

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540393

研究課題名(和文) 高光検出効率アバランシェフォトダイオードの開発

研究課題名(英文) Development of high photodetection efficiency avalanche photodiode

研究代表者

秋葉 誠 (Akiba Makoto)

独立行政法人 情報通信研究機構・新世代ネットワークセンター

量子 ICT グループ・主任研究員

研究者番号：80184109

研究成果の概要(和文): 低暗計数・高光検出効率光子検出システムを開発するために、線型増倍層を持つ数種類のアバランシェフォトダイオード(APD)と APD 測定用温度可変低雑音測定システムを製作した。その結果、暗計数に関しては pin 接合の $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ APD を使用すれば 0.1 カウント/秒以下の値を達成できる可能性があることが分かった。一方、高光検出効率化に関しては所期の性能(90%以上)を確認するに至っていない。

研究成果の概要(英文): To develop a photon counter with low dark count rate and high photodetection efficiency, we have fabricated several kinds of avalanche photodiodes (APDs) with an additional linear multiplication layer and a temperature-controllable and low-noise measurement system to measure the characteristics of the APDs. Consequently, it was found that dark count rate of less than 0.1 cps is possible by using pin junction $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ APDs. On the other hand, with regard to the photodetection efficiency of the APDs, the efficiency of more than 90% has not been confirmed.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：光検出技術

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：アバランシェフォトダイオード、光子検出、高光検出効率、低暗計数、超高感度、低雑音読み出し技術

1. 研究開始当初の背景

量子情報通信・技術における光を用いた実験に使用する光検出器としては、単光子検出ができるのみならず、その性能、特に暗計数、光検出効率、応答速度などに対し極めて高性能のものが求められている。それらの内どの性能がどの程度必要であるかは各研究において異なる。しかしながら、原理実証の実験

においては、光検出効率と暗計数が本質的に重要になることが多い。これらが必要な性能を満たさなければ実験が不可能であるような場合が少なからず存在するのである。例えば、受信機の古典限界を超える実証実験では、ダークカウント 0.001 個/光パルス以下の条件で光検出効率 90%以上が要求される。また、量子コンピューティングにとって必要不可

欠な制御 NOT ゲートにおいては実に 99%の光検出効率が必要とされている。

高光検出効率を目指した光子検出器はこれまでにいくつかの研究がなされてきた。例えば Visible Light Photon Counter : 光検出効率 88%、ダークカウント 2×10^4 個/秒、超伝導トランジションエッジセンサー : 88%、400 個/秒、Si アバランシェ フォトダイオード (Si-APD) : 65%、25 個/秒などがある。これらの光検出器は現状では光検出効率が 90%以下であり暗計数も大きい。一方で、極めて光検出効率の高い検出器としてシリコンフォトダイオード (Si-PD) があり、光検出効率は最も高いもので 99%にも達している。しかし、Si-PD には電流増倍効果がないため我々が開発した超低雑音読み出し回路を使用しても、単光子検出レベルの検出感度を達成するのは難しい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、特に量子情報技術のために低暗計数 (0.1 個/秒以下) 高光検出効率 (90%以上) の APD を開発する事である。高感度な光子検出器は他の分野でも必要とされており、その場合には必ずしも上記レベルの高効率を要求しないことも多い。今回提案した APD はそうした他分野における要求にも応えられると考えている。例えば、低ダークカウント、低アフターパルス確率を実現できるリニアモードで APD を動作させる場合、光検出効率が著しく下がってしまうことが知られているが、本研究で開発する APD を使用することで 2 倍以上に改善することが可能である。

3. 研究の方法

APD の光検出効率を決めている要素は、光を光電子に変換する効率 (量子効率) と光電子を実際に出力として検出できる効率 (光電子検出効率) に分けられる。量子効率は検出器の表面における透過率と入射光が光電子に変換される効率に更に分けられるが、これらは検出器表面の無反射コーティングや検出器光吸収層の厚さなどで決まっており、原理的には 99%以上の効率が可能である。従って、ここで問題となるのは光電子検出効率である。APD の光電子検出効率を決定するメカニズムは、APD の使用方法、リニアモードかガイガーモードかによって異なる。以下に、それぞれのモードにおける光電子検出効率決定のメカニズムと本研究が提案するその解決方法について説明する。

今回提案する APD 構造を用いた場合、読み出し雑音レベルの大きさによらず光検出効率の改善には有効であるが、極限的に光検出効率を上げるためには低雑音読み出し回路が不可欠である。また、暗計数は、

その起源が分かれば低減することが可能であり、その暗計数の起源を知るためには、温度依存性を知ることが必要である。そこで今回使用した超低雑音・温度可変測定システムについても合わせて説明する。

(1) リニアモードにおける光検出効率改善方法

リニアモードでは 1 個の入射電子が増倍され、出力に多数の電子となって現れるが、この出力電子数は一定でなくある分布を持つ。この分布の例を図 1 に示す。このモードでは入射電子数によって出力電子数分布が大きく異なる。また、暗電流によって発生する出力電子数は比較的少ないので、閾値を設け一定の出力電子数より低い出力を除外することでその影響を低減することができる (図 1 参照)。読み出し回路の雑音の影響も低出力電子数部分に集中するため、同様に改善できる。リニアモードでは出力に設定する閾値によって光電子検出効率が決まる。現状では、この閾値を大きくしななければならないため、リニアモードでは光電子検出効率が上げられないのである。もし暗電流や読み出し回路の雑音を下げられれば、閾値を下げられ光電子検出効率も上げることができる。

我々の光検出回路は極めて低雑音であるが、それでも現状の APD を使用する限り量子効率も合わせて全体の光検出効率を 90%以上にすることは難しい。そこで、APD の出力電子数分布を従来と変える事で更に光電子検出効率を上げる方法を考案した。図 1 を見れば分かるように、入射電子の数が多くなれば、出力電子数が小さくなる確

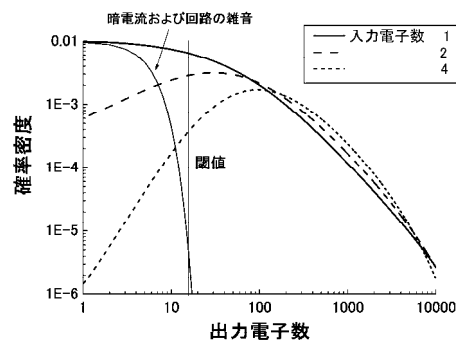


図1、APDの出力電子数分布と閾値

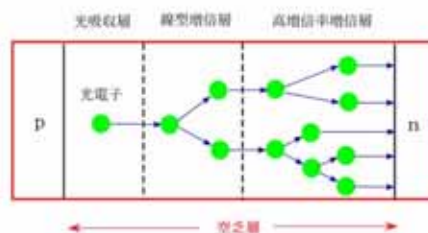


図2、高光検出効率APDの基本的な構造

率が減少するので、同じ閾値を設定しても光電子検出効率は上がる。つまり、光が発生した電子を確実に2個以上に増倍できる過程(図2の線型増倍層)が最初に存在すれば、光電子検出効率を上げる事ができるのである。これまで低温で測定して来たAPDの測定値を使えば、線型増倍層の存在により光電子検出効率は99%にも達することが可能である。

(2) ガイガーモードにおける光検出効率改善方法

ある特定の電圧(ブレイクダウン電圧)より高い電圧をAPDにかけておくと、電子の入射をきっかけとして増倍された電子が正孔を発生させ、その正孔が更に電子を発生させるというメカニズムで永久に電流が流れるという状態が発生する。この電流を止めるためには、電圧をブレイクダウン電圧より下げるしかない。この状態を利用する状態をガイガーモードと呼んでいる。この場合の光検出効率は、一個の電子がブレイクダウンを引き起こす確率(ブレイクダウン確率)によって決定される。ブレイクダウン確率は、バイアス電圧を上げるほど増大するが、それと同時に暗計数あるいはアフターパルスが増大することが知られており、増大にも限界がある。この限界は個々のAPDによって大きく異なるが、最大でも70%程度である。

こうしたガイガーモードにおいても、線型増倍層により電子数が確実に増倍されれば、1個の電子でブレイクダウンを引き起こせなくとも、もう1個の電子がブレイクダウンを引き起こすことが可能になりブレイクダウン確率が全体として増大すると考えられる。このことは下記の式で表現できる。

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^n$$

ただし、 P_1 、 P_n はそれぞれ電子1個、 n 個が入射した場合のブレイクダウン確率を表す。例えば P_1 を0.7としても P_2 は0.91となり今回の目標を達成することができる。

(3) 線型増倍層の形成

線型増倍層の形成の基本的な考え方は下記の通りである。APD増倍層中において極めて短い距離だけ電子を急加速し、加速された電子が一個の電子をイオン化できるだけの運動エネルギーを獲得するようにする。この電子が確実に一個の電子をイオン化することにより、2倍の線型増倍が可能となる(デッドスペースモデル)。長い距離を掛けて電子を加速するとその間にフォノンにより散乱され、電子の運動エネルギーが大きく揺らぐことになる。その

結果イオン化確率が大きく変動し、確実に一個だけイオン化することができなくなるのである。電子の急加速を可能にするのが、階段状ポテンシャル分布である。この階段状の極めて短い区間だけで電界強度が大きくなり、この部分でフォノン散乱を受ける前に十分に加速するのである。階段状ポテンシャルの後段にAPD構造を配すれば今回の目的に必要な構造が実現できる。

こうした階段状ポテンシャルの形成にはバンドギャップの異なる二つの半導体を空乏層内で接合する必要がある。今回試みたのは、アモルファスシリコン/結晶シリコンと化合物半導体のAlGaAs/GaAsおよびInAlAs/InGaAsである。当初は、製作経験のあるアモルファスシリコン/結晶シリコンで製作するつもりであったが、試作途中で装置故障によりこれ以上の製作が不可能となった。そのため検出器の製作経験はなかったが、急遽上記の化合物半導体で製作することになった。化合物半導体に関しては物質の組成を変えることによりバンドギャップが比較的自由に換えられるなどのメリットもある。

(4) 低雑音光検出システムおよび暗計数測定法

これまで開発してきた光検出器用超低雑音読み出し回路の特徴は、分極雑音を極限まで低減したことにある。分極雑音とは誘電分極の虚部の値(誘電損失)に比例して発生する熱雑音である。この熱雑音はこれまで高周波領域では問題となっていたが、低周波領域では全く問題とされていなかった。しかし、あまり一般には知られてはいないが、コンスタントロスと呼ばれる周波数によらない誘電損失が存在し、いわゆる $1/f$ ノイズの発生源となる。このノイズにより低周波領域でノイズが増大するのである。誘電体が発するノイズであるため、回路素子だけでなく検出器や回路部品を載せる基板も含めて、光検出器の近傍にある全ての物質がノイズ源となる可能性がある。分極雑音が大きい素材を除去したり配置を適切に行うことにより読み出し雑音3電子の光検出システムを実現した。

本研究における光検出システムは、暗計数の温度依存性の測定をするためにパルスチューブ型冷凍機を用いて冷却した。パルスチューブ冷凍機にはわずかではあるが振動と温度変動がある。これらはともに雑音源となるが、振動の低減と温度変動を0.003 Kまでに抑えることで、雑音を問題のないレベルまで下げことに成功した。

この測定システムを使い、従来のSi APDの増倍率分布測定した(図3参照)。入射光は0.007個/パルスであり、同時に2個以

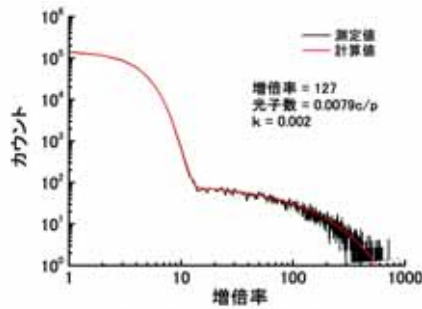


図3、入射光子1個に対する増倍率分布

上の光子が入射する確率を1%以下に抑えてあるため、図の増倍率は光電子1個の場合の増倍率分布を示しているといつてよい。増倍率10倍以下に見られる成分は回路の雑音である。この回路雑音（ガウス分布）とMcINTYRE理論で予測した増倍率分布を同時に図に示した。イオン化率比を0.002とすると測定値と極めてよく一致する。このことから、開発するAPDが機能し、単電子入射の増倍率分布からのずれが存在するとすれば、この測定システムによって測定できることが確認された。また、測定したAPDの光電子検出効率は89%となった。もし量子効率をSiPDと同程度の99%にできれば、従来のAPDを使用しても、今回の目標値である90%の光検出効率に近い値が得られる。しかし、この値は従来のAPDではほぼ限界に近い値であり、しかもかなり低雑音にするため低速（40Hz）で読み出すことで初めて得られる値であることも指摘しておきたい。

従来のAPDにおける暗計数の温度依存性測定はガイガーモードで行われてきた。しかしながら、ガイガーモードではAPDにかけるバイアス電圧を温度によって変えることが避けられないため電界強度も変わってしまい、純粋な温度依存性のみを測定することができなかった。我々はリニアモードで暗計数を測定することで、バイアス電圧を変えずに暗計数の測定をすることに成功した。ただし、バイアス電圧を一定にした場合、リニアモードでは温度により増倍率が変化する。そのため、増倍率の変化に応じた暗計数の補正が必要である。

4. 研究成果

(1) 新たな暗計数発生メカニズムの発見とその解決法

一般に、不純物などによりあるエネルギー順位にトラップされた電子あるいはホールによる暗計数は、時間とともに指数関数的に減少し時間がたてば十分小さくなるので、いわゆる暗計数としては考慮されないことが多い。しかしながら、今回の測定において、極めて低暗計数域ではこうした単純な描写では説明できない不純物からの電

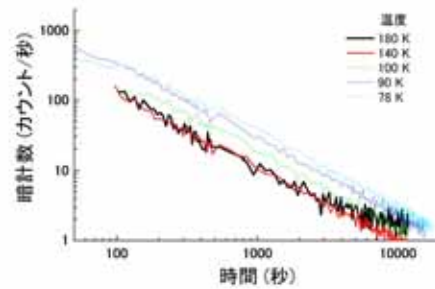


図4、暗計数時間変動の温度依存性

子放射による暗計数があることを発見した。図4にSi APDの各温度における暗計数の時間変動の測定値を示した。縦軸は電子をカウントして得られた計数値である。この暗計数は時間に対し指数関数的ではなく、ほぼ時間に反比例して減少している。その結果として、1日以上たってもまだ暗計数は1個/秒程度以上存在することになる。こうした時間に反比例する暗計数の変動を測定したの初めてのことである。

この現象は、キャリア放出のタイムスケールが連続的に分布しているとすれば理解できる。そしてこのタイムスケールの連続分布は、APD内の強い電界強度とその強度変化によって説明できる可能性がある。強電界中のトラップ順位からのキャリア放出のタイムスケールは、phonon assisted tunneling (PAT) と Poole-Frenkel 効果 (FP 効果) を通して電界強度に依存することが知られている。FP 効果は、クーロン型のトラップ（ポテンシャルが $1/r$ に比例）の場合に現れる効果であり、ポテンシャルが低くなる方向ではイオン化エネルギーが減少する。PAT は、あるレベルのエネルギーまでフォノンにより励起された電子が、ポテンシャルの壁の途中をトンネリングして伝導帯に放出される現象を言う。

従来のSi APDの場合、pn接合部の不純物は階段分布にするので、電界強度は一定にならず空間的に直線的な分布を持つことになる。このため、FP効果あるいはPATにより電子放出時間が連続的に分布することになる。量子論的なPAT理論に基づいて温度78Kにおいて計算した理論値と測定値を図5に示した。トラップエネルギー順

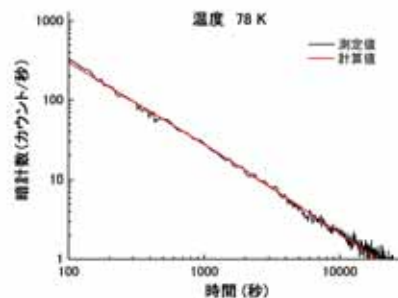


図5、暗計数時間変動の計算値

位は、典型的なシリコン中の不純物であるTiのエネルギー順位0.21eVで良く合わせることができた。しかし、他のパラメータ設定の物理的な妥当性や温度依存性などに関してはまだ検討の余地があり、今後更に研究を進める必要がある。

理論的には完全でないものの、トラップからのキャリア放出が暗計数の起源であるとするれば、その対策を考えることができる。PATにしるPF効果にしる、基本的にはキャリアの熱的励起であり、電子放出のタイムスケールは温度に対して指数関数的に減少すると予想されるので、APDを一度高温にすることでキャリアを放出し、その後低温に戻す、あるいは最初から高温でAPDを動作させそのまま低温にするという操作でこの暗計数を低減することが可能である。実際、100K以上にAPDの温度を上げて再度冷却することにより、暗計数が0.0007個/秒となることを実証した。この値は半導体検出器としては世界最小であり、超伝導検出器に匹敵する。

電界強度の連続的な変化を避けるためには、増倍層をpin接合にすることが考えられる。i層では電界強度が一定になるので特定の時定数の暗計数のみが存在することになる。その結果、不純物順位からの過渡的な暗計数は時間に対して指数関数的に小さく期待されるのである。

今後、超低暗計数のAPDを製作する際には、今回発見したメカニズムとここで示した削減法を考慮する必要があると思われる。

(2) 線型増倍層を持つAPD

アモルファスシリコン

アモルファスシリコンを使い階段状ポテンシャル分布を持つAPDを製作した。この検出器が常温において線型増倍可能であることはすでに示されている。今回は液体窒素温度において線型増倍が可能であることを確認した。極低温における線型増倍の確認は我々の知る限り世界でも初めてのことである。図6に液体窒素温度における過剰雑音係数の測定値を示した。過剰雑音係数は、入力光がある増倍率で増倍された際にどれほど

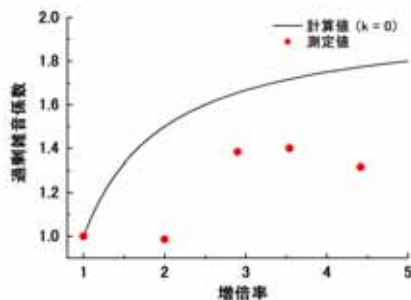


図6、アモルファスシリコンAPDの過剰雑音係数

雑音が増えるかを示す係数である。過剰雑音係数1は増倍により雑音が増えていないことを示しており、線型増倍されていることを意味している。図より増倍率2倍までは線型増倍されていることが分かる。また、数倍程度の増倍率でもMcINTYRE理論値の下限(黒線)より更に小さいことが分かる。しかしながら、更に高増倍率領域では急激に雑音が増大し線型増倍の効果が全く現れないことが分かった。これは、線型増倍の前の層でもAPD増倍が発生しているためと思われる。線型増倍層の前に電界強度を弱める不純物層を導入することでこの問題を解決する方策を考えたが、連携研究者の製造装置が故障し、試作ができなかった。この故障は現在修理のめどが立っていない。そのため、アモルファスシリコンによるAPDの製作は断念せざるを得なかった。

Al_{0.9}Ga_{0.1}As / GaAs APD

InAlAs/InGaAsとAlGaAs/GaAsのAPDを製作し、暗計数を測定した結果、AlGaAs/GaAsのみが0.1cps以下の暗計数を満たせる可能性があることが分かったので、ここではAlGaAs/GaAs APDについて述べる。AlとGaの組成比を0.9:0.1にしたのは、文献を調べた結果、増倍雑音が最も小さかったからである。この組成比では、階段状ポテンシャルなしでも数倍程度であれば線型増倍ができる可能性がある。Al_{0.9}Ga_{0.1}Asの吸収波長はUVであり、量子情報の実験で使用されている波長(700~800nm)に比べて短い。AlとGaの組成比を徐々に変えて行くことで光吸収層をGaAsにすることは可能であり、量子情報実験に対応することができる。

化合物半導体APDを製作するに当たり、電界強度の連続的な変化を避けるため、pin接合にすることにした。製作したAPDのバンドダイアグラムを図7に示した。Al_{0.9}Ga_{0.1}AsとGaAsのi層はともに40nmである。AlGaAs層で発生した光電子がAlGaAsとGaAsのバンドギャップの違いによる階段状ポテンシャルによって2倍に線型増倍されGaAs i層でAPD増倍される。また、AlGaAs層においても数倍の線型増倍ができることも期待して40nmの厚さを選んだ。

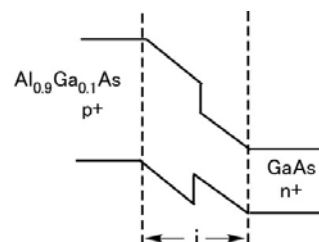


図7、Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs APDバンドダイアグラム

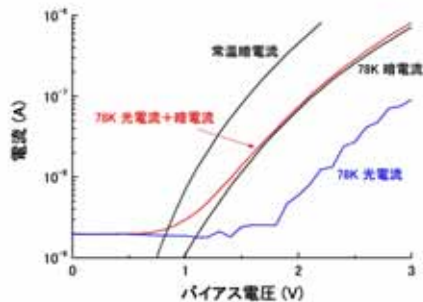


図8 電流-電圧特性

GaAs は $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ と比べてイオン化率が 10 倍程度大きいので、層の厚さは等しいが GaAs で大きな増倍が得られる。

温度 78K で暗電流を測定した結果、バイアス電圧が 0V では極めて低い暗電流 0.02e/s であることが分かった。これまで化合物半導体をこうした超低暗電流にした例はなく、この値は化合物半導体としては最も低いと思われる。光を入射した場合と入れない場合（暗電流）の電圧-電流特性を図 8 に示した。比較のために常温における暗電流も示してある。増倍率は 45 倍を達成したが、バイアス電圧が大きくなると暗電流が急激に増している。この暗電流は、温度依存性は小さいものの、単純なバンド間トンネリングよりは大きいので、不純物によるトラップで増強されたバンド間トンネルによるものであると考えられる。この場合でも、増倍層を厚くし電界強度を下げることににより暗電流を下げる事が可能である。

これまでのところでは、当初の目標である増倍率分布の改善を確認することはできていないが、 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs を用いて APD を製作するところまではできている。現在、これらの測定結果に基づいて、増倍層の厚い新たな $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs APD を製作中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

(1) M. Akiba, K. Tsujino, and M. Sasaki, "Ultra-high-sensitivity single-photon detection with linear-mode silicon avalanche photodiode," *Optics Letters*, 査読あり、Vol.35, No.15, 2010, pp. 2621-2623

(2) K. Tsujino, M. Akiba, M. Sasaki, "Experimental Determination of the Gain Distribution of an Avalanche Photodiode at Low Gains," *IEEE Electron Device Letters*, 査読あり、Vol.30, No.1, 2009, pp.24-26

〔学会発表〕(計 1 件)

秋葉 誠、「高光子検出効率 APD の開発」、応用物理学学会、2010 年 9 月 17 日、長崎大学(長崎県)

〔産業財産権〕

出願状況(計 3 件)

(1) 名称：アバランシェフォトダイオードを用いた光検出方法および光検出装置

発明者：秋葉 誠、佐々木 雅英、辻野 賢治

権利者：(独) 情報通信研究機構

種類：特許権

番号：特願 2010 - 130112

出願年月日：2010 年 6 月 7 日

国内外の別：国内

(2) 名称：高光検出効率アバランシェフォトダイオード

発明者：秋葉 誠、辻野 賢治

権利者：(独) 情報通信研究機構

種類：特許権

番号：特願 2009 - 138344

出願年月日：2009 年 6 月 9 日

国内外の別：国内

(3) 名称：光帰還型光検出器

発明者：秋葉 誠

権利者：(独) 情報通信研究機構

種類：特許権

番号：特願 2008 - 307466

出願年月日：2008 年 12 月 2 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋葉 誠 (Akiba Makoto)

独立行政法人 情報通信研究機構・新世代ネットワークセンター 量子 ICT グループ・主任研究員

研究者番号：80184109

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

澤田 和明 (SAWADA KAZUAKI)

豊橋技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：40235461