

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02017/188438

発行日 平成31年3月14日 (2019. 3. 14)

(43) 国際公開日 平成29年11月2日 (2017. 11. 2)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
G01J 1/02 (2006.01)	G01J 1/02 R	2G065
	G01J 1/02 Q	
	G01J 1/02 C	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 26 頁)

出願番号 特願2018-514736 (P2018-514736)	(71) 出願人 304021417 国立大学法人東京工業大学 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号
(21) 国際出願番号 PCT/JP2017/016947	
(22) 国際出願日 平成29年4月28日 (2017. 4. 28)	
(31) 優先権主張番号 特願2016-91298 (P2016-91298)	(74) 代理人 110001807 特許業務法人磯野国際特許商標事務所
(32) 優先日 平成28年4月28日 (2016. 4. 28)	
(33) 優先権主張国 日本国 (JP)	(72) 発明者 河野 行雄 東京都目黒区大岡山2-12-1 国立大学法人東京工業大学内
	(72) 発明者 鈴木 大地 東京都目黒区大岡山2-12-1 国立大学法人東京工業大学内
	Fターム(参考) 2G065 AA04 AB02 BA11 BA14 BA34 BA38 CA13 DA18

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 テラヘルツ波検出装置およびアレイセンサ

(57) 【要約】

本発明のテラヘルツ波検出装置(10)は、基板(11)に形成された低次元電子系材料(12)と、低次元電子系材料(12)の2次元平面上に対向配置された第1電極(13)および第2電極(14)と、を備え、第1電極(13)と第2電極(14)は、異なる熱伝導率を有する金属からなる。8素子アレイセンサ(20)は、8個のテラヘルツ波検出装置(10)を整列配置してアレイ化する。

または、本発明のテラヘルツ波検出装置(10)は、カーボンナノチューブの膜(12)と、カーボンナノチューブ(12)の膜における一方側に配置される第1電極(13)と他方側に配置される第2電極(14)とを備え、第1電極(13)と第2電極(14)とは、異なる熱伝導率または同じ熱伝導率を有している。

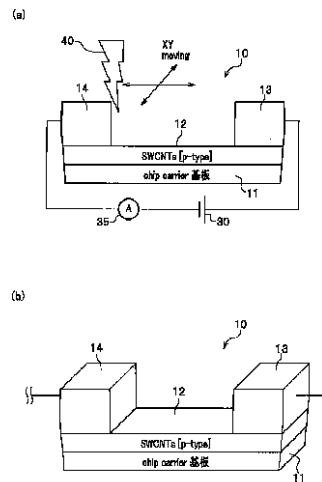


FIG. 1:
11 Chip carrier substrate
12 SWCNTs (p-type)

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板に形成された低次元電子系材料と、
前記低次元電子系材料の 2 次元平面上に対向配置された第 1 電極および第 2 電極と、を
備え、

前記第 1 電極と前記第 2 電極は、異なる熱伝導率を有する金属からなる
ことを特徴とする記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項 2】

前記第 1 電極の熱伝導率と前記第 2 電極の熱伝導率との差が所定値以上であることを特
徴とする請求項 1 に記載のテラヘルツ波検出装置。

10

【請求項 3】

前記低次元電子系材料は、
前記 2 次元平面の 2 次元方向に高精度で配向されたカーボンナノチューブであることを
特徴とする請求項 1 に記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項 4】

前記カーボンナノチューブは、単層である
ことを特徴とする請求項 3 に記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項 5】

前記低次元電子系材料は、
単層または複数層のグラフェンである
ことを特徴とする請求項 1 に記載のテラヘルツ波検出装置。

20

【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載のテラヘルツ波検出装置を複数個整列配置したア
レイセンサであって、

前記低次元電子系材料の表面に THz 波を照射し、当該低次元電子中で THz 励起され
たキャリアを検出するアレイセンサ。

【請求項 7】

前記第 1 電極の熱伝導率と前記第 2 電極の熱伝導率との差は、前記低次元電子系材料に
テラヘルツ波が照射された際に検出信号を取得できる値である
ことを特徴とする請求項 1 に記載のテラヘルツ波検出装置。

30

【請求項 8】

カーボンナノチューブの膜と、
前記カーボンナノチューブの膜における一方側に配置される第 1 電極と他方側に配置さ
れる第 2 電極とを備え、

前記第 1 電極と前記第 2 電極とは、異なる熱伝導率または同じ熱伝導率を有している
ことを特徴とする記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項 9】

前記第 1 電極と前記第 2 電極との間の NEP が $700 \text{ pW} / \text{Hz}$ 以下である
ことを特徴とする請求項 1 から請求項 5 または請求項 7 または請求項 8 のいずれか 1 項
に記載のテラヘルツ波検出装置。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、テラヘルツ波検出装置およびアレイセンサに関する。

【背景技術】

【0002】

テラヘルツ (THz) 波は、周波数が $0.1 \sim 30 \text{ THz}$ ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)
の領域、すなわち波長が $0.01 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$ のサブミリ波から遠赤外線領域の電磁波を
意味する。

THz 波は、エレクトロニクスによる電子制御の高周波極限であり、オプティクスやフ

50

オトニクスによる光制御の低エネルギー極限でもあるため、未開拓とされてきた。そのため、他周波数帯に比べて光源や検出器という基本的な素子が未開拓の現状にある。また、THz波の波長は可視光に比べて2、3桁長いことから、イメージングの空間分解能が低いという特徴がある。

【0003】

特許文献1には、表面から一定の位置に2次元電子ガスが形成された半導体チップと、該半導体チップの表面に密着して設けられたカーボンナノチューブ、導電性のソース電極、ドレイン電極及びゲート電極とを備えるテラヘルツ光検出装置が記載されている。前記カーボンナノチューブは、半導体チップの表面に沿って延び、かつその両端部がソース電極とドレイン電極に接続され、前記ゲート電極は、カーボンナノチューブの側面から一定の間隔を隔てて位置する。さらに、前記ソース電極とドレイン電極の間に所定の電圧を印加し、その間のSD電流を検出するSD電流検出回路と、前記ソース電極とゲート電極の間に可変ゲート電圧を印加するゲート電圧印加回路と、前記半導体チップに可変磁場を印加する磁場発生装置と、を備える。

10

【0004】

また、テラヘルツ波の周波数を検出できる検出器として、例えば、非特許文献1～4がある。周波数を選択できる検出器は、非特許文献3, 4である。従来のTHz検出器は、光子1個の吸収に対して伝導電子1個の励起となるため、必然的に検出感度に限界がある。

これに対して、非特許文献4には、カーボンナノチューブ(CNT: Carbon Nanotube)アレイ、グラフェン(graphene)、半導体ヘテロ界面2次元電子ガス(Two-Dimensional Electron Gas: 2DEG)という低次元電子系の機能を利用した、新しいTHz波検出・分光・撮像技術が示されている。非特許文献4には、カーボンナノチューブ(CNT)量子ドットと半導体中2次元電子ガスが結合したハイブリッド構造を作製し、2次元電子中で励起されたキャリアをCNTによる高感度電荷センサで読み取る新機構が記載されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2010-060284号公報

30

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】Xiaowei He, Naoki Fujimura, J. Meagan Lloyd, Kristopher J. Erickson, A. Alec Talin, Qi Zhang, Weilu Gao, Qijia Jiang, Yukio Kawano, Robert H. Hauge, Francois Leonard and Junichiro Kono, "Carbon Nanotube Terahertz Detector", Nano Letters 14, 3953-3958 (2014).

【非特許文献2】Kristopher Erickson, Xiaowei He, A. Alec Talin, Bernice Mills, Robert H. Hauge, Takashi Iguchi, Naoki Fujimura, Yukio Kawano, Junichiro Kono, Francois Leonard, "Figure of Merit for Carbon Nanotube Photothermoelectric Detectors", ACS Nano 9, 11618-11627 (2015)

40

【非特許文献3】Yukio Kawano, "Terahertz Response of Carbon Nanotubes and Graphene", Journal of the Physical Society of Japan 84, 121010-1-9 (2015).

【非特許文献4】河野 行雄、"低次元電子系の機能に基づくテラヘルツ波検出・分光・撮像デバイス"、応用物理学会誌「応用物理」Vol. 84, pp. 643-647 (2015).

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

非特許文献1～4には、カーボンナノチューブをテラヘルツ検出器やアレイセンサとして使用する場合、材料や電極の最適条件が分からないという課題があった。

【0008】

50

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、検出感度が向上し、精確な画像が観測可能なテラヘルツ波検出装置およびアレイセンサを提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

前記した課題を解決するため、本発明に係る第1のテラヘルツ波検出装置は、基板に形成された低次元電子系材料と、前記低次元電子系材料の2次元平面上に対向配置された第1電極および第2電極と、を備え、前記第1電極と前記第2電極は、異なる熱伝導率を有する金属からなることを特徴とする。

【0010】

本発明に係るアレイセンサは、前記テラヘルツ波検出装置を複数個整列配置したアレイセンサであって、前記低次元電子系材料の表面にTHz波を照射し、当該低次元電子中でTHz励起されたキャリアを検出する。

10

【0011】

本発明に係る第2のテラヘルツ波検出装置は、カーボンナノチューブの膜と、前記カーボンナノチューブの膜における一方側に配置される第1電極と他方側に配置される第2電極とを備え、前記第1電極と前記第2電極とは、異なるまたは同じ熱伝導率を有している。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、検出感度が向上し、精確な画像が観測可能なテラヘルツ波検出装置を提供することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】(a)は本発明の実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の構成を示す図であり、(b)はテラヘルツ波検出装置の斜視図である。

【図2】(a)は本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の8素子アレイセンサの外観を示す図であり、(b)は8素子アレイセンサの斜視図である。

【図3】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の電極の材料(Au、Al、Mo、Ni、Ti)の熱伝導率と感度を示す図である。

【図4】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の電極の厚みに対する応答感度の関係を示す図である。

30

【図5】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の電磁波吸収スペクトルを示す図である。

【図6】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置のI-V特性とTHz応答の結果を示す図であり、(a)は0.14THzのTHz照射によりTHz照射した場合のI-V特性のシフト観測、(b)は1.4THzのTHz照射によりTHz照射した場合のI-V特性のシフト観測、(c)は3.0THzのTHz照射によりTHz照射した場合のI-V特性のシフト観測である。

【図7】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の単層カーボンナノチューブフィルムのXY面における感度を示す図である。

40

【図8】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の雑音等価パワーを示す図である。

【図9】比較例と本実施形態のテラヘルツ波検出装置のI-V特性とTHz応答の結果を示す図であり、(a)は第1電極13(ソース電極)および第2電極14(ドレイン電極)に同種の金属(Au-Au)を用いた比較例、(b)は第1電極13(ソース電極)に熱伝導率の高いAuを用い、第2電極14(ドレイン電極)に熱伝導率の低いTiを用いた例である。

【図10】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の測定系の全体構成を示す図である。

【図11】図10の測定系の観察方法を説明する図であり、(a)は試料を下から見た図、(b)はTHz透過光の観察像を示す図である。

【図12】図10の測定系において他の試料を観察した例を説明する図であり、(a)は

50

試料を下から見た図、(b)はTHz透過光の観察像を示す図である。

【図13】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の測定系の全体構成を示す図であり、(a)は測定系の全体構成例、(b)はベントマスクの例、(c)は2次元画像の観察例である。

【図14】本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の23素子アレイセンサをフレキシブル基板に配置した場合の応用例を示す図であり、(a)は23素子アレイセンサ70を配置したフレキシブル基板71を手に巻き付けた例、(b)はTHz透過光の観察像を示す図である。

【図15】(a)は本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の変形例の構成を示す図であり、(b)は変形例のテラヘルツ波検出装置の斜視図である。

【図16】本発明のテラヘルツ波検出素子の原理を示す模式図である。

【図17】第1電極と第2電極とに、熱伝導率の差が $296.1\text{ W/m}\cdot\text{K}$ のAuとTiとの組み合わせ、熱伝導率の差が $47.1\text{ W/m}\cdot\text{K}$ のMoとNiの組み合わせ、熱伝導率の差0の同種金属のAlの組み合わせの各場合の熱伝導率の差とTHz応答を示す図である。

【図18】バンドル径約 10 nm の単層カーボンナノチューブフィルムの拡大写真である。

【図19】 29 THz のTHz波を照射した場合の単層カーボンナノチューブフィルムの膜厚と雑音等価パワーの関係を示す図である。

【図20】THz透過光の観察像の他例1を示す図である。

【図21】THz透過光の観察像の他例2を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下、本発明の実施形態について図面を参照して詳細に説明する。

図1(a)は、本発明の一実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の構成を示す図であり、図1(b)は、テラヘルツ波検出装置の斜視図である。

本実施形態のテラヘルツ波検出装置は、材料や電極の最適条件を提供する。

図1(a)、(b)に示すように、テラヘルツ波検出素子10(テラヘルツ波検出装置)は、チップキャリア(Chip carrier)基板11上に、水平方向に高精度で配向された単層カーボンナノチューブフィルム(Single-walled Carbon Nanotubes : SWCNTs film)12(低次元電子系材料)と、単層カーボンナノチューブフィルム12の一方の端部に第1の熱伝導率を有する第1電極13と、単層カーボンナノチューブフィルム12の他方の端部に第2の熱伝導率を有する第2電極14と、を備える。

すなわち、テラヘルツ波検出素子10は、チップキャリア基板11に形成された単層カーボンナノチューブフィルム12と、単層カーボンナノチューブフィルム12の2次元平面上に対向配置された第1電極13および第2電極14と、を備え、第1電極13と第2電極14は、異なる熱伝導率を有する金属からなる。なお、チップキャリア基板11は、どのような材質の基板でもよい。

第1電極13と第2電極14間にバッテリー30および電流計35を接続する。図1(a)、(b)では、バッテリー30の正極を第1電極13としているので、第1電極13をソース電極、第2電極14をドレイン電極と呼ぶことがある。

第1電極13と第2電極14間の単層カーボンナノチューブフィルム12上に、赤外線領域のTHz波40が照射(IR irradiation)される。

【0015】

図2(a)は、8素子アレイセンサの外観を示す図であり、図2(b)は、8素子アレイセンサの斜視図である。

図2(a)、(b)に示すように、8素子アレイセンサ(8-element array detector)20は、8個のテラヘルツ波検出素子10を整列配置する。それを小型パッケージに収容して使用する場合には、真空封止することが望ましい。なお、小型パッケージは真空封止しないで構成してもよい。8素子アレイセンサ20は、 1 mm 幅のテラヘルツ波検出素子

10

20

30

40

50

10を0.5mm間隔で8個並べた構造である。図2(a)では、図1(a)、(b)のテラヘルツ波検出素子10の上面視した場合の縦の長さは1mm、テラヘルツ波検出素子10とテラヘルツ波検出素子10間の電極間隔は、1.5mmである。8素子アレイセンサ20をXY方向のうちいずれか一方方向に動かすことで、8×8の2次元エリアでTHz検出を行うことができる。

8素子アレイセンサ20は、テラヘルツ波検出素子10の単層カーボンナノチューブフィルム12の表面にTHz波を照射し、当該低次元電子中でTHz励起されたキャリアを検出する。

【0016】

<単層カーボンナノチューブフィルム>

10

カーボンナノチューブは、電気伝導性が高く、機械的強度が高く柔軟性がある。カーボンナノチューブは、DCに近い周波数から紫外光領域に至る、極めて広い周波数帯での電磁波を吸収する。特に、サブテラヘルツから紫外までの極めて広大な周波数帯域の光を吸収可能である。カーボンナノチューブがテラヘルツ検出器として使用できることは、本発明者らが以前に示したが、材料や電極の最適条件が分かっていなかった。本実施形態では、材料や電極の最適条件を提供する。まず、材料としてのカーボンナノチューブは、下記の特徴を有する。

単層カーボンナノチューブフィルム12は、長さ方向が第1電極13および第2電極14の端部に沿って高密度で単層カーボンナノチューブが配向される。検出感度をより高めるためには、より配向性の高いものが望まれる。

20

単層カーボンナノチューブフィルム12は、一例としてp-typeである。また、単層カーボンナノチューブフィルム12は、n-typeであってもよく、p-typeとn-typeとを組み合わせたものでもよい。

単層カーボンナノチューブフィルム12は、例えば膜厚50μmのカーボンナノチューブ薄膜である。

ここで、低次元電子系材料としては、上記単層カーボンナノチューブフィルムその他、グラフェン(後記)、半導体ヘテロ界面2次元電子ガス(Two-Dimensional Electron Gas: 2DEG)がある。

【0017】

<第1電極および第2電極>

30

第1電極13(ソース電極)および第2電極14(ドレイン電極)は、金属からなる。本発明者らが電極に用いた金属は、Au、Al、Mo、Ni、Tiである。ただし、貴金属ではAu以外のCu、Ag、Ptなど、アルミニウム族元素ではAl以外のGa、Inなど、クロム族元素ではMo以外のCr、Wなど、鉄族元素ではNi以外のFe、Coなど、スズ族元素ではTi以外のZr、Sn、Hf、Pb、Thなど、マグネシウム族元素のBe、Mg、Znなど、さらにこれらの金属の合金が使用できると考えられる。

第1電極13(ソース電極)と第2電極14(ドレイン電極)とは、熱伝導率(熱伝導率: Thermal conductivity)が非対称の金属を用いる。熱伝導率(熱伝導度)は、熱の流れに垂直な単位面積を通過して単位時間に流れる熱量を、単位長さあたりの温度差(温度勾配)で割った値である。各電極で熱伝導率に差を設けるには、各電極を異種材料で構成する。

40

【0018】

第1電極13の熱伝導率と第2電極14の熱伝導率との差は、大きいこと(所定差以上であること)が好ましい(後記)。図3に示す電極の材料の中では、(Au, Al)と(Mo, Ni, Ti)との組み合わせが電極の熱伝導率が大きくなる。

例えば、第1電極13(ソース電極)は、熱伝導率の高いAuを用い、第2電極14(ドレイン電極)は、熱伝導率の低いTiを用いることで、電極の熱伝導率の非対称電極構造を実現する。ここで、第1電極13と第2電極14とで、AuとTiとを逆に用いてもよい。

なお、一例として、第1電極13および第2電極14の単層カーボンナノチューブフィ

50

ルムの長さ方向は 1.5 mm、第 1 電極 13 の端部と第 2 電極 14 の端部との間は 2.0 mm としている。

【0019】

図 3 は、電極の材料 (Au、Al、Mo、Ni、Ti) の熱伝導率 (Thermal conductivity [W/m·K]) と応答信号 (Response [μA]) (右縦軸) を示す図である。応答信号 (Response [μA]) は、応答電流で示される。電極の材料の熱伝導率は、図 3 の折れ線グラフ (左縦軸) で示され、応答信号は、棒グラフ (右縦軸) で示されている。

図 3 に示すように、各電極の応答電流 (Response [μA]) は、Au > Al > Mo > Ni > Ti の順に感度に変化する。図 3 に示す電極の材料の中では、Au の応答電流が最も大きく、次いで Al となる。そして、感度は Al から略半減して Mo、Ni、Ti と続く。

上記感度は、熱伝導率と関連する。すなわち、図 3 に示すように、熱伝導率が良いほど高感度である。電極の熱伝導率を高めることで、検出感度を向上させることができる。

【0020】

図 4 は、電極の厚み (Thickness [nm]) に対する応答信号 (応答電流) (Response [μA]) の関係を示す図である。

図 4 に示すように、電極の厚さが厚いほど高感度である。応答信号を増すためには、電極の厚みを厚くする。

【0021】

以上のことから、熱伝導率が非対称の金属を用いる観点からは、図 3 に示す電極の材料の中では、(Au, Al) と (Mo, Ni, Ti) との組み合わせとなる。また、検出感度を向上させる観点からは、熱伝導率の大きい Au を選択することができる。したがって、一方の電極に Au を選択した場合、他方の電極は (Mo, Ni, Ti) から選択可能となる。この場合、各電極の熱伝導率の差を大きくするためには、他方の電極には Ti を用いるとよりよい。

【0022】

図 5 は、テラヘルツ波検出素子 10 (単層カーボンナノチューブフィルム 12) の電磁波吸収スペクトルを示す図である。横軸に周波数 (Frequency [THz]) をとり、縦軸に電磁波吸収 (Absorbance) をとる。

図 5 に示すように、テラヘルツ波検出素子 10 は、幅広い周波数帯において電磁波を吸収することができる。

上述したように、単層カーボンナノチューブフィルム 12 は、長さ方向が第 1 電極 13 および第 2 電極 14 の端部に沿って高密度でアレイ状に配向される。すなわち、電磁波の振動電界が単層カーボンナノチューブフィルム 12 (CNT アレイ) の長さ方向に対して平行な場合である。このため、単層カーボンナノチューブフィルム 12 は、幅広い周波数帯において電磁波を吸収することができる。

【0023】

図 6 は、テラヘルツ波検出装置 10 の I - V 特性と THz 応答の結果 (室温下) を示す図である。横軸にソース - ドレイン電圧 [mV] をとり、縦軸にソース - ドレイン電流 [μA] をとる。また、図 6 の I - V 特性の細実線は、THz 照射がない場合 (Off) を、太実線は、THz 照射がある場合 (On) を示す。

図 6 (a) に示すように、0.14 THz の THz 照射により THz 照射した場合、I - V 特性は線形であり、I - V 特性のシフトが観測された。

図 6 (b) に示すように、1.4 THz の THz 照射により THz 照射した場合、I - V 特性は線形であり、I - V 特性のシフトが観測された。

図 6 (c) に示すように、3.0 THz の THz 照射により THz 照射した場合、I - V 特性は線形であり、I - V 特性のシフトが観測された。いずれの THz 照射によっても I - V 特性の傾きに変化がない (電気抵抗は一定のまま) ことから、単純なポロメトリック効果 (THz 吸収による温度上昇効果) ではない。単層カーボンナノチューブフィルム 12 (CNT アレイ) が載る基板 (チップキャリア基板 11) の熱伝導率への依存性を測定したところ、熱伝導率が小さいほど THz 応答が大きくなることがわかった。この事実は

10

20

30

40

50

、THz照射の結果として生じる熱が基板を通して逃げず、CNTに熱が蓄積されるほどTHz応答が大きくなることを意味しており、光熱電効果がTHz検出機構として予想される。

【0024】

図7は、単層カーボンナノチューブフィルム12のXY面における応答信号（応答電流）（Response[μA]）を示す図である。図7に示す濃淡が濃いところが感度が高いところである。図7は、モノクロ表示のため識別されていないが、実画面では図7の左側と応答信号（Response[μA]）のプラス側が信号の正（例えば赤色）、図7の右側と応答信号（Response[μA]）のマイナス側が信号の負（例えば青色）で表示されており、応答信号の正負と感度が検出されている。高感度部分は、単層カーボンナノチューブフィルム12のXY面の二箇所の各電極に近いところにある。高感度部分が電極に近いところにあるため、構造的な理由から正確な情報を取り出しにくいことが分かった。本発明者らは、利用される高感度部分は、1つでよく、電極から離れていればより正確な情報を取得できるのではないかとの着想を得た。そこで、熱伝導率が非対称の金属を各電極に用いることで、非対称電極構造を実現する。例えば、一方の電極を熱伝導率の高いAu、他方の電極を熱伝導率の低いTiにすることで、上記高感度部分をいずれか一方の電極から離す。これにより、一方のみの応答を取り出すことで、正確な画像を取得できる。

10

【0025】

図8は、テラヘルツ波検出装置10の雑音等価パワーを示す図である。

図8に示すように、DCに近い周波数から紫外光領域に至る、極めて広い周波数帯において、雑音等価パワー $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ A} / \text{Hz}^{1/2}$ という優れた検出感度を得ることができた。

20

【0026】

図9は、比較例と本実施形態のテラヘルツ波検出装置10のI-V特性とTHz応答の結果（室温下）を示す図である。横軸にソース-ドレイン電圧[mV]をとり、縦軸にソース-ドレイン電流[μA]をとる。また、図9のI-V特性の細実線および細破線は、THz照射がない場合(Off)を、太実線および太破線は、THz照射がある場合(On)を示す。

図9(a)は、第1電極13（ソース電極）および第2電極14（ドレイン電極）に同種の金属（Au-Au）を用いた比較例である。

30

図9(a)に示すように、比較例では、THz照射によるI-V特性のシフトは観測されない。

図9(b)は、第1電極13（ソース電極）に熱伝導率の高いAuを用い、第2電極14（ドレイン電極）に熱伝導率の低いTiを用いた例である。

図9(b)に示すように、THz照射した場合、I-V特性は線形であり、I-V特性のシフトが観測された。また、(Au-Ti)を用いた場合、I-V特性のシフトは、最も大きい。

【0027】

次に、以上の最適値で試作した8素子アレイセンサ20による測定例を以下に示す。

図10は、テラヘルツ波検出装置の測定系の全体構成を示す図である。

40

図10に示すように、被検査対象物であるメタルマスク(Metal mask)50（試料）に、上方から赤外線領域のTHz波40を照射(IR irradiation)する。THz光源は、フェムト秒レーザ等で発生させる。メタルマスク50は、アルミホイル(THz波非透過)51に情報52（ここでは文字：X, Y, Z）を形成し、このアルミホイル51に不透明(可視光)なフィルム(THz透過)を重ねてマスクとする。

このメタルマスク50の下方に、8素子アレイセンサ20を配置し、8素子アレイセンサ20をメタルマスク50に対してXY移動(2次元移動)する。

あるいは、図10に示すように、8素子アレイセンサ20を載置し、上方から赤外線領域のTHz波70を照射しつつ、メタルマスク50を図10の矢印()方向に移動させる。すなわち、8素子アレイセンサ20を一方向に移動・交差させて2次元画像を観察す

50

る。

【0028】

図11は、図10の測定系の観察方法を説明する図であり、図11(a)は、試料を下から見た図、図11(b)は、THz透過光の観察像を示す図である。

図11(a)に示すように、メタルマスク50(試料)は、アルミホイル51に文字82(X, Y, Z)を形成する(例えばアルミホイルから文字部分を切り取る)。

図10に示すように、8素子アレイセンサ20を一方向に移動させて2次元画像を観察する。図11(b)、図20に示すように、メタルマスク50の文字52が高感度、高精度で観察できた。また、テラヘルツ波検出素子10は、アレイ化されているので、8素子アレイセンサ20を一方向に移動させるだけで2次元画像を取得できる。このため、高速に観察可能である。

10

なお、図20は、THz透過光の観察像の他例1を示す図である。

【0029】

図12は、図10の測定系において他の試料を観察した例を説明する図であり、図12(a)は、試料を下から見た図、図12(b)は、THz透過光の観察像を示す図である。

図12(a)に示すように、クリップ(軟鉄)60(試料)の一部を円形のGe板61で覆う。ここで、Ge板61のGeは、THz波に対して透過する。クリップ60のFeは、THz波に対して非透過である。上方からみると、クリップ60(試料)はGe板61で隠されてクリップ60は見えない。

20

図10に示すように、8素子アレイセンサ20を一方向に移動させて2次元画像を観察する。図12(b)、図21に示すように、クリップ60が高感度、高精度で観察できた。また、テラヘルツ波検出素子10は、アレイ化されているので、8素子アレイセンサ20を一方向に移動・交差させるだけで2次元画像を取得できる。このため、高速に観察可能である。

なお、図21は、THz透過光の観察像の他例2を示す図である。

【0030】

図13は、テラヘルツ波検出装置の測定系の全体構成を示す図である。

図13に示すように、23素子アレイセンサ70(23-element array detector)は、フレキシブル基板71に23個のテラヘルツ波検出素子10を整列配置する。フレキシブル基板71の材質は、ポリイミドフィルム等のようなものでもよい。また、単層カーボンナノチューブフィルム12(図1(a)、(b)参照)は、高い電気伝導性と機械的強度を兼ね備えており、柔軟性のあるフレキシブル基板71に用いることができる。23素子アレイセンサ70は、1mm幅のテラヘルツ波検出素子10を0.5mm間隔で28個フレキシブル基板71上に並べたフレキシブルセンサである。23素子アレイセンサ70は、例えば指や腕など生体上の湾曲した箇所に密着させるように装着することができる。

30

【0031】

図13(b)に示すように、アルミホイル(THz波非透過)51に情報52(ここでは文字: X, Y, Zと図形)を形成しこのアルミホイル51に不透明(可視光)なフィルム(THz透過)53を重ねて柔軟性のあるベントマスク(Bent mask)80とする

40

ベントマスク80(試料)に、上方から赤外線領域のTHz波40を照射(IR irradiation)する。THz光源は、フェムト秒レーザ等で発生させる。

図13(a)に示すように、ベントマスク80(試料)に、上方から赤外線領域のTHz波70を照射しつつ、ベントマスク80を矢印()方向に移動させて2次元画像を観察する。

図13(c)に示すように、ベントマスク80を一方向に移動させて2次元画像を観察すると、ベントマスク80の文字・図形52が高感度、高精度で観察できた。また、テラヘルツ波検出素子10は、アレイ化されているので、23素子アレイセンサ70を一方向に移動させるだけで2次元画像を取得できる。このため、高速に観察可能である。

【0032】

50

図14は、23素子アレイセンサをフレキシブル基板に配置した場合の応用例を示す図である。図14(a)は、23素子アレイセンサ70を配置したフレキシブル基板71を手に巻き付けた例、図14(b)は、THz透過光の観察像を示す図である。

図14に示すように、外部光源なしで手からの放射のパッシブイメージングを観察することができた。医療応用への第一歩となることが期待される。

【0033】

以上説明したように、本実施形態に係るテラヘルツ波検出素子10は、チップキャリア基板11に形成された単層カーボンナノチューブフィルム12と、単層カーボンナノチューブフィルム12の2次元平面上に対向配置された第1電極13および第2電極14と、を備え、第1電極13と第2電極14は、異なる熱伝導率を有する金属からなる。第1電極13の熱伝導率と第2電極14の熱伝導率との差は、大きいこと(所定差以上であること)が好ましい。

【0034】

このように、熱伝導率が非対称の金属を各電極に用いることで、非対称電極構造を実現する。例えば、第1電極13(ソース電極)を熱伝導率の高いAu、第2電極14(ドレイン電極)を熱伝導率の低いTiにすることで、高感度部分をいずれか一方の電極から離す。これにより、一方のみの応答を取り出すことで、精確な画像を取得できる。

【0035】

また、8素子アレイセンサ20は、8個のテラヘルツ波検出素子10を整列配置してアレイ化する。8素子アレイセンサ20をXY方向のうちいずれか一方方向に動かすことで、8x8の2次元エリアでTHz検出を行うことができる。また、テラヘルツ波検出素子10は、アレイ化されているので、8素子アレイセンサ20を一方向に移動させるだけで2次元画像を取得でき、高感度、高精度で高速に観察可能である。

本実施形態では、電極の種類や厚みを変えて検出感度向上を確認した。多素子によるイメージング計測により、可視光では見えないものを可視化することができる。

また、サブテラヘルツ~赤外での画像計測を1つのカメラで可能である。現時点では、1~30THzで可能であるものの、原理的にはサブTHz~数百THzまで可能である。

また、折り曲げたカメラも作製可能になる。

さらに、フレキシブル特性を利用した生体センサや人体に貼り付けるなどセンシングや医療応用などにも適用可能である。

【0036】

[変形例]

図15(a)は、変形例のテラヘルツ波検出装置の構成を示す図であり、図15(b)は、変形例のテラヘルツ波検出装置の斜視図である。

本変形例は、低次元電子系材料として、単層カーボンナノチューブフィルムに代えて、グラフェンを用いた例である。

図15(a)、(b)に示すように、テラヘルツ波検出素子10A(テラヘルツ波検出装置)は、2次元系材料であるグラフェン12Aと、グラフェン12Aの2次元平面上に対向配置された第1電極13および第2電極14と、を備え、第1電極13と第2電極14は、異なる熱伝導率を有する金属からなる。

グラフェン12Aは、2層以上の複数層のグラフェンが好ましい。

【0037】

グラフェン12Aは、単層カーボンナノチューブフィルム12と同様に、テラヘルツ波検出装置10の低次元電子系材料に適している。

グラフェンは、炭素原子の sp^2 結合によって形成された八子の巣状の原子層1層のシート構造である。グラフェンは、高キャリア移動度、光波長無依存性(高い透明度)、高光非線形性など独自の利点を有する。グラフェンは、炭素原子のみで構成された六角形のセル構造のみならず、六角形のセルに対してある種の置換基/官能基が結合されていてもよいし、あるいは、酸化グラフェンのような前駆体もまた存在していてもよい。本変形例

10

20

30

40

50

では、グラフェン 1 2 A がチップキャリア基板 1 1 上に 2 次元配置されている。さらに、グラフェン 1 2 A は、複数層のグラフェンではなく、単層のグラフェンでもよい。

【 0 0 3 8 】

グラフェンは、コーン型のバンド構造でバンドギャップがなく、高いキャリア移動度、高い透明度でどの波長帯でも機能する。本実施形態のテラヘルツ波検出装置 1 0 A の T H z 波の波長帯の観点からも好ましい。

【 0 0 3 9 】

なお、グラフェン以外の低次元電子系材料としては、フォスフォレン（原子層黒リン）、遷移金属ダイカルコゲナイド（ MoS_2 、 WS_2 、 WSe_2 など）が挙げられる。ただし、フォスフォレンや二硫化モリブデン（ MoS_2 ）は、バンドギャップと高いキャリア移動度を持つ半導体の性質を有する。製作の容易性を考慮すると、実際にはグラフェン、 MoS_2 、 WS_2 となる。

【 0 0 4 0 】

<テラヘルツ波検出素子 1 0 の原理>

次に、テラヘルツ波検出素子（テラヘルツ波検出装置）1 0 の原理について説明する。

テラヘルツ波検出素子 1 0 は光熱電効果を利用したものである

図 1 6 は、本発明のテラヘルツ波検出素子の原理を示す模式図である。

【 0 0 4 1 】

材料 A と材料 B は、単層カーボンナノチューブ（CNT）と電極、または、p 型 CNT と n 型 CNT に相当する。

高温 T_h の T H z 波 4 0 が照射された I 部では接触しており、T H z 波 4 0 の照射箇所
の I 部から離れた箇所では接触していない。

材料 A と材料 B とが接する一方の端部の I 部に T H z 波 4 0 が照射されたとする。

すると、I 部は T H z 波 4 0 が吸収されて加熱され高温 T_h の温度となる。他方の端部
の II 部は I 部から離れているため、低温 T_o の温度である。

【 0 0 4 2 】

こうして、I 部と II 部とで温度差が生じ、温度勾配が発生する。

高温 T_h の I 部ではキャリアが生じる一方、低温 T_o の II 部ではキャリアの発生が殆ど
ない。そのため、キャリアの密度バランスが崩れ、I 部から II 部にキャリアが流れる。そ
して、ある程度のキャリアが II 部に移動すると I 部からのキャリアの移動がなくなる。

【 0 0 4 3 】

キャリアが移動した I 部ではキャリアと反対の電荷を持ち、キャリアが移動してきた II
部ではキャリアと同じ電荷を持つ。これにより、I 部と II 部との間に電位差（熱起電力 V
）が生じ、I 部と II 部との間に電流が流れる。

つまり、単層カーボンナノチューブフィルム 1 2 の T H z 波 4 0 の吸収により（図 1（
a）参照）、熱（温度勾配）が発生し、電位差（熱起電力 V ）が生じる。

熱起電力 V は下式（1）で表される。

【 0 0 4 4 】

【数 1】

$$V = -S_{AB}(T_h - T_o) = -(S_A - S_B)(T_h - T_o) \quad (1)$$

V : 熱電力

S_{AB} : 相対ゼーベック係数

T_h : I 部の温度

T_o : II 部の温度

ここで、 S_A は材料 A のゼーベック係数であり、 S_B は材料 B のゼーベック係数である。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 5 】

式 (1) より相対ゼーベック係数 $S_{A/B}$ は、 $(S_A - S_B)$ と表されるので材料 A のゼーベック係数 S_A と材料 B のゼーベック係数 S_B との差が大きいほど熱起電力 V は大となる。

また、式 (1) より温度勾配 $(T_h - T_o)$ が大きいほど、熱起電力 V は大となる。そのため、材料 A と材料 B の熱伝導率差が大きいほど温度勾配 $(T_h - T_o)$ が大きく、熱起電力 V は大となる。

【 0 0 4 6 】

上述の関係を、図 1 (a) に示すテラヘルツ波検出素子 1 0 に適用すると、THz 波 4 0 が単層カーボンナノチューブフィルム 1 2 に照射された際、単層カーボンナノチューブフィルム 1 2 の照射箇所に近い電極 (第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 の何れか一方) が相対的に高温となり、照射箇所に遠い電極 (第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 の何れか他方) が相対的に低温となる。

【 0 0 4 7 】

ここで、テラヘルツ波検出素子 1 0 のチップ化のため、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とを限りなく近付けると、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とが同種金属の場合には同じ熱伝導率なので、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 との温度差が限りなく “ 0 ” に近くなる。この場合、熱起電力 V が “ 0 ” に近付き、テラヘルツ波の検出は困難となる。

【 0 0 4 8 】

これに対して、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とが異種金属の場合、熱伝導率が異なる。そのため、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とを限りなく近付けた際、熱伝導率が異なることから、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 との温度差は同種金属の場合よりも大となる。そのため、発生する熱起電力 V は同種金属の場合よりも大きくなる。

すなわち、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とが異種金属の場合の方が同種金属の場合よりも THz 波 4 0 を検出できる可能性が高い。

つまり、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とで、熱伝導率の差が大きいほど温度差が大きくなり、より大きな起電力 V が発生し、THz 波 4 0 の検出感度が高い。

【 0 0 4 9 】

<テラヘルツ波検出素子 1 0 の第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 の各材料と THz 応答>

そこで、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 の熱伝導率の差異により、テラヘルツ波検出素子 1 0 の感度がどのように変化するか評価した。

表 1 に、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 に使用される金属の Cu、Au、Al、Mo、Ni、Ti の熱伝導率を示す。

【表 1】

	熱伝導率[W/(m・K)]
Cu	403
Au	318
Al	237
Mo	138
Ni	90.9
Ti	21.9

【 0 0 5 0 】

表 2 に、金属の Cu、Au、Al、Mo、Ni、Ti を第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とに使用する組み合わせと、この場合の熱伝導率の差 (W/m・K) を示す。

10

20

30

40

【表 2】

		第1電極					
		Cu	Au	Al	Mo	Ni	Ti
第2電極	Cu	0	85	166	265	312.1	381.1
	Au	85	0	81	180	227.1	296.1
	Al	166	81	0	99	146.1	215.1
	Mo	265	180	99	0	47.1	116.1
	Ni	312.1	227.1	146.1	47.1	0	69
	Ti	318.1	296.1	215.1	116.1	69	0

10

【0051】

表 1、表 2 より、これらの金属で熱伝導率の差が $381.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ と最大であるのが Cu と Ti との組み合わせである。

熱伝導率の差が $296.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ と 2 番目に大きいのが Au - Ti の組み合わせである。例えば、第 1 電極 1 3 に熱伝導率 $318 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の Au を用い、第 2 電極 1 4 に熱伝導率 $21.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の Ti を用いる。

【0052】

これらの金属で熱伝導率の差が $47.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ で最小なのが Mo と Ni との組み合わせである。例えば、第 1 電極 1 3 に熱伝導率 $138 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の Mo を用い、第 2 電極 1 4 に熱伝導率 $90.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の Ni を用いる。

同種金属の場合、熱伝導率の差は “0” である。例えば、Al を第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とに用いた場合である。

【0053】

図 1 7 に、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 とに、熱伝導率の差が $296.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の Au と Ti との組み合わせ、熱伝導率の差が $47.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ の Mo と Ni の組み合わせ、熱伝導率の差が 0 である同種金属の Al の組み合わせの各場合の熱伝導率の差 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) (左縦軸) と THz 応答 (μA) (右縦軸) を示す。熱伝導率の差 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) (左縦軸) を折れ線グラフで示し、THz 応答 (μA) (右縦軸) を棒グラフで示す。

30

【0054】

図 1 7 の評価条件は、単層カーボンナノチューブフィルム 1 2 のバンドルサイズ (バンドル径) 10 nm 、単層カーボンナノチューブフィルム 1 2 の膜厚 $100 \mu\text{m}$ 、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 の各金属膜厚 20 nm である。なお、バンドル径とは、複数本のカーボンナノチューブが繊維状の形状を保って寄り集まったものの径である。

【0055】

図 1 7 より、熱伝導率の差が $296.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (左縦軸) の Au と Ti との組み合わせで THz 応答が約 $2 \mu\text{A}$ (右縦軸) であった。また、熱伝導率の差が $47.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (左縦軸) の Mo と Ni の組み合わせで THz 応答が約 $1.5 \mu\text{A}$ (右縦軸) であった。また、熱伝導率の差が “0” (左縦軸) の同種金属の Al を用いた場合の THz 応答が $0.5 \mu\text{A}$ 弱 (右縦軸) であった。

40

図 1 7 の結果から、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 との熱伝導率の差が大きいほど THz 応答が強い、つまり高感度であることが確認された。

【0056】

発明者等の知見では、光熱起電力 V の強度は、電極金属の熱伝導率、電気伝導率、ゼーベック係数といった様々なパラメーターに依存して決まる。本実施形態の条件 ($100 \mu\text{m}$ 厚のカーボンナノチューブ膜、第 1 電極 1 3 と第 2 電極 1 4 の各金属膜厚 20 nm) においては熱伝導率に支配的に依存して決まると考えられる。

【0057】

50

以上より、テラヘルツ波検出素子 10 として機能するためには、テラヘルツ波検出素子 10 を小型化して小さいピクセルを作製しようとした際に、第 1 電極 13 の熱伝導率と第 2 電極 14 の熱伝導率との差は、少なくとも応答信号が 0 にならない値とする必要がある。換言すれば、第 1 電極 13 の熱伝導率と第 2 電極 14 の熱伝導率との差は、THz 波 40 が単層カーボンナノチューブフィルム 12 に照射された際に検出信号が取得できる値に設定すればよい。

【0058】

<単層カーボンナノチューブフィルム 12 の特性>

次に、テラヘルツ波検出素子 10 の単層カーボンナノチューブフィルム 12 (カーボンナノチューブ膜) の特性について説明する。

図 18 は、バンドル径約 10 nm の単層カーボンナノチューブフィルム 12 の拡大写真である。図 18 において、繊維状に目視できるのがバンドルである。

【0059】

図 19 は、2.9 THz の THz 波 40 を単層カーボンナノチューブフィルム 12 に照射した場合の単層カーボンナノチューブフィルム 12 の膜厚と雑音等価パワー (NEP: Noise equivalent power) の関係を示す図である。横軸に膜厚 (μm) をとり、縦軸に NEP (pW/Hz) をとっている。図 19 において、黒丸がバンドル径約 200 nm であり、白丸がバンドル径約 10 nm である。前記したように、バンドル径とは複数本のカーボンナノチューブが繊維状の形状を保って寄り集まったものの径である。

【0060】

図 19 より、単層カーボンナノチューブフィルム 12 のバンドル径約 200 nm の方がバンドル径約 10 nm よりも NEP が高く高感度であることが分る。バンドル径が大きい方が、バンドル径が小さいものよりも配向性がよい。

バンドル径がより大きい単層カーボンナノチューブフィルム 12 (カーボンナノチューブ膜) はカーボンナノチューブの繊維の特性が残り易い。

カーボンナノチューブの繊維はゼーベック係数が大きい。そのため、バンドル径がより大きい単層カーボンナノチューブフィルム 12 (カーボンナノチューブ膜) は高感度になる。

【0061】

ゆえに、現実的な範囲でのできるだけ大きいバンドル径である 500 nm 程度で配向していることが好ましい。

なお、図 19 に示す NEP が $700 \text{ pW}/\text{Hz}$ 以下の感度があれば、テラヘルツ波検出素子 10 の性能が少なくとも満足できる。

【0062】

<その他の実施形態 >

1. 前記実施形態では、単層カーボンナノチューブフィルム 12 をチップキャリア基板 11 に形成した場合を説明したが、チップキャリア基板 11 を設けることなくテラヘルツ波検出素子 10 を構成してもよい。

【0063】

2. 前記実施形態では、低次元電子系材料として単層カーボンナノチューブフィルム 12 の膜を例示して説明したが、単層カーボンナノチューブ、二層カーボンナノチューブ、多層カーボンナノチューブを、それぞれ単独で使用、または/および、併用しても構わない。また、低次元電子系材料は、単層または複数層のグラフェンを用いてもよい。

【0064】

3. 前記実施形態では、第 1 電極 13 と第 2 電極 14 とが金属である場合を例示して説明したが、電極の機能を果たせれば、金属以外の材料を用いてもよい。

【0065】

本発明は上記の実施形態例に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載した本発明の要旨を逸脱しない限りにおいて、他の変形例、応用例を含む。

また、上記した実施形態例は本発明をわかりやすく説明するために詳細に説明したもの

10

20

30

40

50

であり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施形態例の構成の一部を他の実施形態例の構成に置き換えることが可能であり、また、ある実施形態例の構成に他の実施形態例の構成を加えることも可能である。また、各実施形態例の構成の一部について、他の構成の追加・削除・置換をすることが可能である。

また、上記実施の形態では、テラヘルツ波検出装置という名称を用いたが、これは説明の便宜上であり、名称はテラヘルツ波検出器等であってもよい。

【符号の説明】

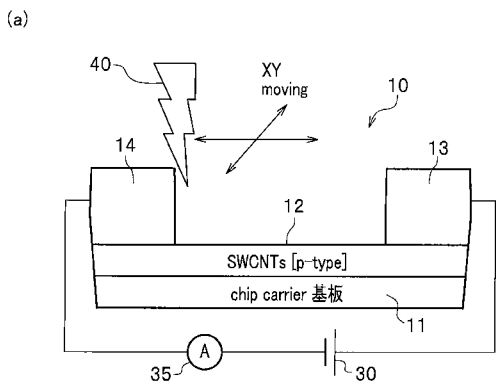
【0066】

- 10, 10A テラヘルツ波検出素子(テラヘルツ波検出装置)
- 11 チップキャリア基板
- 12 単層カーボンナノチューブフィルム(低次元電子系材料, カーボンナノチューブの膜)
- 12A グラフェン(低次元電子系材料)
- 13 第1電極
- 14 第2電極
- 20 8素子アレイセンサ
- 40 THz波
- 50 メタルマスク
- 70 23素子アレイセンサ
- 71 フレキシブル基板
- 80 ベントマスク

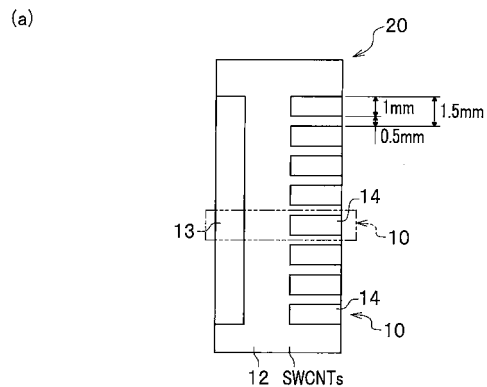
10

20

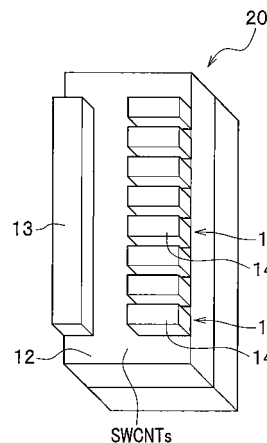
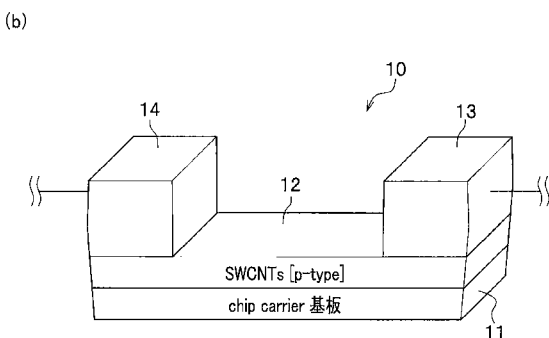
【図1】



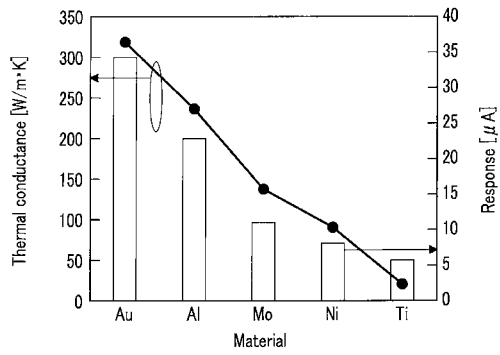
【図2】



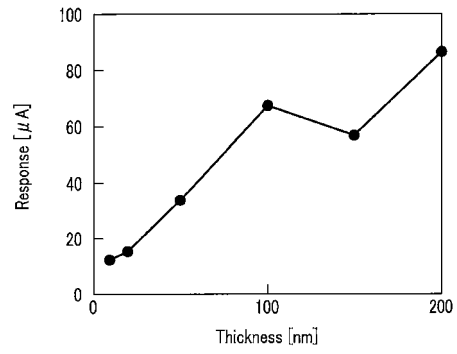
(b)



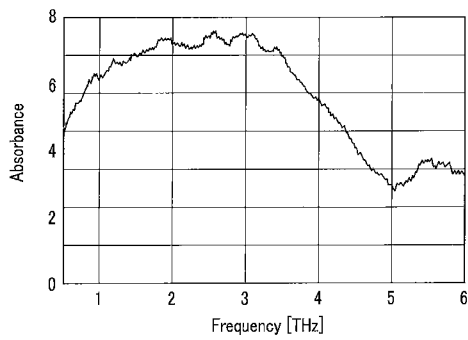
【 図 3 】



【 図 4 】

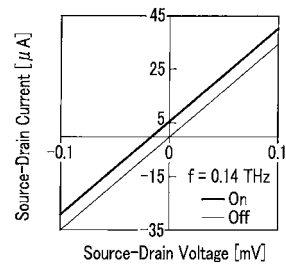


【 図 5 】

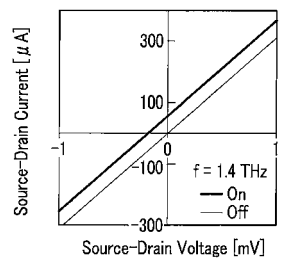


【 図 6 】

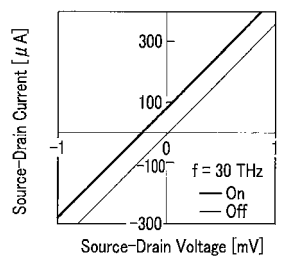
(a)



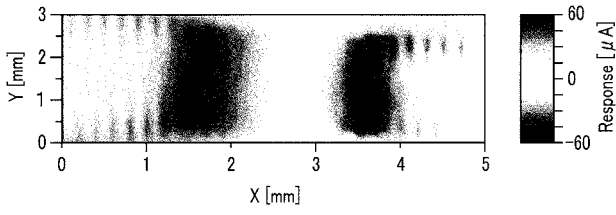
(b)



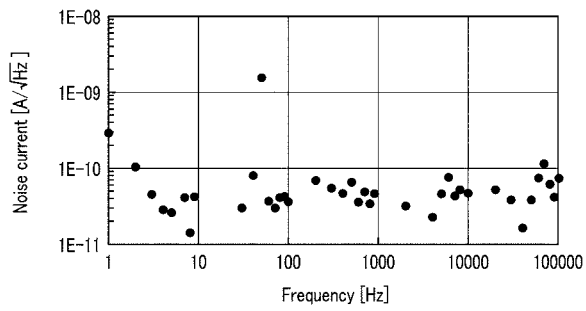
(c)



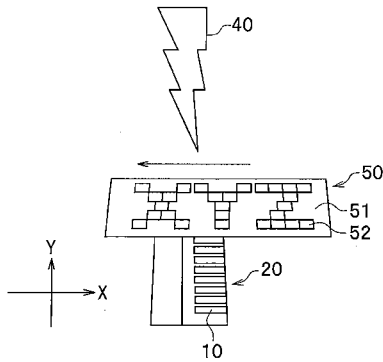
【 図 7 】



【 図 8 】

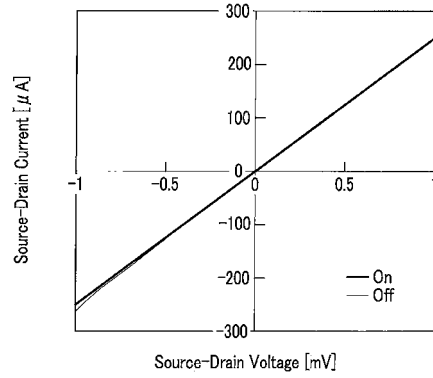


【 図 10 】

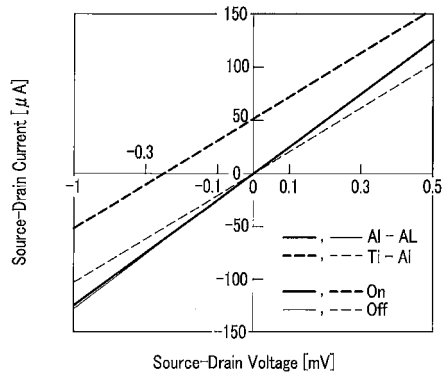


【 図 9 】

(a)

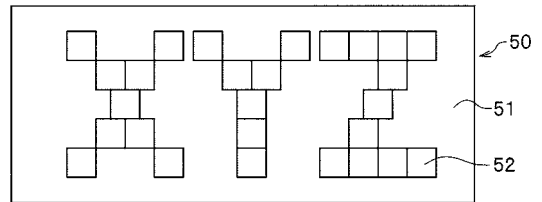


(b)

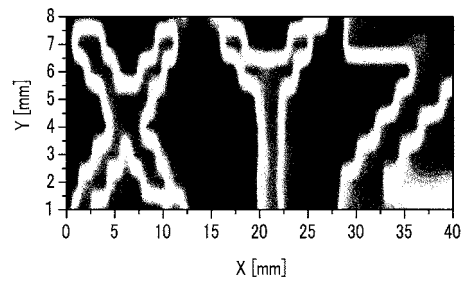


【 図 11 】

(a)

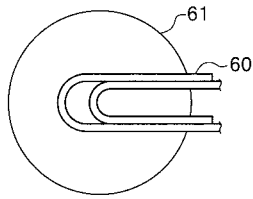


(b)

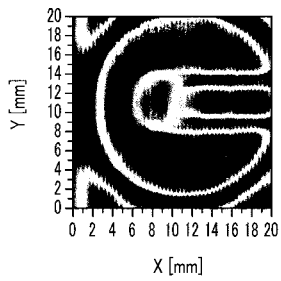


【 図 1 2 】

(a)

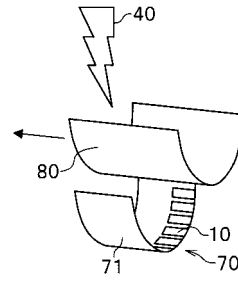


(b)

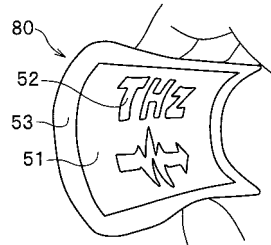


【 図 1 3 】

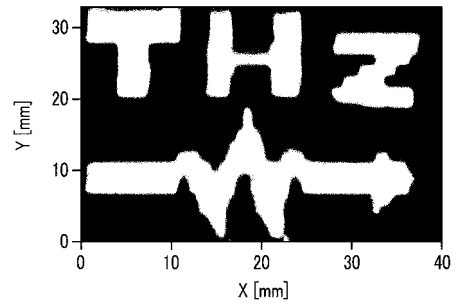
(a)



(b)

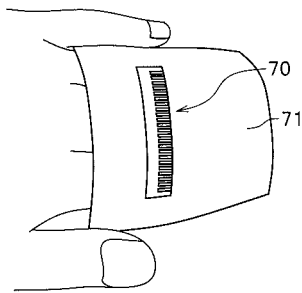


(c)

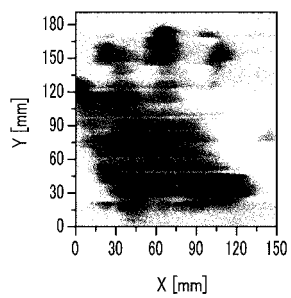


【 図 1 4 】

(a)

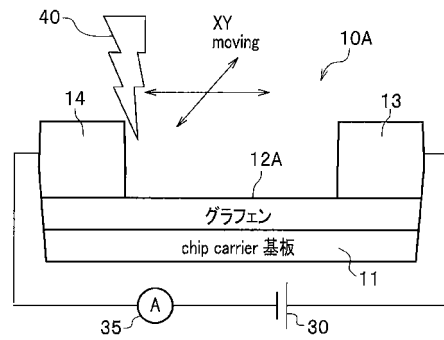


(b)

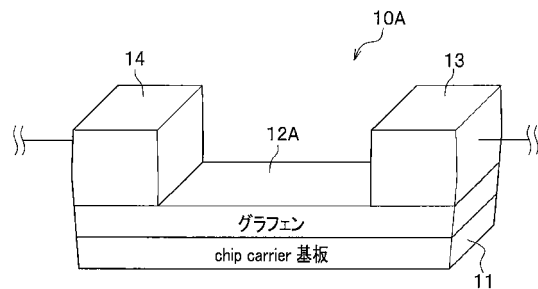


【 図 1 5 】

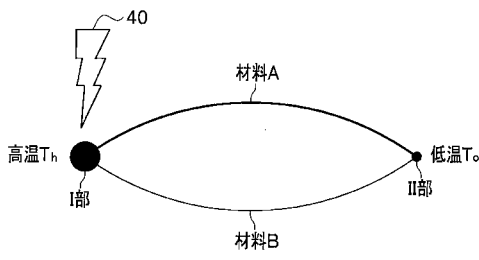
(a)



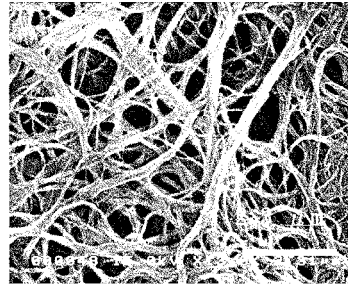
(b)



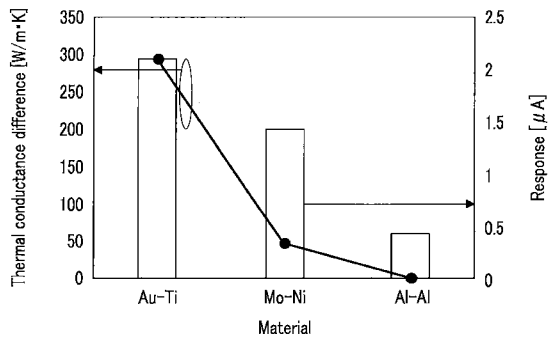
【 図 1 6 】



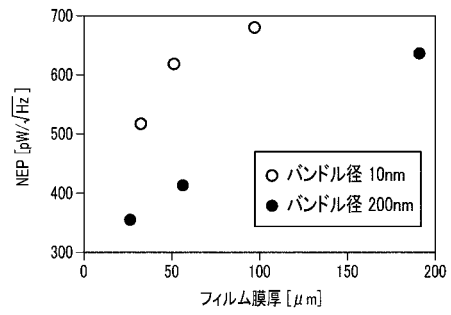
【 図 1 8 】



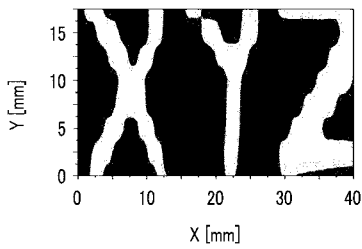
【 図 1 7 】



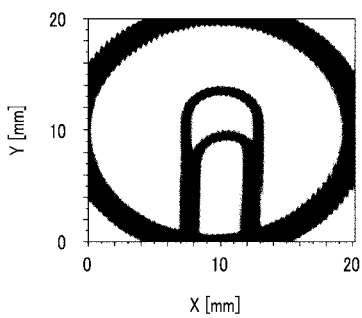
【 図 1 9 】



【 図 2 0 】



【 図 2 1 】



【手続補正書】

【提出日】平成29年9月22日(2017.9.22)

【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

基板に形成された低次元電子系材料と、

前記低次元電子系材料の2次元平面上に対向配置された第1電極および第2電極と、を備え、

前記第1電極と前記第2電極は、異なる熱伝導率を有する金属からなることを特徴とするテラヘルツ波検出装置。

【請求項2】

前記第1電極の熱伝導率と前記第2電極の熱伝導率との差が所定値以上であることを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項3】

前記低次元電子系材料は、

前記2次元平面の2次元方向に高精度で配向されたカーボンナノチューブであることを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項4】

前記カーボンナノチューブは、単層である

ことを特徴とする請求項3に記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項5】

前記低次元電子系材料は、

単層または複数層のグラフェンである

ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項6】

請求項1乃至5のいずれか1項に記載のテラヘルツ波検出装置を複数個整列配置したアレイセンサであって、

前記低次元電子系材料の表面にTHz波を照射し、当該低次元電子中でTHz励起されたキャリアを検出するアレイセンサ。

【請求項7】

前記第1電極の熱伝導率と前記第2電極の熱伝導率との差は、前記低次元電子系材料にテラヘルツ波が照射された際に検出信号を取得できる値である

ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項8】

カーボンナノチューブの膜と、

前記カーボンナノチューブの膜における一方側に配置される第1電極と他方側に配置される第2電極とを備え、

前記第1電極と前記第2電極とは、異なる熱伝導率を有している

ことを特徴とする記載のテラヘルツ波検出装置。

【請求項9】

前記第1電極と前記第2電極との間のNEPが700pW/Hz以下である

ことを特徴とする請求項1から請求項5または請求項7または請求項8のいずれか1項に記載のテラヘルツ波検出装置。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0003

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0003】

発明が解決しようとする課題

[0007]

非特許文献1～4には、カーボンナノチューブをテラヘルツ検出器やアレイセンサとして使用する場合、材料や電極の最適条件が分からないという課題があった。

[0008]

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、検出感度が向上し、精確な画像が観測可能なテラヘルツ波検出装置およびアレイセンサを提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

[0009]

前記した課題を解決するため、本発明に係る第1のテラヘルツ波検出装置は、基板に形成された低次元電子系材料と、前記低次元電子系材料の2次元平面上に対向配置された第1電極および第2電極と、を備え、前記第1電極と前記第2電極は、異なる熱伝導率を有する金属からなることを特徴とする。

[0010]

本発明に係るアレイセンサは、前記テラヘルツ波検出装置を複数個整列配置したアレイセンサであって、前記低次元電子系材料の表面にTHz波を照射し、当該低次元電子中でTHz励起されたキャリアを検出する。

[0011]

本発明に係る第2のテラヘルツ波検出装置は、カーボンナノチューブの膜と、前記カーボンナノチューブの膜における一方側に配置される第1電極と他方側に配置される第2電極とを備え、前記第1電極と前記第2電極とは、異なる熱伝導率を有している。

発明の効果

[0012]

本発明によれば、検出感度が向上し、精確な画像が観測可能なテラヘルツ波検出装置を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0013]

[図1](a)は本発明の実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の構成を示す図であり、(b)はテラヘルツ波検出装置の斜視図である。

[図2](a)は本実施形態に係るテラヘルツ波検出装置の8素子アレイセンサ

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2017/016947
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01J1/02(2006.01)i 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) G01J1/00-1/60, 5/00-5/62, 11/00, H01L27/16, 35/00-37/04 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2017 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2017 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2017 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII), IEEE Xplore		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	Yukio KAWANO, "Terahertz detectors, spectrometers, and imagers based on low-dimensional electron systems", Journal of The Japan Society of Applied Physics 'Oyo Butsuri', 10 July 2015 (10.07.2015), vol.84, no.7, pages 643 to 647, particularly, 2. Kohaiko CNT Array ni yoru Shitsuon THz Kenshutsu Soshi, see fig. 1	8-9 1-7
X A	Xiaowei He et al., Carbon Nanotube Terahertz Detector, Nano Lett., 2014.05.29, 14, 3953-3958, DOI:http://dx.doi.org/10.1021/nl5012678, particularly, see Results	8-9 1-7
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> 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 21 June 2017 (21.06.17)		Date of mailing of the international search report 04 July 2017 (04.07.17)
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/JP2017/016947

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	Yukio Kawano, Terahertz Response of Carbon Nanotubes and Graphene, Journal of Physical Society of Japan, 2015.12.15, 84, 121010-1-9, DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.121010, particularly, see 2.2 CNT film device	8-9 1-7
P,X	D. Suzuki et al., A flexible and wearable terahertz scanner, NATURE PHOTONICS, 2016.12, Vol. 10, pp. 809-813, entire text	1-9
A	Yingxin Wang et al., Terahertz Response of Carbon Nanotube/Metal Heterojunctions, IRMMW-THz, 2013 38th International Conference, 2013.11.21, 978-1-4673-4717-4/13, DOI:http://dx.doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2013.6665664, entire text	1-9
A	WO 2011/024561 A1 (Fujitsu Ltd.), 03 March 2011 (03.03.2011), paragraphs [0071], [0099] to [0106], [0141]; fig. 7 to 8 & US 2012/0160291 A1 paragraphs [0100], [0125] to [0135], [0170]; fig. 7 to 8 & JP 2011-50147 A & US 2015/0059823 A1 & EP 2472712 A1 & CN 102484436 A & KR 10-2012-0035193 A & CN 104467626 A	1-9
A	JP 2007-311442 A (Hitachi, Ltd.), 29 November 2007 (29.11.2007), claim 1; paragraphs [0005] to [0010] & US 2007/0284571 A1 claim 1; paragraphs [0008] to [0022]	1-9
A	WO 2016/039022 A1 (Fujifilm Corp.), 17 March 2016 (17.03.2016), paragraphs [0001] to [0149]; fig. 1 to 6 (Family: none)	1-9
A	JP 3981738 B1 (Nagaoka University of Technology), 26 September 2007 (26.09.2007), paragraphs [0001] to [0021]; fig. 1 to 5 (Family: none)	1-9
A	US 2011/0315880 A1 (NEMIROVSKY), 29 December 2011 (29.12.2011), paragraphs [0001] to [0124]; fig. 1 to 9 & WO 2010/076783 A1	1-9

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 7 / 0 1 6 9 4 7									
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01J1/02(2006.01)i											
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)) Int.Cl. G01J1/00-1/60, 5/00-5/62, 11/00, H01L27/16, 35/00-37/04											
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 <table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td>日本国実用新案公報</td><td>1922-1996年</td></tr> <tr><td>日本国公開実用新案公報</td><td>1971-2017年</td></tr> <tr><td>日本国実用新案登録公報</td><td>1996-2017年</td></tr> <tr><td>日本国登録実用新案公報</td><td>1994-2017年</td></tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2017年	日本国実用新案登録公報	1996-2017年	日本国登録実用新案公報	1994-2017年
日本国実用新案公報	1922-1996年										
日本国公開実用新案公報	1971-2017年										
日本国実用新案登録公報	1996-2017年										
日本国登録実用新案公報	1994-2017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) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII), IEEE Xplore											
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									
X A	河野 行雄, 低次元電子系の機能に基づくテラヘルツ波検出・分光・撮像デバイス, 応用物理学会誌「応用物理」, 2015.07.10, Vol. 84, No. 7, pp. 643-647、特に、2. 高配向CNTアレイによる室温THz検出素子、図1を参照。	8-9 1-7									
X A	Xiaowei He et al., Carbon Nanotube Terahertz Detector, Nano Lett., 2014.05.29, 14, 3953-3958, DOI:http://dx.doi.org/10.1021/nl5012678, 特に、Results.を参照。	8-9 1-7									
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> 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		の日の後に公表された文献									
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの		「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矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの									
「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		「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									
「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)		「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									
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		「&」同一パテントファミリー文献									
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願											
国際調査を完了した日 21.06.2017		国際調査報告の発送日 04.07.2017									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 小澤 瞬	2W 6003								
		電話番号 03-3581-1101	内線 3258								

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 7 / 0 1 6 9 4 7
C (続き) . 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
X A	Yukio Kawano, Terahertz Response of Carbon Nanotubes and Graphene, Journal of Physical Society of Japan, 2015.12.15, 84, 121010-1-9, DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.121010, 特に、2.2 CNT film device を参照。	8-9 1-7
P, X	D. Suzuki et al., A flexible and wearable terahertz scanner, NATURE PHOTONICS, 2016.12, Vol. 10, pp. 809-813, 全文	1-9
A	Yingxin Wang et al., Terahertz Response of Carbon Nanotube/Metal Heterojunctions, IRMMW-THz, 2013 38th International Conference, 2013.11.21, 978-1-4673-4717-4/13, DOI:http://dx.doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2013.6665664, 全文	1-9
A	WO 2011/024561 A1 (富士通株式会社) 2011.03.03, 段落[0071], [0099]-[0106], [0141], 図 7-8 & US 2012/0160291 A1, 段落[0100], [0125]-[0135], [0170], FIGs. 7-8 & JP 2011-50147 A & US 2015/0059823 A1 & EP 2472712 A1 & CN 102484436 A & KR 10-2012-0035193 A & CN 104467626 A	1-9
A	JP 2007-311442 A (株式会社日立製作所) 2007.11.29, 請求項 1, 段落[0005]-[0010] & US 2007/0284571 A1, claim1, [0008]-[0022]	1-9
A	WO 2016/039022 A1 (富士フイルム株式会社) 2016.03.17, 段落[0001]-[0149], 図 1-6 (ファミリーなし)	1-9
A	JP 3981738 B1 (国立大学法人長岡技術科学大学) 2007.09.26, 段落[0001]-[0021], 図 1-5 (ファミリーなし)	1-9
A	US 2011/0315880 A1 (NEMIROVSKY) 2011.12.29, 段落[0001]-[0124], Figs. 1-9 & WO 2010/076783 A1	1-9

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(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), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, 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, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ

(出願人による申告)平成26年度、国立研究開発法人科学技術振興機構、産学共創基礎基盤研究プログラム、「ナノカーボン材料を用いた新規テラヘルツ検出器の開発」、産業技術力強化法第19条の適用を受ける出願

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。