and (c)I-V characteristics of SIS photon detector.

4.3 超伝導 HEB フォトン検出器

超伝導ホットエレクトロンポロメーター(HEB)は超伝導転移端を利用した高感度ポロメーターで、平面アンテナとのカップリングが容易である(インピーダンスがアンテナとマッチするために 50-100 とする)。また、サブミクロンブリッジ構造のため高速応答が可能でアレー化が容易である。THz 帯のヘテロダインミキサーとして有望である。フォトン検出器としての性能は極めて高感度で、超伝導温度が $\sim 0.1\text{K}$ で $\text{NEP} \sim 10^{-21} - 10^{-20}\text{W/Hz}$ が達成可能である。JPL の K.Boris らによりデバイス開発が進められている。

4.4 GaAs 光伝導型検出器

ドイツの Max-Planck-Institute(MPI)の E. Bauser ら¹¹⁻¹²⁾は早くからこの検出器に着目し開発を続けている。我々も平成 9 年度から宇宙科学研究所を拠点として GaAs 光伝導検出器の開発を開始した¹³⁻¹⁴⁾。GaAs 中のドナーに対して電子の有効質量は小さく ($m^*/m=0.0665$) 水素原子近似が良く成り立つとともに、非常に浅い準位をつくる¹⁵⁾。電子の基底状態から伝導帯に励起するための(ドナーのイオン化の)エネルギーは、光の波長に直すと $210\ \mu\text{m}$ 付近にくる。しかし液体ヘリウム温度付近の動作温度では、さらに長い波長にも感度を持つことがわかってきている。これはフォトンによって基底状態から上の準位へ励起された後、フォノンによってイオン化される過程によると考えられている。最も大きな光吸収断面積を持つのは、水素原子近似で(1s-2p)の遷移で、これは $290\ \mu\text{m}$ 付近にある。これら、通常のカットオフ波長より長波長における光応答は、フォノンが関与していることから予想されるように温度依存性を持ち、低温では感度が下がる¹⁵⁾ (Fig.7)

高感度の光伝導検出器を作ろうとする場合、最も重要なのは半導体の補償比をいかに低く抑えられるかである。n 型の GaAs 検出器の場合、アクセプター濃度は 10^{12}cm^{-3} 以下、できれば 10^{11}cm^{-3} が必要である。これによりキャリアの寿命が延び、フォトキャリアの収集効率が高くなる。GaAs の場合、不純物濃度 10^{12}cm^{-3} 程度で、77K での移動度が $250,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$ 以

上の超高純度結晶が液相エピタキシー成長により作られた実績がある¹⁶⁾。我々もこのレベルの高純度を目標に液相エピタキシー装置による結晶試作を開始した。不純物濃度は見かけ上 10^{12}cm^{-3} 程度まで低減したが、移動度は $100,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$ を超えていない³⁾。不純物の補償効果によるもので、さらに不純物を低減させる対策を検討している。

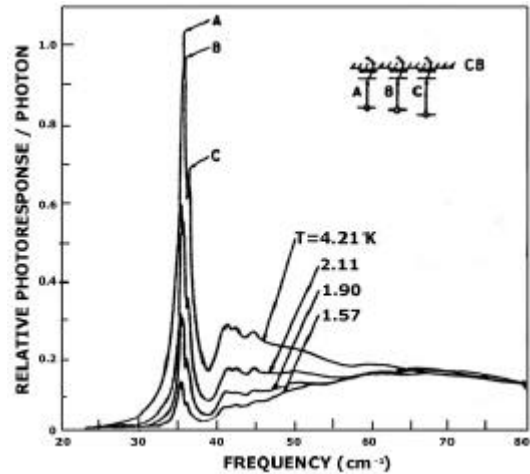


Fig.7 Variation with temperature of the excited state photoconductivity in highly pure GaAs.

4.5 Ge 系 BIB 型検出器

Si:As などを用いた $10 \sim 20\ \mu\text{m}$ 帯の検出器では Blocked Impurity Band (BIB) 検出器と呼ばれるものが実用化され、天文観測に用いられるようになってきている。これは、不純物帯が形成される濃度まで不純物をドーピングするのであるが、電極との間に、不純物をドーピングしない層をはさんでいる。このノンドーピング層 (Blocking Layer) によって不純物帯は断たれ、伝導帯に励起された電子(n 型の場合)だけが電極に到達できるようになっている¹⁷⁾。Figure 8 に模式図を示す。

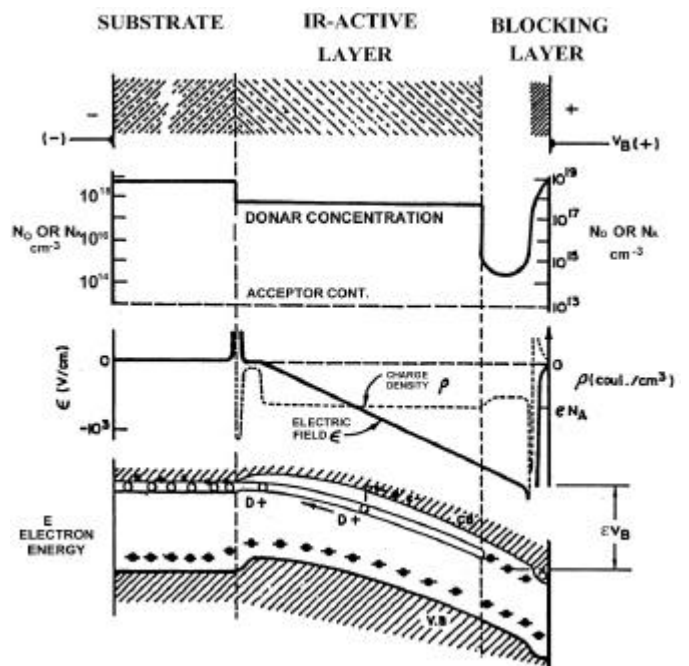


Fig.8 Band structure of an n-type blocked impurity band detector(Ref. 17).

普通の遠赤外線用光伝導型検出器でこのような高濃度ドーパ状態にすると、大きな暗電流が流れ、検出感度はとうてい天文観測に耐えるものではなくなる。通常はこのようなホッピング電流による暗電流が流れない範囲に不純物濃度が制限される。従い、高い量子効率を得るには厚い(1 mm 程度)検出器が必要となるに対して、BIB 型では不純物濃度が高いために薄くてもよい。このため宇宙空間のように宇宙線にさらされる環境にも強い等、様々な長所を持つ。

数年前までは、この BIB 型で一番長波長まで感度を有するものでも Si:Sb の 40 μm までであったが、現在ではさらに長い波長帯で有望な Ge 系 BIB 検出器の開発が進められており注目を集めている。

4.5.1 Ge:Ga BIB 型検出器

Rochester 大学の D.M.Watson ら¹⁸⁾のグループは 10 年ほど前から Ge:Ga 光伝導型検出器に替わりうると期待される Ge:Ga BIB の開発に着手している。当面の目標は波長域が 50-200 μm の 4X32 ピクセル Ge:Ga BIB アレーである。Fairfield 大学の N.M.Haegel ら¹⁹⁻²⁰⁾もこの検出器の振る舞いについて最近興味あるモデル計算を行った。

4.5.2 Ge:Sb BIB 型検出器

Ge 系 BIB の難しさは超高純度な Ge エピタキシャル層を作ることの困難さにある。しかし、1998 年 Lawrence Berkeley 研究所(米国)の C.S. Olsen²¹⁾は Pb を溶媒とする液相エピタキシー法でキャリア濃度が $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ の超高純度 n 型 Ge エピ層の作製に成功し、Sb ドーピングにより、応答波長が $\sim 170 \mu\text{m}$ 、感度が 1 A/W の Ge:Sb BIB 型検出器を開発した。その最新情報は、本年 7 月の SPIE シンポジウム(San Diego)で、同研究所の J.Bandaru ら²²⁻²⁴⁾により報告された。非常にホットな話題で、今後の進展に大変興味がある。

4.6 GaAs BIB 検出器

GaAs BIB 型検出器²⁰⁾についても将来の期待は大きい。GaAs 検出器の波長感度特性は、ドナー濃度が上がるにつれてさらに長波長へ伸びることが知られている。 10^{15} 台の濃度では 350 μm 付近まで感度を持つことがわかる。これは天文観測にとっては非常に重要である。というのは、350 μm 付近は地球の大気がある程度透明であり、この波長帯で感度を持てば、地上望遠鏡による天体観測が可能になるためである。恐らく BIB 型はこれを実現できるはずである。我々も GaAs BIB を最終目標としている。

5. まとめ

天文学では、新しい波長域の検出技術の開拓、感度や分解能の向上は、常に新しい宇宙像をもたらしてきた。フォトン検出技術の開発は天文学にとって本質的に重要である。特に、観測の精密化が進む赤外・サブミリ波天文学の分野では、検出器開発の余地がまだ残されており、さらに高感度な検出器の出現が期待されている。本稿ではこの波長領域で有望視されているフォトン検出器について最新情報をレビューしてみた。近い将来の実用化を期待しつつ、我々も GaAs 検出器開発にさらなる意欲と情熱を燃やしていきたいと思う。

参考文献

- 1) 高橋忠幸、満田和久、村上浩：“X線・赤外線で探る活動的宇宙像”、応用物理、第 68 巻、第 9 号、(1999) pp.1049-1052
- 2) E. E. Haller: “Advanced Far-Infrared Detectors”, Infrared Phys. Technol., Vol.35, No.2/3, (1994) pp.127-146
- 3) “第 1 回 次世代遠赤外サブミリ波検出器ワークショップ”要旨集、(2000)、宇宙科学研究所 小研究会
- 4) 長坂啓吾：“遠赤外検出器の現状”、固体物理、第 31 巻、第 4 号(1996)pp.287-295
- 5) L. Vigroux: “New detectors for astronomy”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A 387, (1997)19-23
- 6) 廣木宣久、板部敏和、有賀規、猪股英行、奥田治之、松原英雄、芝井広、中川貴雄：“圧縮型 Ge:Ga 半導体遠赤外線検出器開発実験”、通信総合研究所季報、Vol.35 (1989)143
- 7) 平川一彦、川口康、山中宏治、小宮山進：“量子ホール効果を用いた超高感度遠赤外光検出”、応用物理、第 68 巻、第 9 号、(1999)pp.1027-1033
- 8) S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and H. Hirai: “A single-photon detector in the far-infrared range”, Nature, Vol. 403, No. 6768, (2000)pp.405-407
- 9) 小宮山進：“遠赤外単一光子検出”、パリティ、Vol.15, No.6、(2000)pp.39-42
- 10) 松尾宏、榎原英昭、坂本彰弘、野口卓、佐藤武志、赤堀洋道：“SIS フォトン検出器のサブミリ波への応用”、宇宙放射線シンポジウム、(1997)p.33
- 11) J. Farhoomand, R. E. McMurray, E. Haller, E. Bauser and I. Filier: “High Purity GaAs as a Far Infrared Photoconductor”, SPIE proceedings, Vol. 1576(1991)470
- 12) R. Katterloher, G. Jakob, E. Bauser, E. Haller, T. Henning and G. Pilbratt: “Development of a Far Infrared Detector Array for FIRST based on n-type Ultra Pure Liquid Phase Epitaxial Gallium Arsenide”, SPIE proceedings, Vol.2475(1995)62
- 13) 村上浩、阿部治、若木守明、矢川太祐：“GaAs を用いた 300 μm 帯光伝導検出器”、宇宙放射線シンポジウム、(1997)p.37
- 14) O. Abe, H. Murakami, Y. Okamura, M. Wakaki, T. Yakawa, M. Koyama, T. Ogawa: “GaAs Photoconductors for Submillimeter Astronomy”, SPIE proceedings, Vol.3698, (1999) pp.603-611
- 15) G. E. Stillman, C. M. Wolfe and J. O. Dimmock, 1977 in “Semiconductors and Semimetals”, vol.12, chapter4, ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer (Academic Press, New York), p.169
- 16) T. Amano, S. Kondo, H. Nagai and S. Maruyama, Jpn. J. Appl. Phys., 32, (1993)3692
- 17) M. D. Petroff and M. G. Stapelbroek, U.S. Patent No. 4568960(1986)
- 18) D. M. Watson, M. T. Guptill, J. E. Huffman, T. N. Krabach, S. N. Raines and S. Satyapal, J. Appl. Phys., 74, (1993) 4199
- 19) N. M. Haegel, J. E. Jacobs, A. M. White, Applied Phys. Letters, Vol.77, Number 26,(2000) pp.4389-4391
- 20) N. M. Haegel: “Photoconductors for 200-400 μm : choices and challenges”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A 377, (1996) pp.501-507
- 21) C. S. Olsen: “Advanced Far Infrared Blocked Impurity Band Detectors based on Germanium Liquid Phase Epitaxy”, U. S.

DOE Rep. (1998)

- 22) J. Bandaru, J. W. Beeman, E. E. Haller: "Growth and performance of Ge:Sb Blocked Impurity Band(BIB) detectors", to be presented at the SPIE Symposium on Optical Science and Technology, IR spaceborne remote sensing IX, July 2001
- 23) J. Bandaru, J. W. Beeman, E. E. Haller: "Influence of Sb concentration and dopant distribution on Ge:Sb far infrared Blocked Impurity Band detector performance". (under preparation).
- 24) J. Bandaru, E. E. Haller: "Growth of pure and Sb-doped Ge epilayers by Liquid Phase Epitaxy(LPE) from a Pb solvent", (under preparation).