

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2021年9月23日(23.09.2021)



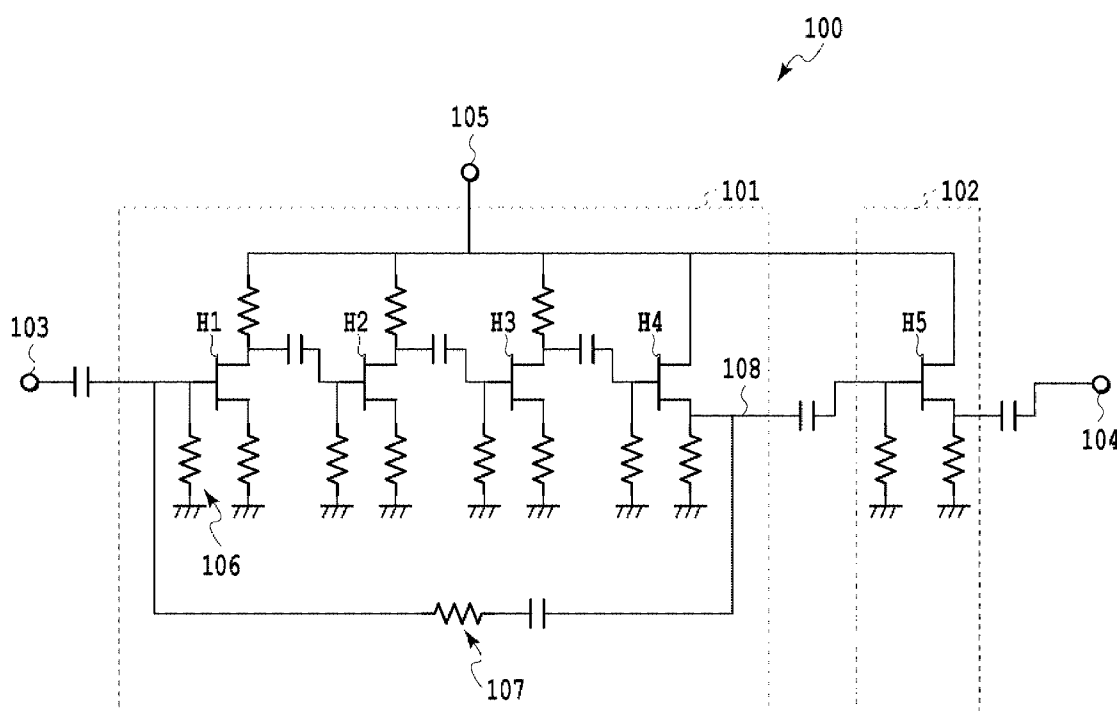
(10) 国際公開番号

WO 2021/186652 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 21/338 (2006.01) *H03F 1/34* (2006.01)
H01L 29/778 (2006.01) *H03F 3/68* (2006.01)
H01L 29/812 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2020/012150
- (22) 国際出願日: 2020年3月18日(18.03.2020)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 橋坂 昌幸 (HASHISAKA Masayuki); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 村木 康二 (MURAKI Koji); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 秋保 貴史 (AKIHO Takafumi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 谷・阿部特許事務所 (TANI & ABE, P.C.); 〒1070052 東京都港区赤坂2丁目6番20号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,

(54) Title: CURRENT-VOLTAGE CONVERSION DEVICE

(54) 発明の名称: 電流電圧変換装置



(57) Abstract: If operated at very low temperatures, FETs used by conventional current-voltage conversion devices have insufficient current-voltage conversion efficiency, making it difficult to achieve current measurement of a good sensitivity. There has also been a problem wherein a desired low temperature environment cannot be achieved due to the inflow of heat from the outside to the inside of a cooling device. Provided is a current-voltage conversion device which measures a minute current with good sensitivity, even in very low temperature conditions. The current-voltage conversion device of

CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

the present disclosure uses, as an electronic element for current-voltage conversion, an element (such as an HEMT) that is optimized exclusively for low temperature operation. The current-voltage conversion device can achieve current-voltage conversion properties that are significantly better than in conventional technology, even if operated in very low temperature conditions of close to absolute zero or 150K or less. In addition, the bias circuit and the power source for a current-voltage conversion circuit are simplified, suppressing the inflow of heat from the outside of a cooling device, reducing the load of the cooling device.

(57) 要約: 従来技術の電流電圧変換装置で使用された F E T は、極低温で動作させると電流電圧変換効率が不足し、感度の良い電流測定は難しかった。外部から冷却装置内部への熱流入のために、所望の低温環境を実現できない問題もあった。極めて低温の状態であっても、感度良く微小電流を測定する電流電圧変換装置を提供する。本開示の電流電圧変換装置は、電流電圧変換のための電子素子として、低温動作専用に最適化した素子 (例えば H E M T) を使用する。150K以下の低温または絶対零度近くの極低温の状態電流電圧変換装置を動作させても、従来技術よりも格段に優れた電流電圧変換特性を実現する。電流電圧変換回路への電源およびバイアス回路を簡略化して、冷却装置の外部からの熱流入を抑えて、冷却装置の負荷を減らす。

明 細 書

発明の名称：電流電圧変換装置

背景技術

- [0001] 本発明は、電流を電圧に変換する電子回路に関する。
- [0002] 電流を測定するために、対象となる電流を電圧に変換し、電圧計を用いて電流を計測することが知られている。微小な電流を正確に読み出すためには、低ノイズの電子回路を用いて電流を電圧に変換する必要がある。これを実現するために、電流電圧変換装置を低温で用いて熱ノイズを低減する手法が利用されている。超長波～短波帯域（1 kHz～30 MHz）の電流信号に対しては、低温動作する低消費電力電界効果トランジスタ（FET）を用いた電流電圧変換装置が報告されている（非特許文献1）。
- [0003] 図1は、従来技術の電流電圧変換装置の電流電圧変換回路の概略構成を示す図である（非特許文献1）。電流電圧変換回路10では、入力端子11に測定する対象の電流が流れ出す端子（電流ソース）を接続し、出力端子14において、対象電流に対応した変換電圧の測定を行う。4つのFET（H1～H4）を用いて信号増幅を行い、最終段のH4のソース出力信号を入力側のH1のゲートにフィードバックすることで電流－電圧変換を実現する。従来技術の電流電圧変換回路では、一般に入手可能な室温動作するFETが使用されてきた。例えば非特許文献1の電流電圧変換装置は、シュードモルフイック高電子移動度トランジスタ（HEMT：High Electron Mobility Transistor）を用いている。
- 非特許文献1：橋坂他，“Cross-correlation measurement of quantum shot noise using homemade transimpedance amplifiers, 2014年, Rev. Sci. Instrum. 85, 054704
- 非特許文献2：PAM－X I AMEN社 GaAs HEMT Epi wafer 製品カタログページ、[online] 令和2年3月6日検索、インターネット＜URL：<https://www.powerwaywafer.com/gaas-hemt-epi-wafer.html>>

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、従来技術の室温動作可能なFETを使用した電流電圧変換装置では、信号増幅部が持つ開ループ利得が十分でない問題があった。電流電圧変換装置において、例えば宇宙線や量子デバイス信号、電流の「量子的な揺らぎ」の測定、低温での物理現象の観測等をする場合は、非常に小さな信号を測定することになる。このような微小電流の測定のためには、最低でも液体窒素の温度（77 K）から絶対零度近くの非常に低温にして、電流電圧変換装置を動作させる必要がある。従来技術の電流電圧変換装置で使用されていたFETは、室温および低温で動作することを前提としている。このため、極低温でこのFETを動作させても、電流電圧変換効率が不足し、感度の良い電流測定は難しかった。さらに、冷却状態で使用する際の電流電圧変換装置の消費電力や外部からの熱流入により、冷却装置で所望の低温環境を実現できない問題もあった。

[0005] 本発明はこのような問題に鑑みてなされたものであって、その目的とするところは、極めて低温の状態で感度良く微小電流を測定する手段を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0006] このような目的を達成するために、本発明の1つの実施態様は、各段が電子素子で構成された少なくとも3段を有する増幅部であって、初段に対象電流が供給され、最終段の出力信号を前記初段へ帰還し、前記対象電流を電圧に変換する、増幅部と、前記増幅部に接続され、前記変換された電圧を出力するバッファ部とを備え、前記電子素子は、150 K以下の温度における動作に適合された電界効果トランジスタ（FET）であって、前記FETのゲートが接地電位に接続され、前記FETの各々に共通する単一の電源が供給されることを特徴とする電流電圧変換装置である。

発明の効果

[0007] 極めて低温の状態、感度良く微小電流を測定する手段を提供する。

図面の簡単な説明

[0008] [図1]従来技術の電流電圧変換回路の概略構成を示す図である。

[図2]電流電圧変換装置の低温動作のための構成を説明する図である。

[図3]本開示の電流電圧変換装置の電流電圧変換回路の構成を示す図である。

発明を実施するための形態

[0009] 以下の開示は、極めて低温の状態であっても、感度良く微小電流を測定する電流電圧変換装置に関する。本開示の電流電圧変換装置は、電流電圧変換のための電子素子として、低温動作専用に最適化した素子（例えばH E M T）を使用する。これにより、150 K以下の低温または絶対零度近くの極低温の状態、電流電圧変換装置を動作させても、従来技術よりも格段に優れた電流電圧変換特性を実現する。さらに、電流電圧変換回路への電源構成を簡略化して、冷却装置の外部からの熱流入を抑え、冷却装置の負荷を減らす。

[0010] 再び図1を参照すると、電流電圧変換回路10で使用されるH1～H4のF E Tは、それぞれ室温でも動作することを前提としていた。一般に、電子素子はその使用温度によって動作性能が異なり、電流電圧変換回路であれば、F E Tへ供給すべき電源電圧や、変換効率、ノイズ特性などの全て特性、動作要件が温度と伴に変化する。例えば非特許文献1で開示された電流電圧変換装置のシュードモルフィックF E Tは、一般に入手できる電子デバイスであって、常温および低温のどちらでも動作するものを用いている。この理由は、電子素子の検査において常温で動作できることで、まず常温で特性評価を行って、コストの掛かる低温評価を選択的、任意的に実施できるからである。電子素子の量産時の試験の効率、常温時での使用・評価の容易さなどの観点から、供給者および使用者の両方にとって、常温および低温で動作する電子素子を作製することに大きなメリットがある。

[0011] しかしながら、宇宙線や量子デバイス信号、電流の「量子的な揺らぎ」などのような微小電流を測定するため絶対零度近くまでF E Tを冷却する状況では、常温および低温の両方で動作するF E Tの電流電圧変換特性は不十分

なものであった。発明者らは、従来技術の電流電圧変換装置で使用されていた電子素子を、低温での動作および性能に特化したものにすれば、低温状態においてより好ましい低雑音特性が得られるのではないかとこの着想に至った。

[0012] 図2は、電流電圧変換装置の低温動作のための構成を説明する図である。従来技術の電流電圧変換装置におけるもう1つの問題は、電流電圧変換装置を低温状態で使用する場合の、冷却装置の能力による制限である。図2の電流電圧変換装置20において、図1に示した電流電圧変換回路10は、例えば冷却ステージ22およびそのケース21からなる冷却装置の内部に配置されている。電流電圧変換回路10は、増幅器の記号でシンボリックに示しているが、実際には図1に示した複数の素子(FET)他が基板上に実装されたパッケージ状のものであり得る。さらに、このパッケージを無酸素銅等のケースに入れ、ケースごとステージ22に配置したものであり得る。ケース21の内部から外部へ、電流入力端子11、電圧出力端子14、2つの電源供給端子12、13が取り出される。

[0013] 冷却装置は様々な形態ものがあり得るが、一例を挙げれば、希釈冷凍機を使用できる。希釈冷凍機は直径0.5~1m×高さ2mほどの筒状の缶の中に上記の流電圧変換回路10を実装して、缶の内部でヘリウムを循環させる機構を持つ。希釈冷凍機は、図2には示していないヘリウム循環のためのポンプやコンプレッサ等の外部機構も含み得る。他のタイプの冷却装置と冷却温度を例示すれば、希釈冷凍機：10mK~1K程度、3He冷凍機：300mK程度、4He冷凍機：1.5K程度、液体ヘリウム：4.2K、液体窒素：77K、無冷媒パルスチューブ冷凍機：1.5K~300Kを利用できる。冷却装置のタイプに応じて、ケースおよび冷却ステージの形態は変わること留意されたい。

[0014] 電流電圧変換回路によって高感度で微小電流を測定するためには、図2のように冷却装置と組み合わせて用いることが前提となる。上述の冷却装置では、その冷却能力が有限であるため、内部に配置する電流電圧変換装置10

の消費電力を低く保つ必要がある。同時に、外部から冷却装置内へ流入する熱を最小に抑える必要がある。最先端の冷却装置であっても、その内部に消費電力の大きな電子回路を収めたり、外部から冷却装置への熱流入が多かったりすれば、極低温に保つことは難しくなる。

[0015] 冷却装置の重要な指標として「冷却能力」が知られており、ある温度を維持するために冷却装置内における発熱が何ワット以下の必要があるかを示す。言い換えると、冷却装置内における冷却対象に許容できる最大発熱量を意味する。例えばミリケルビン程度の低温を実現するための冷却装置（希釈冷凍機）の場合、最先端の装置で、冷却能力は $500\text{ }\mu\text{W}$ at 100 mK 程度が典型的である。これは 100 mK の低温を維持するためには冷却装置内で生じる消費電力を $500\text{ }\mu\text{W}$ 以下に抑えなければならないことを意味する。したがって指標「冷却能力」は、冷却装置によって設定する温度が高いほど大きくて良い。例えば 200 mK の温度に維持する場合は、 100 mK とする場合と比べて、冷却装置内における冷却対象の発熱すなわち消費電力が2倍大きくて良いことになる。

[0016] 一般に電子回路は、その温度が低ければ低いほど、熱雑音を抑制して低ノイズにできる。電流電圧変換装置でも、できるだけ温度の低い環境で使うのが究極的な低雑音測定の実現に向け有利である。したがって、電流電圧変換装置の消費電力をできるだけ抑制し、冷却装置の指標「冷却能力」に対して小さくする必要がある。図1に示した従来技術（非特許文献1）の電流電圧変換装置は消費電力が 1.5 mW であり、最先端の希釈冷凍機を用いても 500 mK 以上でしか使用できなかった。冷却装置への負荷を減らすためには、電流電圧変換装置の消費電力を減らし、外部から冷却装置への熱流入を抑える必要がある。

[0017] 本開示の電流電圧変換装置では、低温動作に特化して構成された電子素子（FET）を用いること、および、電流電圧変換回路の特有の構成によって、上述の低温動作時の開ループ利得の不足、冷却装置の能力の制限の問題を同時に解決する。

[0018] 図3は、本開示の電流電圧変換装置における電流電圧変換回路の構成を示す図である。電流電圧変換回路100は、大きく分けて電流電圧変換部101と、出力段ソースフォロア部102とを含む。電流電圧変換部101は、基本的な増幅器構成としては図1と類似しており、コモンソース電圧増幅段を構成する3つのFET（H1～H3）およびソースフォロアである最終出力段FET（H4）を備える。H4のソースからの出力電圧108を、フィードバック抵抗107を介してH1のゲートへ帰還させている。各FETへのゲートは、ゲート抵抗106によって接地電位とされ、各FETは単一の電源供給端子105からの電源によりソース抵抗によって自己バイアスされる。上述の電流電圧変換部101は、初段に対象電流が供給され、最終段の出力信号を初段へ帰還し、対象電流を電圧に変換する、増幅部として機能する。

[0019] 出力段ソースフォロア部102は、図1の従来技術の電流電圧変換回路10には無い構成である。すなわち本開示の電流電圧変換回路100では、出力段ソースフォロア部102のFET（H5）は、出力電圧端子104の後段側に冷却装置から電圧出力を取り出すための同軸ケーブルを接続する場合に、ケーブルの浮遊容量により電流電圧変換回路100の周波数特性が悪化するのを防ぐ。一般に回路出力におけるソースフォロアは、その回路の出力インピーダンスを下げ、次段回路との接続によって受けるその回路自身の動作の変動を避けるために使用される。すなわち、出力段ソースフォロア部102は、増幅部に接続され、対象電流から変換された電圧を出力するバッファ部として機能する。

[0020] 消費電流の制限がない常温における電流測定時には、電流電圧変換部101のソースフォロア（H4）に大きな電流を流すことができる。しかしながら、冷却装置の使用を前提として極低温において電流電圧変換装置を使用する場合には、1段構成のソースフォロアだけでは不十分と判った。ソースフォロアのFETに割り当てることができる消費電力には制限があり、ソースフォロアの出力インピーダンスを十分に下げることができない。そこで出力

段ソースフォロア部 102 をさらに備えることで、後段側のケーブル浮遊容量による電流電圧変換特性の周波数特性悪化を防ぐことができる。後述する低温動作に特化された低電流の FET を使用することで、電流電圧変換回路全体でも、増幅段の数の増加（4 → 5 段）を補ってより小さい消費電流を実現できる。このため、極低温測定における冷却装置への負荷を軽減し、同時に広帯域の微小電流測定を実現する。

[0021] 本開示の電流電圧変換装置において特徴的な点の 1 つは、H1 ～ H5 の各増幅段の FET に対して自己バイアス方式でゲートに電源電圧を供給している点にある。すなわち、各 FET のゲートとグラウンドの間をゲート接地抵抗 106 によって接続し、ゲートは 0V に固定される。ソースとグラウンド間にも抵抗があるため、電源供給端子 105 からドレインに電圧を供給すれば、ソース電位はプラスとなる。したがって、n 型の HEMT を使用する場合には、ゲートーソース間に負電圧を印可したのと等価になる。ゲート抵抗およびソース抵抗に適切な値を選べば、1 つの電源供給端子 105 を備えるだけで各 FET に対して自己バイアス方式で適切な電源電圧が供給される。

[0022] 図 1 に示した従来技術の電流電圧変換回路 10 では、4 つの FET（H1 ～ H4）に対して、ドレイン用の電源供給端子 13 と、ゲート用の電源供給端子 12 が独立に必要であった。このため、図 2 に示した冷却装置の内外を少なくとも 2 系統の電気配線によって接続する必要があった。この 2 本の電気配線から冷却装置への熱流入が、冷却装置の負荷となっていた。複数の微小電流の測定対象があれば、複数の電流電圧変換回路を冷却装置に収納する必要があるが、配線が少なくとも 2 本必要なことは、冷凍機内のスペースの点でも問題であった。

[0023] 配線に用いる金属材料、および、冷凍機の構造から決まる配線の長さから、配線 1 本あたりの熱流入量を見積もることができる。配線の材料として低温で一般に用いられるのは、銅ニッケル合金、ステンレス、超電導線などである。超電導線は最も熱伝導度が小さいものの、4 K 以下の極低温でのみの使用に限られるので、ここでは広く用いられているキュプロニッケル（銅ニ

ッケル合金)の同軸ケーブルを用いた場合を試算してみる。使いやすく一般に用いられている太さ(0.86mmφ)のケーブルの場合、一例を挙げれば、熱伝導度は約 $0.07\text{ mW}\cdot\text{m}/\text{K}$ である。4 Kまで冷却するものとして、標準的な冷却装置のサイズを例に1 mの配線を用いたとすると、配線1本あたりの熱流入量は約 0.2 mW となる。 0.2 mW の熱流入量は、電流電圧変換装置本体における消費電力 0.75 mW に比べて無視できないほど大きい。

[0024] これに対して、図3の本開示の電流電圧変換回路100によれば、電源配線は1本のみで済むため、電気配線を経由して外部から冷却装置内へ流入する熱を半分程度に抑えることができる。重要な指標「冷却能力」の観点からも、冷却装置の負荷を減らすことができるのは明らかである。さらに冷却装置内に複数個の電流電圧変換装置を収納する場合でも、配線スペースおよび熱の流入の抑制の効果がある。

[0025] 本開示の電流電圧変換装置においてもう1つの特徴的な点は、図3の電流電圧変換回路の各FET(H1~H5)について、低温動作に特化した構成のFETを使用していることにある。低温動作に特化したFETの例としてGaAs系HEMTがあり、具体的には、 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ HEMT、GaAs量子井戸HEMTがある。GaAs系HEMTは低温で高い電子移動度を示すことから、広帯域かつノイズの少ないFETとして動作し、低温でトランスコンダクタンスの大きな素子の作製も容易である。

[0026] 従来技術の電流電圧変換装置で使用されていた常温および低温の両方で動作するFETと、本開示の電流電圧変換装置で使用した低温動作に特化したFETの特性について、より具体的に述べておく。図3に示した電流電圧変換回路100で使用したHEMT(FET)は、GaAs-AlGaAs変調ドーピング超格子構造を持つHEMTである。他に使用可能なものとしては、シュドーモルフィックHEMT、InP系HEMTがある。これらのHEMTは低温で動作可能で、優れた雑音特性を持つ。

[0027] したがって、本開示の電流電圧変換装置は、各段が電子素子で構成された

少なくとも3段を有する増幅部101であって、初段に対象電流が供給され、最終段の出力信号を前記初段へ帰還し、前記対象電流を電圧に変換する、増幅部と、前記増幅部に接続され、前記変換された電圧を出力するバッファ部102とを備え、前記電子素子は、150K以下の温度における動作に適合された電界効果トランジスタ(FET)であって、前記FETのゲートが接地電位に接続され、前記FETの各々に共通する単一の電源105が供給されるものとして実施できる。

[0028] HEMTでは、チャネル部分の構成が微小電流に対する検出感度に関係している。HEMTの断面構造を考えると、ドレインおよびソースの間にチャネルが形成される。チャネルにおける電流は、ゲートへの入力信号によって制御される。常温で動作するHEMTの場合は、チャネルとゲート間のリーク電流を抑えるために、ゲート絶縁層の厚さdは十分に大きい必要がある。したがって、常温および低温の両方で動作可能なHEMTは、絶縁層の厚さdは通常100nm以上ある。一方で、厚さdが大きいほど、ゲート電圧の変化に対する応答が小さくなり、ゲートへの入力信号に対する検出感度が低下する。

[0029] 本開示の電流電圧変換装置で使用した低温動作に特化したチャネル幅3mmのGaAs-AlGaAsHEMTでは、温度4Kで絶縁層厚さdは、100nm以下の55nmとした。このHEMTを増幅素子として利用する場合、室温ではゲートーチャネル間の電気抵抗は実測値で200kΩ/mmとなっていて、リーク動作が大きいため使用できない。一方で、例えば液体ヘリウム温度(4.2K)ではゲートーチャネル間の電気抵抗は1GΩ/mm以上のため、リーク電流を無視できる。常温における正常な動作を諦めて、低温動作に特化したHEMTを使用することで、極低温用の電流電圧変換回路としてHEMTの電流検出感度を大きく向上させることができる。

[0030] 一般に常温動作のHEMTでは、ゲートーチャネル間のリークを抑えることが重要である。GaAs-AlGaAsHEMTでは、ショットキー障壁ができるため、ゲートとチャネルは自然に絶縁されるものの、絶縁層はあ

る程度厚くする必要がある。一般に入手可能なGaAs-AlGaAs HEMTの構成は、例えば非特許文献2に開示されており、ドーピング量について記載はないが、絶縁層の厚さは210nmとなっている。材料が違えば絶縁層の必要な厚さも異なるが、GaAs-AlGaAsの場合は概ね100nm以上の厚さが一般的だと考えられる。本開示の電流電圧変換装置では、常温動作をさせるためには選択し得ない、ゲート絶縁層が100nm以下の厚さを持つ、低温動作に特化した構成を採用し、電流電圧変換回路への電源構成を簡略化して、従来技術よりも格段に優れた電流電圧変換特性を実現した。

[0031] ここで、低温動作に特化したHEMTの構成についてさらに言及しておく。上述のように、電流電圧変換回路において、電流検出感度を大きくするためにはゲートとチャネルの距離が近く、ゲート絶縁層が薄いほど良い。また、ゲート電圧に対するチャネル電流の変化量（トランスコンダクタンス）が大きいほど良いので、ドーピング量は多いほど電流検出感度が大きくなる。

[0032] しかしながら、ゲート絶縁層厚さおよびドーピング量の2つの条件は、ゲート絶縁層にキャリアが生じないような範囲でしか最適化できない。この範囲を超えると、室温ではゲートリーク電流が生じたり、平行伝導（Parallel Conduction）によって移動度が低下しHEMTの特性が劣化したりすることが知られている。HEMTのゲート絶縁層でキャリアが生じ、ゲートリーク電流が流れれば、電流電圧変換回路としてはもちろん、常温で電子素子の基本動作・性能を持たないものとして使用できなくなる。

[0033] 上述の電子素子としての基本的な動作を確保するために、市販のHEMTは、例えばゲート絶縁層の一部であるバリア層として100nm以上の厚さを持つものが大半である。非特許文献2によれば、バリア層は180nmであり、3層構造のゲート全厚さは210nmである。このような厚いゲート絶縁層を持つ構成のHEMTでは、低温で高感度な測定を行う障壁となる。

[0034] 本開示の電流電圧変換装置では、HEMTのゲート絶縁層の厚さを55nmとして、2回のデルタドーピング（ $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ）を行ったもの（チャネルのキャリア密度 $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ に相当）を使用して、電流電圧変換回

路を試作し、優れた雑音性能を確認した。これらのHEMTは、室温で電気抵抗の実測値が $200\text{ k}\Omega/\text{mm}$ のゲート抵抗を持ち、リーク電流のために室温ではHEMTとして用いることができない。しかしながら、上述の低温動作に特化したHEMTを極めて低温で使用し、図3に示したように電流電圧変換回路への電源構成を簡略化することで、高感度で低消費電力を実現できる。低温動作に特化したHEMTの構成の目安としては、ゲート絶縁層の厚さが 100 nm 以下であって好ましくは 55 nm 以下であって、かつドーピング量はチャンネルのキャリア密度 $4 \times 10^{11}\text{ cm}^{-2}$ 相当を越えるものであると言える。

[0035] 以上詳細に述べたように、本開示の電流電圧変換装置によって、極めて低温の状態で感度良い微小電流の測定を実現できる。

産業上の利用可能性

[0036] 本発明は、微小電流の高感度な測定に利用することができる。

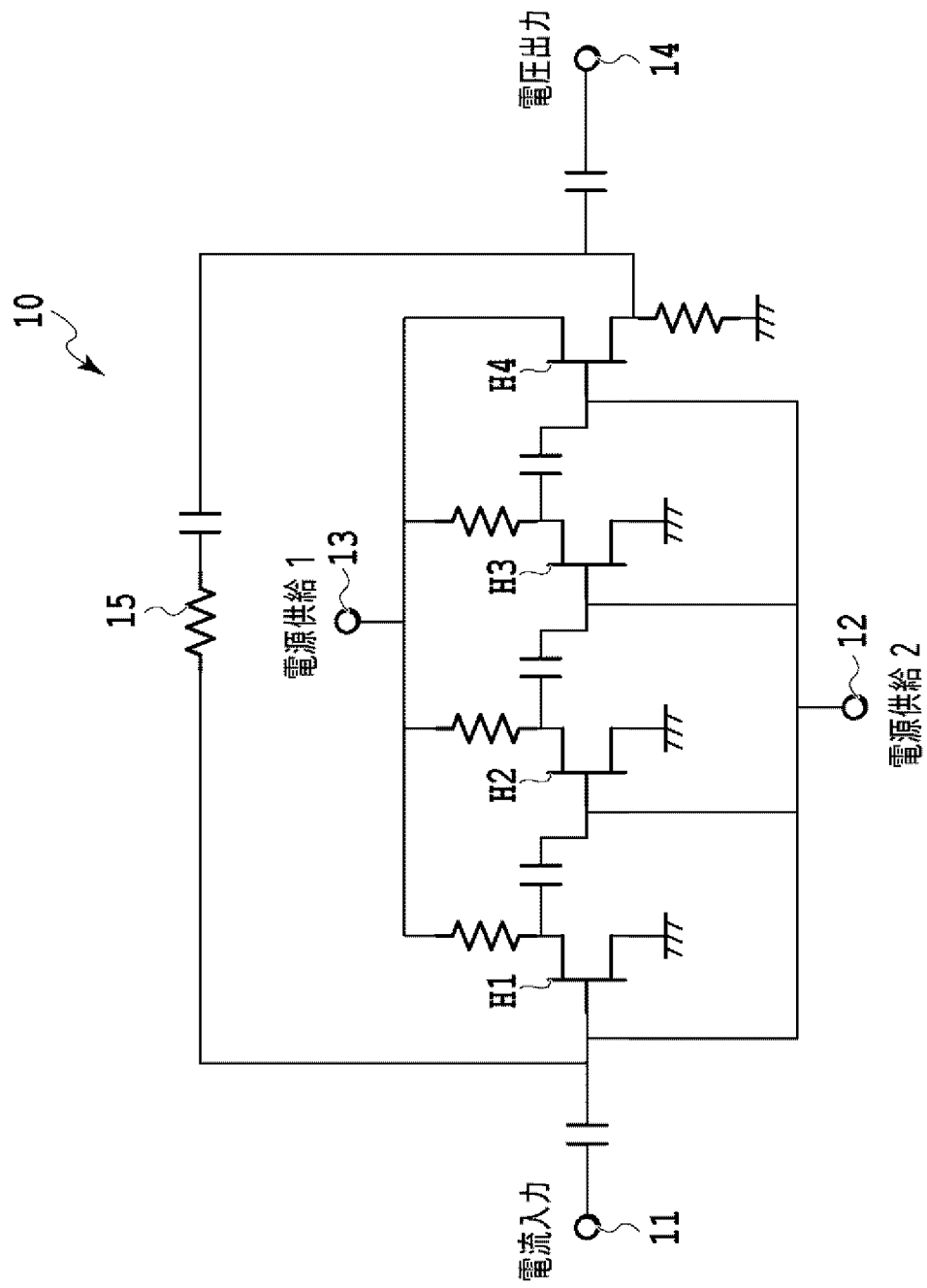
符号の説明

[0037] 10、100 電流電圧変換回路
11、103 電流入力端子
12、13、105 電源端子
14、104 電圧出力端子
15、107 帰還抵抗
20 電流電圧変換装置
21 ケース
22 冷却ステージ
108 ドレイン出力電圧

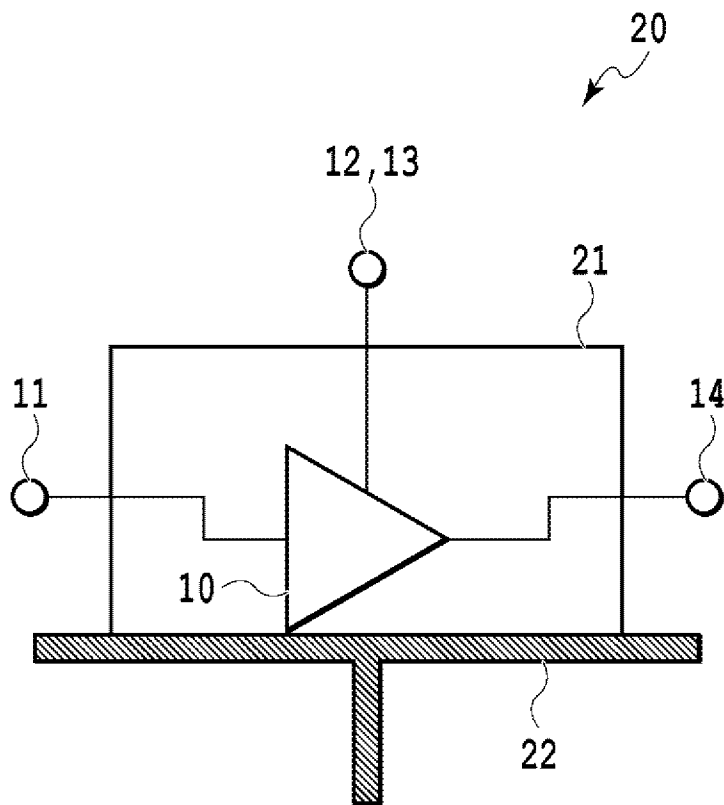
請求の範囲

- [請求項1] 各段が電子素子で構成された少なくとも3段を有する増幅部であって、初段に対象電流が供給され、最終段の出力信号を前記初段へ帰還し、前記対象電流を電圧に変換する、増幅部と、
- 前記増幅部に接続され、前記変換された電圧を出力するバッファ部と
- を備え、
- 前記電子素子は、150K以下の温度における動作に適合された電界効果トランジスタ（FET）であって、前記FETのゲートが接地電位に接続され、前記FETの各々に共通する単一の電源が供給されることを特徴とする電流電圧変換装置。
- [請求項2] 前記増幅部は4段のコモンソース電圧増幅段であって、最終段はソースフォロアを構成し、
- 前記バッファ部は、前記電子素子で構成されたソースフォロアであることを特徴とする請求項1に記載の電流電圧変換装置。
- [請求項3] 前記FETは、高電子移動度トランジスタ（HEMT）であって、ゲート絶縁層厚さが100nm以下であることを特徴とする請求項1または2に記載の電流電圧変換装置。
- [請求項4] 前記HEMTは、GaAs-AlGaAs変調ドープ超格子構造のHEMT、シュードモルフィックHEMT、またはInP系HEMTのいずれかであることを特徴とする請求項3に記載の電流電圧変換装置。
- [請求項5] 冷却装置内に請求項1乃至4いずれかの電流電圧変換装置を備えた微小電流測定装置。

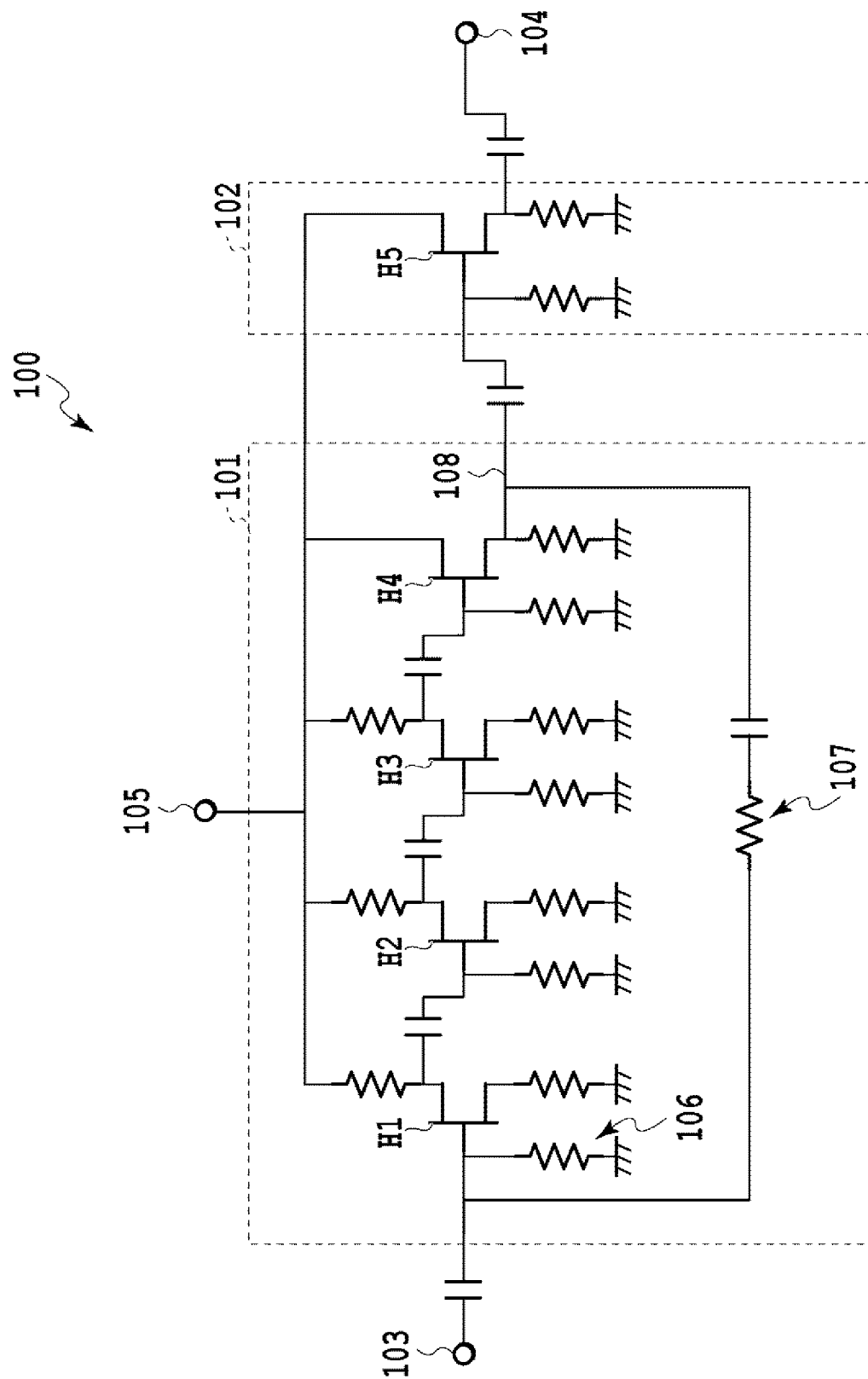
[図1]



[図2]



[図3]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/012150

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. H01L21/338 (2006.01) i, H01L29/778 (2006.01) i, H01L29/812 (2006.01) i, H03F1/34 (2006.01) i, H03F3/68 (2006.01) i
FI: H03F3/68, H03F1/34, H01L29/80 H

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. H01L21/338, H01L29/778, H01L29/812, H03F1/34, H03F3/68

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2020

Registered utility model specifications of Japan 1996-2020

Published registered utility model applications of Japan 1994-2020

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 4-107004 A (FUJITSU LTD.) 08 April 1992, page 1, lower left column, line 18 to page 3, upper right column, line 3, fig. 1	1-5
Y	JP 60-140907 A (MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., LTD.) 25 July 1985, page 1, lower left column, line 10 to page 1, lower right column, line 15, fig. 2	1-5
Y	JP 2009-10910 A (NTT DOCOMO INC.) 15 January 2009, paragraphs [0001]-[0005], [0010], [0017]-[0022], fig. 1, 2, 9	1-5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
06.08.2020

Date of mailing of the international search report
18.08.2020

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/012150

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2015-50464 A (TRIQUINT SEMICONDUCTOR INC.) 16 March 2015, paragraph [0033], fig. 1	3-5
Y	JP 2010-506397 A (SELEX SISTEMI INTEGRATI SPA) 25 February 2010, paragraphs [0002], [0018]-[0039], fig. 1	3-5
Y	JP 3-6029 A (SHARP CORP.) 11 January 1991, page 1, lower left column, line 17 to page 3, upper left column, line 9, fig. 1	4-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2020/012150

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 4-107004 A	08.04.1992	(Family: none)	
JP 60-140907 A	25.07.1985	(Family: none)	
JP 2009-10910 A	15.01.2009	US 2008/0204149 A1 paragraphs [0001]- [0007], [0010], [0046]-[0051], fig. 1, 3, 15 EP 1962418 A1 KR 10-2008-0078595 A CN 101252344 A	
JP 2015-50464 A	16.03.2015	DE 102014012702 A1 paragraph [0033], fig. 1	
JP 2010-506397 A	25.02.2010	US 2010/0102358 A1 paragraphs [0002], [0031]-[0052], fig. 1 WO 2008/041249 A1 CN 101636843 A	
JP 3-6029 A	11.01.1991	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01L 21/338(2006.01)i; H01L 29/778(2006.01)i; H01L 29/812(2006.01)i; H03F 1/34(2006.01)i; H03F 3/68(2006.01)i FI: H03F3/68; H03F1/34; H01L29/80 H		
B. 調査を行った分野		
調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） H01L21/338; H01L29/778; H01L29/812; H03F1/34; H03F3/68		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2020年 日本国実用新案登録公報 1996-2020年 日本国登録実用新案公報 1994-2020年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 4-107004 A（富士通株式会社）08.04.1992（1992-04-08） 第1頁左下欄第18行-第3頁右上欄第3行，第1図	1-5
Y	JP 60-140907 A（松下電器産業株式会社）25.07.1985（1985-07-25） 第1頁左下欄第10行-第1頁右下欄第15行，第2図	1-5
Y	JP 2009-10910 A（株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ）15.01.2009（2009-01-15） 段落[0001]-[0005]，[0010]，[0017]-[0022]，図1-2，9	1-5
Y	JP 2015-50464 A（トライクイント・セミコンダクター・インコーポレイテッド） 16.03.2015（2015-03-16） 段落[0033]，図1	3-5
Y	JP 2010-506397 A（セレックス システミ インテグラティエッセ，ピ，ア，） 25.02.2010（2010-02-25） 段落[0002]，[0018]-[0039]，図1	3-5
Y	JP 3-6029 A（シャープ株式会社）11.01.1991（1991-01-11） 第1頁左下欄第17行-第3頁左上欄第9行，第1図	4-5
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 06.08.2020		国際調査報告の発送日 18.08.2020
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 及川 尚人 5W 5888 電話番号 03-3581-1101 内線 3576

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/012150

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	4-107004	A	08.04.1992	(ファミリーなし)	
JP	60-140907	A	25.07.1985	(ファミリーなし)	
JP	2009-10910	A	15.01.2009	US 2008/0204149 A1	
				段落[0001]-[0007],	
				[0010], [0046]-[0051], 図	
				1, 3, 15	
				EP 1962418 A1	
				KR 10-2008-0078595 A	
				CN 101252344 A	
JP	2015-50464	A	16.03.2015	DE 102014012702 A1	
				段落[0033], 図1	
JP	2010-506397	A	25.02.2010	US 2010/0102358 A1	
				段落[0002], [0031]-	
				[0052], 図1	
				WO 2008/041249 A1	
				CN 101636843 A	
JP	3-6029	A	11.01.1991	(ファミリーなし)	