

令和元年5月28日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26287047

研究課題名(和文) 超伝導光検出器を用いた液体ヘリウムTPCの開発と軽い暗黒物質の探索

研究課題名(英文) Development of the liquid helium TPC with superconducting detectors and search for light dark matter

研究代表者

石野 宏和 (Ishino, Hirokazu)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：90323782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：軽い暗黒物質が液体ヘリウム原子を散乱することによって発生する深紫外線光を高効率で検出する超伝導技術を用いた光センサーの開発を行った。1cm角のシリコン基板に50個の検出器アレイを約3%の一様性で作製する手法を確立した。10 μ 秒のパルス信号について20個の検出器素子を1本の配線で読み出すことに成功した。検出器感度を測定し、条件を整えることができれば、液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索は可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として得られた大面積かつ高感度で極低温で作動する超伝導光検出器とその読み出しシステムは、本研究の主題である軽い暗黒物質探索のみならず、X線・ γ 線・中性子線といった放射線の高精度測定にも転用することができ、学術的波及効果は大きいと考える。半導体検出器では不可能であった可視光のみならず赤外線から紫外線の幅広い波長領域での量子イメージングを単一技術で可能となるので、社会的意義も大きいと考える。

研究成果の概要(英文)：We have developed photon sensors using superconducting material for the detection of scintillation light emitted from Helium atoms recoiled by dark matter particles. We have established a fabrication procedure to have about 3% uniformity for 50 detectors on 1cm silicon substrate. We have successfully read out photon 10 usec pulse signals for the 20 sensors using a single wire. We have demonstrated that the sensors developed so far have the potential sufficient for use of a search for dark matter particles with necessary conditions which we have identified.

研究分野：宇宙・素粒子実験

キーワード：暗黒物質 超伝導検出器 周波数領域多重化 力学的インダクタンス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙の26%は光と相互作用しない暗黒物質から構成されている、ということが分かっている。暗黒物質の正体として、弱い相互作用する素粒子(WIMP, Weakly Interacting Massive Particles)が候補として考えられており、世界中の研究者がWIMPの直接探索を目指している。WIMPを発見したと報告する実験グループがあれば、それを真っ向から否定する実験グループがあり、その真意は今もって不明確である。これまでの探索実験では、Xe, NaIなど重い原子核が標的として用いられたため、質量が $10\text{GeV}/c^2$ 以下のWIMPにはあまり感度が無かった。上述の真意は、軽い暗黒物質に感度を持てば解決可能である、と考えられていた。

その中、2013年にW. GuoとD.N. McKinseyは液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索実験を提案した。液体ヘリウム中のヘリウム核がWIMPからの散乱で反跳を受けると、周囲のヘリウム原子を励起・電離する。それらは1光子 16eV の深紫外線シンチレーション光を発する。これまでは、液体ヘリウムシンチレーション光を検出するために、液体ヘリウムデュワーに窓を開けて、波長変換板により深紫外線光を可視光に変換、サファイア窓を通じて光電子増倍管で検出する手法が使われていた。この手法では、窓の大きさによる立体角の制限、波長変換効率および光電子増倍管の量子効率のため、およそ1%程度の検出効率しかない。 5keV の反跳エネルギーを受けると、約80個の紫外線光子が放出されるため、この手法ではWIMPによる信号を検出するのは困難である。そこで、極低温下で作動し液体ヘリウム内で直接紫外線光子を検出可能な超伝導検出器を用いる手法を提案した。この手法により、シンチレーション光の検出効率を20%以上にすることができる。また、反跳ヘリウム核と環境ガンマ線による反跳電子の信号を区別するためにTPC(Time Projection Chamber)を用いることにより、ヘリウム原子の電離と励起の比を測定する。液体ヘリウムを用いたTPCはこれまで世界で成功例はまだない。 1kg の液体ヘリウムを用いて1年間観測すると、質量 $4\text{GeV}/c^2$ のWIMPに対して、スピンに依存しない相互作用断面積について 10^{-40}cm^2 の上限値を与えることができる。この値は、提案当時(2013年11月)において、前人未到の探索領域であった。

2. 研究の目的

液体ヘリウム内で作動し、直接シンチレーション光(深紫外線、波長 80nm , 1光子 16eV)を検出するための超伝導検出器と、その読み出しシステムを開発する。超伝導検出器として、KID(Kinetic Inductance Detector)を用いる。KIDは、超伝導薄膜を用いてLC共振回路を構成する。外部から付与エネルギーが与えられると、超伝導体内のクーパー対が破壊され、その結果力学的インダクタンスが変わる。その変化は共振回路の共振周波数を変える。予め共振周波数を持つ励起マイクロ波を導入しておき、その振幅と位相の変化を検出することにより、外部からの付与エネルギーを測定する。

気液2層からなるTPC作製に向けた情報収集を行い、検出器のデザインを決定し、将来において 1kg 液体ヘリウムを用いた本格的暗黒物質探索への道筋を立てる。

3. 研究の方法

液体ヘリウムは減圧することにより、 1.6K 程度まで冷却可能である。その温度において低雑音で作動する超伝導体としてNbまたはNbNを用いることにした。Nbは 9.2K で超伝導転移を起す。BCS理論によると、クーパー対の束縛エネルギーは 2.8meV であり、 16eV の付与エネルギーに対して、約5000個のクーパー対を破壊できる。NbNは転移温度が 16K と高めであるため、クーパー対束縛エネルギーが 4.8meV となり、破壊できるクーパー対数が少ない。一方、Nbよりも大きな力学的インダクタンスを持つため、単位準粒子(クーパー対が破壊されて生じた自由電子)生成あたりの感度は高くなる。両薄膜で実機を作製し、その性能から超伝導薄膜を選択する。

KIDの共振周波数が読み出しマイクロ波($4\sim 5\text{GHz}$)の周波数と一致し、かつなるべく大きな受光面積を持つデザインを構築する。一方、検出器を大きくしすぎると、全インダクタンスに対する力学的インダクタンスの比が減り感度が悪くなる。そこで多素子化が必要になる。一様な感度を持つ検出器アレイの作製手法を確立し、その感度を測定する。

多素子化した検出器アレイからの読み出しを周波数領域多重化で行うシステムを構築する。光パルス信号を効率良く検出するために、KIDに対してこれまで世界でも行われていないセルフトリガー方式を採用した。この手法により、安価で限られた資源(FPGAのゲート数とPCへのデータ転送量)を最大限に活用することが可能となる。

4. 研究成果

まずは検出器のサイズを決定した。TPCとして機能させるためには、電離して生じた電子を効率よくイオンから分離する必要がある。電子を電場で移動させ、電子を液相から気層に取り出すためには、 10m/s 以上の速さが必要である。そのためには、 10kV/cm の電場が必要である。印加電圧を考慮して、検出器サイズは1辺 1cm の立方体とした。なお、そのためには 10kV の電圧を印加する必要があり、フィードスルーでの放電を抑制する技術が必要になる。あるいはデュワー内部で高電圧を発生する装置を導入する必要があるが、 4K 程度の極低温で作動する必要がある。これは今後残された技術的課題である。

研究分担者である山森氏とともにKIDの開発を行った。最初に、KIDのデザインを行った。電磁シミュレーションを用いた設計と実機による共振周波数と歩留りの測定を複数回反復することにより、95%以上の歩留りを持つ共振器そのもののデザインを決定した。次に、共振器アレイをデザインした。なるべく大きな立体角を持たせるために、 10mm 角のシリコン基板に50

個の共振器を配置する。手持ちの読み出しシステムが持つ DAC で供給できる帯域幅 (120MHz) が読み出し可能な素子数の上限を決定する。作製した KID に 10n 秒の可視光パルス照射し、その時間応答から共振器が必要とする帯域を決定した。その結果 2MHz であることがわかった。これは共振器の共振周波数 f_0 と Q 値から決まる時定数 Q/f_0 とほぼ一致したことから、共振器の時間応答は、共振器自身が持つ Q 値で支配されていることがわかった。隣の共振器と干渉しないように、帯域の 3 倍の 6MHz 間隔で共振器アレイを設計することにした。LC 共振回路の C に相当する interdigital capacitance を変化させることにより、電磁シミュレーションと実機での測定経験から共振器アレイを設計した。実際作製し共振周波数間隔を測定すると、予想に反して共振周波数間隔にばらつきが生じた。ばらつきの度合いを $\sigma = (\text{共振周波数間隔の分布 RMS}) / (\text{共振周波数間隔の平均値})$ と定義すると、 $\sigma = 0.57$ であった。50 個の共振器の周波数領域上の位置と物理的位置の対応関係が一意的に決定されるためには、 $\sigma < 0.33$ が必要であり、この要求条件を満たしていない。調査の結果 2 つの原因を突き止めた。1 つ目は、共振器の物理的な電磁干渉である。これは共振器の間にグラウンド膜を敷き詰めることにより取り除くことができた。2 つ目はオーバーエッチングであった。シリコン基板上に金属薄膜をスパッターにより 50~300nm の厚さで作製する。その後、リソグラフィー技術によりエッチングすることにより、金属薄膜を特定の部分だけ掘り取り除くことにより、共振器パターンを形成する。このとき、1cm 角の基板上においてエッチングの速さが異なるため、速いところは金属膜とともに下のシリコン基板をも削ってしまう (オーバーエッチング)。そうすると、共振器が感じる正味の誘電率が基板上的位置で変わってしまい、その結果共振周波数が変化し非一様性が生じてしまう。これを実証するために、故意にオーバーエッチングを起こし、共振周波数の変化を測定したのが図 1 である。この結果、オーバーエッチングによる効果が確認された。オーバーエッチングを防ぐために、シリコン基板の上に予め厚さ 2nm の AlN 薄膜をスパッターし、その後金属薄膜をスパッター・エッチングすることにより、一様な膜厚を持つ共振器アレイの作製に成功した。図 2 は共振間隔の分布を示し、青いヒストグラムが最終的に得られた分布であり、 $\sigma = 0.31$ であることがわかり要求を満たすことができた。この成果は論文 1 .において発表されている。

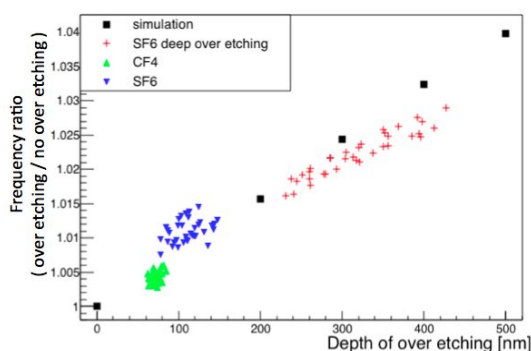


図 1 : 横軸はオーバーエッチングによるシリコン基板の深さ、縦軸は共振周波数のずれ。色付点がデータで、黒い点がシミュレーション結果

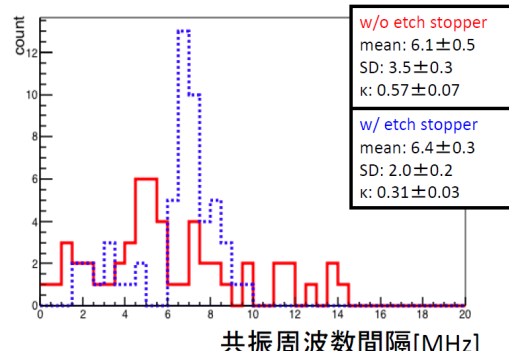


図 2 : 共振周波数間隔の分布。赤いヒストグラムは AlN 薄膜無しの場合、青いヒストグラムは AlN 薄膜有の場合。

金属薄膜として、Nb と NbN の双方を作製した。その結果 Nb の方が 95% 以上の安定した歩留りをえることができた。一方 NbN は素子の作製バッチにより歩留りが大きく変化し、最も悪い物で 50% 程度のものもあった。顕微鏡による目視においても素子自信の見た目は大きく変わらないにも関わらず、共振ピークが異常に小さかったり現れなかったりした。NbN の空気中での化学変化が原因の 1 つとして考えられるが、詳細は不明である。金属薄膜として Nb を選択し先に進むことにした。

一様な周波数間隔が得られたので、次に FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた読み出しシステムの開発を行った。KID は周波数領域において多重読み出しが容易な素子であり、1 本の線で多数の素子を同時に読み出すことが可能である。これまで KID は、信号強度がほとんど時間的に変わらないミリ波・サブミリ波天文観測に用いられそのための読み出しシステムは既に存在していた。それらの観測では、せいぜい 100Hz 程度のサンプリングで済むために、何も処理をせずホモダイン読み出しが可能である。一方、光パルスや X 線といったパルス信号に対しては、MHz 以上のサンプリングが必要となり、ホモダイン処理後そのままデータを転送・保存するのは困難である。本研究ではセルフトリガーを新たに設け、興味のある事象を持つ時系列データのみ抜き取り転送・保存するシステムを構築した。市販されている Xilinx Kintex-7 DSP ボードとアナログ・デジタルボード FMC150 を用いてデータ収集システムをファームウェアによって構築した。FMC150 は 120MHz の帯域を持つ DAC を持つので、最大 20 チャンネル読み出し可能である。ファームウェアにおいて 20 の異なるマイクロ波を発生する。DAC から発生したマイクロ波は、LO (Local Oscillator) とミキサによって 4~5GHz にアップコンバートされ KID に導入される。KID を通過したマイクロ波はミキサによってダウンコンバートされ FMC150 の ADC に入力される。ファームウェア内では、それぞれのマイクロ波に対してホモダイン処理し、Low Pass filter を施すことにより、それぞれの共振器信号の時間領域データを取り出す。それら

のデータは2つに分けられ、一方はFIFO もう一方は他のチャンネルの信号との和をとられる。パルス信号が生じると、和信号はある閾値を超える。その閾値を超えた時刻の周辺のデータのみをもう一方のFIFOから抽出し、別のメモリーに蓄える。SiTCPによって、ある程度データがたまったらPCがそのデータを読み出す。この回路の動作を実証するために、共振器アレイ検出器の基板の裏にAm-241からのアルファ線(約5MeV)を照射し、シリコン基板内に生じたフォノン信号を多数の共振器で同時観測した。図3はそのときのパルス信号を示す。時刻5μ秒あたりの信号がアルファ線によるフォノン信号で同時計測されていることがわかる。一方ベースラインのふらつきは雑音によるもので、SN比はあまり良くない。1素子あたりのフォノンによる付与エネルギーは、シリコン基板から金属薄膜へのフォノン透過率に大きく依存するが、概ね0.1~1keV程度である。今後この雑音源を特定し削減することが必要である。セルフトリガーシステムを用いたKIDの読み出しシステムは世界では他に例を見ない。この成果は論文(発表論文2.)として出版された。

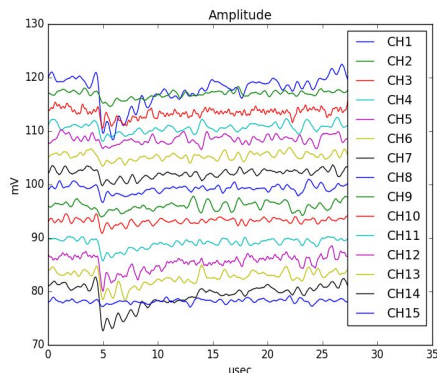


図3: 15チャンネルの共振器の周波数領域での同時読み出しの例。5μ秒あたりの信号がアルファ線によるフォノン信号。

Nbの50個の共振器素子アレイの感度評価を行った。評価方法は2種類である。1つ目は、可視光パルス信号を照射しリアリティを測定した。素子に照射される光子数は、光電子増倍管と検出器アレイの照射プロファイルから得られる。660nmと405nmの2つの異なる波長のレーザーパルス光により、1.1および 1.3×10^{-12} C/eVという感度を得られた。誤差はそれぞれ50%程度あるが概ね一致した結果を得られた。光照射によって得られた最小感度は1keV程度であり、それ以下になると測定系の雑音に埋もれてしまうことがわかった。原理的には16eV光子に感度を持つはずである。雑音の原因は、真空ポンプからの振動によるものや磁場の変動によるものが考えられるが、検出器が配置されている極低温部にアッテネータとHEMTアンプ(30dBのゲイン)、および磁場シールド(Snなどの超伝導体とミュメタル)を用いることにより、SN比は100倍程度改善できると考えられる。2つ目は、共振周波数の温度依存性を測定することにより、全インダクタンスに対する力学的インダクタンスの比を測定した。図4左はある共振器の共振ピークの温度依存性をネットワークアナライザーで測定した結果である。共振カーブをフィットし、共振ピークの周波数の温度依存性を示したのが図4の真ん中の図である。赤い線はBCS理論に基づいて導かれたMattis・Bardeenの式を用いてフィットしたものでこの式から $=L_k / (L_k + L_g)$ が得られる。ここで、 L_k は力学的インダクタンス、 L_g は磁束によるインダクタンスである。この値を50個の素子について測定したところ、約3%のばらつきで一致し、素子アレイの一様性を確認した。の超伝導膜厚の依存性を示したのが図4右の図である。黒い点が測定点で赤い線がシミュレーションと理論式から導いた期待値である。期待値と測定点にずれが見られるが概ね傾向は一致し、薄いほどが大きいことがわかる。1準粒子生成あたりの励起マイクロ波の位相変化が検出器の感度として与えられ、それは $K \cdot Q/V$ で与えられる。ここでKは物質固有の量でBCS理論から与えられNbでは 8.4×10^{-9} [rad·μm³]である。Vは検出器の体積である。この結果16eVの光子が照射されると位相は 1.8×10^{-5} [rad]変化することが計算される。この位相変化量と1つ目の感度の結果の一致性は、読み出しマイクロ波回路の性能の較正が必要であり、課題として残っている。

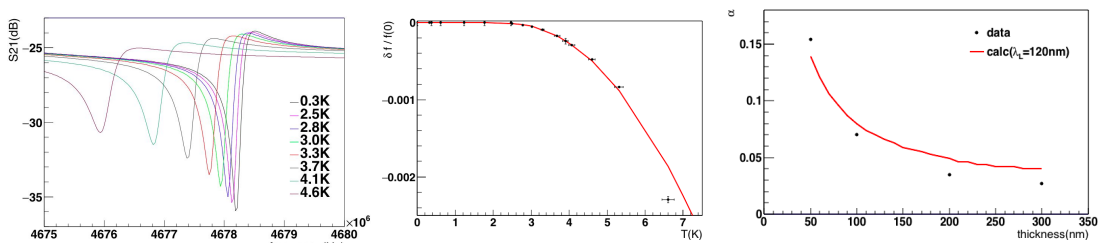


図4: 左図: 共振ピークの温度依存性。温度が上がると L_k が増えるため、ピークは低周波側にずれる。中図: 共振周波数の温度依存性。クロス点はデータ、赤線はフィットの結果。右図: の膜厚依存性。黒点がデータ、赤線が理論的な期待値。

以上、KID共振器素子50個からなる1cm角の超伝導光検出器とその読み出し装置の開発・評価を行った。これらの技術は、上述で述べた課題をクリアできれば、液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索が可能であることを示す。また素子にホウ素を塗布すれば、現状の感度においても中性子の検出が可能であり、量子干渉や中性子の寿命測定など冷中性子科学にも適応可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. 「等間隔共振周波数を狙ったニオブ製集中定数型力学インダクタンス検出器の設計と制作の改善」、喜田洋介、石野宏和、山森弘毅、平山文紀、神代暁、樹林敦子、佐藤伸明、低温工学、54巻1号、(2019), pp33 - 36、doi.org/10.2221/jcsj.54.33、オープンアクセス有、査読有、国際共著無
2. "Frequency-Domain Multiplexing Readout with a Self-Trigger System for Pulse Signals from Kinetic Inductance Detectors," Y. Yamada, H. Ishino, A. Kibayashi, Y. Kida, N. Hidehira, K. Komatsu, M. Hazumi, N. Sato, K. Sakai, H. Yamamori, F. Hirayama, S. Kohjiro, Journal Low Temperature Physics, 193 (2018), pp518-524, doi.org/10.1007/s10909-018-1911-6, オープンアクセス有、査読有、国際共著無
3. 「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発」、喜田洋介、石野宏和、樹林敦子、山田要介、小松国幹、秀平直人、羽澄昌史、佐藤伸明、山森弘毅、平山文紀、神代暁、信学技報、Vol. 116, No. 269、(2016), pp13-18, DOI 無、オープンアクセス無、査読無、国際共著無
4. 「超伝導検出器 KID 用高速多重同時読み出しシステム」、山田要介、石野宏和、樹林敦子、喜田洋介、小松国幹、羽澄昌史、佐藤伸明、酒井和弘、神代暁、山森弘毅、平山文紀、信学技報、Vol. 116, No. 269, pp.19-24, DOI 無、オープンアクセス無、査読無、国際共著無
5. 「超伝導検出器 KID 用読み出しシステム - ホモダイン形式によるパルス多重読み出し論理回路の開発」、山田要介、石野宏和、樹林敦子、喜田洋介、舟木巧、羽澄昌史、佐藤伸明、神代暁、山森弘毅、平山文紀、酒井和弘、信学技報、Vol. 115, No. 242 (2015), pp.41-45, DOI 無、オープンアクセス無、査読無、国際共著無
6. "Development of Microwave Kinetic Inductance Detectors for phonon and photon detections," H. Ishino, A. Kibayashi, Y. Kibe, Y. Yamada, A. Okamoto, Y. Kida, M. Hazumi, N. Sato, H. Watanabe, PoS (TIPP2014), 090 (2015) pp.1-8、doi.org/10.22323/1.213.0090、オープンアクセス有、査読有、国際共著無
7. 「フォノン・フォトン検出用 Kinetic Inductance Detectors」、石野宏和、樹林敦子、山田要介、岡本晃範、喜田洋介、羽澄昌史、佐藤伸明、神代暁、山森弘毅、信学技報、SCE2014-42,(2014), pp.43-47, DOI 無、オープンアクセス無、査読無、国際共著無

〔学会発表〕(計 34 件)

1. 石野宏和、「液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索」、アクティブ媒質 TPC 開発座談会、2019、招待講演有、国際学会無
2. 山森弘毅、「超伝導検出器多重読み出し回路の開発」、アクティブ媒質 TPC 開発座談会、2019、招待講演有、国際学会無
3. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発(7)」、日本物理学会、2018、招待講演無、国際学会無
4. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発(6)」、日本物理学会、2018、招待講演無、国際学会無
5. 秀平直人、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の性能評価(3)」、日本物理学会、2018、招待講演無、国際学会無
6. 石野宏和、「液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索」、日本物理学会、2018、招待講演有、国際学会無
7. Yousuke Kida, "Study on Lumped Element Kinetic Inductance Detectors for Light Dark Matter Searches Using Liquid Helium," 30th International Symposium on superconductivity, 2017, 招待講演無、国際学会有
8. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発(3)」、超伝導エレクトロニクス研究会、2017、招待講演無、国際学会有
9. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発(5)」、日本物理学会、2017、招待講演無、国際学会無
10. 秀平直人、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の性能評価(2)」、日本物理学会、2017、招待講演無、国際学会無
11. Yousuke Kida, "Development of Lumped Element Kinetic Inductance Detectors for Light Dark Matter Searches using Liquid Helium," Low Temperature Detector 17, 2017, 招待講演無、国際学会有
12. 石野宏和、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索」、CRC タウンミーティング、2017、招待講演有、国際学会無
13. 石野宏和、「軽い暗黒物質探索のための液体ヘリウム TPC」、アクティブ媒質 TPC 開発座談会、2017、招待講演有、国際学会無、
14. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発(4)」、日本物理学会、2017、招待講演無、国際学会無
15. 秀平直人、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の性能評

価」、日本物理学会、2017、招待講演無、国際学会無

16. Yousuke Kida, "Development of LEKID detectors for Light Dark Matter Searches using Liquid Helium," 29th International Symposium on Superconductivity, 2016, 招待講演無,国際学会無

17. Hirokazu Ishino, "Development of superconducting detectors for Dark Matter Searches using Liquid Helium, " 29th International Symposium on Superconductivity, 2016, 招待講演無, 国際学会無

18. Hirokazu Ishino, "Development of Kinetic Inductance Detectors to search for dark matter," The 3rd international Workshop on Superconducting Sensors and Detectors, 2016, 招待講演無, 国際学会無

19. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発(3)」、日本物理学会、2016、招待講演無、国際学会無

20. 山田要介、「超伝導検出器 KID 用パルス多重同時読み出し DAQ システムの開発」、日本物理学会、2016、招待講演無、国際学会無

21. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器(LEKID)の開発(2)」、日本物理学会、2016、招待講演無、国際学会無

22. 山田要介、「超伝導検出器 KID 用多重同時読み出しシステムによるパルス光信号の測定」、日本物理学会、2016、招待講演無、国際学会無

23. Yousuke Kida, "Development of Lumped Element Kinetic Inductance Detectors for light detection," B-mode from space, 2015, 招待講演無, 国際学会無

24. Yousuke Yamada, "Development of a readout system of Kinetic Inductance Detectors with FPGA self-triggering for pulsed events," B mode from space, 2015, 招待講演無, 国際学会無

25. 山田要介、「超伝導検出器 KID の周波数駆動多重読み出しシステムの開発」、日本物理学会、2015、招待講演無、国際学会無

26. 喜田洋介、「軽い暗黒物質探索用液体ヘリウム TPC に用いる超伝導検出器の開発」、日本物理学会、2015、招待講演無、国際学会無

27. Hirokazu Ishino, "Study on the Lumped Element Kinetic Inductance Detector for Photon Detection," ISEC2015, 招待講演無, 2015, 国際学会無

28. Atsuko Kibayashi, "Development of Lumped Element Kinetic Inductance Detectors for Phonon and Photon Detections," I2MTC, 2015, 招待講演無, 国際学会無

29. 喜田洋介、「軽い暗黒物質探索に用いる超伝導検出器と液体ヘリウム TPC の開発」、日本物理学会、2015、招待講演無、国際学会無

30. 山田要介、「FPGA を用いた超伝導検出器 KID (Kinetic Inductance Detector) 多重読み出しシステムの開発」、日本物理学会、2015、招待講演無、国際学会無

31. 石野宏和、「フォノン・フォトン検出用 KID」、超伝導エレクトロニクス研究会、2014、招待講演無、国際学会無

32. 山田要介、「FPGA を用いた超伝導検出器 KID (Kinetic Inductance Detector) 用データ収集システムの概要」、日本物理学会、2014、招待講演無、国際学会無

33. 喜田洋介、「液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索用超伝導検出器の開発」、日本物理学会、2014、招待講演無、国際学会無

34. 石野宏和、「軽い暗黒物質探索を目指した超伝導検出器と液体ヘリウムを用いた TPC の開発の概要」、日本物理学会、2014、招待講演無、国際学会無

〔その他〕

ホームページ

<http://www.physics.okayama-u.ac.jp/~ishino/kiban-b.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：山森 弘毅、ローマ字氏名：Hirotake Yamamori, 所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所, 部局名：エレクトロニクス・製造領域, 職名：研究グループ長, 研究者番号(8桁): 00358293

(2)研究協力者

山田 要介 (Yousuke Yamada)、喜田 洋介 (Yousuke Kida)、秀平 直人 (Naoto Hidehira)、樹林 敦子 (Atsuko, Kibayashi)、神代 暁 (Satoshi Kohjiro)、平山 文紀 (Fuminori Hirayama)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。