

(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
2016年6月16日(16.06.2016)



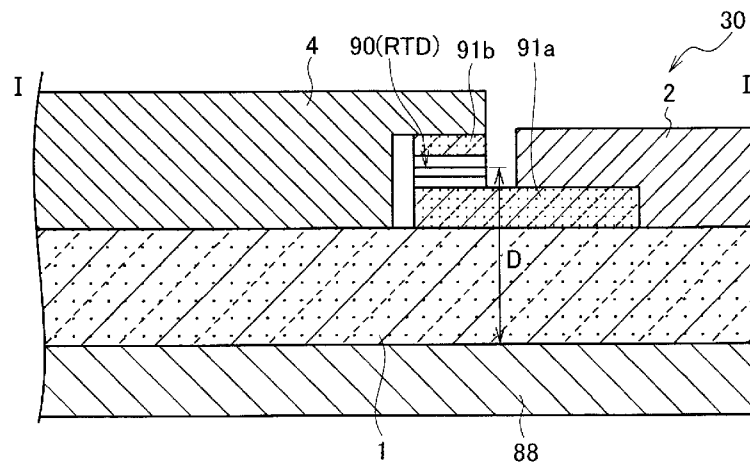
(10) 国際公開番号

WO 2016/092886 A1

- (51) 国際特許分類:
H03B 7/08 (2006.01) H01Q 9/16 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/066892
- (22) 国際出願日: 2015年6月11日(11.06.2015)
- (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 2014-247779 2014年12月8日(08.12.2014) JP
- (71) 出願人: ローム株式会社(ROHM CO., LTD.) [JP/JP];
〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町2-1番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 向井 俊和(MUKAI, Toshikazu); 〒6158585
京都府京都市右京区西院溝崎町2-1番地 ローム株式会社内 Kyoto (JP). 鶴田 一魁(TSURUDA, Kazusao); 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町2-1番地 ローム株式会社内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 三好 秀和, 外(MIYOSHI, Hidekazu et al.); 〒1050001 東京都港区虎ノ門一丁目2番8号 虎ノ門琴平タワー 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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, 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:
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: TERAHERTZ ELEMENT AND METHOD FOR PRODUCING SAME

(54) 発明の名称: テラヘルツ素子およびその製造方法



(57) Abstract: This terahertz element (30) is provided with: a semiconductor substrate (1); a first semiconductor layer (91a) that is arranged on the semiconductor substrate (1); an active element (90) that is formed by lamination on the first semiconductor layer (91a); a second electrode (2) that is arranged on the semiconductor substrate (1) and is connected to the first semiconductor layer (91a) and a cathode K of the active element (90); a first electrode (4) that is connected to an anode A of the active element (90) and is arranged on the semiconductor substrate (1) so as to face the second electrode (2); and a backside reflective metal layer (88) that is arranged on the back surface of the semiconductor substrate (1), said back surface being on the reverse side of the first semiconductor layer (91a)-side surface. The active element (90) forms a resonator between the second electrode (2) and the first electrode (4) and an electromagnetic wave is reflected by the backside reflective metal layer (88), so that this terahertz element has a surface light radiation pattern or a surface light reception pattern in a direction that is perpendicular to the semiconductor substrate (1).

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2016/092886 A1



テラヘルツ素子（３０）は、半導体基板（１）と、半導体基板（１）上に配置された第１の半導体層（９１ａ）と、第１の半導体層（９１ａ）上に積層化形成された能動素子（９０）と、第１の半導体層（９１ａ）に接続されて能動素子（９０）のカソードＫに接続され、かつ半導体基板（１）上に配置された第２の電極（２）と、能動素子（９０）のアノードＡに接続され、かつ半導体基板（１）上に第２の電極（２）に対向して配置された第１の電極（４）と、第１の半導体層（９１ａ）に対向する半導体基板（１）の裏面に配置された裏面反射体金属層（８８）とを備え、能動素子（９０）は、第２の電極（２）と第１の電極（４）間において共振器を形成し、電磁波は、裏面反射体金属層（８８）に反射されて、半導体基板（１）に対して垂直方向の面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有する。

明 細 書

発明の名称： テラヘルツ素子およびその製造方法

技術分野

[0001] 本実施の形態は、テラヘルツ素子およびその製造方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、トランジスタなどの電子デバイスの微細化が進み、その大きさがナノサイズになってきたため、量子効果と呼ばれる新しい現象が観測されるようになってきている。そして、この量子効果を利用した超高速デバイスや新機能デバイスの実現を目指した開発が進められている。そのような環境の中で、特に、テラヘルツ帯と呼ばれる、周波数が 0.1 THz (10^{11} Hz) $\sim 10\text{ THz}$ の周波数領域を利用して大容量通信や情報処理、あるいはイメージングや計測などを行う試みが行われている。この周波数領域は、光と電波の中間の未開拓領域であり、この周波数帯で動作するデバイスが実現されれば、上述したイメージング、大容量通信・情報処理のほか、物性、天文、生物などのさまざまな分野における計測など、多くの用途に利用されることが期待されている。

[0003] テラヘルツ帯の周波数の高周波電磁波を発振する素子としては、共鳴トンネルダイオード (RTD: Resonant Tunneling Diode) と微細スロットアンテナを集積する構造のものが知られている。また、スロットアンテナの両端には、金属と絶縁体が積層され、絶縁体を上下の電極金属によって挟み込み、高周波的に短絡したMIM (Metal Insulator Metal) 構造を持つ素子が開示されている。

[0004] 一方、テラヘルツ検出素子としては、ショットキーバリアダイオード (SBD: Schottky Barrier Diode) が良く知られているが、これはテラヘルツ発振素子としては使えない。

[0005] 一方、RTDは、発振素子としても検出素子としても利用できるが、テラヘルツ発振素子として用いる場合には、寄生発振を抑制するためにB_iなど

の抵抗体をアノード・カソード間に接続する。

[0006] また、共鳴トンネルダイオードとSBDを集積化した低雑音のテラヘルツ発振検出素子も開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：特開2007-124250号公報

特許文献2：特開2012-217107号公報

非特許文献

[0008] 非特許文献1：T.Wei and S.Stapleton, “Equivalent circuit and capacitance of double barrier resonant tunneling diode”, J.Appl.Phys. 73(2), 15 January 1993, pp.829-834.

非特許文献2：C.Bayram, Z.Vashaei, and M. Razeghi, “Reliability in room-temperature negative differential resistance characteristics of low-aluminum content AlGaIn/GaN double-barrier resonant tunneling diodes”, Appl. Phys. Lett. 97, 181109(2010).

非特許文献3：Lin’ an Yang, Hanbing He, Wei Mao, and Yue Hao, “Quantitative analysis of the trapping effect on terahertz AlGaIn/GaN resonant tunneling diode”, Appl. Phys. Lett. 99, 153501(2011).

非特許文献4：Z. Suet, D.J.Paul, J. Zhang and S.G.Turner, “Si/SiGe n-type resonant tunneling diodes fabricated using in situ hydrogen cleaning”, Appl. Phys. Lett. 90, 203501(2007).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0009] 本実施の形態は、面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有するテラヘルツ素子およびその製造方法を提供する。

課題を解決するための手段

[0010] 本実施の形態の一態様によれば、半導体基板と、前記半導体基板上に配置

された第1の半導体層と、前記第1の半導体層上に積層化形成された能動素子と、前記第1の半導体層に接続されて前記能動素子の主電極の一方に接続され、かつ前記半導体基板上に配置された第2の電極と、前記能動素子の主電極の他方に接続され、かつ前記半導体基板上に前記第2の電極に対向して配置された第1の電極と、前記第1の半導体層に対向する前記半導体基板の裏面に配置された裏面反射体金属層とを備え、前記能動素子は、前記第2の電極と前記第1の電極間において共振器を形成し、電磁波は、前記裏面反射体金属層に反射されて、前記半導体基板に対して垂直方向の面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有するテラヘルツ素子が提供される。

[0011] 本実施の形態の他の態様によれば、半導体基板と、前記半導体基板上に配置された第1の半導体層と、前記第1の半導体層をパターニングして形成された第1カソード領域および第2カソード領域と、前記第1カソード領域に第1カソードが接続され、第1アノードが前記第2カソード領域と接続された第1共鳴トンネルダイオードと、前記第2カソード領域に第2カソードが接続され、第2アノードが前記第1カソード領域と接続された第2共鳴トンネルダイオードと、前記第1の半導体層に対向する前記半導体基板の裏面に配置された裏面反射体金属層とを備え、前記第1共鳴トンネルダイオードが負性抵抗発振状態にバイアスされるとき、前記第2共鳴トンネルダイオードは抵抗状態にバイアスされ、電磁波は、前記裏面反射体金属層に反射されて、前記半導体基板に対して垂直方向の面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有するテラヘルツ素子が提供される。

[0012] 本実施の形態の他の態様によれば、半導体基板上に第1の半導体層を形成する工程と、前記第1の半導体層をパターニングして第1カソード領域および第2カソード領域を形成する工程と、前記第1カソード領域に第1カソードが接続され、第1アノードが前記第2カソード領域と接続される第1共鳴トンネルダイオードを形成する工程と、前記第2カソード領域に第2カソードが接続され、第2アノードが前記第1カソード領域と接続された第2共鳴トンネルダイオードを形成する工程と、前記第1カソード領域上に第2アノ

ード電極と共通接続される第1カソード電極を形成する工程と、前記第2カソード領域上に第1アノード電極と共通接続される第2カソード電極を形成する工程と、前記第1の半導体層に対向する前記半導体基板の裏面に裏面反射体金属層を形成する工程とを有するテラヘルツ素子の製造方法が提供される。

発明の効果

[0013] 本実施の形態によれば、面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有するテラヘルツ素子およびその製造方法を提供することができる。

図面の簡単な説明

- [0014] [図1]第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の模式的平面パターン構成図。
[図2]図1のI-I線に沿う模式的断面構造図。
[図3](a)第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子に適用可能な能動素子の模式的断面構造図、(b)第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子に適用可能な能動素子の別の模式的断面構造図。
[図4]第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の詳細な平面パターン構成図。
[図5]図4における寄生素子パラメータの説明図。
[図6]第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の等価回路構成図。
[図7]第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子のデバイス表面顕微鏡写真例。
[図8]図7の拡大されたデバイス表面顕微鏡写真例。
[図9]第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の発振周波数特性。
[図10](a)ダイポールアンテナ計算モデルに用いた第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の模式的鳥瞰図、(b)フィード線およびパッド電極を含むダイポールアンテナ計算モデルに用いた第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の模式的鳥瞰図。
[図11]第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の放射パターンであって、(a)発振周波数300GHzにおけるシミュレーション結果、(b)発振周波数320GHzにおけるシミュレーション結果。
[図12]第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子に適用可能なRTD1の非対

称電流電圧特性例。

[図13]第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子の等価回路構成図。

[図14]第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子に適用可能なRTD1の非対称電流電圧特性例。

[図15]第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子に適用可能なRTD2の非対称電流電圧特性例。

[図16]第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子において、RTD1とRTD2の合成抵抗から見積もった電流電圧特性例。

[図17]第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子の配線構造の模式的平面構成図。

[図18]図17のI-I'線に沿う模式的断面構造図。

[図19]図17のJ-J'線に沿う模式的断面構造図。

[図20]図17のK-K'線に沿う模式的断面構造図。

[図21]第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子に適用可能なRTD1・RTD2の同時工程で形成可能な模式的断面構造図。

[図22]ダイポールアンテナを備える第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子の模式的平面パターン構成図。

発明を実施するための形態

[0015] 次に、図面を参照して、本実施の形態を説明する。以下において、同じブロックまたは要素には同じ符号を付して説明の重複を避け、説明を簡略にする。図面は模式的なものであり、現実のものとは異なることに留意すべきである。また、図面相互間においても互いの寸法の関係や比率が異なる部分が含まれていることはもちろんである。

[0016] 以下に示す実施の形態は、技術的思想を具体化するための装置や方法を例示するものであって、各構成部品の配置などを下記のものに特定するものではない。この実施の形態は、特許請求の範囲において、種々の変更を加えることができる。

[0017] [第1の実施の形態]

第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 30 の模式的平面パターン構成は、図 1 に示すように表され、図 1 の I-I 線に沿う模式的断面構造は、図 2 に示すように表される。

[0018] また、第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 30 に適用可能な能動素子 90 の模式的断面構造は、図 3 (a) に示すように表され、別の模式的断面構造は、図 3 (b) に示すように表される。能動素子 90 の詳細については後述する。

[0019] (テラヘルツ発振素子)

テラヘルツ発振素子として動作可能な第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 30 は、図 1 ~ 図 2 に示すように、半導体基板 1 と、半導体基板 1 上に配置された第 1 の半導体層 91 a と、第 1 の半導体層 91 a 上に積層化形成された能動素子 90 と、第 1 の半導体層 91 a に接続されて能動素子 90 の主電極の一方に接続され、かつ半導体基板 1 上に配置された第 2 の電極 2 と、能動素子 90 の主電極の他方に接続され、かつ半導体基板 1 上に第 2 の電極 2 に対向して配置された第 1 の電極 4 と、第 1 の半導体層 91 a に対向する半導体基板 1 の裏面に配置された裏面反射体金属層 88 とを備える。ここで、能動素子 90 は、第 2 の電極 2 と第 1 の電極 4 間において共振器を形成し、放射された電磁波は、裏面反射体金属層 88 に反射されて、半導体基板 1 に対して垂直方向の面発光放射パターンを有する。

[0020] また、第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 30 において、能動素子 90 と半導体基板 1 に接する裏面反射体金属層 88 表面との距離 D (図 2 に示す) は、発振波長 λ の $1/4$ 倍であることが望ましい。半導体基板 1 に対して垂直方向の良好な面発光放射パターンを効率的に得るためである。

[0021] また、第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 30 は、図 1 に示すように、第 1 の電極 4 および第 2 の電極 2 は、ダイポールアンテナを備える。

[0022] 第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子の詳細な平面パターン構成は、図 4 に示すように表され、図 4 における寄生素子パラメータの説明は、図 5 に示すように表される。

[0023] また、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の等価回路構成は、図6に示すように表される。

[0024] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図4・図5に示すように、ダイポールアンテナに接続された第1フィード線40Fおよび第2フィード線20Fと、第1フィード線40Fおよび第2フィード線20Fに接続された第1パッド電極40Pおよび第2パッド電極20Pとを備えていても良い。

[0025] また、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図4・図5に示すように、第1パッド電極40Pと第2パッド電極20Pとの間に接続されたMIMリフレクタ50を備えていても良い。パッド電極20P・40Pの一部を絶縁層を介して積層化することで、MIMリフレクタ50が形成可能である。

[0026] また、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図1・図4・図5に示すように、第1の電極4と第2の電極2間に接続された抵抗素子114を備えていても良い。ここで、抵抗素子114は、金属配線を備えていても良い。例えば、金属配線は、ビスマス(Bi)、ニッケル(Ni)、チタン(Ti)、若しくは白金(Pt)を備えていても良い。

[0027] また、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30において、能動素子90は、マルチチップ化して配置されていても良い。

[0028] また、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30において、能動素子90は、セルアレイ化して配置されていても良い。

[0029] 能動素子90としてはRTDが代表的なものであるが、これ以外のダイオードやトランジスタでも構成可能なものである。その他の能動素子としては、例えば、タンネット(TUNNETT: Tunnel Transit Time)ダイオード、インパット(IMPAT: Impact Ionization Avalanche Transit Time)ダイオード、GaAs系電界効果トランジスタ(FET: Field Effect Transistor)、GaN系FET、高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(H

B T :Heterojunction Bipolar Transistor) などを適用することもできる。

[0030] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、能動素子90として、RTDの負性抵抗を用いたテラヘルツ発振素子若しくはテラヘルツ検出素子を構成可能である。

[0031] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、ダイポール型のアンテナ部を構成する第1の電極4および第2の電極2と、伝送線部を構成するパッド電極40P・20Pと、接続部を構成するフィード線40F・20Fと、裏面反射体金属面を形成する裏面反射体金属層88を備えている。

[0032] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、素子の放射パターンを改善し、面発光型の放射パターンを得ることができる。

[0033] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30において、裏面に金属がない場合、これを例えばテフロン（登録商標）基板上に実装した場合、テフロンの誘電率、厚さ、配置位置の影響を受けて、放射パターンが変化する。第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、半導体基板1の裏面に金属面を設けることで、放射パターンを改善すると同時に、実装する場所による放射パターンへの影響を低減することができる。

[0034] 反射面を形成する裏面反射体金属層88を備えることで、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30を検出素子として動作させる場合にも同様の効果がある。すなわち、半導体基板1の裏面に金属面を設けることで、受信波パターンを改善すると同時に、実装する場所による受信波パターンへの影響を低減することができる。

[0035] また、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30において、実用化上でCANパッケージ（金属）内に封止する場合においても素子の裏面に金属を形成しておくことで、放射パターンの変化を抑えることができる。

[0036] さらに詳細には、第1の電極4・第2の電極2は、例えば、Au/Pd/Ti若しくはAu/Tiを備えていても良い。

[0037] また、裏面反射体金属層88にも、例えば、Au/Ti若しくはAu/Pd/Tiを適用可能である。

[0038] (テラヘルツ検出素子)

テラヘルツ検出素子として動作可能な第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図1～図2に示すように、半導体基板1と、半導体基板1上に配置された第1の半導体層91aと、第1の半導体層91a上に積層化形成された能動素子90と、第1の半導体層91aに接続されて能動素子90の主電極の一方に接続され、かつ半導体基板1上に配置された第2の電極2と、能動素子90の主電極の他方に接続され、かつ半導体基板1上に第2の電極2に対向して配置された第1の電極4と、第1の半導体層91aに対向する半導体基板1の裏面に配置された裏面反射体金属層88とを備える。ここで、能動素子90は、第2の電極2と第1の電極4間において共振器を形成し、受信した電磁波は、裏面反射体金属層88に反射されて、半導体基板1に対して垂直方向の面受光パターンを有する。

[0039] また、能動素子90と半導体基板1に接する裏面反射体金属層88表面との距離D(図2に示す)は、波長 λ の $1/4$ 倍であることが望ましい。半導体基板1に対して垂直方向の良好な面受光パターンを効率的に得るためである。テラヘルツ検出素子のその他の構成は、テラヘルツ発振素子と同様である。

[0040] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、素子の受信波パターンを改善し、面受信型の受信波パターンを得ることもできる。

[0041] (並列抵抗)

能動素子90としてRTDを有するテラヘルツ素子30は、RTDの負性抵抗に起因する外部回路との寄生発振によって、テラヘルツ帯での本発振を規制される。寄生発振を抑制する方法として、図1・図4・図5に示すように、RTDに対して並列にビスマスからなる抵抗素子114を配置し、外部回路に対して負性抵抗が見えないようにすることができる。

[0042] RTDの抵抗 R_{RTD} に対して、抵抗素子114の抵抗 R_{Bi} は、RTDのアノード・カソード間に並列に接続される。結果として、RTDのアノードA・カソードK間の合成抵抗 R_t は、RTDの抵抗 R_{RTD} とビスマスからなる抵抗素子

1 1 4 の抵抗 R_{Bi} の並列接続された抵抗 $R_{RTD} \cdot R_{Bi} / (R_{RTD} + R_{Bi})$ で表される。ビスマスからなる抵抗素子 1 1 4 の抵抗 R_{Bi} は、図 5 における並列抵抗 R_p に相当している。

[0043] R_{TD} の抵抗 R_{RTD} に対して、ビスマスからなる抵抗素子 1 1 4 の抵抗 R_{Bi} を並列に配置することによって、負性抵抗 ($-\Delta V / \Delta I$) の発生が、相対的に大きな電圧および相対的に大きな電流側にシフトし、寄生発振の抑制効果がある。

[0044] 負性抵抗領域において外部回路との間に寄生発振が生じてしまうため、 R_{TD} に並列に抵抗を配置することで、外部回路から負性抵抗を見えにくくする。こうすると、本発振以外の寄生発振を抑えることができる。

[0045] そのための要求条件は、合成抵抗 $R_t \geq 0$ より、

$$R_{Bi} \leq \Delta V / \Delta I \quad (= R_{RTD}) \quad (1)$$

で表される。

[0046] 抵抗値の比較的高い B_i や半導体プロセスでも一般的に使われる N_i 、 T_i 、 P_t 等のメタルで配線を行い、寄生発振を抑制して本発振を得ている。第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 においては、寄生発振を抑制するための抵抗配線をダイポールアンテナ部に直接接続している。

[0047] (等価回路構成)

第 1 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 において、並列抵抗 R_p が有る場合の簡易的な等価回路構成は、図 6 に示すように表される。図 6 において、 $L_1 \cdot L_2$ は、フィード線 4 0 F・2 0 F に相当する部分のインダクタンスに相当している。また、 C_p は、 R_{TD} 部の寄生容量を示す。また、 R_{TD} 部の R_{TD} は、ダイオード表示で示されている。また、アンテナ部は、アンテナインダクタンス L_A とアンテナ抵抗 R_A の並列回路で表されている。また、 C_M は、MIMリフレクタ 5 0 のキャパシタに対応している。また、アノード A・カソード K 間には、コネクタや駆動回路等の外部回路が接続される

。

[0048] (外部回路との寄生発振)

R T Dを用いてテラヘルツ波の発振器を作製しようとした場合、R T Dから見て回路的に外部に当たる部分との間で寄生発振が発生する。外部回路に対して、R T Dの負性抵抗が見えていて、R F基本発振する共振回路よりも、外部と低周波で発振する方がQ値が高く、発振しやすい条件となる。そのため、外部回路との寄生発振が顕著に生じる。

[0049] (並列抵抗)

一般的に寄生発振を抑える方法として、図1・図4・図5・図6に示すように、R T Dに対して並列抵抗 R_p を配置してやることで、寄生発振のQ値を低下させて発振を抑制し、効率よく本発振側へ電力をまわしてやるといった工夫がなされる。

[0050] 並列抵抗 R_p を配置して、外部から負性抵抗が見えなくなると、外部と低周波で発振する寄生発振のQが低くなり、R F基本発振よりも発振しにくくなる。そのため、本来のR F基本発振がおきる。

[0051] (Q値)

Q値を簡単に説明すると、発振状態がどれだけ安定して存在しているかを示す指標である。並列共振回路を考えたときのQ値を示す式を以下に記す。

[0052]

$$Q = 1 / R_t \cdot \sqrt{L A / C_p} \quad (2)$$

並列抵抗 R_p を配置することは、合成抵抗 R_t を大きくすることに相当する。

[0053] 仮にこの(2)式から、上に示すような寄生発振のQ値を考えると、並列抵抗 R_p を配置することは、 R_t を大きくすることに相当し、結果としてQ値の減少が得られる。並列抵抗 R_p を配置することによって、寄生発振を抑制可能であることがわかる。

[0054] (R T Dのデバイス表面顕微鏡写真例)

第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30のデバイス表面顕微鏡写真例

は、図7に示すように表され、図7の拡大されたデバイス表面顕微鏡写真例は、図8に示すように表される。図7・図8の例は、図4の第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子の詳細な平面パターン構成例に対応している。尚、図7・図8では、MIMリフレクタ50が形成されていない例が示されているが、図4と同様に、パッド電極20P・40Pの一部を絶縁層を介して積層化することで、MIMリフレクタ50が形成可能である。

[0055] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、相対的に抵抗値の高いBiや半導体プロセスで一般的に使用されるTi、Pt、Ni等のメタルを用いて並列抵抗Rpを作製可能である。デバイスの構造上、段差のある部分も、斜め蒸着などうまく覆膜性を改良し、デバイスの動作実証を達成可能である。

[0056] (発振周波数特性)

第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の発振周波数特性例は、図9に示すように表される。図9に示す例では、約0.27THzにおいて、発振強度(任意単位)のピークが得られている。

[0057] (シミュレーション結果)

ダイポールアンテナ計算モデルに用いた第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の模式的鳥瞰図は、図10(a)に示すように表され、フィード線40F・20Fおよびパッド電極40P・20Pを含むダイポールアンテナ計算モデルに用いた第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の模式的鳥瞰図は、図10(b)に示すように表される。いずれも裏面反射体金属層88を備えるものとして計算している。

[0058] ここで、パッド電極40P・20Pは、伝送線路を構成している。パッド電極40P・20Pの幅(伝送線路の幅)は、例えば75μmとし、パッド電極40P・20P間の間隔(伝送線路の間隔)は、例えば5μmとし、パッド電極40P・20Pの長さ(伝送線路の長さ)は、例えば300μmとした。

[0059] また、フィード線40F・20Fは、ダイポールアンテナ(2・4)と、

パッド電極40P・20Pとの間の接続部を構成しており、その長さは、例えば、 $20\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ とし、その幅は、例えば、 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ とした。

[0060] また、ダイポールアンテナ(2・4)のアンテナ長DA(図4参照)は、例えば $320\mu\text{m}$ とした。

[0061] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の放射パターンであって、発振周波数300GHzにおけるシミュレーション結果は、図11(a)に示すように表され、発振周波数320GHzにおけるシミュレーション結果は、図11(b)に示すように表される。図11(a)・図11(b)のシミュレーション結果は、図10(b)に示すフィード線40F・20Fおよびパッド電極40P・20Pを含むダイポールアンテナ計算モデルに基づき計算した結果である。

[0062] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、シミュレーション結果より、例えば約330GHz以下において、良好な面発光型の放射パターンのが得られている。

[0063] 比較例として、テーパスロットアンテナを備えるテラヘルツ素子のチップ面積($1.5\text{mm}\times 3.0\text{mm}$)と比較すると、ダイポールアンテナを備える第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30のチップ面積は、例えば約 $0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ であり、比較例に比べて、約1/18に微細化可能である。さらに、チップサイズは、約 $0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ 以下にも微細化可能である。

[0064] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、半導体基板1の裏面全面に裏面反射体金属層88を配置し、この裏面反射体金属層88による反射を用いて、半導体基板表面側にテラヘルツ波を面発光放射することができる。アンテナ長DAを変化することによって、発振周波数を制御することができる。また、接続部を構成するフィード線40F・20Fの長さ・幅・配置位置を調整することによってアンテナ効率を制御することも可能である。

[0065] —RTD—

第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な能動素子90として、RTDの構成例は、図3(a)に示すように、半絶縁性のInP基板からなる半導体基板1上に配置され、n型不純物を高濃度にドーピングされたGaInAs層91aと、GaInAs層91a上に配置され、n型不純物をドーピングされたGaInAs層92aと、GaInAs層92a上に配置されたアンドープのGaInAs層93aと、GaInAs層93a上に配置されたAlAs層94a／InGaAs層95／AlAs層94bから構成されたRTD部と、AlAs層94b上に配置されたアンドープのGaInAs層93bと、GaInAs層93b上に配置され、n型不純物をドーピングされたGaInAs層92bと、GaInAs層92b上に配置され、n型不純物を高濃度にドーピングされたGaInAs層91bと、GaInAs層91b上に配置された第1の電極4と、GaInAs層91a上に配置された第2の電極2とを備える。

[0066] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な能動素子90として、RTDの別の構成例は、図3(b)に示すように、GaInAs層91b上に配置され、n型不純物を高濃度にドーピングされたGaInAs層91cを備え、第1の電極4は、GaInAs層91c上に配置される。このように、第1の電極4とGaInAs層91bとのコンタクトをさらに良好にするために、GaInAs層91cを形成しても良い。

[0067] ここで、各層の厚さは、例えば以下の通りである。

[0068] n⁺型のGaInAs層91a、91b・91cの厚さは、それぞれ例えば、約400nm、15nm・8nm程度である。n型のGaInAs層92aおよび92bの厚さは、略等しく、例えば、約25nm程度である。アンドープGaInAs層93a・93bの厚さは、例えば、上述の非対称性を実現可能とする厚さであって、約2nm・20nm程度である。AlAs層94aおよび94bの厚さは、等しく、例えば、約1.1nm程度である。GaInAs層95の厚さは、例えば、約4.5nm程度である。

- [0069] なお、図3(a)および図3(b)に示す積層構造の側壁部には、 SiO_2 膜、 Si_3N_4 膜、 SiON 膜、 HfO_2 膜、 Al_2O_3 膜など、若しくはこれらの多層膜からなる絶縁膜を堆積することもできる。絶縁層は、化学的気相堆積(CVD: Chemical Vapor Deposition)法、或いはスパッタリング法などによって形成することができる。
- [0070] MIMリフレクタ50は金属／絶縁体／金属からなる積層構造により、パッド電極40P・20Pは高周波的に短絡される。また、MIMリフレクタ50は、直流的には開放(オープン)でありながら、高周波を反射させることが可能となるという効果を有する。
- [0071] 第1の電極4・第2の電極2は、いずれも例えば、 $\text{Au}/\text{Pd}/\text{Ti}$ や Au/Ti のメタル積層構造からなり、Ti層は、半絶縁性のInP基板からなる半導体基板1との接触状態を良好にするためのバッファ層である。第1の電極4・第2の電極2の各部の厚さは、例えば、約数100nm程度であり、全体として、平坦化された積層構造が得られている。なお、第1の電極4・第2の電極2は、いずれも真空蒸着法、或いはスパッタリング法などによって形成することができる。
- [0072] MIMリフレクタの絶縁層は、例えば、 SiO_2 膜で形成することができる。その他、 Si_3N_4 膜、 SiON 膜、 HfO_2 膜、 Al_2O_3 膜などを適用することもできる。なお、絶縁層の厚さは、MIMリフレクタ50の幾何学的な平面寸法と、回路特性上の要求されるキャパシタ値を考慮して決めることができ、例えば、数10nm～数100nm程度である。絶縁層は、CVD法、或いはスパッタリング法などによって形成することができる。
- [0073] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、第1トンネルバリア層／量子井戸層／第2トンネルバリア層が、 $\text{AlAs}/\text{InAlAs}/\text{AlAs}$ の構成を有する例が示されているが、このような材料系に限定されるものではない。例えば、第1トンネルバリア層／量子井戸層／第2トンネルバリア層が、 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ の構成を有する例であっても良い。また、第1トンネルバリア層／量子井戸層／第2トンネルバリア層が

、 $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/\text{AlGaIn}$ の構成を有する例であっても良い。また、第1トンネルバリア層/量子井戸層/第2トンネルバリア層が、 $\text{SiGe}/\text{Si}/\text{SiGe}$ の構成を有する例であっても良い。

[0074] 第1の実施の形態によれば、面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有するテラヘルツ素子を提供することができる。

[0075] [第2の実施の形態]

第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の抵抗素子114の代わりに、第1RTD1に逆並列接続された第2RTD2を備える。

[0076] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な第1RTD1・第2RTD2の模式的断面構造は、図21に示すように表される。図21では、同一の半導体基板1上に集積化された例を示す。また、第1RTD1・第2RTD2は、個別素子として形成されていても良い。

[0077] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30と同様に、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の半導体基板1の裏面には、裏面反射体金属層88が配置されている。図21において、矢印で示される方向が、順方向電流が流れる向きである。デバイス構造の詳細については後述する。

[0078] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な第1RTD1の非対称電流－電圧特性例は、図12に示すように表される。

[0079] また、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の等価回路構成は、図13に示すように表される。

[0080] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図13に示すように、第1アノードA1と第1カソードK1とを備える第1RTD1と、第2アノードA2と第2カソードK2とを備える第2RTD2とを備える。ここで、第1RTD1と第2RTD2は、逆並列に接続されると共に、第1RTD1と第2RTD2の内、いずれか一方が負性抵抗発振状態にバイアスされるとき、他方は抵抗状態にバイアスされる。

[0081] 例えば、図12において、順方向の電圧値が+200mVのバイアス状態で

は、第1 R T D 1は、純抵抗と見なすことができるが、順方向の電圧値が -200 mV のバイアス状態では、負性抵抗状態と見なすことができる。ここで、図12に示すように、第1 R T D 1は、非対称の電流電圧特性を有する。同様に、第2 R T D 2も、非対称の電流電圧特性を有する。

[0082] また、図13に示すように、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30において、第1アノードA1と第2カソードK2が接続され、第1カソードK1と第2アノードA2が接続される。

[0083] (非対称電流電圧特性)

第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な第1 R T D 1の非対称電流電圧特性例であって、順方向の電圧値が $-400\text{ mV} \sim +400\text{ mV}$ の範囲内の拡大図は、図14に示すように表される。また、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な第2 R T D 2の非対称電流電圧特性例であって、順方向の電圧値が $-400\text{ mV} \sim +400\text{ mV}$ の範囲内の拡大図は、図15に示すように表される。

[0084] さらに、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30において、図14・図15の特性に基づいて、第1 R T D 1と第2 R T D 2の合成抵抗から見積もった電流電圧特性例は、図16に示すように表される。この計算結果によると、2つのR T Dを極性を反転させて並列に接続することは、十分に寄生発振を抑制する効果があるとわかる。

[0085] 図14・図15に示される電流電圧特性を持つR T Dを2つ用いて、極性を反転させて構成すると、図13に示すような等価回路になる。このとき一方のR T Dのマイナス側の負性抵抗領域を用いて、RF (THz帯) 発振を試みているとする。仮に、 $+200\text{ mV}$ を印加したとき、一方のR T Dには -200 mV かかるので、負性抵抗領域にバイアスが掛かり駆動電圧となる。この時、他方のR T Dには $+200\text{ mV}$ の電圧が印加され純粋な抵抗体として振舞う。

[0086] 例えば、第1 R T D 1の非対称電流電圧特性例(図14)において、順方向の電圧値が $+200\text{ mV}$ のバイアス状態では、第1 R T D 1は純抵抗、順方

向の電圧値が -200 mV のバイアス状態では負性抵抗状態となるが、第2 R T D 2の非対称電流電圧特性例（図15）において、順方向の電圧値が $+200\text{ mV}$ のバイアス状態では、第2 R T D 2は負性抵抗状態、順方向の電圧値が -200 mV のバイアス状態では純抵抗状態となる。

[0087] したがって、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、第1 R T D 1と第2 R T D 2は逆並列に接続されるため、第1 R T D 1と第2 R T D 2の内、いずれか一方を負性抵抗発振状態にバイアスするとき他方は抵抗状態にバイアスすることが可能である。

[0088] 図12・図14に示す第1 R T D 1の電流電圧特性と、図16に示す合成抵抗から見積もった電流電圧特性を比較すると明らかなように、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、第1 R T D 1と第2 R T D 2は逆並列に接続されるため、第1 R T D 1を負性抵抗発振状態にバイアスするとき第2 R T D 2は抵抗状態にバイアスすることが可能である。これにより、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子によれば、メタル配線無しでR T Dと外部回路の寄生発振を抑えることができる。

[0089] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、第1 R T D 1の寄生発振を抑えるデバイス構造について、外部回路との寄生発振を抑制する第2 R T D 2を用いたテラヘルツ発振器を提供可能である。

[0090] なお本手法は、テラヘルツ波帯に限らず、R T Dとその外部回路における寄生発振を抑制する手法として一般化可能な基盤技術である。具体的には、プラス側とマイナス側で非対称な電流電圧特性を有する二つのR T Dを、極性を反転させて並列に配置することで、実現させるという方法である。

[0091] R T Dは負性抵抗を示す電圧範囲よりも低い電圧領域では、純粋な抵抗体であるかのような振る舞いをする。極性を反転させるというのは、一方のR T Dが負性抵抗に差し掛かっている時他方のR T Dは抵抗体として振る舞うということである。

[0092] これにより、後述するように、同一エピ基板で、かつ同一プロセスで寄生発振を抑えるデバイス構造を作製できる。

[0093] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30においては、メタル配線をする分の工程数を減らし、デバイスの信頼性向上にも貢献できる。また、同一エピ基板を用いているため新たなエピ膜や工程を追加する必要は無い。マスクの変更のみで実現でき、最終的な製造コストの抑制にも貢献できる。また、メタル配線部分のインダクタンスを除去できるため、高速変調の特性も向上可能である。

[0094] (デバイス構造)

第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の配線構造の模式的平面構成は、図17に示すように表され、図17のⅠⅠーⅠⅠ線に沿う模式的断面構造は、図18に示すように表され、図17のⅠⅠⅠーⅠⅠⅠ線に沿う模式的断面構造は、図19に示すように表され、図17のⅠⅤーⅠⅤ線に沿う模式的断面構造は、図20に示すように表される。

[0095] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、半導体基板1を備え、第1RTD1と第2RTD2は、半導体基板1上に配置されていても良い。ここで、半導体基板1は、例えば半絶縁性のInP基板などを適用可能である。

[0096] 第1の実施の形態に係るテラヘルツ素子30と同様に、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の半導体基板1の裏面には、裏面反射体金属層88が配置されている。

[0097] また、第1RTD1と第2RTD2は、図17～図20に示すように、半導体基板1上に集積化されていても良い。

[0098] (集積化テラヘルツ発振素子)

集積化テラヘルツ発振素子として動作可能な第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図17～図20に示すように、半導体基板1と、半導体基板1上に配置された第1の半導体層91aと、第1の半導体層91aをパターンニングして形成された第1カソード領域および第2カソード領域と、第1カソード領域に第1カソードK1が接続され、第1アノードA1が第2カソード領域と接続された第1RTD1と、第2カソード領域に第2カソード

K 2 が接続され、第 2 アノード A 2 が第 1 カソード領域と接続された第 2 R T D 2 と、第 1 の半導体層 9 1 a に対向する半導体基板 1 の裏面に配置された裏面反射体金属層 8 8 とを備える。ここで、第 1 R T D 1 が負性抵抗発振状態にバイアスされるとき、第 2 R T D 2 は抵抗状態にバイアスされ、第 1 R T D 1 から放射された電磁波は、裏面反射体金属層 8 8 に反射されて、半導体基板 1 に対して垂直方向の面発光放射パターンを有する。

[0099] また、第 1 R T D 1 および第 2 R T D 2 は、非対称の電流電圧特性を有する。

[0100] また、第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 は、図 1 7 ～図 2 0 に示すように、第 1 カソード領域上に配置された第 1 カソード電極 2₁ と、第 2 カソード領域上に配置された第 2 カソード電極 2₂ と、第 1 アノード A 1 に接続された第 1 アノード電極 4₁ と、第 2 アノード A 2 に接続された第 2 アノード電極 4₂ とを備え、第 1 カソード電極 2₁ は、第 2 アノード電極 4₂ と共通接続され、第 2 カソード電極 2₂ は、第 1 アノード電極 4₁ と共通接続される。

[0101] 尚、電氣的に絶縁が必要な場所には、図 1 8 に示すように、層間絶縁膜 9 を形成している。層間絶縁膜 9 は、例えば、S i O₂ 膜で形成することができる。層間絶縁膜 9 は、C V D 法、或いはスパッタリング法などによって形成することができる。

[0102] (集積化テラヘルツ検出素子)

集積化テラヘルツ発振素子として動作可能な第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 は、上述のテラヘルツ発振素子と同様の構成を備え、第 1 R T D 1 が負性抵抗発振状態にバイアスされるとき、第 2 R T D 2 は抵抗状態にバイアスされ、第 1 R T D 1 により受信した電磁波は、裏面反射体金属層 8 8 に反射されて、半導体基板 1 に対して垂直方向の面受光パターンを有する。

[0103] (詳細構造)

第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 に適用可能な第 1 R T D 1 ・第 2 R T D 2 の構成例は、図 2 1 に示すように、半絶縁性の I n P 基板から

なる半導体基板 1 上に配置され、 n 型不純物を高濃度にドーピングされた GaInAs 層 91a と、 GaInAs 層 91a 上に配置され、 n 型不純物をドーピングされた GaInAs 層 92a と、 GaInAs 層 92a 上に配置されたアンドープの GaInAs 層 93a と、 GaInAs 層 93a 上に配置された AlAs 層 94a / InGaAs 層 95 / AlAs 層 94b から構成された RTD 部と、 AlAs 層 94b 上に配置されたアンドープの GaInAs 層 93b と、 GaInAs 層 93b 上に配置され、 n 型不純物をドーピングされた GaInAs 層 92b と、 GaInAs 層 92b 上に配置され、 n 型不純物を高濃度にドーピングされた GaInAs 層 91c と、 GaInAs 層 91c 上に配置された第 1 の電極 4₁ と、 GaInAs 層 91a 上に配置された第 2 の電極 2₁ とを備える。

[0104] 図 21 に示すように、第 1 RTD 1 の量子井戸構造 QW1 は、 GaInAs 層 95 を AlAs 層 94a・94b で挟んで形成されている。このように積層された量子井戸構造 QW1 は、スペーサ層 SP11・SP12 として用いられるアンドープ GaInAs 層 93a・93b を介在させて n 型の GaInAs 層 92a・92b、及び n^+ 型の GaInAs 層 91a・91b 若しくは 91c を介して、第 2 の電極 2₁・第 1 の電極 4₁ にオーミックに接続される。

[0105] 同様に、図 21 に示すように、第 2 RTD 2 の量子井戸構造 QW2 は、 GaInAs 層 95 を AlAs 層 94a・94b で挟んで形成されている。このように積層された量子井戸構造 QW2 は、スペーサ層 SP21・SP22 として用いられるアンドープ GaInAs 層 93a・93b を介在させて n 型の GaInAs 層 92a・92b、及び n^+ 型の GaInAs 層 91a・91b 若しくは 91c を介して、第 2 の電極 2₁・第 1 の電極 4₁ にオーミックに接続される。

[0106] 第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 30 において、第 1 RTD 1・第 2 RTD 2 は、図 21 に示すように、量子井戸層 95 と、量子井戸層 95 を挟むトンネルバリア層 94a・94b を介してカソード K 側に配置された第

1 スペーサ層 SP 1 1 (9 3 a) ・ SP 2 1 (9 3 a) と、アノード A 側に配置された第 2 スペーサ層 SP 1 2 (9 3 b) ・ SP 2 2 (9 3 b) とを備え、第 1 スペーサ層 SP 1 1 と第 2 スペーサ層 SP 1 2 の厚さは互いに異なるように構成されていても良い。

[0107] また、第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 において、第 1 R T D 1 ・ 第 2 R T D 2 は、それぞれの第 1 スペーサ層 SP 1 1 ・ SP 2 1 の厚さが互いに異なるように構成されていても良い。

[0108] また、第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 において、第 1 R T D 1 ・ 第 2 R T D 2 は、それぞれの第 2 スペーサ層 SP 1 2 ・ SP 2 2 の厚さが互いに異なるように構成されていても良い。

[0109] 第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 に適用可能な第 1 R T D 1 ・ 第 2 R T D 2 においては、共鳴トンネル効果を発現する量子井戸構造 QW 1 ・ QW 2 と、これを挟む形で、上下に配置されるスペーサ層 SP 1 1 ・ SP 1 2 および SP 2 1 ・ SP 2 2 の厚さを異ならせることによって、プラス側とマイナス側で非対称な電流電圧特性を持つようになる。これは、スペーサ層 SP 2 1 ・ SP 2 2 および SP 2 1 ・ SP 2 2 の厚さによって量子井戸構造 QW 1 ・ QW 2 の量子井戸層 9 5 に注入されるキャリアの数がバイアスの方向によって異なることに起因している。スペーサ層 SP 2 1 ・ SP 2 2 および SP 2 1 ・ SP 2 2 の厚さを異ならせることによる非対称性の導入が、第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 を実現可能なものとしている。

[0110] また、第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 において、第 1 R T D 1 ・ 第 2 R T D 2 の量子井戸構造 QW 1 ・ QW 2 と半導体基板 1 に接する裏面反射体金属層 8 8 表面との距離 D は、波長 λ の $1/4$ 倍であることが望ましい。半導体基板 1 に対して垂直方向の良好な面発光放射パターン若しくは面受光パターンを効率的に得るためである。

[0111] 第 2 の実施の形態に係るテラヘルツ素子 3 0 に適用可能な第 1 R T D 1 において、スペーサ層 SP 1 1 ・ SP 1 2 の厚さを例えば、 $20\text{ nm} \cdot 2\text{ nm}$ といったように非対称にすることで、図 1 2 若しくは図 1 4 に示すような非

対称の電流電圧特性を得ることができる。

[0112] 同様に、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な第2 RTD2において、スペーサ層SP21・SP22の厚さを例えば、2 nm・20 nmといったように非対称にすることで、図15に示すような非対称の電流電圧特性を得ることができる。

[0113] ここで、各層の厚さは、例えば以下の通りである。

[0114] n^+ 型のGaInAs層91a、91b・91cの厚さは、それぞれ例えば、約400 nm、15 nm・8 nm程度である。 n 型のGaInAs層92aおよび92bの厚さは、略等しく、例えば、約25 nm程度である。アンドープGaInAs層93a・93bの厚さは、例えば、上述の非対称性を実現可能とする厚さであって、約2 nm・20 nm程度である。AlAs層94aおよび94bの厚さは、等しく、例えば、約1.1 nm程度である。GaInAs層95の厚さは、例えば、約4.5 nm程度である。

[0115] なお、図21に示す積層構造の側壁部には、SiO₂膜、Si₃N₄膜、SiON膜、HfO₂膜、Al₂O₃膜など、若しくはこれらの多層膜からなる絶縁膜を堆積することもできる。絶縁層は、CVD法、或いはスパッタリング法などによって形成することができる。

[0116] ダイポールアンテナを備える第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子の模式的平面パターン構成は、図22に示すように表される。

[0117] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図22に示すように、カソード電極2₂・2₁に接続されたダイポールアンテナ40D・20Dを備える。

[0118] また、第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、図22に示すように、ダイポールアンテナ40D・20Dに接続されたフィード線40F・20Fと、フィード線40F・20Fに接続されたパッド電極40P・20Pを備えていても良い。

[0119] また、実施の形態に係るテラヘルツ素子30は、パッド電極40P・20P間に接続されたMIMリフレクタ（図示省略）を備えていても良い。

[0120] MIMリフレクタは金属／絶縁体／金属からなる積層構造により、パッド電極40P・20P間は高周波的に短絡される。また、MIMリフレクタは、直流的には開放（オープン）でありながら、高周波を反射させることが可能となるという効果を有する。

[0121] ダイポールアンテナ40D・20Dは、いずれも例えば、Au／Pd／TiやAu／Tiのメタル積層構造からなり、Ti層は、半絶縁性のInP基板からなる半導体基板1との接触状態を良好にするためのバッファ層である。ダイポールアンテナ40D・20Dの各部の厚さは、例えば、約数100nm程度であり、全体として、図22に示すような平坦化された積層構造が得られている。なお、ダイポールアンテナ40D・20Dは、いずれも真空蒸着法、或いはスパッタリング法などによって形成することができる。

[0122] （製造方法）

第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子の製造方法は、半導体基板1上に第1の半導体層91aを形成する工程と、第1の半導体層91aをパターンニングして第1カソード領域および第2カソード領域を形成する工程と、第1カソード領域に第1カソードK1が接続され、第1アノードA1が第2カソード領域と接続される第1RTD1を形成する工程と、第2カソード領域に第2カソードK2が接続され、第2アノードA2が前記第1カソード領域と接続された第2RTD2を形成する工程と、第1カソード領域上に第2アノード電極4₂と共通接続される第1カソード電極2₁を形成する工程と、第2カソード領域上に第1アノード電極4₁と共通接続される第2カソード電極2₂を形成する工程とを有する。

[0123] また、第1RTD1および第2RTD2を形成する工程は、第1の半導体層91a上に第1スペーサ層SP11（93a）・SP21（93a）を形成する工程と、第1スペーサ層SP11（93a）・SP21（93a）上に第1トンネルバリア層94a・94aを形成する工程と、第1トンネルバリア層94a・94a上に量子井戸層95・95を形成する工程と、量子井戸層95・95上に第2トンネルバリア層94b・94bを形成する工程と

、第2トンネルバリア層94b・94b上に第1スペーサ層SP11(93a)・SP21(93a)と厚さの異なる第2スペーサ層SP12(93b)・SP22(93b)を形成する工程とを有する。

[0124] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30に適用可能な第1RTD1・第2RTD2の構造は、同一の製造工程で形成可能である。

[0125] 同一工程で製造された第1RTD1・第2RTD2の模式的断面構造であって、集積化された第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30の第1RTD1・第2RTD2部分の模式的断面構造は、図21に示すように表される。各層の構成は、図3(a)・図3(b)と同様であるため、重複説明は省略する。

[0126] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子30において、第1RTD1のスペーサ層SP11・SP12の厚さを例えば、20nm・2nmとし、第2RTD2のスペーサ層SP21・SP22の厚さを例えば、2nm・20nmとする場合には、共通にエピタキシャル成長する工程と、第2RTD2側にマスクをかけて第1RTD1側のみをエピタキシャル成長する工程と、逆に第1RTD1側にマスクをかけて第2RTD2側のみをエピタキシャル成長する工程とを使い分ける必要がある。それ以外の各層の製造工程は、第1RTD1・第2RTD2の共通プロセスで形成可能である。

[0127] 例えば、同一工程で製造された第1RTD1・第2RTD2において、室温で観測した発振周波数は、いずれも約300GHz程度である。

[0128] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子の製造方法によれば、メタル配線無しでRTDと外部回路の寄生発振を抑えることができ、メタル配線の製造工程が不要となるため、プロセスの工程数を減少させることができる。

[0129] 第2の実施の形態に係るテラヘルツ素子は、第1トンネルバリア層／量子井戸層／第2トンネルバリア層が、AlAs／InAlAs／AlAsの構成を有する例が示されているが、このような材料系に限定されるものではない。例えば、第1トンネルバリア層／量子井戸層／第2トンネルバリア層が、AlGaAs／GaAs／AlGaAsの構成を有する例であっても良い。

。また、第1トンネルバリア層／量子井戸層／第2トンネルバリア層が、AlGaIn／GaIn／AlGaInの構成を有する例であっても良い。また、第1トンネルバリア層／量子井戸層／第2トンネルバリア層が、SiGe／Si／SiGeの構成を有する例であっても良い。

[0130] いずれの構成においても、第1トンネルバリア層に接して第1スペーサ層が配置され、第2トンネルバリア層に接して第2スペーサ層が配置され、かつ第1スペーサ層と第2スペーサ層の厚さが異なることによって、非対称の電流電圧特性を備え、このような非対称の電流電圧特性を有する第1RTD1・第2RTD2を逆並列に接続すると共に、第1RTD1と第2RTD2の内、いずれか一方が負性抵抗発振状態にバイアスされるとき、他方は抵抗状態にバイアスされる点は同様である。

[0131] 以上説明したように、本実施の形態によれば、面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有するテラヘルツ素子およびその製造方法を提供することができる。

[0132] [その他の実施の形態]

上記のように、実施の形態に係るテラヘルツ素子について記載したが、この開示の一部をなす論述および図面は例示的なものであり、この実施の形態を限定するものであると理解すべきではない。この開示から当業者には様々な代替実施の形態、実施例および運用技術が明らかとなろう。

[0133] このように、本実施の形態はここでは記載していない様々な実施の形態などを含む。

産業上の利用可能性

[0134] 本実施の形態のテラヘルツ素子は、デバイスベースでは、テラヘルツ発振器、テラヘルツ検出器、高周波共振回路、信号増幅器等に適用可能であり、応用ベースでは、テラヘルツ波イメージング装置、センシング装置、高速無線通信器等の大容量通信・情報処理のほか、物性、天文、生物などのさまざまな分野における計測、セキュリティー分野など、幅広い分野に適用することができる。

符号の説明

[0135] 1…半導体基板

2、2₁、2₂…第2の電極（カソード電極）

4、4₁、4₂…第1の電極（アノード電極）

9…層間絶縁膜

20D、40D…ダイポールアンテナ（アンテナ電極）

20F、40F…フィード線

20P、40P…パッド電極

30…テラヘルツ素子

50…MIMリフレクタ

88…裏面反射体金属層

90…能動素子

91a…第1の半導体層（GaInAs層）

94a、94b…トンネルバリア層

95…量子井戸層

114…抵抗素子

A、A1、A2…アノード

K、K1、K2…カソード

SP11、SP12、SP21、SP22…スペーサ層

QW1、QW2…量子井戸構造

請求の範囲

- [請求項1] 半導体基板と、
 前記半導体基板上に配置された第1の半導体層と、
 前記第1の半導体層上に積層化形成された能動素子と、
 前記第1の半導体層に接続されて前記能動素子の主電極の一方に接続され、かつ前記半導体基板上に配置された第2の電極と、
 前記能動素子の主電極の他方に接続され、かつ前記半導体基板上に前記第2の電極に対向して配置された第1の電極と、
 前記第1の半導体層に対向する前記半導体基板の裏面に配置された裏面反射体金属層と
 を備え、
 前記能動素子は、前記第2の電極と前記第1の電極間において共振器を形成し、電磁波は、前記裏面反射体金属層に反射されて、前記半導体基板に対して垂直方向の面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有することを特徴とするテラヘルツ素子。
- [請求項2] 前記能動素子と前記半導体基板に接する前記裏面反射体金属層の表面との距離は、波長 λ の $1/4$ 倍であることを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項3] 前記第1の電極および前記第2の電極は、ダイポールアンテナを備えることを特徴とする請求項1または2に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項4] 前記ダイポールアンテナに接続された第1フィード線および第2フィード線と、
 前記第1フィード線および前記第2フィード線に接続された第1パッド電極および第2パッド電極と
 を備えることを特徴とする請求項3に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項5] 前記第1パッド電極と前記第2パッド電極との間に接続されたMIMリフレクタを備えることを特徴とする請求項4に記載のテラヘルツ素子。

- [請求項6] 前記第1の電極と前記第2の電極間に接続された抵抗素子を備えることを特徴とする請求項1～5のいずれか1項に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項7] 前記抵抗素子は、金属配線を備えることを特徴とする請求項6に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項8] 前記金属配線は、ビスマス、ニッケル、チタン、白金を備えることを特徴とする請求項7に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項9] 前記能動素子は、マルチチップ化して配置されたことを特徴とする請求項1～8のいずれか1項に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項10] 前記能動素子は、セルアレイ化して配置されたことを特徴とする請求項9に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項11] 前記能動素子は、共鳴トンネルダイオード、タンネットダイオード、インパットダイオード、GaAs系電界効果トランジスタ、GaN系FET、高電子移動度トランジスタ、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのいずれかであることを特徴とする請求項1～10のいずれか1項に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項12] 半導体基板と、
前記半導体基板上に配置された第1の半導体層と、
前記第1の半導体層をパターンニングして形成された第1カソード領域および第2カソード領域と、
前記第1カソード領域に第1カソードが接続され、第1アノードが前記第2カソード領域と接続された第1共鳴トンネルダイオードと、
前記第2カソード領域に第2カソードが接続され、第2アノードが前記第1カソード領域と接続された第2共鳴トンネルダイオードと、
前記第1の半導体層に対向する前記半導体基板の裏面に配置された裏面反射体金属層と
を備え、前記第1共鳴トンネルダイオードが負性抵抗発振状態にバイアスされるとき、前記第2共鳴トンネルダイオードは抵抗状態にバ

イアスされ、

電磁波は、前記裏面反射体金属層に反射されて、前記半導体基板に対して垂直方向の面発光放射パターン若しくは面受光パターンを有することを特徴とするテラヘルツ素子。

[請求項13] 前記第1カソード領域上に配置された第1カソード電極と、
前記第2カソード領域上に配置された第2カソード電極と、
前記第1アノードに接続された第1アノード電極と、
前記第2アノードに接続された第2アノード電極と
を備え、

前記第1カソード電極は、前記第2アノード電極と共通接続され、
前記第2カソード電極は、前記第1アノード電極と共通接続されることを特徴とする請求項12に記載のテラヘルツ素子。

[請求項14] 前記第1共鳴トンネルダイオードおよび前記第2共鳴トンネルダイオードは、
量子井戸層と、

前記量子井戸層を挟むトンネルバリア層を介してアノード側に配置された第2スペーサ層と、カソード側に配置された第1スペーサ層とを備え、

前記第1スペーサ層と前記第2スペーサ層の厚さは互いに異なることを特徴とする請求項12または13に記載のテラヘルツ素子。

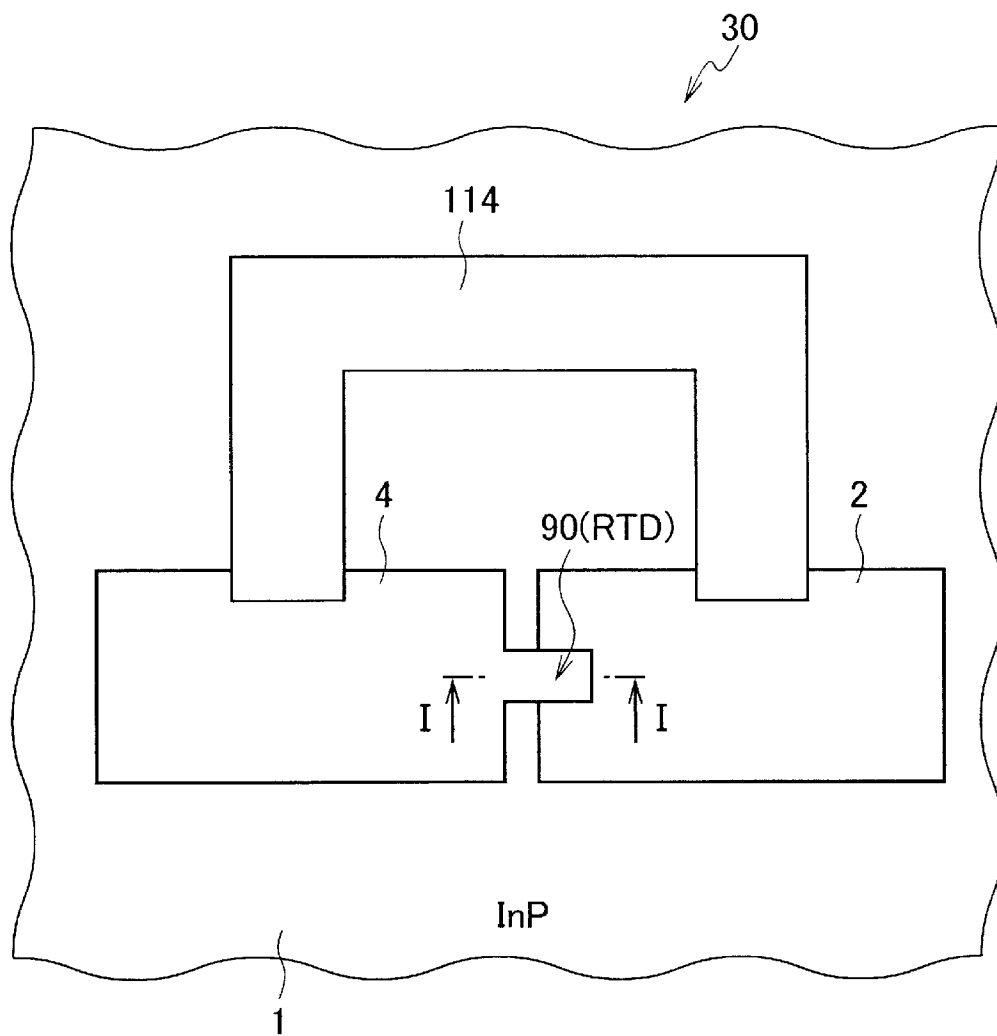
[請求項15] 前記第1共鳴トンネルダイオードおよび前記第2共鳴トンネルダイオードは、それぞれの前記第1スペーサ層の厚さが互いに異なることを特徴とする請求項12～14のいずれか1項に記載のテラヘルツ素子。

[請求項16] 前記第1共鳴トンネルダイオードおよび前記第2共鳴トンネルダイオードは、それぞれの前記第2スペーサ層の厚さが互いに異なることを特徴とする請求項12～14のいずれか1項に記載のテラヘルツ素子。

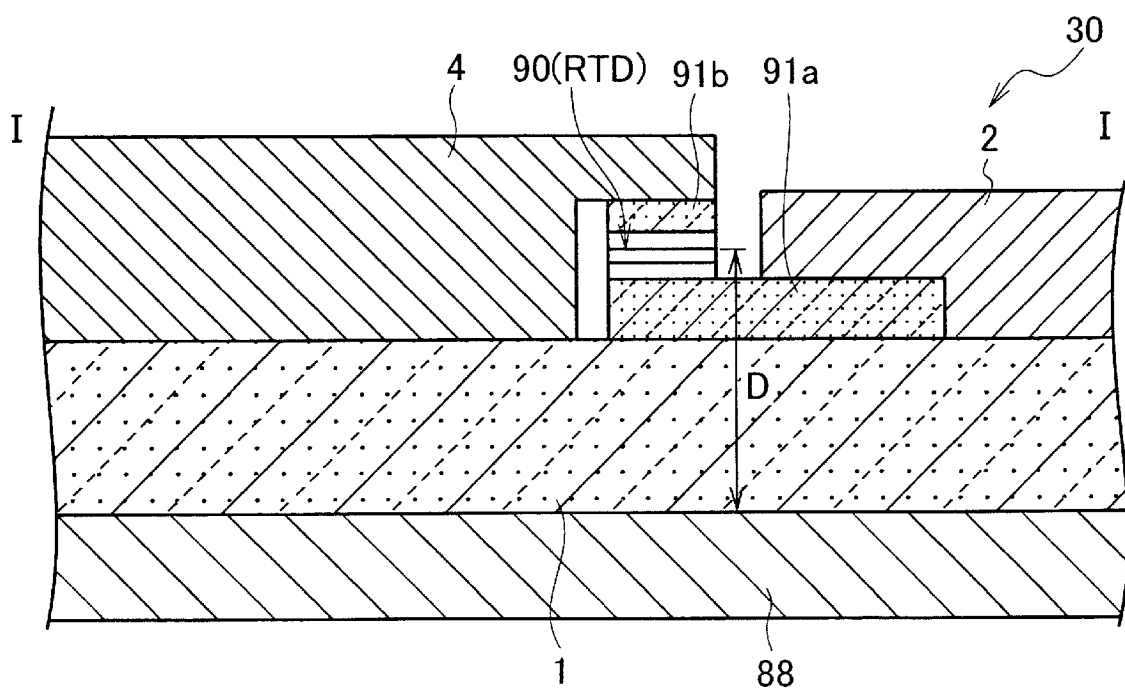
- [請求項17] 前記第1カソードおよび前記第2カソードに接続されたダイポールアンテナを備えることを特徴とする請求項12～16のいずれか1項に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項18] 前記ダイポールアンテナに接続されたフィード線と、前記フィード線に接続されたパッド電極を備えることを特徴とする請求項17に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項19] 前記第1カソードと前記第2カソードとの間に接続されたMIMリフレクタを備えることを特徴とする請求項12～18のいずれか1項に記載のテラヘルツ素子。
- [請求項20] 半導体基板上に第1の半導体層を形成する工程と、
前記第1の半導体層をパターンニングして第1カソード領域および第2カソード領域を形成する工程と、
前記第1カソード領域に第1カソードが接続され、第1アノードが前記第2カソード領域と接続される第1共鳴トンネルダイオードを形成する工程と、
前記第2カソード領域に第2カソードが接続され、第2アノードが前記第1カソード領域と接続された第2共鳴トンネルダイオードを形成する工程と、
前記第1カソード領域上に第2アノード電極と共通接続される第1カソード電極を形成する工程と、
前記第2カソード領域上に第1アノード電極と共通接続される第2カソード電極を形成する工程と、
前記第1の半導体層に対向する前記半導体基板の裏面に裏面反射体金属層を形成する工程と
を有することを特徴とするテラヘルツ素子の製造方法。
- [請求項21] 前記第1共鳴トンネルダイオードおよび前記第2共鳴トンネルダイオードを形成する工程は、
前記第1の半導体層上に第1スペーサ層を形成する工程と、

前記第 1 スペーサ層上に第 1 トンネルバリア層を形成する工程と、
前記第 1 トンネルバリア層上に量子井戸層を形成する工程と、
前記量子井戸層上に第 2 トンネルバリア層を形成する工程と、
前記第 2 トンネルバリア層上に前記第 1 スペーサ層と厚さの異なる
第 2 スペーサ層を形成する工程とを有することを特徴とする請求項 2
0 に記載のテラヘルツ素子の製造方法。

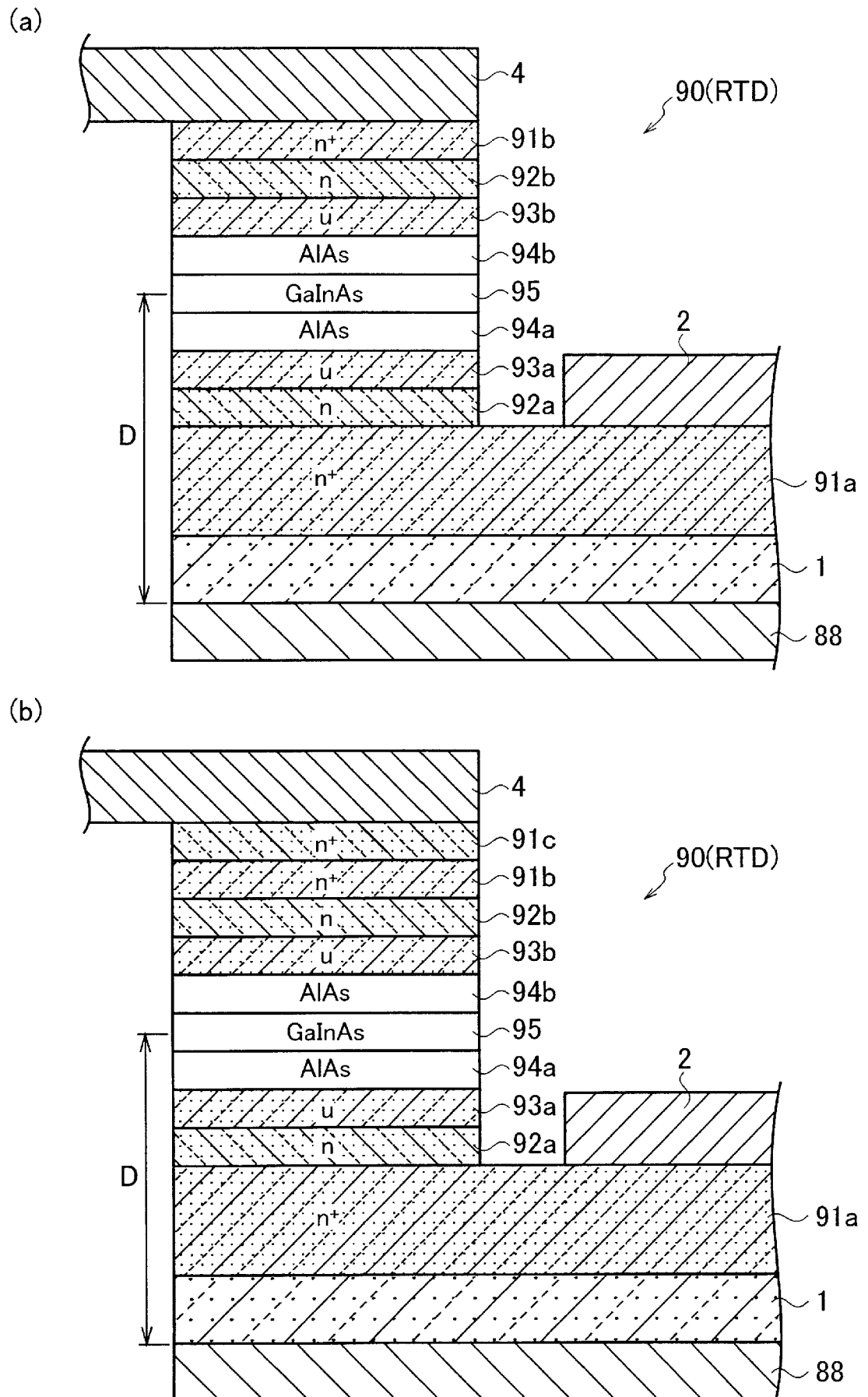
[図1]



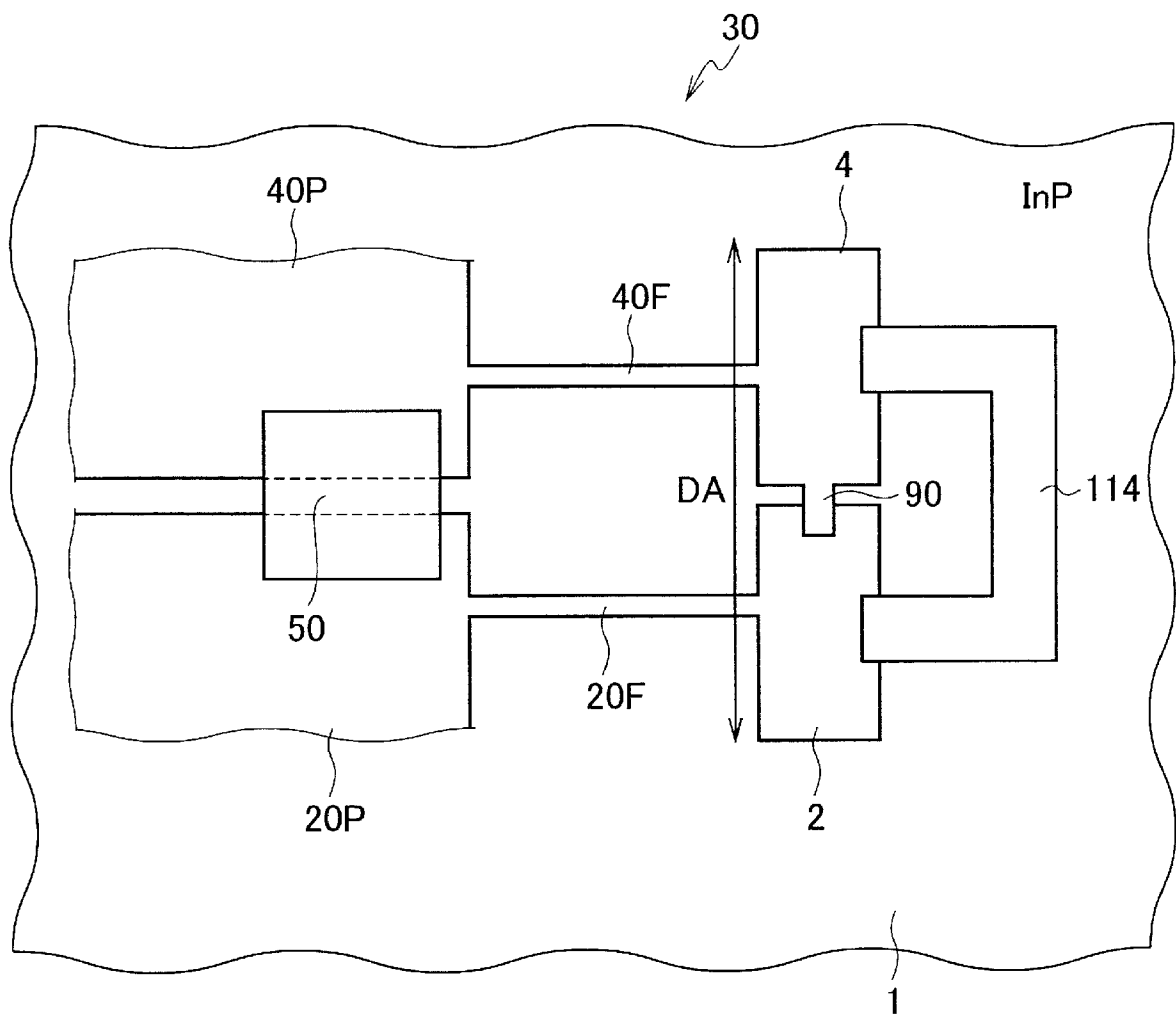
[図2]



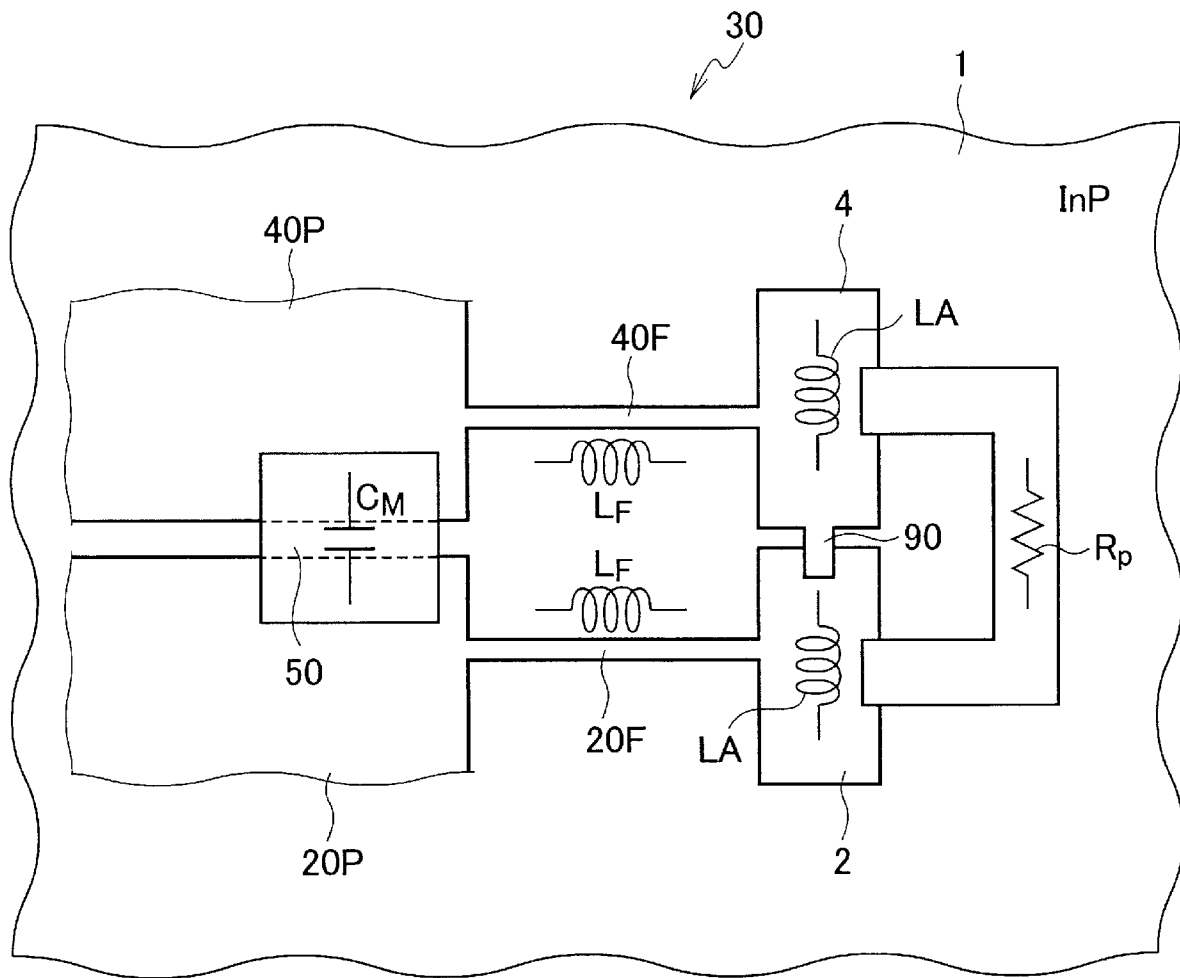
[図3]



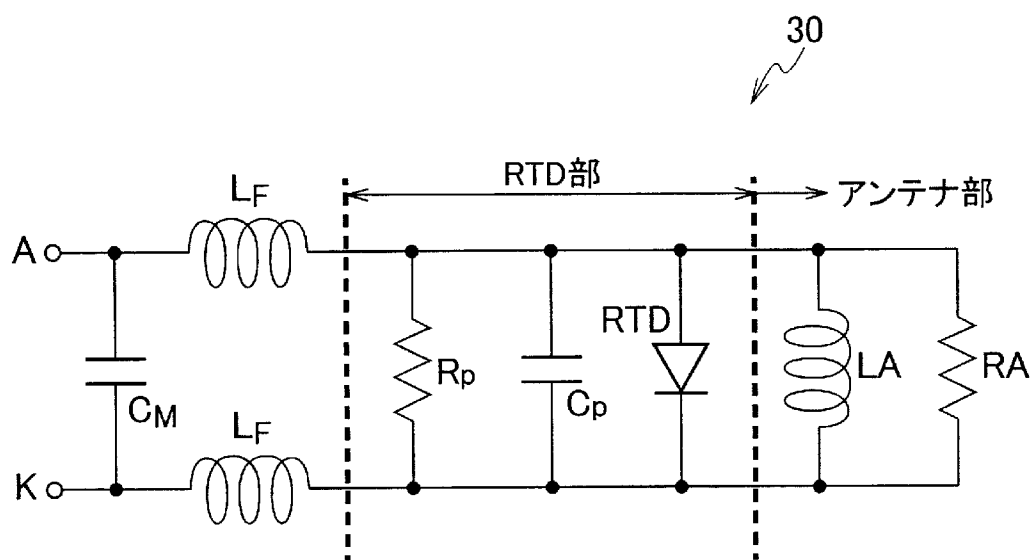
[図4]



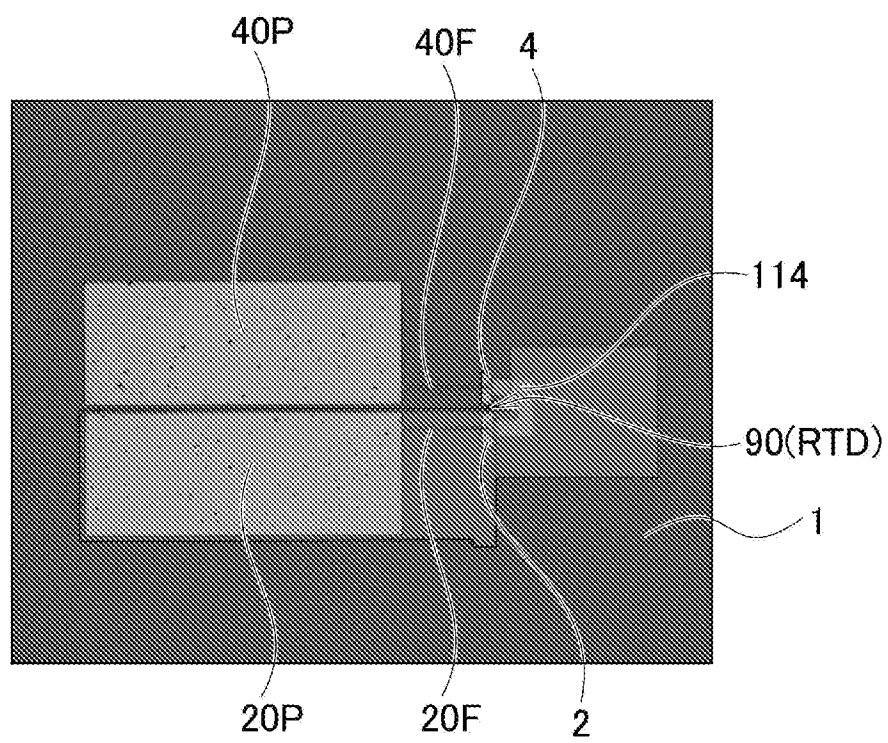
[図5]



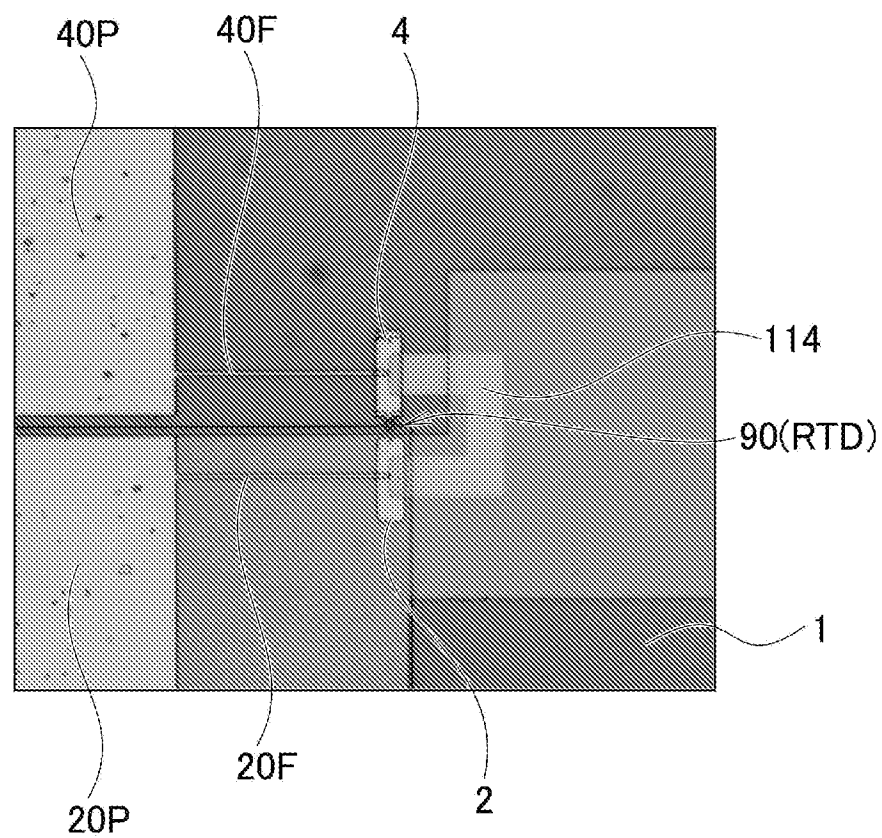
[図6]



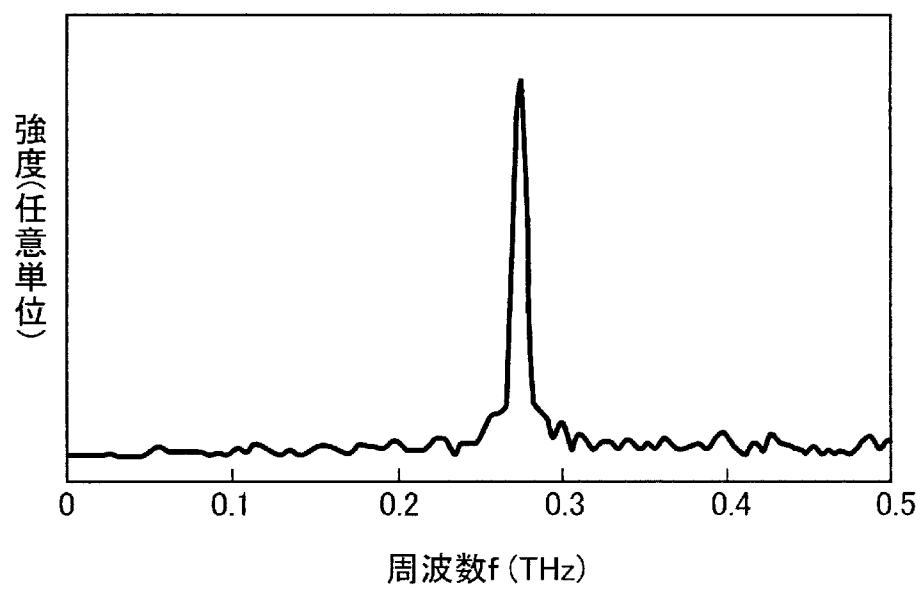
[図7]



[図8]

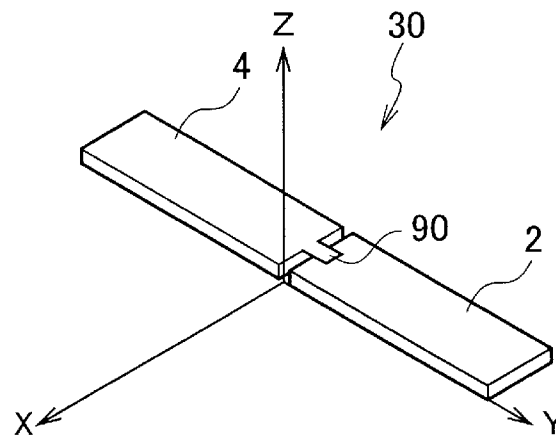


[図9]

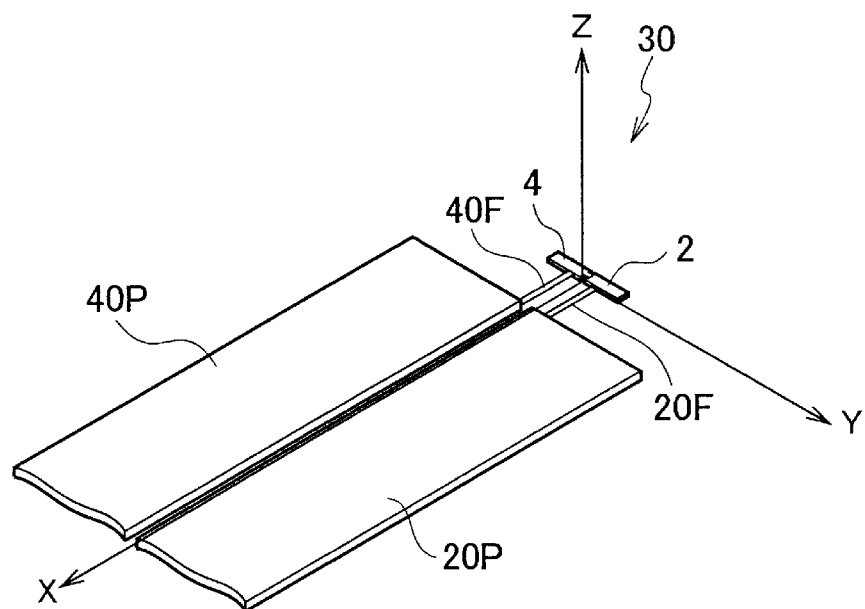


[図10]

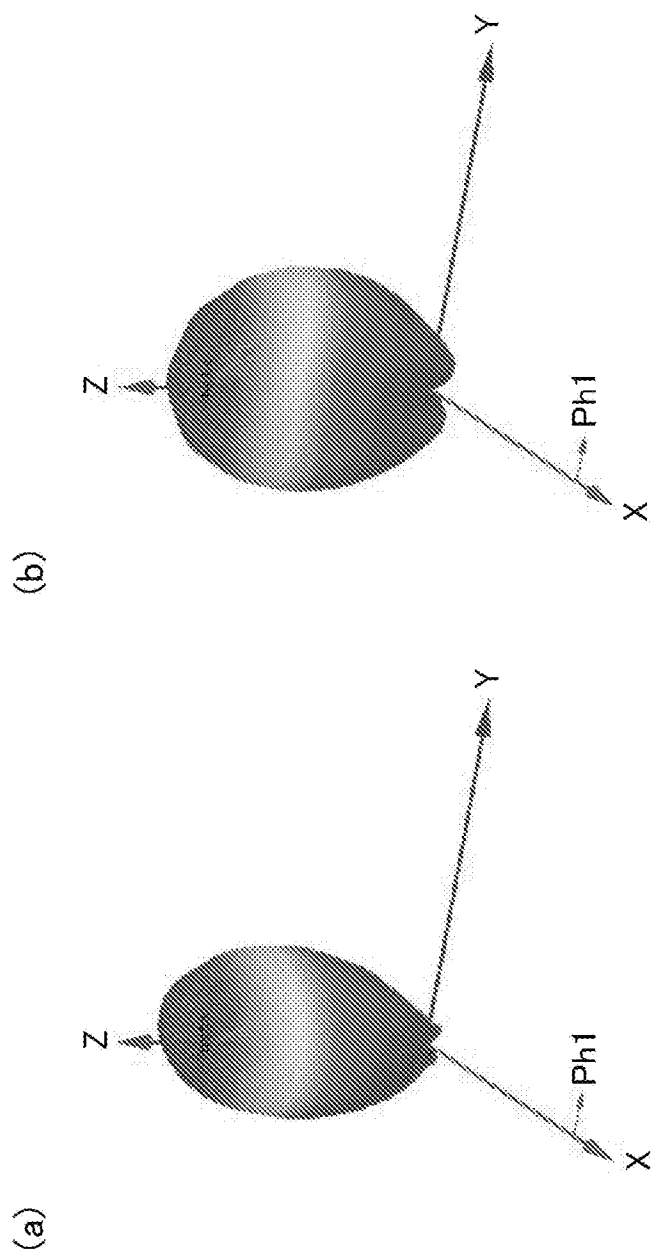
(a)



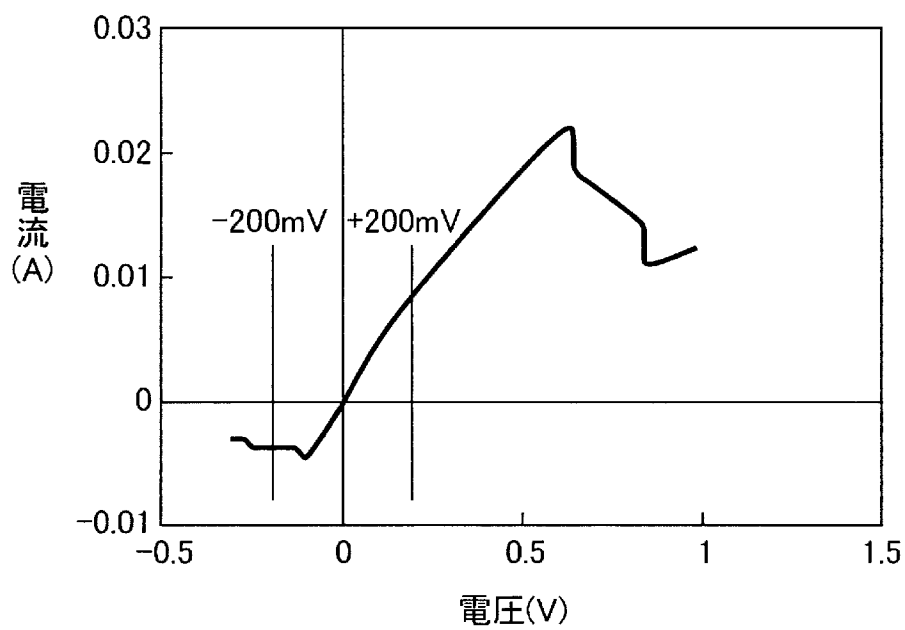
(b)



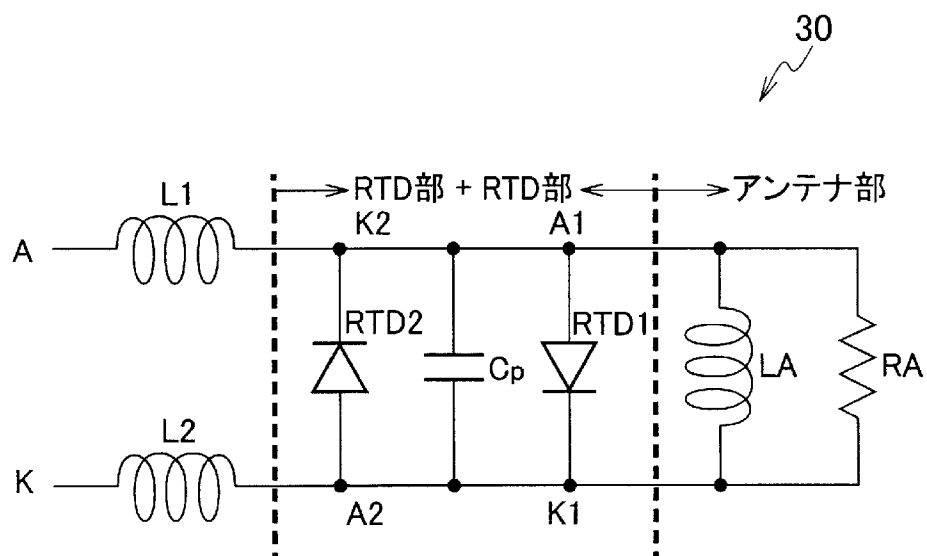
[図11]



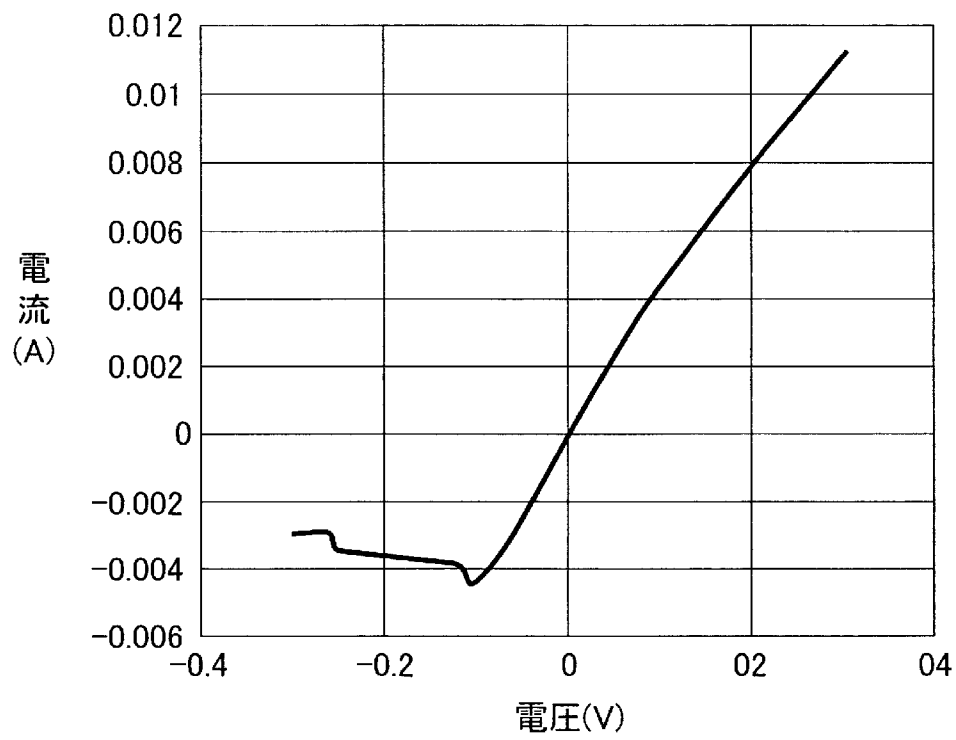
[図12]



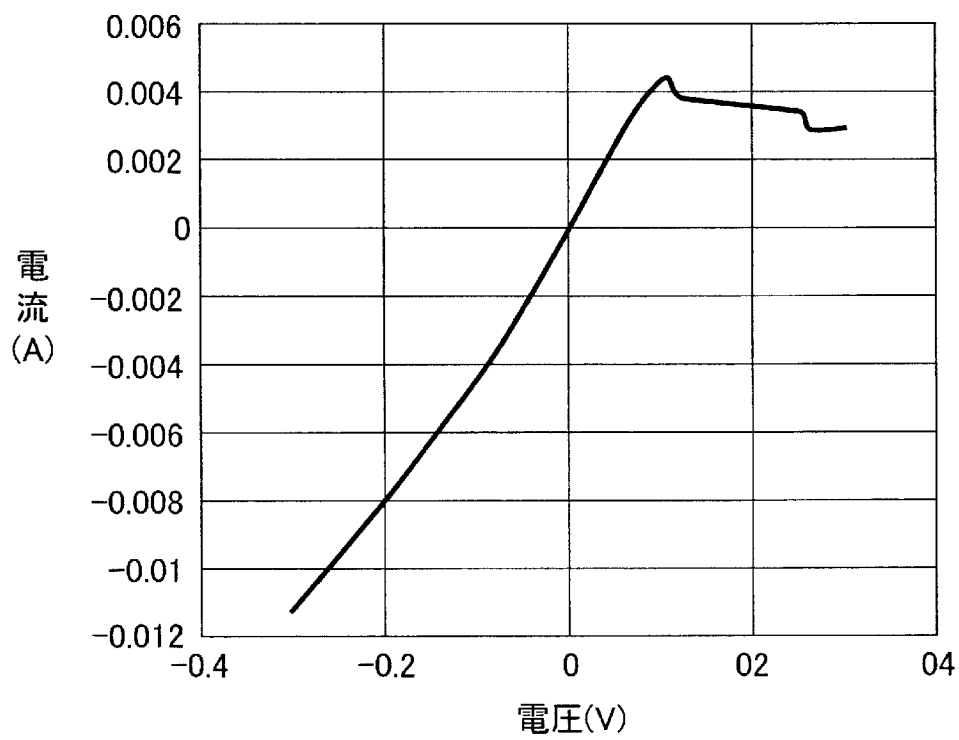
[図13]



[図14]



[図15]

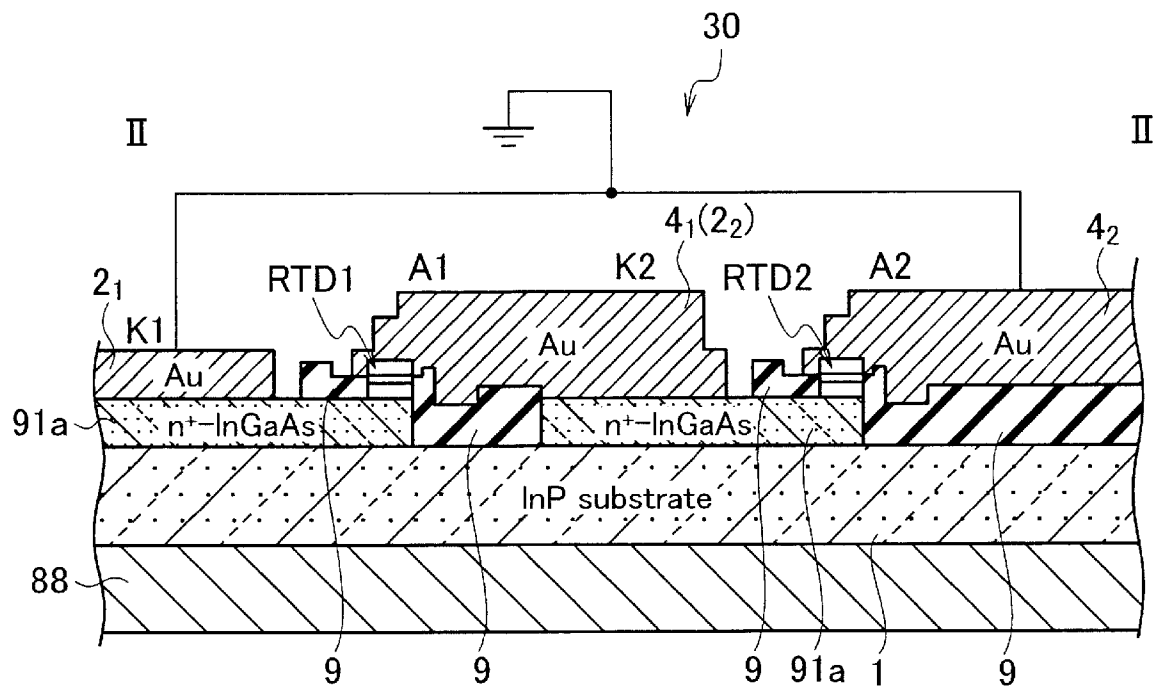


The graph illustrates the relationship between current (電流) and voltage (電圧). The y-axis represents current in Amperes (A), ranging from -8 to 8. The x-axis represents voltage in Volts (V), ranging from -0.4 to 0.4. The curve shows a non-linear relationship, passing through the origin (0,0).

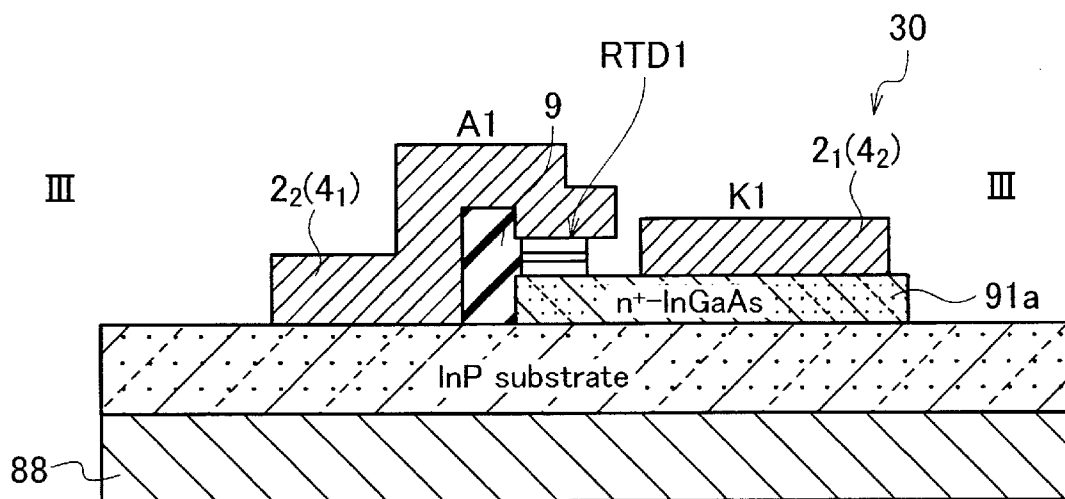
電圧 (V)	電流 (A)
-0.30	-6.5
-0.25	-5.0
-0.20	-4.0
-0.15	-3.0
-0.10	-2.0
-0.05	-1.0
0.00	0.0
0.05	1.0
0.10	2.0
0.15	3.0
0.20	4.0
0.25	5.0
0.30	6.5

[illegible]

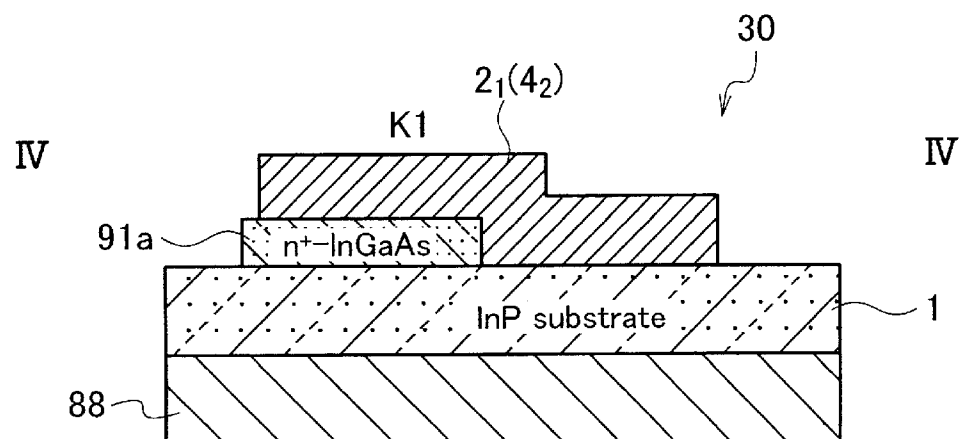
[図18]



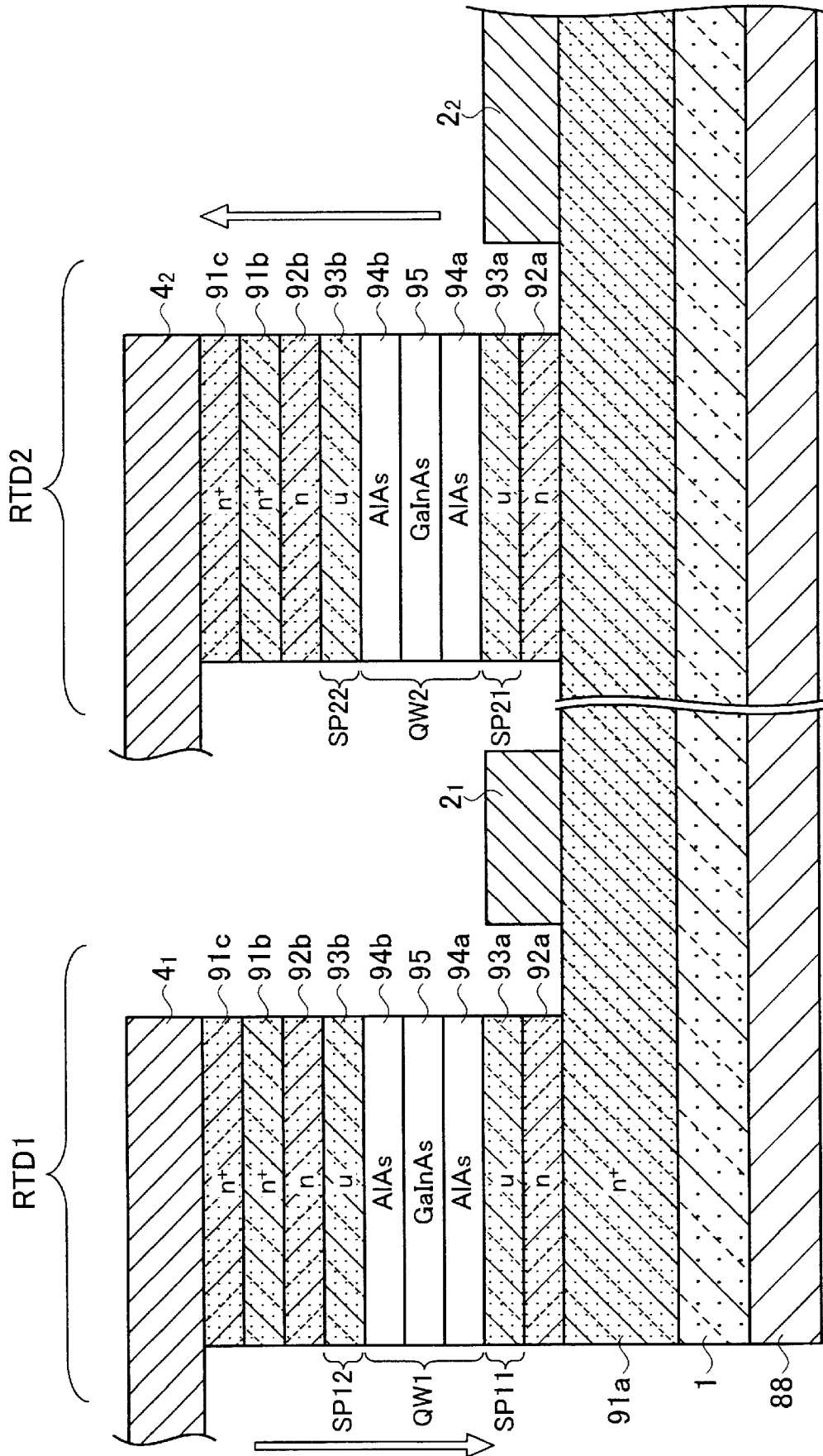
[図19]



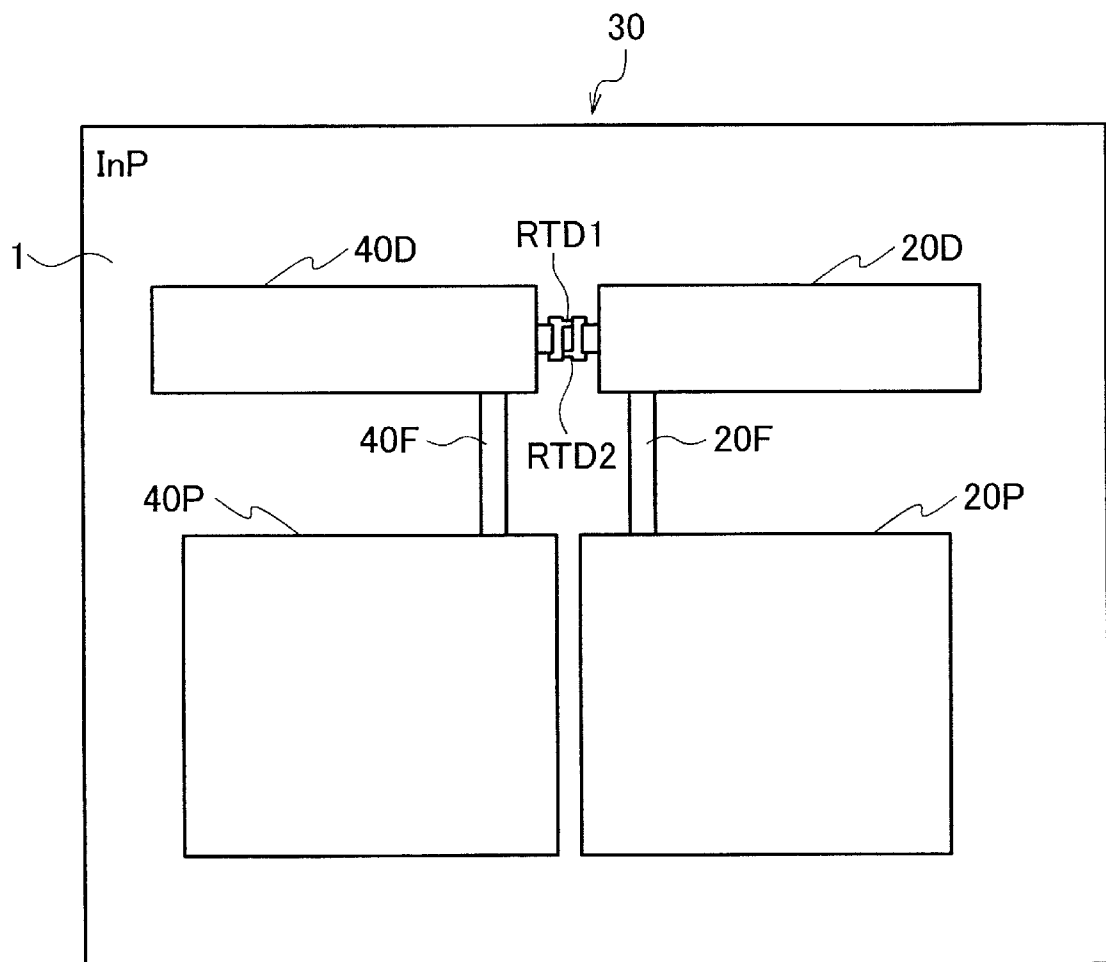
[図20]



[図21]



[図22]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/066892

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H03B7/08(2006.01)i, H01Q9/16(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)

H03B7/08, H01Q9/16

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	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

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.
A	JP 2009-049692 A (Tokyo Institute of Technology), 05 March 2009 (05.03.2009), paragraphs [0032] to [0042]; fig. 1 to 4 & US 2009/0051452 A1	1-21
A	JP 2011-155433 A (Rohm Co., Ltd.), 11 August 2011 (11.08.2011), paragraphs [0026] to [0066]; fig. 1 to 13 (Family: none)	1-21
A	JP 2013-168928 A (Canon Inc.), 29 August 2013 (29.08.2013), paragraphs [0025] to [0056]; fig. 1 to 3 & US 2013/0187721 A1	1-21

☐ 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
07 July 2015 (07.07.15)

Date of mailing of the international search report
21 July 2015 (21.07.15)

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

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H03B7/08(2006.01)i, H01Q9/16(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（I P C））

Int.Cl. H03B7/08, H01Q9/16

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	1971-2015年
日本国実用新案登録公報	1996-2015年
日本国登録実用新案公報	1994-2015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
A	JP 2009-049692 A（国立大学法人東京工業大学）2009.03.05, 段落 [0032] - [0042]、図1 - 図4 & US 2009/0051452 A1	1-21
A	JP 2011-155433 A（ローム株式会社）2011.08.11, 段落 [0026] - [0066]、図1 - 図13（ファミリーなし）	1-21
A	JP 2013-168928 A（キャノン株式）2013.08.29, 段落 [0025] - [0056]、図1 - 図3 & US 2013/0187721 A1	1-21

☐ 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

07.07.2015

国際調査報告の発送日

21.07.2015

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A/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）

畑中 博幸

5W

9180

電話番号 03-3581-1101 内線 3576