

3-2 遠赤外及び微弱光検出に関する研究

3-2 Study for Far-infrared and Faint Light Detection Technology

藤原幹生 秋葉 誠 佐々木雅英

FUJIWARA Mikio, AKIBA Makoto, and SASAKI Masahide

要旨

微弱光検出には、熱雑音及び暗電流を抑制するために光検出システムを極低温下で動作させることが効果的である。近年の赤外天文衛星は液体ヘリウム(4.2K)以下に冷却して用いるセンサが搭載されている。我々は遠赤外領域での検出技術を担当し、世界で初めての試みである遠赤外検出器二次元アレイのダイレクトハイブリッド構造を実現した。さらにこの極低温技術を応用し、現在注目を浴びている量子情報技術への応用を目指し微弱光検出技術開発を進めている。

To realize a sensitive photodetector, cooling down the device is an effective way because of reducing thermal noise and dark current. Recent space observation satellites have liquid-Helium cooled detectors. We focus on far-infrared region, in which there are many important research fields. To our knowledge, we are the first to successfully report a direct hybrid two-dimensional detector array in the far-infrared region. Moreover, we are trying to develop an ultra-sensitive photodetector for the application in quantum information field by using cryogenic technology.

[キーワード]

遠赤外検出器, 極低温, 二次元アレイ, 微弱光検出

Far-infrared detector, Cryogenic temperature, Two-dimensional array, Detection of faint light

1 はじめに

人間が視覚できる電磁波は $0.3 \sim 0.75 \mu\text{m}$ の波長域である。この可視光より長い光を赤外と考え、一般に赤外線と言われる光は波長 $0.75 \mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ までの電磁波を言う。特にここでは遠赤外光を波長 $30 \mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ の電磁波と定義する。すべての物体はその温度が絶対零度以上であれば物質表面の原子もしくは分子の運動により、温度に応じた電磁波を放出している。遠赤外領域では分子の回転スペクトル等の現れる領域であり、また、固体の不純物振動モードやプラズマの温度・密度計測など長年にわたり研究されてきた多くのテーマが存在する[1] - [3]。それらのうち天文観測について記述すると、遠赤外領域での宇宙塵の熱放射の観測によって過去に銀河の星生成がどれだけ盛んであったかを知ることができ、銀河の活動性の指標となり得る。しかし、

この波長領域の観測手段は技術的な問題から十分に整えられていなかった。我々は2005年夏季に、宇宙航空研究開発機構(JAXA)により打ち上げが予定されている我が国初の本格的赤外天文衛星ASTRO-Fに搭載するための波長 $50 \sim 110 \mu\text{m}$ 帯の遠赤外検出器の開発を行った。Geにp型ドーパントとなるGaをドープした半導体(Ge:Ga)はアクセプタ準位 10.8meV を持ち[4]、 $110 \mu\text{m}$ まで感度を持つ光伝導型外因性半導体遠赤外検出器となる。アクセプタ準位への熱的励起を抑え、高感度化を実現するために検出器を液体ヘリウム温度(4.2K)以下に冷却して用いる。Ge:Ga遠赤外検出器はこの波長帯において最も高感度な量子型光検出器であるが、極低温冷却が必要なことと、遠赤外光の大気中での吸収が大きいため、民生応用という点で注目を浴びてこなかったことがこの波長域での検出器の発展を遅らせてきた原因となっている。我々は天文観

測時の高効率、高精度化を可能とし、また、衛星搭載に適した小型な遠赤外検出器アレイの開発を行った。この波長帯では世界で初めての試みであるモノリシック2次元アレイと読み出し回路をダイレクトハイブリッドさせた構造を有し、高感度かつ高いフィルファクタを可能にした。この論文においてGe:Gaダイレクトハイブリッド2次元アレイの性能を述べ、最後に極低温読み出し技術を応用し、現在注目を浴びている量子通信への応用として1.5 μm 帯の光子数識別器の実現に向けた成果を報告する。

2 Ge:Ga遠赤外検出器ダイレクトハイブリッド2次元アレイ

検出器の多素子化は同空間分解能で同時に観測可能な領域が広がり、計測や観測時における効率や精度の向上をもたらす。従来のGe:Ga遠赤外検出器は量子効率の向上を得るためにキャビティ内にセットして用いられてきたが、多素子化を考慮した場合、高密度配列の実現が困難で、システム全体の重量の増加が予想される。高密度実装に適した構造として、一つのウェハーに幾つもの素子を並べるモノリシックアレイ化が挙げられるが、Ge:Ga遠赤外検出器の光吸収係数の小ささが高感度な検出器の実現を困難にしてきた。Ge:Gaの光吸収係数を増加させるためにはGaのドーパント濃度を増加することが考えられるが、ドーパント濃度の増加は不純物準位間を伝導するホッピングカレントの増加を伴い、光検出能の劣化を招く。また、検出器の体積を大きくすれば光吸収長を長くすることができるが、高エネルギー粒子が多数飛来する宇宙環境下での使用には適さない。なぜなら高エネルギー粒子がGe:Ga検出器にヒットした場合、感度の非線形な増加が発生し、計測精度の劣化が生じる。高エネルギー粒子のヒット率を低減させるために検出器の小型化は衛星搭載素子には必須条件となっている。また、検出器は高いインピーダンスを持っており、信号を取り出すためにインピーダンス変換用の読み出し回路が不可欠である。振動や外来ノイズを低減するためには検出器の付近でインピーダンス変換を行う必要がある。我々はこれらの要求を満たすために、

イオン注入層に遠赤外光に対する感度を持たせたモノリシック2次元アレイと、Ge:Ga検出器と同じ温度で動作する読み出し回路及びそれらをダイレクトに接続するためにInバンプ技術を応用した。図1に当所で開発したダイレクトハイブリッド2次元アレイの構造図を示す。

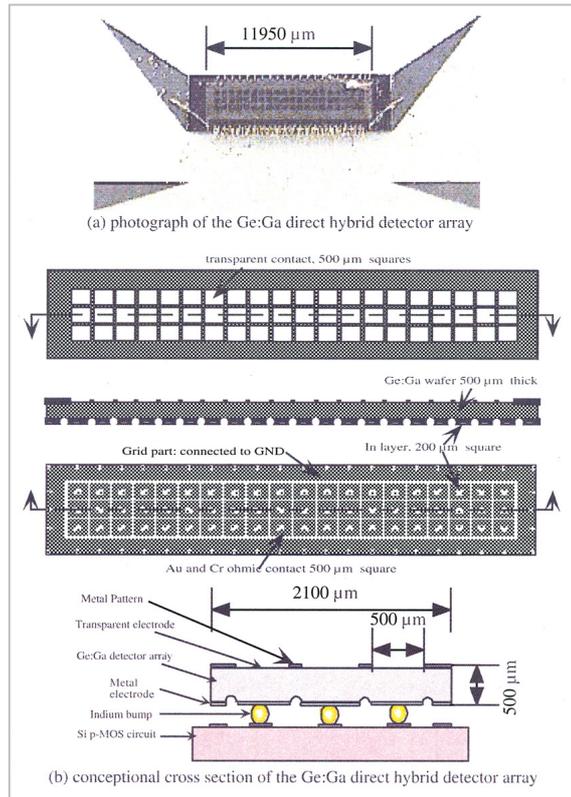


図1 Ge:Gaダイレクトハイブリッド2次元アレイ (a)写真、(b)構成図

この検出器は20×3列の素子を有している。モノリシックアレイの入射面には電極と光学的素子分離を兼ねた格子状のパターンをCrとAuを蒸着して形成している。下部電極は全面にCr及びAuを蒸着している。表層より遠赤外光が入射し、素子内で発生した光電流は下部電極より読み取られる。受光部は透明電極となっており、各素子共通となっている。素子分離は下部電極に幅100 μm 深さ30 μm の溝を形成することにより行っている。各素子の受光面積は500 μm ×500 μm であり、素子中心間隔は550 μm 、電極間距離500 μm である。読み出し回路には名古屋大学が中心となって開発した、p型Si MOSFETで構築したcapacitive trans-impedance amplifier (CTIA)を用いている。検出器は2.5Kにまで冷却

して用いるため、遠赤外検出器であるGe:Gaと読み出し回路の母材であるSiには熱膨張率の差から、室温と比較すると冷却時に12 μm 程度の歪みが生じる。この歪みを緩和するために極低温においても低いYoung率を有しているInを用いてダイレクトハイブリッド構造を実現している。歪みが大きい場合、Inバンプを形成するためには、一般に用いられている蒸着法による成長ではなく、直径 $\sim 100 \mu\text{m}$ のボール状のInを検出器間隔に並べる方法を用いた。熱及び振動を加えながらダイレクトハイブリッド構造を実現した。図2にInバンプのSEM写真とダイレクトハイブリッド時の透過軟X線写真を示す。ダレのないバンプが形成されていることが確認できる。

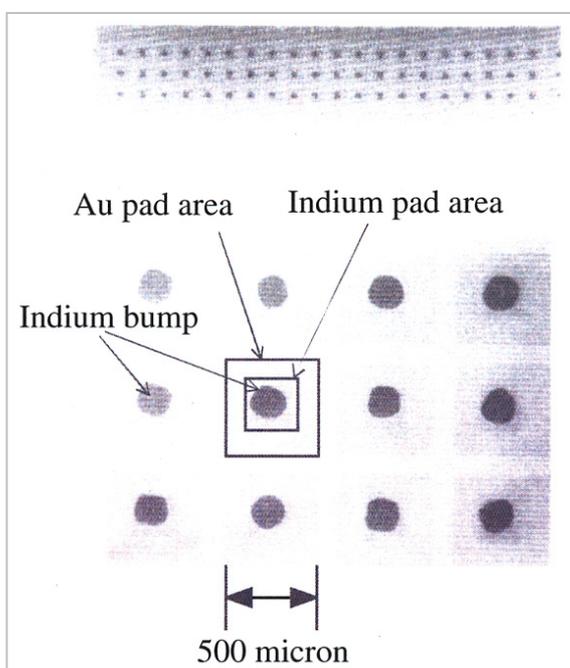


図2 ダイレクトハイブリッドの透過軟X線写真

Ge:Ga半導体の入射面と下部電極にはGaと同じアクセプタ単位を持つBを高濃度にドーピングし、電極へのキャリアのトンネルを容易にしている。また、このB注入層には検出器の高感度化に重要な役割を果たしている。B注入層をモット転移以下の濃度で形成することにより、遠赤外光に対する感度を持たせることに成功した。従来イオン注入法を用いてBIB構造の実現を試みた例がある。B注入の際の活性化率を重視しない傾向にあったが、我々はGe結晶内のBの活性化率がイオン注入層の性質を決定付ける重要なパラメ

ータであることを示した[5]。B注入層によるGe:Ga遠赤外検出器の高性能化を確かめるためにLongitudinal型Ge:Ga検出器を実績のある77K動作Si JFETを使用したフィードバック抵抗6G Ω のtrans-impedance amplifier (TIA)回路を用いて評価した。図3に感度のバイアス電界強度依存性とnoise equivalent power (NEP)を示す。

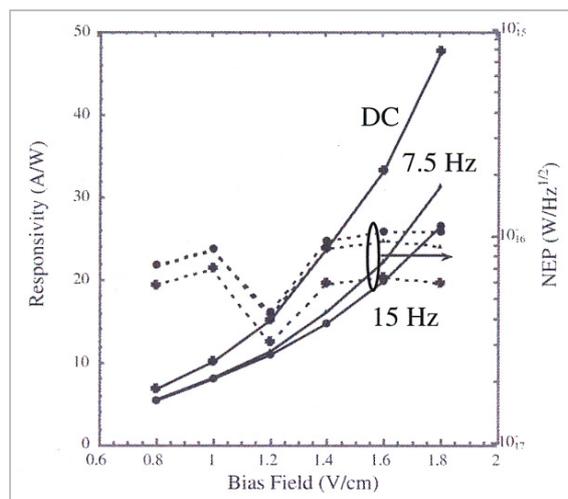


図3 感度及びNEPのバイアス電界強度依存性

B濃度が高いため光吸収係数は大きくなる、また電極間には低濃度Ge:Gaがあるため、ホッピング電流による暗電流も抑えられる。このB注入層がある場合、Ge:Ga単体で用いた場合の量子効率率が19%程度であることにに対し42%まで増加させることに成功した。その結果、 $500 \times 500 \times 500 \mu\text{m}^3$ 角という小体積でキャビティを有しないにもかかわらず、15 A/Wという高い感度を実現し、アメリカ合衆国が2003年8月に打ち上げた赤外天文衛星SIRTIFに搭載された検出器[6]と比較しても、体積が1/6程度にもかかわらず2倍以上の感度を有するに至った。

極低温読み出し回路はp型Si MOSFETを用いた、オープンループゲイン1000倍、フィードバック容量7pFのCTIAである。検出器と読み出し回路のノイズは1/fの依存性を持つスペクトルであり、 $20 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ at 1Hzである。このノイズの源は読み出し回路であることが分かっている。ASTRO-Fのサーベイモードにおける積分時間は0.14secであり、その時間信号は積分されることになる。Correlation double sampling (CDS)を用いてNEPを見積もった場合、 $1.8 \times 10^{17} \text{W}$ となり、

観測機器として十分な性能を有していることが分かった。我々は世界で初めて遠赤外検出器のダイレクトハイブリッドアレイの開発に成功した[7]。図4にダイレクトハイブリッドの出力波形を示す。

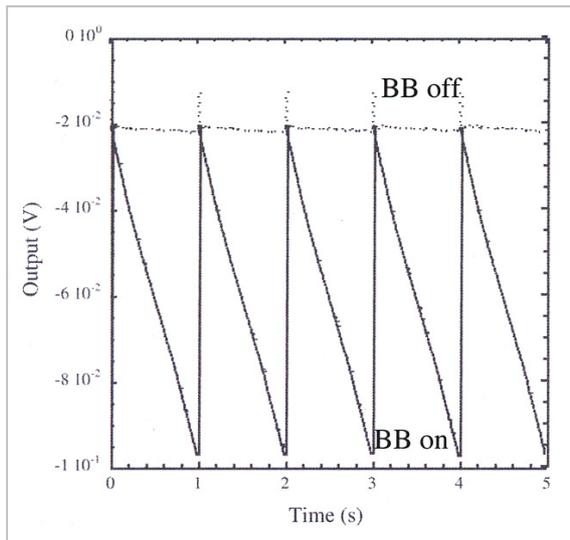


図4 2.15KにおけるGe:Gaダイレクトハイブリッドの出力波形、実線black body (BB) source on、破線BB off。

3 微弱光検出技術

極低温動作回路技術は遠赤外検出にとどまらず、あらゆる波長帯における微弱光検出に応用が可能である。高いインピーダンスを持っている高感度光検出器にインピーダンス変換し増幅する読み出し回路の低ノイズ化は分光など微弱光を取り扱う分野において強力なデバイスと成り得る。特に、将来の大容量、完全秘匿通信の担い手と期待されている量子通信分野において重要な要素デバイスになると予想される。光パルスに含まれる光子数を正確に識別する検出器、いわゆる光子数識別器は量子暗号の高性能化はもちろん、光領域での量子計算を実現する上で必須デバイスとなる。例えば、単一光子状態やスクィーズド状態のような非古典光と光子数識別器及びフィードバック系を組み合わせることにより、汎用的な光量子計算機を実現することができる。これは将来の大容量通信を実現するための量子符号化技術として重要であるばかりでなく、堅牢なセキュリティをも具備した量子

情報ネットワークを構築するための基盤技術となり、そのインパクトは極めて大きい。可視光領域においては米国スタンフォード大学により10K動作のvisible light photon counter (VLPC)が開発されている[8]。また、NIST等で開発された超伝導を用いた物は100mKの極低温冷却が必要となるが、光ファイバー内の減衰が最も少ない1.5 μm 帯の赤外光に対して光子数を識別できる[9]。これらの検出器はダークカウントが大きい、バックグラウンド光に弱い、もしくは量子効率が低い等の短所がある。また、これらの検出器は特殊な加工技術が必要であり、普及という面で困難を伴う。我々はコマーシャルアベイラブルなデバイスを組み合わせ、極低温で動作させることにより1.5 μm 帯の赤外光の光子数識別器の開発を目指している。我々はInGaAs pin photodiodeで発生した電荷を正確にカウントすることにより、入射光に含まれていた光子数を識別する方法を用いた。読み出し回路方式としては、微弱光検出に適し、構成素子が少なくすむcharge integration amplifier (CIA) 積分型回路を採用した。図5に回路構成を示す。赤い線で囲まれている部分を4.2Kに冷却している。InGaAs pin photodiodeには京セミ製 $\phi 30 \mu\text{m}$ のものを使用した。

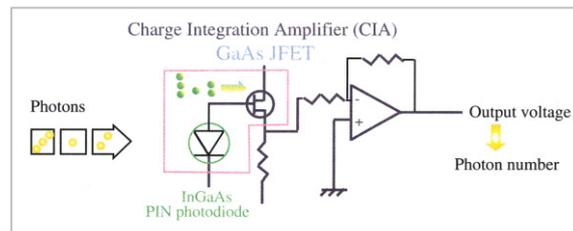


図5 1.5 μm 帯微弱光検出システムCIA回路

低容量実装と、読み出し回路の低雑音化が光子数識別の正否を決定付ける。我々は初段アンプとして、GaAs JFETを使用した。極低温で動作するFETとして、MOS FET、MES FET、HEMT及び化合物系JFETがある。n型MOS FETは極低温下では電流-電圧特性において電流が急上昇するキック現象が確認されている。このキック現象を避けるためにp型MOS FETを用いるか[10]、ドーパント量を多くするなどの工夫が必要となる[6]。それでもノイズは $\sim 10 \mu$

$V/Hz^{1/2}$ at 1Hz であり、十分に低い値とは言い難い。MES FETやHEMTはドレイン電流を1mA程度流した場合、 $1 \mu V/Hz^{1/2}$ at 1Hz を切る低ノイズの報告があるが[11]、極低温動作FETとしては消費電力が大きく、またゲートリーク電流が大きく、高いインピーダンスを有する検出器の読み出し回路には不向きである。一方化合物系(GaAs) JFETはゲート構造にp-nジャンクションを有し、HEMT等と比較して高いゲートインピーダンスが期待できる。また他のFETと比較して、構造的にキャリアが走行するチャンネルとゲート電極の距離が長く、同じゲートサイズの場合、低い入力容量となる。これは積分型読み出し回路において高いS/Nを得られることを意味し、重要な長所となる。我々はSONY製GaAs JFETの極低温における性能を評価した。図6(a)にゲート幅 $5 \mu m$ 、ゲート長 $50 \mu m$ のGaAs JFETの4.2KにおけるI-V特性、(b)に相互コンダクタンスのゲート電圧依存性を示す。4.2Kにおいても良好なI-V特性を示すことが分かる。また、相互コンダクタンスとしても $\sim 10 \mu S$ 程度は得られることが分かった。

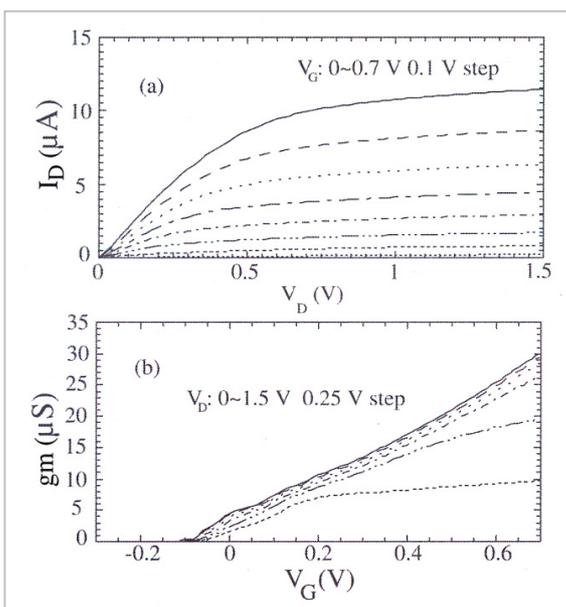


図6 (a) GaAs JFETの4.2KにおけるI-V特性、(b)相互コンダクタンスのゲート電圧依存性

図7にゲート容量のゲート電圧依存性の室温、77K及び4.2Kでの場合を示す。低温になるに従って容量が低下しており、4.2Kにおいては0.1pF

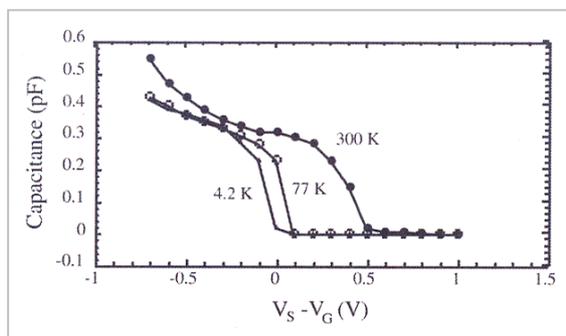


図7 ゲート入力容量のゲート電圧依存性

を切る動作条件も可能となる。GaAs JFETは極低温においてrandom telegraph signal (RTS) というノイズ[12]が発生する(図8)。このスイッチング現象は測定時の誤差となり、計測時に大きな障害となる。

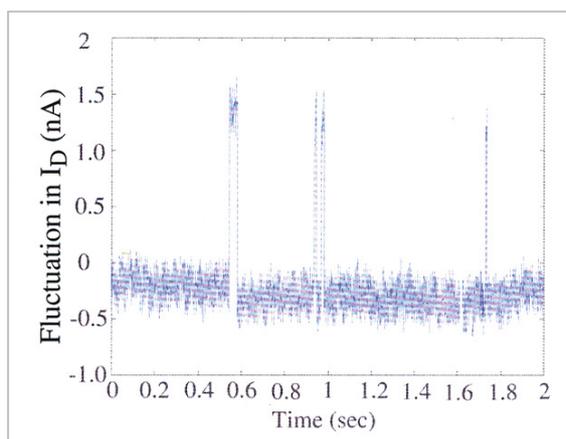


図8 random telegraph signal 波形

我々はこのRTSの発生確率を格段に減らす方法を発見した。ドレイン電流を流したまま、素子温度を35K以上に上昇させ、そのまま4.2Kに再冷却する、この行為をthermal cure (TC)と名付ける。図9にTCを行った場合とそうでない場合のノイズを示す。TCを行わない場合は $3 \mu V/Hz^{1/2}$ at 1Hz程度であるのに対し、TCを行った後は $0.5 \mu V/Hz^{1/2}$ at 1Hzにまで減少する。これらのメカニズムの詳細は文献[13]を参照されたい。また、GaAs JFETのゲート入力容量を測定した結果0.06pFであることが分かった。さらに、InGaAs pin photodiodeは極低温において容量が0.026pFとなりGaAs JFETの入力容量との合計0.086pF(Cs)となり、0.1pFを切るが可能となった。CIAタイプの読み出し回路を用いて、

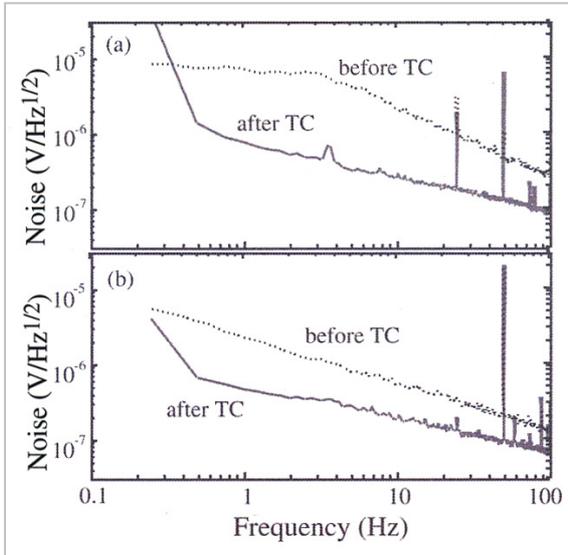


図9 TC前後のノイズスペクトル

微弱光検出を試みた。Signal=QGM/Cs (V)、Noise= $V_{n, CDS}$ で表現でき、ここでQ: 素電荷 (1.6×10^{-19} C)、GM: source follower gain (0.8~0.9) である。CDSにおけるノイズ $V_{n, CDS}$ は以下の式で表される。

$$V_{n, CDS}^2 = \int_0^\infty V_n(f)^2 \frac{4 \sin^2(\pi f T)}{1 + (f/f_c)^2} df \quad (1)$$

ここで、Tは積分時間(0.5~1s) and f_c (100 Hz) は回路のカットオフ周波数、 $V_n(f)$ はノイズスペクトルである。毎秒約40 photonsが入射する程度に減衰させた光を入射した場合の出力波形を図10に示す。量子効率約60%、途中RTSのための取得の失敗もあるが、ノイズより見積もった誤差~2photonsで検出に成功した。この回路の漏れ電流は500 electron/hourなので、測定時に

ほとんど影響を及ぼさない。少なくとも1.5 μm 帯のダークカウントの少ない、世界で最も高感度な検出器であると言える。今後、読み出し回路の低雑音化を更に進めて、1光子を識別できる検出器の開発を進めたい。

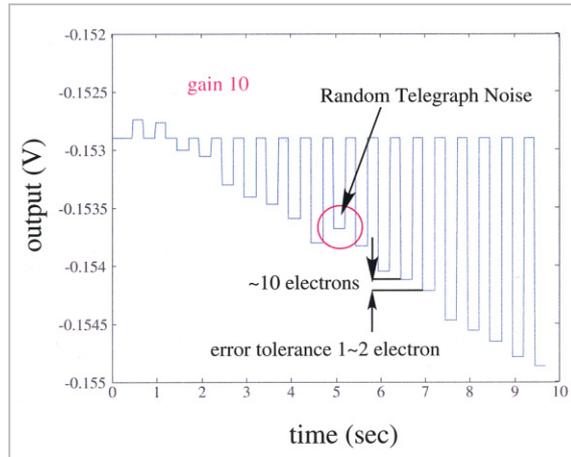


図10 InGaAs pin photodiodeの4.2Kにおける積分波形出力

4 まとめ

我々は極低温下で動作させることにより低雑音高感度光検出器を開発してきた。Ge:Ga 遠赤外検出器においては世界で初めての試みであるダイレクトハイブリッド構造を作成し、遠赤外光の検出に成功した。また、InGaAs pin photodiodeとGaAs JFETを用いて1.5 μm 帯の微弱光検出器を構築し、毎秒40photons程度の光を量子効率60%、誤差~2photonsで検出することに成功した。今後更に低雑音化を進め、光子数識別能力を高めていく予定である。

参考文献

- 1 C. A. Beichman, "The IRAS View of the Galaxy and the Solar System", Ann. Rev. Astron. Astrophysics, 35, 521-563, 1987.
- 2 D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss, "T-ray Imaging", IEEE J. Sel Topics Quantum Electron, 2, 679-692, 1996.
- 3 M. Hermann, M. Tani, K. Sakai, and R. Fukasawa, "Terahertz imaging of silicon wafers", J. Appl. Phys. 91 (3), 1247-1250, 2002.
- 4 P. R. Bratt, "Impurity germanium and silicon infrared detector" in Semiconductors and Semimetals, R. K. Willardson and A. C. Beer, eds. (Academic Press, New York, 1997), pp. 33-142.
- 5 M. Fujiwara, "Development of far-infrared Ge:Ga photoconductor having a longitudinal configuration," Appl.

- Phys. Lett. 77, 3099-3101, 2000.
- 6 E. T. Young, J.T. Davis, C.L. Thompson, G.H. Rieke, G. Rivlis, R.Shchnurr, J. Cadien, L. Davidson, G. S. Winters, and K. A. Kormos, "Far-infrared imaging array for SIRTf," in Infrared Astronomical Instrumentation, A.M. Fowler eds., Proc. SPIE 3354, 57-65, 1998.
 - 7 M. Fujiwara, T. Hirao, M. Kawada, H. Shibai, S. Matsuura, H. Kanneda, M. Patrashin, and T. Nakagawa, "Development of a gallium-doped germanium far-infrared photoconductor direct hybrid two-dimensional array," Appl. Opt. Vol. 42, No. 12, 2166-2173, 2003.
 - 8 E. Waks, K. Inoue, W. D. Oliver, E. Diamanti, and Y. Yamamoto, "High efficiency photon number detection for quantum information processing," quant-ph/0308054v1, 2003.
 - 9 A. J. Miller, S. W. Nam, J. M. Martinis, and A. V. Sergienko, "Demonstration of a low-noise near-infrared photon counter with multiphoton discrimination," Appl. Phys. Lett. Vol. 83, No. 4, 791-793, 2003.
 - 10 T. Hirao, Y. Hibi, M. Kawada, H. Nagata, H. Shibai, T. Watabe, M. Noda, and T. Nakagawa, "Cryogenic readout electronics with silicon P-MOSFETs for the infrared astronomical satellite, ASTRO-F," Advances in Space Research, 2002.
 - 11 R. K. Kirschman and J. A. Lipa, "Further evaluation of GaAs FETs for cryogenic readout," in Infrared Detectors and Instrumentation, W.H. Makky eds., Proc. SPIE 1946, 350-364, 1993.
 - 12 K. Kandiah, "Random telegraph signal currents and low-frequency noise in junction field effect transistors," IEEE trans. Elec. Dev. Vol. ED-41, No. 11, 2006-2015, 1994.
 - 13 M. Fujiwara, M. Sasaki, and M. Akiba, "Reduction method for low-frequency noise of GaAs junction field effect transistor at a cryogenic temperature," Appl. Phys. Lett. Vol. 80, No. 10, 1844-1846, 2002.



藤原幹生

基礎先端部門量子情報技術研究グループ主任研究員 博士（理学）
光検出技術



秋葉 誠

基礎先端部門光エレクトロニクスグループ主任研究員 理学博士
光計測



佐々木雅英

基礎先端部門量子情報技術研究グループリーダー 博士（理学）
量子情報理論

