(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
2017年11月2日(02.11.2017)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2017/188438 A1

(51) 国際特許分類:
G01J 1/02 (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2017/016947

(22) 国際出願日： 2017年4月28日(28.04.2017)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2016-091298 2016年4月28日(28.04.2016) JP

(71) 出願人: 国立大学法人東京工業大学 (TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1528550 東京都目黒区大岡山２－１２－１ Tokyo (JP).

(72) 発明者: 河野 行雄(KAWANO Yukio); 〒1528550 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 Tokyo (JP). 鈴木 大地 (SUZUKI Daichi); 〒1528550 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 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人磯野国際特許商標事務所 (ISONO INTERNATIONAL PATENT OFFICE, P.C.); 〒1050001 東京都港区虎ノ門一丁目１番１８号 ヒューリック虎ノ門ビル 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, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,

(54) **Title:** TERAHERTZ WAVE DETECTION DEVICE AND ARRAY SENSOR

(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

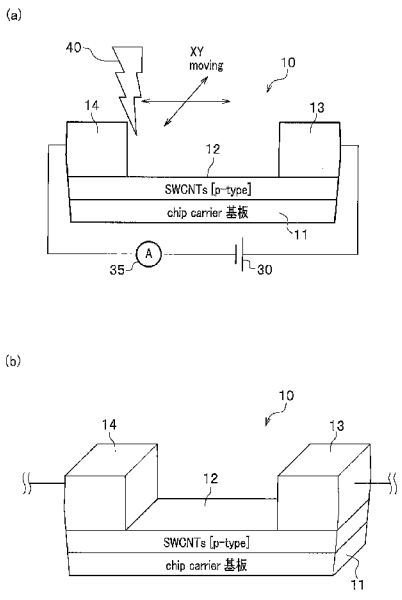


FIG. 1:
11 Chip carrier substrate
12 SWCNTs [p-type]

(57) Abstract: This terahertz wave detection device (10) is provided with the following: a low-dimensional electron system material (12) formed on a substrate (11); and a first electrode (13) and second electrode (14) disposed opposite one another on a two-dimensional plane of the low-dimensional electron system material (12), the first electrode (13) and the second electrode (14) being composed of metals having different thermal conductivities. An eight-element array sensor (20) is an array formed by arranging an alignment of eight terahertz wave detection devices (10). Alternatively, this terahertz wave detection device (10) is provided with a carbon nanotube film (12), and a first electrode (13) disposed on one side in the carbon nanotube film (12) and a second electrode (14) disposed on the other side therein, the first electrode (13) and the second electrode (14) having different thermal conductivities or the same thermal conductivity.

(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。

WO 2017/188438 A1

［続葉有］

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, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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))

明　細　書

発明の名称 ： テラヘルツ波検出装置およびアレイセンサ

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０．１～３０ＴＨｚ（１ＴＨｚ＝１０^{12}Ｈｚ）の領域、すなわち波長が０．０１ｍｍ～３ｍｍ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、オプティクスやフォトニクスによる光制御の低エネルギ極限でもあるため、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。

[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。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開２０１０－０６０２８４号公報

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)

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] 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。

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、ＡＩ、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。

[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、（ｃ）は３０ＴＨｚ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。

[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（ソース電極）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２９６．１Ｗ／ｍ・ＫのＡｕとＴｉとの組み合わせ、熱伝導率の差が４７．１Ｗ／ｍ・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１０ｎｍ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]２９ＴＨｚ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３０および電流計３５を接続する。図１（ａ）、（ｂ）では、バッテリ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-elementarray 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、１ｍｍ幅のテラヘルツ波検出素子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〉

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。

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〉

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Ｉ、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っ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。

[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（ソース電極）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ルムの長さ方向は１．５ｍｍ、第１電極１３の端部と第２電極１４の端部との間は２０ｍｍ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の順に感度が変化する。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

ースードレイン電流[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、０．１４ＴＨｚ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、１４ＴＨｚ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、３０ＴＨｚ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、単純なボロメトリック効果（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、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。

[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}～10^{-11}Ａ／Ｈｚ$^{1/2}$という優れた検出感度を得ることができた。

[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。

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（ソース電極）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。

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５

０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。

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。

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-elementarray 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ど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。

[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

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] 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、８×８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ハチの巣状の原子層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。本変形例では、グラフェン１２Ａがチップキャリア基板１１上に２次元配置されている。さらに、グラフェン１２Ａ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。

[0038] 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１０ＡのＴＨｚ波の波長帯の観点からも好ましい。

[0039] 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。

[0040] <テラヘルツ波検出素子１０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）１０の原理について説明する。

テラヘルツ波検出素子１０は光熱電効果を利用したものである

図１６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。

[0041] 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ＴＨｚ波４０が照射されたＩ部では接触しており、ＴＨｚ波４０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ＴＨｚ波４０が照射されたとする。

すると、Ｉ部はＴＨｚ波４０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_cの温度である。

[0042] 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_c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。

[0043] 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１２のＴＨｚ波４０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。

[0044] [数1]

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

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。

[0045] 式（１）より相対ゼーベック係数S_{AB}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。

[0046] 上述の関係を、図１（ａ）に示すテラヘルツ波検出素子１０に適用すると、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、単層カーボンナノチューブフィルム１２の照射箇所に近い電極（第１電極１３と第２電極１４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１３と第２電極１４の何れか他方）が相対的に低温となる。

[0047] ここで、テラヘルツ波検出素子１０のチップ化のため、第１電極１３と第２電極１４とを限りなく近付けると、第１電極１３と第２電極１４とが同種金属の場合には同じ熱伝導率なので、第１電極１３と第２電極１４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。

[0048] これに対して、第１電極１３と第２電極１４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１３と第２電極１４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１３と第２電極１４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１３と第２電極１４とが異種金属の場合の方が同種金属の場合よりもＴＨｚ波４０を検出できる可能性が高い。

つまり、第１電極１３と第２電極１４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４０の検出感度が高い。

[0049] <テラヘルツ波検出素子１０の第１電極１３と第２電極１４の各材料とＴＨｚ応答>

そこで、第１電極１３と第２電極１４の熱伝導率の差異により、テラヘルツ波検出素子１０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１３と第２電極１４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

[0050] 表２に、金属のＣｕ、Ａｕ、Ａｌ、Ｍｏ、Ｎｉ、Ｔｉを第１電極１３と第２電極１４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。

[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

[0051] 表１、表２より、これらの金属で熱伝導率の差が３８１．１W/m・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２９６．１W/m・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１３に熱伝導率３１８W/m・KのＡｕを用い、第２電極１４に熱伝導率２１．９W/m・KのＴｉを用いる。

[0052] これらの金属で熱伝導率の差が４７．１W/m・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１３に熱伝導率１３８W/m・KのＭｏを用い、第２電極１４に熱伝導率９０．９W/m・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１３と第２電極１４とに用いた場合である。

[0053] 図１７に、第１電極１３と第２電極１４とに、熱伝導率の差が２９６．１W/m・KのＡｕとＴｉとの組み合わせ、熱伝導率の差が４７．１W/m・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（W/m・K）（左縦軸）とＴＨｚ応答（μA）（右縦軸）を示す。熱伝導率の差（W/m・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。

[0054] 図１７の評価条件は、単層カーボンナノチューブフィルム１２のバンドルサイズ（バンドル径）１０nm、単層カーボンナノチューブフィルム１２の膜厚１００μm、第１電極１３と第２電極１４の各金属膜厚２０nm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１７より、熱伝導率の差が２９６．１W/m・K（左縦軸）のＡｕとＴｉとの組み合わせでＴＨｚ応答が約２μＡ（右縦軸）であった。また、熱伝導率の差が４７．１W/m・K（左縦軸）のＭｏとＮｉの組み合わせでＴＨｚ応答が約１．５μＡ（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０．５μＡ弱（右縦軸）であった。

図１７の結果から、第１電極１３と第２電極１４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（１００μm厚のカーボンナノチューブ膜、第１電極１３と第２電極１４の各金属膜厚 ２０nm）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] 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１０nm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、２９THz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２００nmであり、白丸がバンドル径約１０nm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２００nmの方がバンドル径約１０nm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５００nm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７００pW／√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

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。

[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

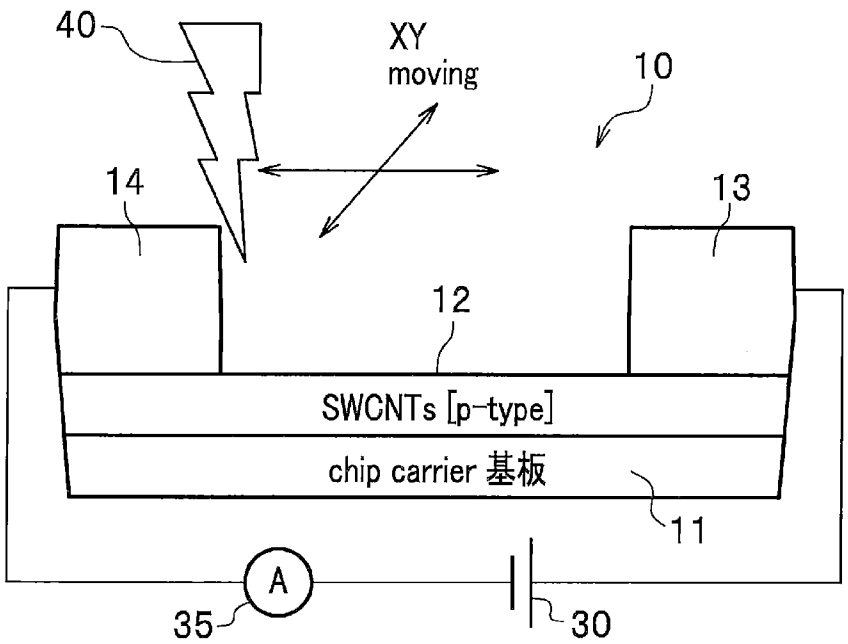
ことを特徴とする記載のテラヘルツ波検出装置。

[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

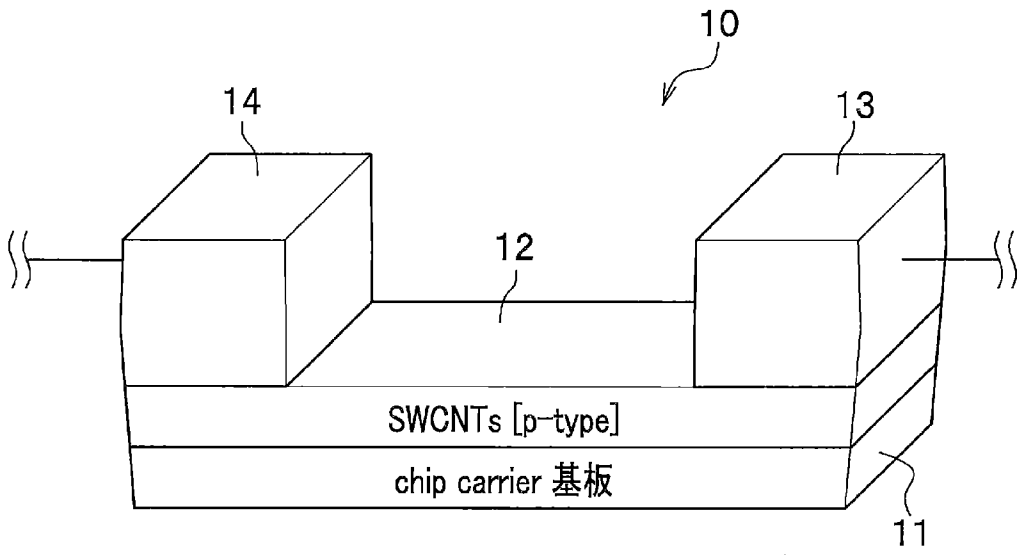
ことを特徴とする請求項１から請求項５または請求項７または請求項８のいずれか１項に記載のテラヘルツ波検出装置。

[図1]

(a)

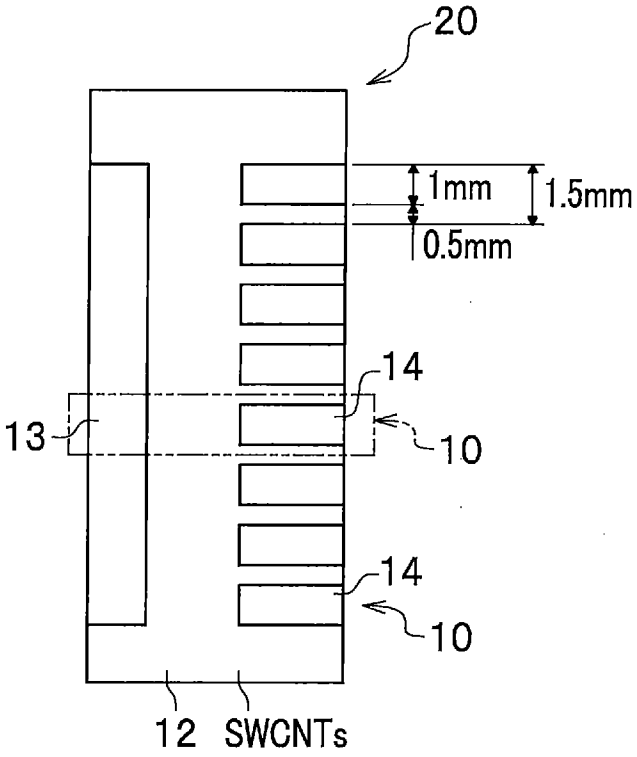

40
XY
moving
10
14
13
12
SWCNTs [p-type]
chip carrier 基板
11
A
35
30

(b)

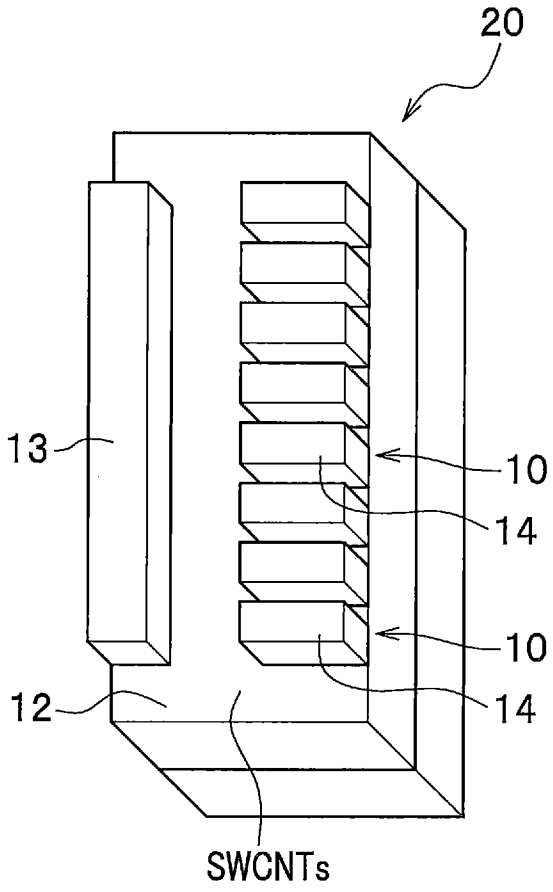

10
14
13
12
SWCNTs [p-type]
chip carrier 基板
11

[図2]

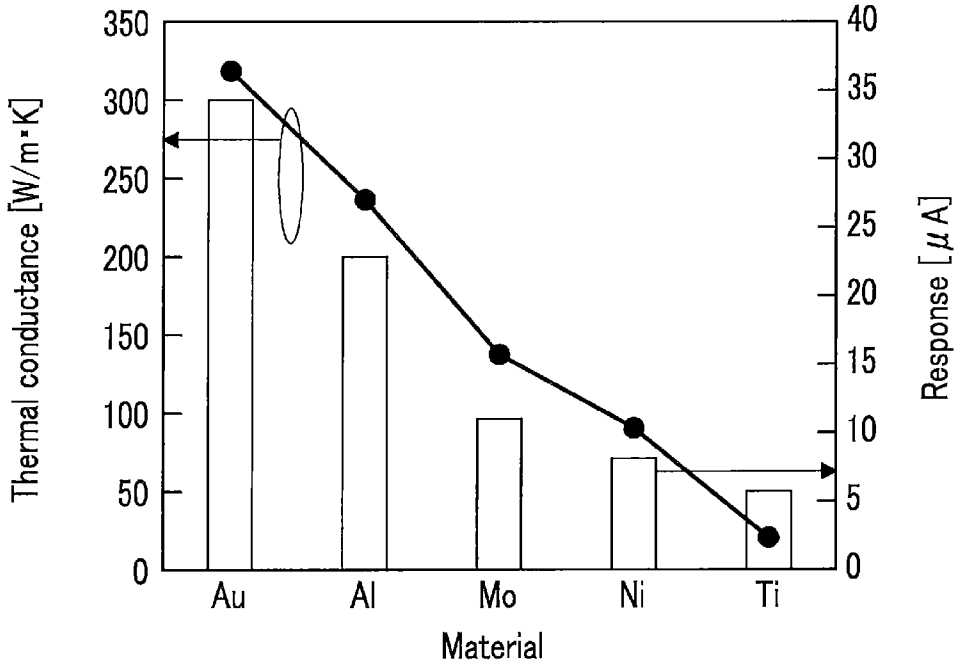
(a)


20
1mm
1.5mm
0.5mm
14
13
10
14
10
12
SWCNTs

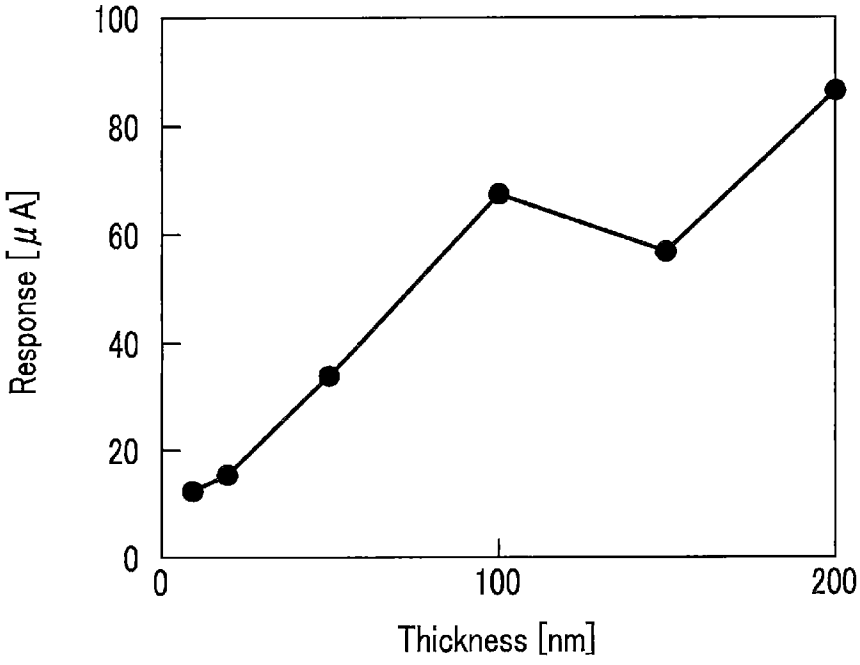
(b)


20
13
10
14
10
14
12
SWCNTs

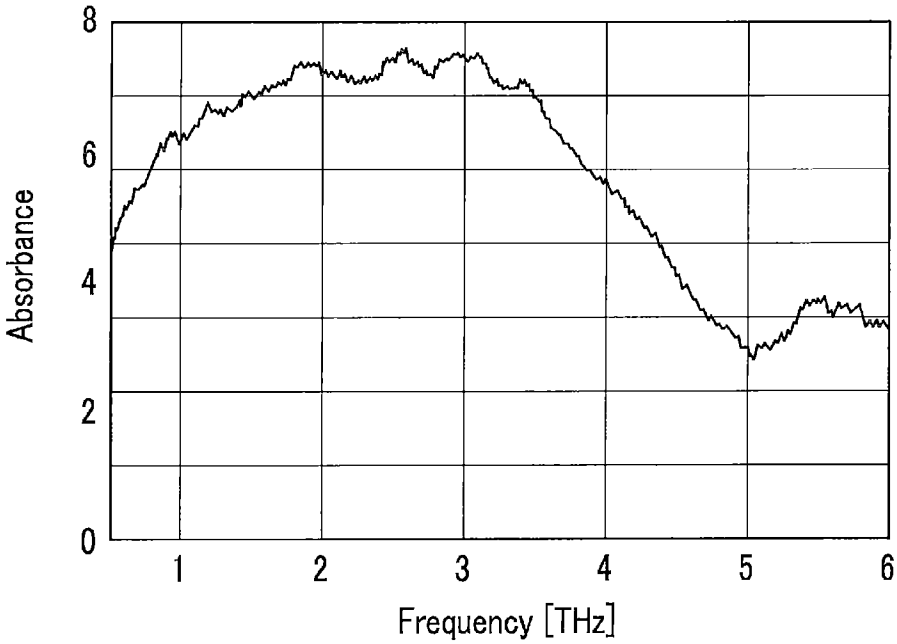
[図3]


Thermal conductance [W/m•K]
Response [μA]
350
300
250
200
150
100
50
0
40
35
30
25
20
15
10
5
0
Au
Al
Mo
Ni
Ti
Material

[図4]

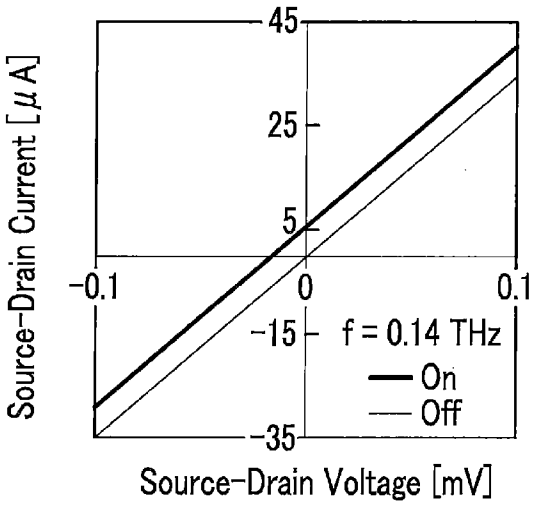

Response [μA]
100
80
60
40
20
0
0
100
200
Thickness [nm]

[図5]

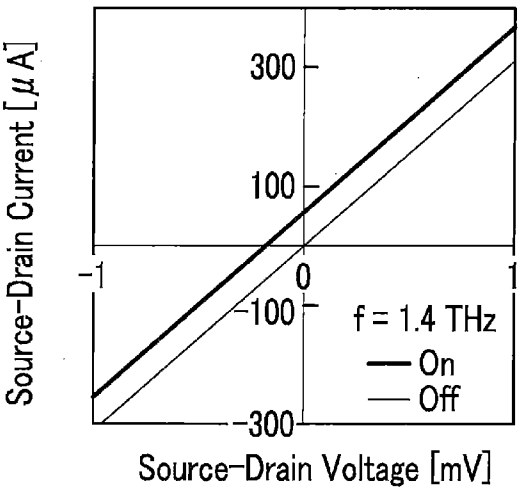


[図6]

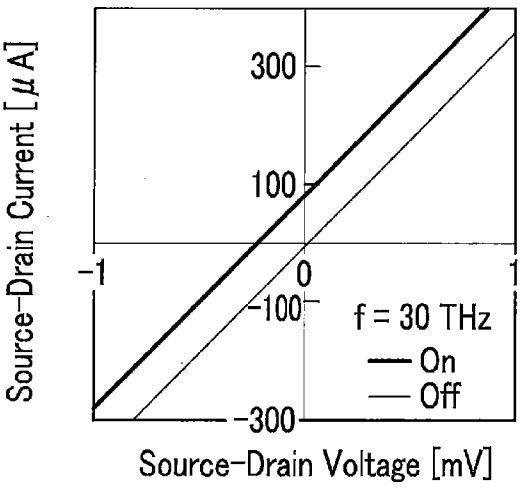
(a)


45
25
5
-15
-35
-0.1
0
0.1
f = 0.14 THz
On
Off
Source-Drain Current [μA]
Source-Drain Voltage [mV]

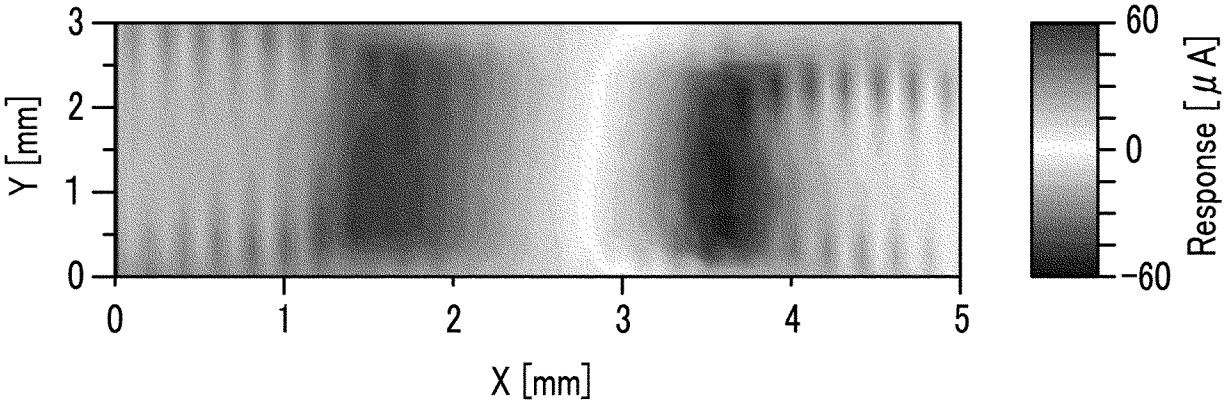
(b)


300
100
-100
-300
-1
0
1
f = 1.4 THz
On
Off
Source-Drain Current [μA]
Source-Drain Voltage [mV]

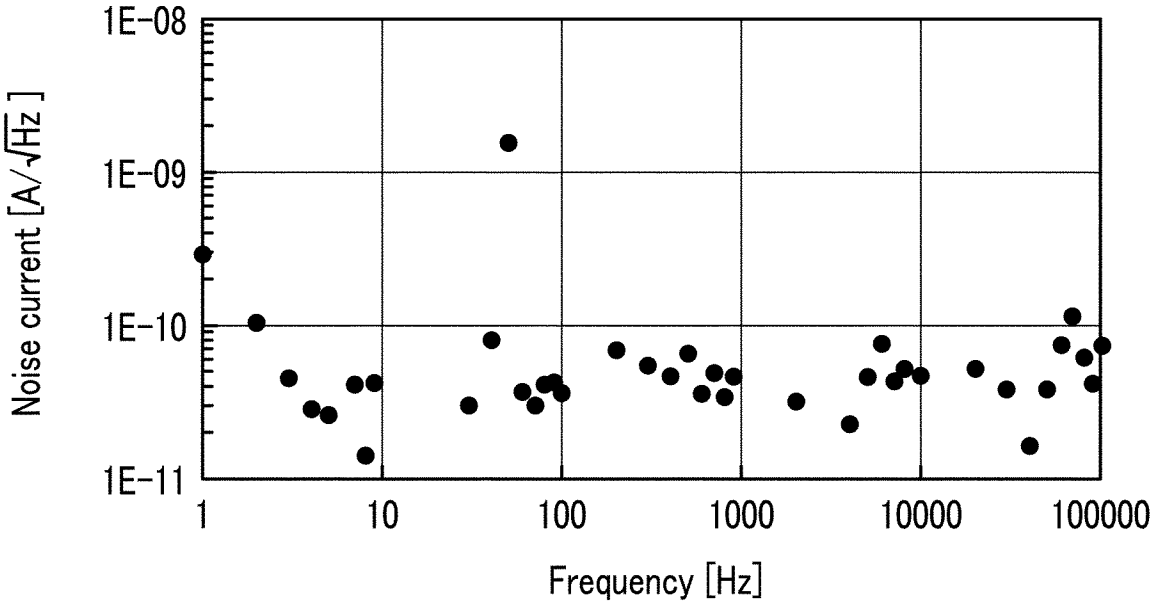
(c)


300
100
-100
-300
-1
0
1
f = 30 THz
On
Off
Source-Drain Current [μA]
Source-Drain Voltage [mV]

[図7]

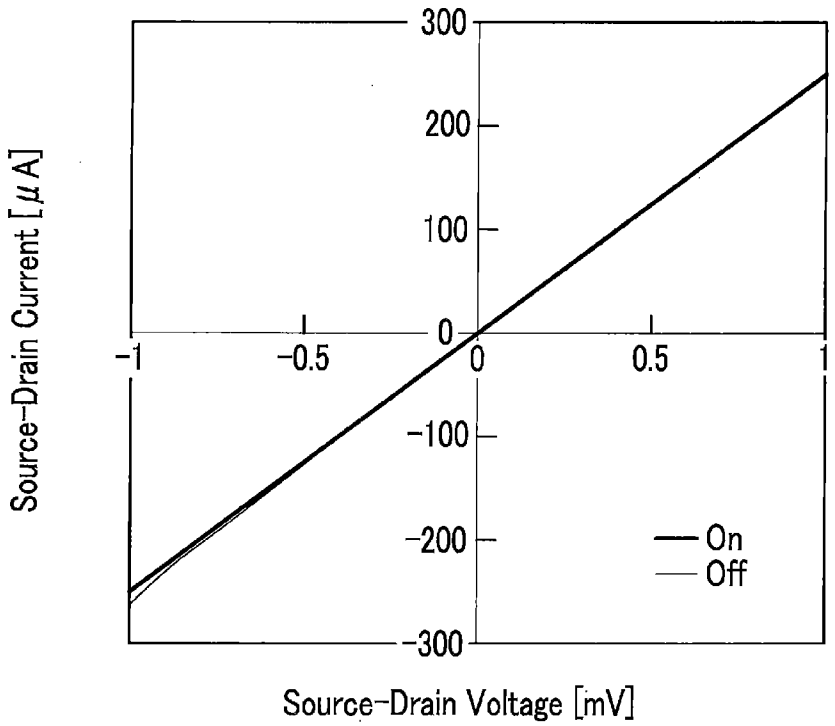

Y [mm]
X [mm]
Response [μA]
60
0
-60

[図8]

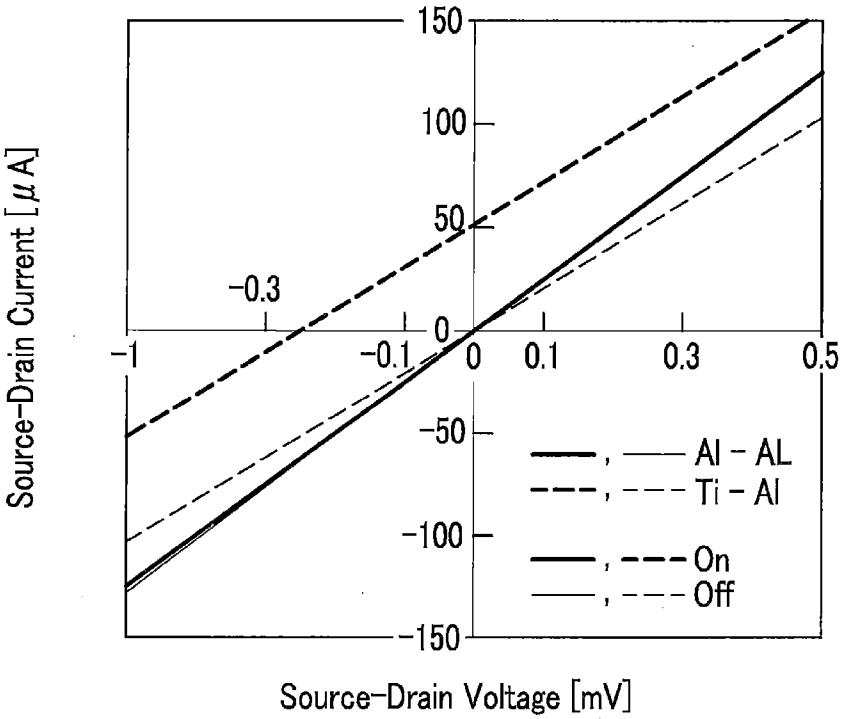

Noise current [A/√Hz]
Frequency [Hz]
1E-08
1E-09
1E-10
1E-11
1
10
100
1000
10000
100000

[図9]

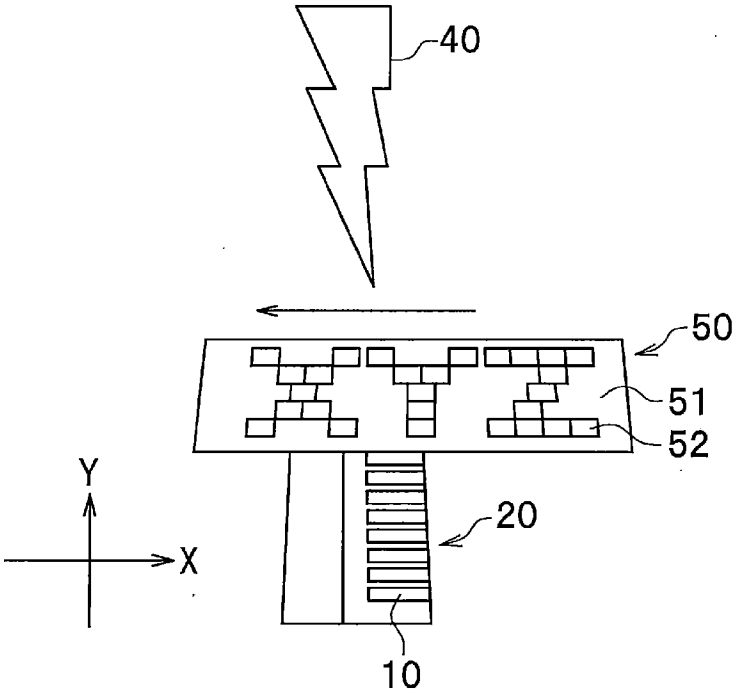
(a)


300
200
100
0
-100
-200
-300
-1
-0.5
0
0.5
1
Source-Drain Current [μA]
Source-Drain Voltage [mV]
On
Off

(b)

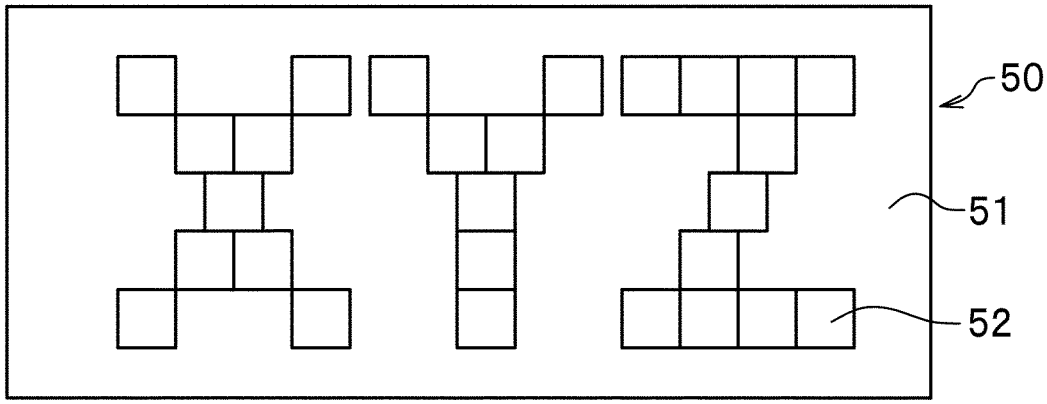

150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.3
-1
-0.1
0
0.1
0.3
0.5
Source-Drain Current [μA]
Source-Drain Voltage [mV]
Al - AL
Ti - Al
On
Off

[図10]

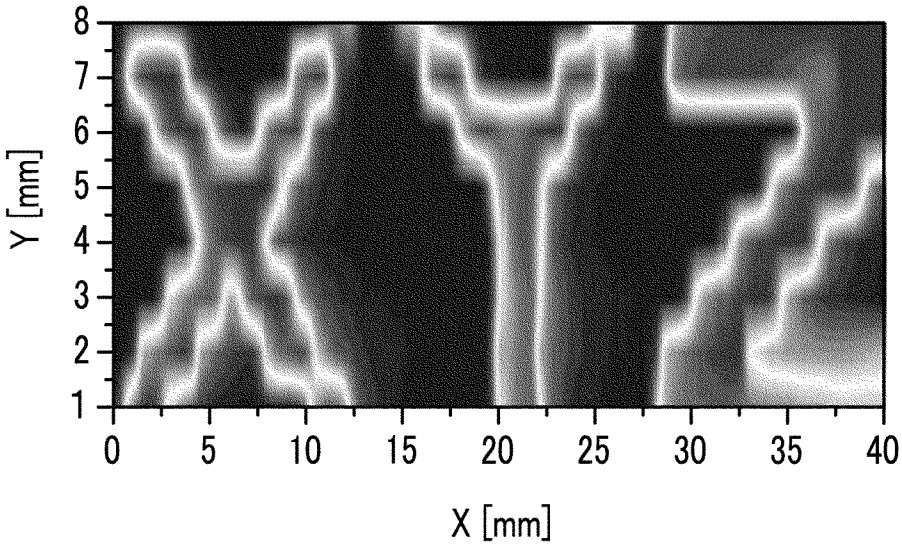


[図11]

(a)

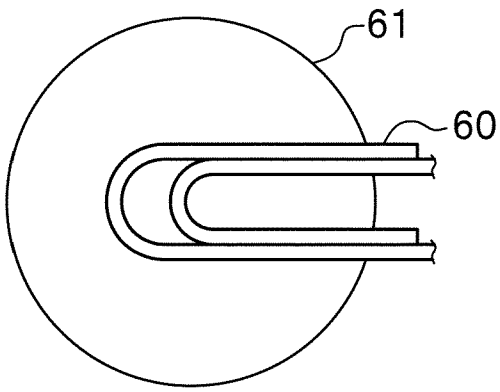


(b)

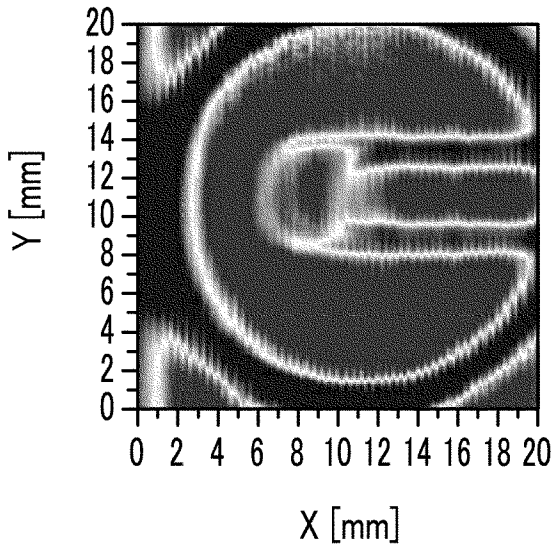


[図12]

(a)

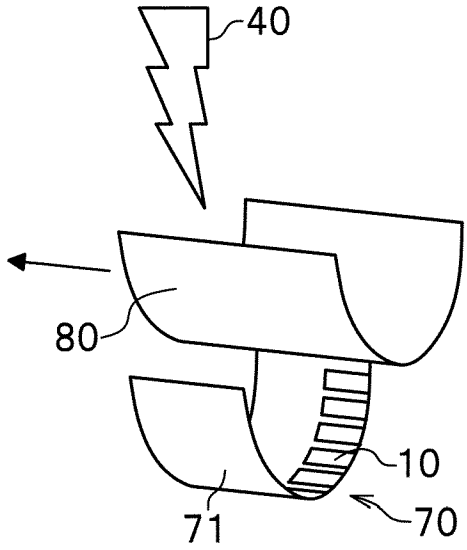


(b)

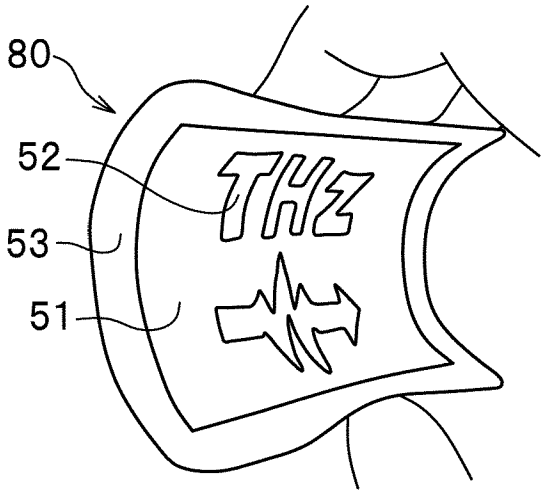


[図13]

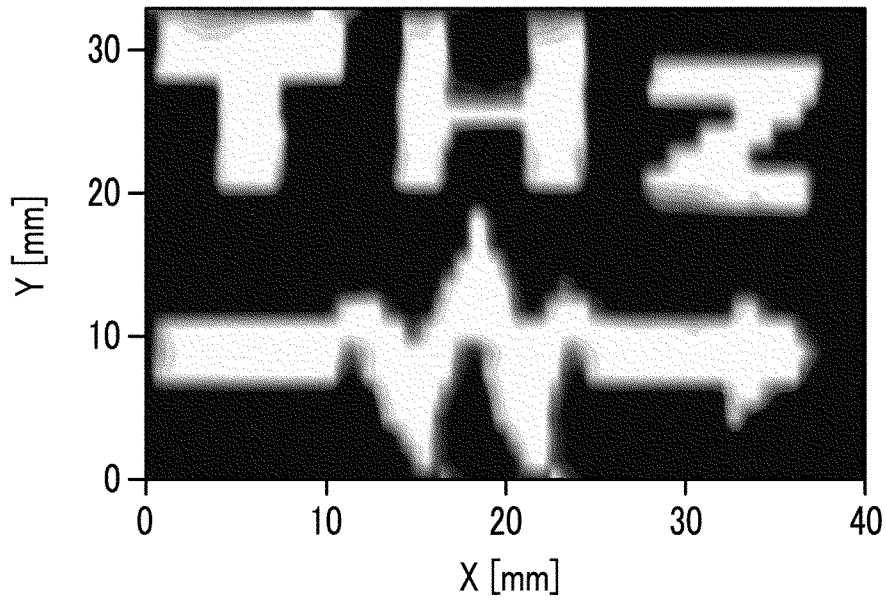
(a)



(b)

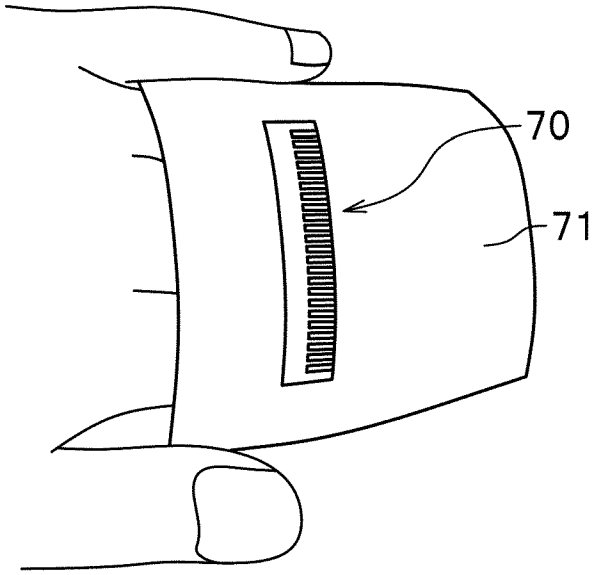


(c)

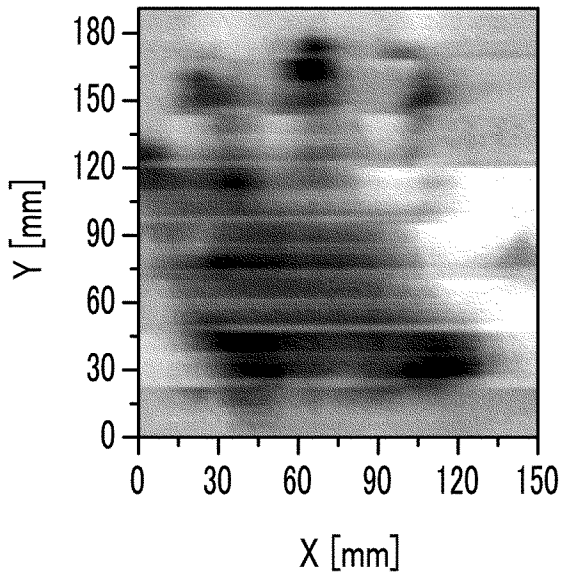


[図14]

(a)

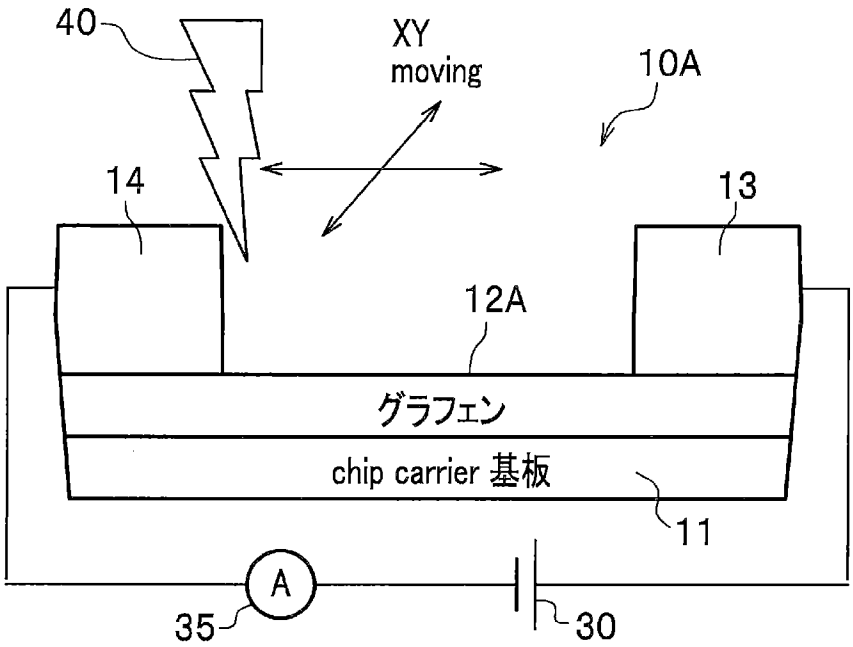


(b)

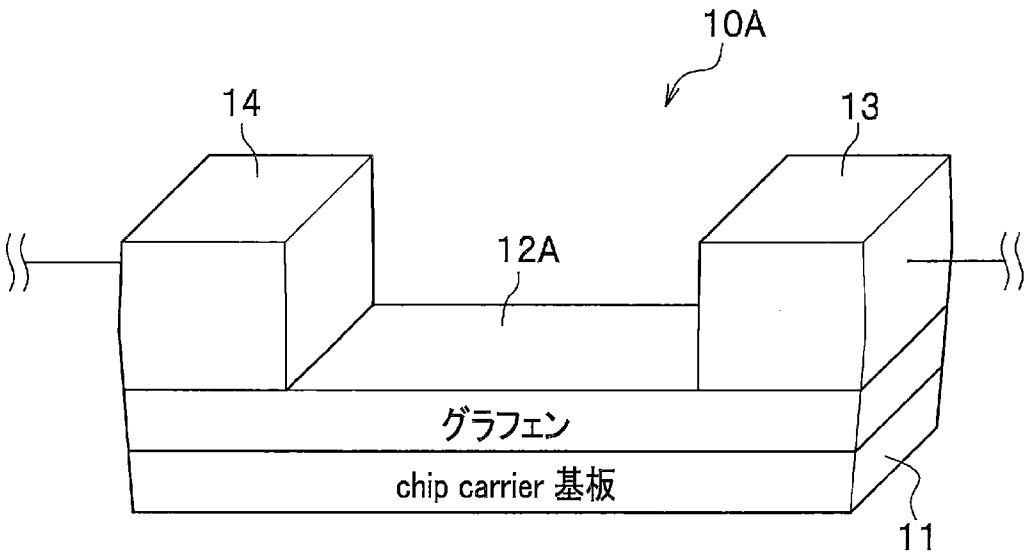


[図15]

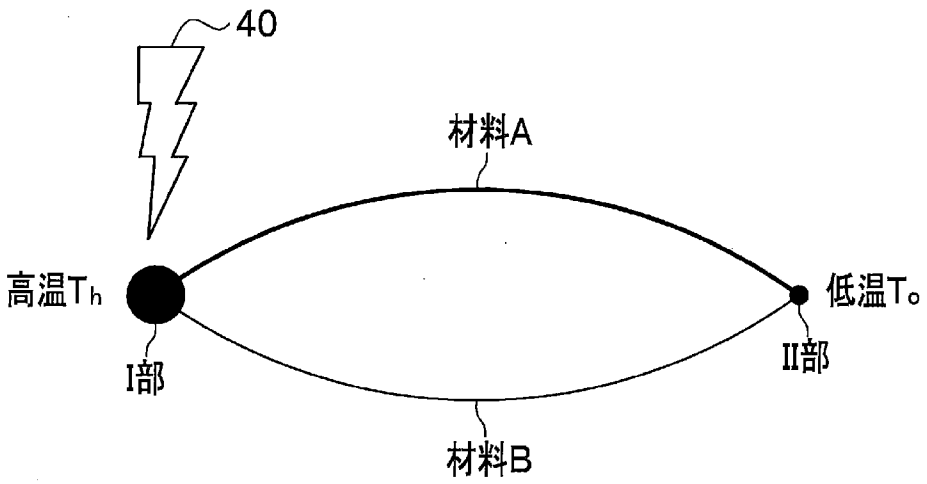
(a)


40
XY
moving
10A
14
13
12A
グラフェン
chip carrier 基板
11
A
35
30

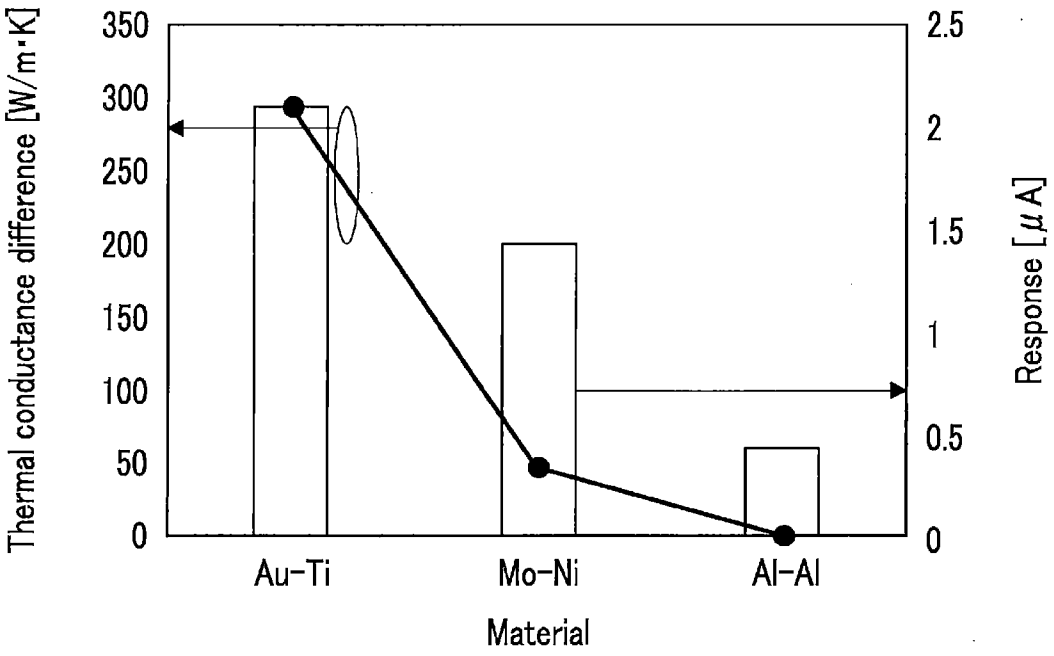
(b)


10A
14
13
12A
グラフェン
chip carrier 基板
11

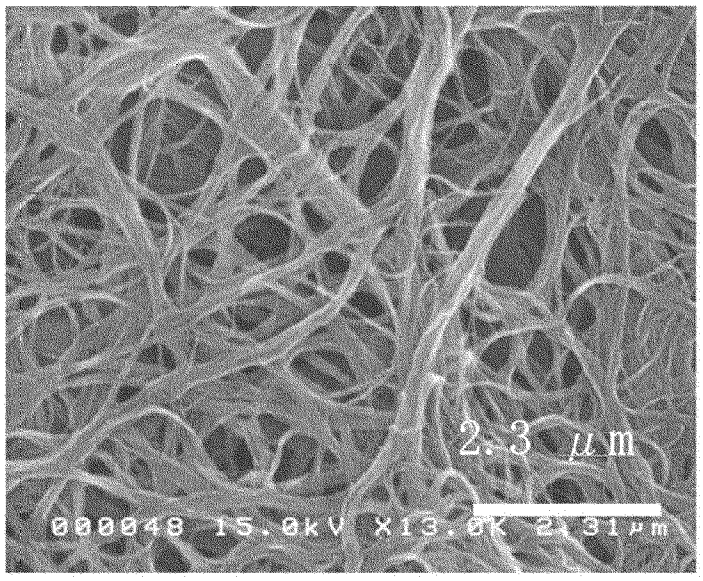
[図16]


40
材料A
高温Th
低温To
I部
II部
材料B

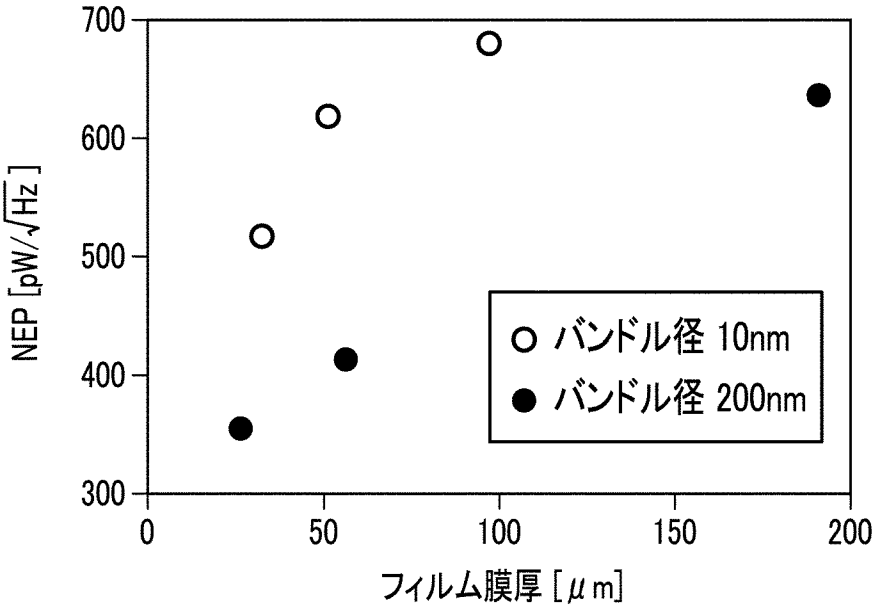
[図17]


Thermal conductance difference [W/m·K]
350
300
250
200
150
100
50
0
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Response [μA]
Au-Ti
Mo-Ni
Al-Al
Material

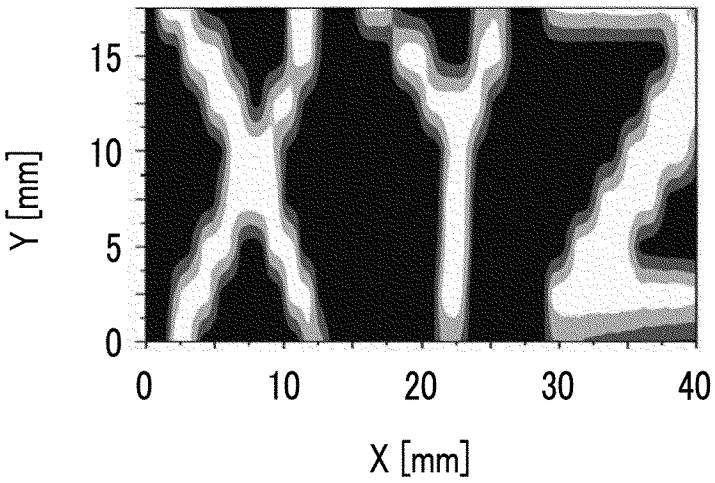
[図18]


2.3 μm
000048 15.0kV X13.0K 2.31μm

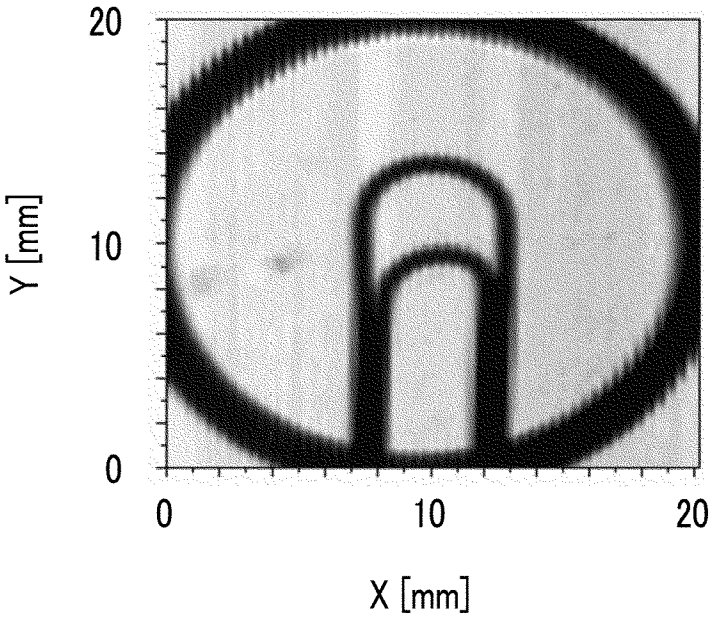
[図19]


700
600
500
400
300
0
50
100
150
200
NEP [pW/√Hz]
フィルム膜厚 [μm]
バンドル径 10nm
バンドル径 200nm

[図20]



[図21]



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

☒ 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	Date of mailing of the international search report
21 June 2017 (21.06.17)	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／ＪＰ２０１７／０１６９４７

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

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

☑　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
「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	国際調査報告の発送日
２１．０６．２０１７	０４．０７．２０１７

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
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）　２Ｗ　６００３
小澤　瞬
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２５８

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