

(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
2025年2月6日(06.02.2025)



(10) 国際公開番号

WO 2025/027675 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 23/12 (2006.01) *H05K 3/46* (2006.01)
H05K 1/09 (2006.01) *H10N 60/80* (2023.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/027712
- (22) 国際出願日: 2023年7月28日(28.07.2023)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 富士通株式会社 (**FUJITSU LIMITED**)
[JP/JP]; 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: 福盛大雅 (**FUKUMORI, Taiga**);
〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 片山修平 (**KATAYAMA, Shuhei**);
〒1040031 東京都中央区京橋1-6-1 三井住友海上テプコビル 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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,

(54) **Title:** QUANTUM DEVICE AND PRODUCTION METHOD FOR MULTILAYER WIRING BOARD

(54) 発明の名称: 量子デバイスおよび多層配線基板の製造方法

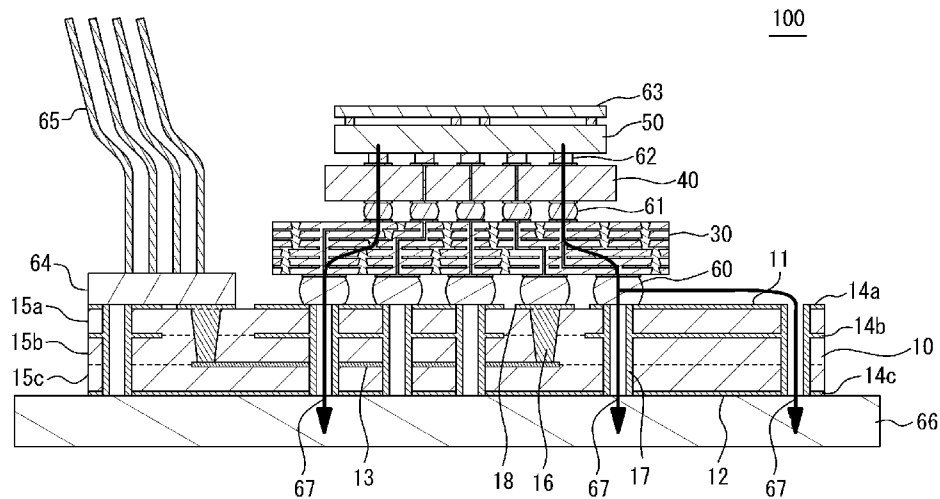


図9

(57) **Abstract:** This quantum device comprises: a multilayer wiring board provided with a first wiring that includes a superconducting material, a second wiring that includes a normal conductive material, and a via that is connected to the second wiring and includes a normal conductive material; and a quantum chip that is provided on a first surface of the multilayer wiring board and is electrically connected to the first wiring and the via. The via is formed so as to penetrate from the first surface to a second surface of the multilayer wiring board, and the second wiring is formed so as to be



MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK,
SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, 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))

exposed to the second surface of the multilayer wiring board. This configuration makes it possible to reduce the loss of high-frequency signals while ensuring the cooling performance of the quantum device.

(57) 要約: 量子デバイスは、超伝導材料を含む第1配線と、常伝導材料を含む第2配線と、第2配線に接続され、常伝導材料を含むビアと、を備える多層配線基板と、多層配線基板の第1面上に設けられ、第1配線及びビアに電氣的に接続された量子チップと、を備え、ビアは、多層配線基板の第1面から第2面に貫通して形成され、第2配線は、多層配線基板の第2面に露出して形成される。これにより、量子デバイスの冷却性を確保しつつ、高周波信号の損失を低減することができる。

明 細 書

発明の名称：量子デバイスおよび多層配線基板の製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、量子デバイスおよび多層配線基板の製造方法に関する。

背景技術

[0002] 高周波信号の伝送線路としてストリップ線路が知られている。例えば、信号配線を超伝導材料で形成し、グランド配線を常伝導材料で形成したストリップ線路からなる高周波信号遅延線路が知られている（例えば特許文献1）。また、信号配線とグランド配線を共に超伝導材料で形成することも知られている（例えば特許文献2）。更に、信号配線を内部の常伝導膜と外周部の超伝導膜とで形成し、グランド配線を回路パターン側の超伝導膜と反対側の常伝導膜とで形成することも知られている（例えば特許文献3）。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開平5-226901号公報

特許文献2：特表2020-535660号公報

特許文献3：特開平10-224110号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 極低温下において超伝導状態で動作する量子デバイスを備える超伝導量子コンピュータの開発が進められている。量子デバイスとして、多層配線基板上に量子チップを設けた構成が提案されている。この場合に、高周波信号の損失を低減するため、多層配線基板に設けられた信号配線およびグランド配線を超伝導材料で形成することが考えられる。しかしながら、超伝導材料は極低温において熱抵抗が非常に高くなる。このため、量子チップを極低温に冷却するために多層配線基板を冷却プレート上に配置した場合に、信号配線およびグランド配線の熱抵抗が非常に高くなって、量子チップを極低温まで

冷却できないことがある。

- [0005] 1つの側面では、量子デバイスの冷却性を確保しつつ、高周波信号の損失を低減することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0006] 1つの態様では、超伝導材料を含む第1配線と、常伝導材料を含む第2配線と、前記第2配線に接続され、常伝導材料を含むビアと、を備える多層配線基板と、前記多層配線基板の第1面上に設けられ、前記第1配線及び前記ビアに電氣的に接続された量子チップと、を備え、前記ビアは、前記多層配線基板の前記第1面から第2面に貫通して形成され、前記第2配線は、前記多層配線基板の前記第2面に露出して形成される、量子デバイスである。
- [0007] 1つの態様では、超伝導材料を含む第1配線と、磁性材料が添加された超伝導材料を含む第2配線と、前記第2配線に接続され、磁性材料が添加された超伝導材料を含むビアと、を備える多層配線基板と、前記多層配線基板の第1面上に設けられ、前記第1配線及び前記ビアに電氣的に接続された量子チップと、を備え、前記ビアは、前記多層配線基板の前記第1面から第2面に貫通して形成され、前記第2配線は、前記多層配線基板の前記第2面に露出して形成される、量子デバイスである。
- [0008] 1つの態様では、超伝導材料を含む信号配線と常伝導材料を含む複数のグラウンド配線とが絶縁層を間に挟んで積層された積層体の第1面に前記複数のグラウンド配線のうちの第1のグラウンド配線が露出し、前記第1面とは反対の第2面に前記複数のグラウンド配線のうちの第2のグラウンド配線が露出した前記積層体を形成する工程と、前記積層体に前記第1のグラウンド配線と前記第2のグラウンド配線とを接続する常伝導材料を含むグラウンドビアを形成する工程と、を備える多層配線基板の製造方法である。

発明の効果

- [0009] 1つの側面として、冷却性を確保しつつ、損失を低減することができる。

図面の簡単な説明

- [0010] [図1]図1は、実施例1に係る量子デバイスの断面図である。

[図2]図2（a）は、実施例1における量子チップに備わる量子ビットの平面図、図2（b）は、ジョセフソン接合素子の平面図、図2（c）は、図2（b）のA－A断面図である。

[図3]図3（a）から図3（d）は、実施例1におけるプリント基板の分解平面図である。

[図4]図4（a）は、図3（a）のA－A間に相当する箇所のプリント基板の断面図、図4（b）は、図3（a）のB－B間に相当する箇所のプリント基板の断面図である。

[図5]図5（a）から図5（c）は、実施例1におけるプリント基板の第1の製造方法を示す断面図である。

[図6]図6（a）から図6（c）は、実施例1におけるプリント基板の第2の製造方法を示す断面図である。

[図7]図7は、シミュレーションを行ったストリップ線路の断面図である。

[図8]図8は、ストリップ線路を伝送する高周波信号の挿入損失のシミュレーション結果である。

[図9]図9は、実施例1に係る量子デバイスの冷却構造を示す断面図である。

[図10]図10（a）および図10（b）は、実施例1の変形例におけるプリント基板の断面図である。

[図11]図11（a）から図11（e）は、実施例2におけるプリント基板の分解平面図である。

[図12]図12（a）は、図11（a）のA－A間に相当する箇所のプリント基板の断面図、図12（b）は、図11（a）のB－B間に相当する箇所のプリント基板の断面図である。

[図13]図13（a）は、実施例2におけるプリント基板の第1の製造方法を示す断面図、図13（b）は、第2の製造方法を示す断面図である。

[図14]図14（a）および図14（b）は、実施例2における2層構造のグラウンド配線の第1の形成方法を示す断面図、図14（c）から図14（e）は、第2の形成方法を示す断面図である。

[図15]図15は、実施例2に係る量子デバイスの冷却構造を示す断面図である。

[図16]図16(a)および図16(b)は、実施例2の変形例におけるプリント基板の断面図である。

[図17]図17(a)および図17(b)は、実施例2の変形例における2層構造のグラウンド配線の第1の形成方法を示す断面図、図17(c)から図17(e)は、第2の形成方法を示す断面図である。

[図18]図18は、実施例2の変形例に係る量子デバイスの冷却構造を示す断面図である。

[図19]図19は、導体の表面からの距離に対する電流密度を示す図である。

[図20]図20(a)および図20(b)は、実施例3におけるプリント基板の断面図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、図面を参照し、本発明の実施例について説明する。

実施例 1

[0012] 図1は、実施例1に係る量子デバイス100の断面図である。図1のように、実施例1に係る量子デバイス100は、プリント基板10と、パッケージ基板30と、インターポーザ40と、量子チップ50と、を備える。パッケージ基板30は、接合材60によってプリント基板10に搭載されている。インターポーザ40は、接合材61によってパッケージ基板30に搭載されている。接合材61のピッチは、接合材60のピッチより小さい。例えば、接合材60のピッチは1mm程度であり、接合材61のピッチは200μm程度である。接合材60、61は、はんだであり、例えばSn-Ag-Cu系はんだ、または、Sn-Cu系はんだである。

[0013] 量子チップ50は、接合材62によってインターポーザ40に搭載されている。接合材62は、接合材60、61より接合温度が低く、例えばインジウム(In)バンプや金(Au)バンプである。接合材62にInバンプを用いることで、はんだを用いる場合に比べて、量子チップ50をインターポー

ーザ40に搭載するときの温度を低く抑えることができる。例えば、はんだを用いた場合の接合温度は200℃程度（加熱時間は約5分）であるのに対し、Inバンプを用いた場合は接合温度を140℃程度まで低く抑えることができる。超音波Au接合を用いた場合は接合温度を200℃程度（加熱時間は約3秒）まで低く抑えることができる。量子チップ50は例えばジョセフソン接合素子を有する量子ビットを備える。

[0014] 図2(a)は、実施例1における量子チップ50に備わる量子ビット51の平面図、図2(b)は、ジョセフソン接合素子56の平面図、図2(c)は、図2(b)のA-A断面図である。図2(a)において、図の明瞭化のために、導電膜にハッチングを付している。図2(a)から図2(c)のように、量子ビット51は、量子ビット素子52と共振器53とフィルタ54とを備える。量子ビット素子52は、電極55aと電極55bとの間に接続されたジョセフソン接合素子56を含む。ジョセフソン接合素子56は、超伝導膜57aと超伝導膜57bが絶縁膜58を介して重なっている。超伝導膜57a、57bは例えばアルミニウム(Al)膜である。絶縁膜58は例えば酸化アルミニウム(Al_2O_3)膜である。超伝導膜57a、57bは、磁性材料が添加されていない超伝導材料により形成されている。ジョセフソン接合素子56は、超伝導膜57aが電極55aに接続され、超伝導膜57bが電極55bに接続されることで、電極55aと電極55bとの間に接続されている。量子ビット素子52は、ジョセフソン接合素子56と、ジョセフソン接合素子56に並列接続された、電極55aおよび電極55bからなるキャパシタと、を含むトランズモンを備える。共振器53は、例えばメアング構造のコプレーナ線路を含み、一端が量子ビット素子52に静電的に結合されている。共振器53の他端は、フィルタ54を介して読出部59に接続されている。

[0015] 図1において、量子チップ50をインターポーザ40に搭載するときの温度が高くなると、ジョセフソン接合素子56の絶縁膜58の厚さが変化する場合があります、量子ビット素子52の特性の変化が生じてしまう。そこで、パ

ッケー基板 30 を接合材 60 によってプリント基板 10 に搭載し、インターポーザ 40 を接合材 61 によってパッケージ基板 30 に搭載した後に、量子チップ 50 を In バンプまたは Au バンプ等からなる接合材 62 によってインターポーザ 40 に搭載する。これにより、量子チップ 50 の温度上昇を避け、量子ビット素子 52 の特性変化を抑制できる。なお、図 1 のように、量子チップ 50 を覆ってカバーチップ 63 が設けられていてもよい。

[0016] プリント基板 10 にはコネクタ 64 を介してケーブル 65 が接続されている。ケーブル 65 は、一端がコネクタ 64 に接続され、他端が例えば高周波発生装置または高周波受信装置等の外部装置に接続されている。量子チップ 50 と外部装置との間で送受信される高周波（例えば 1 GHz ~ 10 GHz）の電気信号は、ケーブル 65、コネクタ 64、プリント基板 10、接合材 60、パッケージ基板 30、接合材 61、インターポーザ 40、および接合材 62 を伝送する。

[0017] 図 3 (a) から図 3 (d) は、実施例 1 におけるプリント基板 10 の分解平面図である。図 4 (a) は、図 3 (a) の A-A 間に相当する箇所のプリント基板 10 の断面図、図 4 (b) は、図 3 (a) の B-B 間に相当する箇所のプリント基板 10 の断面図である。図 3 (a) から図 3 (d) は、各層を上方から見た平面図である。図 3 (a) から図 3 (d) では、図の明瞭化のために、信号配線 13、グランド配線 14 a、14 b、14 c、信号ビア 16、グランドビア 17、およびランド 18 にハッチングを付している。

[0018] 図 3 (a) から図 3 (d) および図 4 (a)、図 4 (b) のように、プリント基板 10 は、信号配線 13 と、複数のグランド配線 14 a、14 b、14 c と、複数の絶縁層 15 a、15 b、15 c と、を備える。グランド配線 14 a（第 3 配線）は、プリント基板 10 の上面 11（第 1 面）に露出して設けられている。グランド配線 14 c（第 2 配線）は、プリント基板 10 の下面 12（第 2 面）に露出して設けられている。信号配線 13（第 1 配線）とグランド配線 14 b（第 4 配線）はプリント基板 10 の内部に設けられている。信号配線 13 は、平面視において少なくとも一部がグランド配線 14

a、14cの両方に重なっている。絶縁層15aは、グランド配線14aとグランド配線14bとの間に位置する層である。絶縁層15bは、グランド配線14bと信号配線13との間に位置する層である。絶縁層15cは、信号配線13とグランド配線14cとの間に位置する層である。

[0019] 信号配線13は、上面が絶縁層15bを介してグランド配線14bに対向し、下面が絶縁層15cを介してグランド配線14cに対向し、グランド配線14bとグランド配線14cにより挟まれている。これにより、信号配線13とグランド配線14b、14cとによりストリップ線路19が形成されている。

[0020] プリント基板10は、更に、信号配線13に接続する信号ビア16と、グランド配線14a、14b、14cに接続するグランドビア17と、信号ビア16に接続するランド18と、を備える。ランド18は、プリント基板10の上面11に露出して設けられている。信号ビア16は、プリント基板10にランド18から信号配線13にかけて設けられている。グランドビア17は、プリント基板10の上面11から下面12に貫通して設けられている。

[0021] 信号配線13は、超伝導材料により形成されている。超伝導材料とは、極低温（例えば数十mK）において超電導状態となる材料である。信号配線13に用いられる超伝導材料として、例えばアルミニウム（Al）、窒化チタン（TiN）、およびニオブ（Nb）等が挙げられる。信号配線13の超伝導材料は磁性材料が添加されていない。グランド配線14a、14b、14cは、常伝導材料により形成されている。常伝導材料とは、極低温（例えば数十mK）の温度域で超電導状態とならない材料である。グランド配線14a、14b、14cに用いられる常伝導材料として、例えば銅（Cu）および銀（Ag）等が挙げられる。

[0022] 絶縁層15a、15b、15cは、例えばエポキシ樹脂、フェノール樹脂、またはガラスエポキシ樹脂等により形成されている。信号ビア16およびランド18は、超伝導材料（例えばAl、TiN、Nb）または常伝導材料

(例えばCu、Ag)により形成されている。ランドビア17は、常伝導材料(例えばCu、Ag)により形成されている。

[0023] 信号配線13の幅Wは、数十 μm から百数十 μm であり、例えば50 μm ～150 μm である。信号配線13の長さLは、数cmから数十cmであり、例えば5cm～20cmである。信号配線13およびランド配線14a、14b、14cの厚さは数十 μm であり、例えば10 μm ～50 μm である。絶縁層15a、15b、15cの厚さは数十 μm ～百数十 μm であり、例えば80 μm ～120 μm である。ランドビア17の内壁の導体の厚さは例えば25 μm 程度であり、ランドビア17の内側の貫通孔の直径D1は例えば100 μm 程度である。ランド18の直径D2は例えば400 μm 程度である。ランド18とランド配線14aとの間隔Iは例えば100 μm 程度である。

[0024] [プリント基板の製造方法]

図5(a)から図5(c)は、実施例1におけるプリント基板10の第1の製造方法を示す断面図である。図5(a)のように、上面にランド配線14aが形成され、下面にランド配線14bが形成された硬化済みの絶縁層70aを準備する。同様に、上面に信号配線13が形成され、下面にランド配線14cが形成された硬化済みの絶縁層70bを準備する。絶縁層70a、70bは、熱硬化性樹脂(例えばガラスエポキシ樹脂)を硬化させて形成する。ランド配線14a、14b、14cは、例えば絶縁層70a、70bの表面に常伝導材料の導電箔(例えばCu箔)を貼り付け、パターニングすることで形成する。信号配線13は、例えば絶縁層70bの表面に超伝導材料の導電箔(例えばAl箔)を貼り付け、パターニングすることで形成する。絶縁層70aと絶縁層70bとの間に半硬化状態の絶縁層71aを挟むように配置する。絶縁層71aは、熱硬化性樹脂(例えばガラスエポキシ樹脂)を半硬化状態にしたものであり、接着剤の役割を果たす。半硬化状態とは、硬化を途中で止めてある状態である。硬化済樹脂をコア、半硬化樹脂をプリプレグとも言う。硬化樹脂と半硬化樹脂の成分は同じでもよい。

- [0025] 絶縁層 71 a を挟むようにして絶縁層 70 a と絶縁層 71 a と絶縁層 70 b とを積層し、積層方向からの圧力と温度を加えて絶縁層 71 a を硬化させる。これにより、図 5 (b) のように、信号配線 13 とグランド配線 14 a、14 b、14 c との間に絶縁層 15 a、15 b、15 c が設けられた積層体 72 が形成される。積層体 72 は、上面 73 にグランド配線 14 a が露出し、下面 74 にグランド配線 14 c が露出する。また、積層体 72 の積層方向において、信号配線 13 は絶縁層 15 c を挟んでグランド配線 14 c に対向している。グランド配線 14 b は、絶縁層 15 b を挟んで信号配線 13 に対向し、グランド配線 14 c とで信号配線 13 を挟んでいる。
- [0026] 図 5 (c) のように、例えばレーザ加工によって信号配線 13 まで届く穴 75 を形成し、穴 75 に例えばめっき法により超伝導膜または常伝導膜を埋め込んで信号ビア 16 とランド 18 を形成する。例えばドリル加工によって積層体 72 を上面 73 から下面 74 にかけて貫通する貫通孔 76 を形成し、貫通孔 76 の内面に例えばめっき法により常伝導膜を形成してグランドビア 17 を形成する。以上により、プリント基板 10 が形成される。
- [0027] 図 6 (a) から図 6 (c) は、実施例 1 におけるプリント基板 10 の第 2 の製造方法を示す断面図である。図 6 (a) のように、上面にグランド配線 14 b が形成され、下面に信号配線 13 が形成された絶縁層 70 c を形成する。絶縁層 70 c、グランド配線 14 b、および信号配線 13 は、第 1 の製造方法と同じ方法により形成する。絶縁層 70 c の両側に絶縁層 71 b、71 c を配置し、絶縁層 71 b、71 c の外側に常伝導材料の導電箔 77 a、77 b (例えば Cu 箔) を配置する。絶縁層 71 b、71 c は、第 1 の製造方法と同じく、熱硬化性樹脂 (例えばガラスエポキシ樹脂) を半硬化状態にしたものであり、接着剤の役割を果たす。
- [0028] 導電箔 77 a、77 b と絶縁層 71 b、71 c と絶縁層 70 c とを積層させ、積層方向からの圧力と温度を加えて絶縁層 71 b、71 c を硬化させる。その後、導電箔 77 a、77 b をパターンニングする。これにより、図 6 (b) のように、信号配線 13 とグランド配線 14 a、14 b、14 c との間

に絶縁層 15 a、15 b、15 c が設けられた積層体 72 が形成される。積層体 72 は、上面 73 にグランド配線 14 a が露出し、下面 74 にグランド配線 14 c が露出する。また、積層体 72 の積層方向において、信号配線 13 は絶縁層 15 c を挟んでグランド配線 14 c に対向している。グランド配線 14 b は、絶縁層 15 b を挟んで信号配線 13 に対向し、グランド配線 14 c とで信号配線 13 を挟んでいる。

[0029] 図 6 (c) のように、図 5 (c) で説明した方法と同じ方法によって信号ビア 16、グランドビア 17、およびランド 18 を形成する。以上により、プリント基板 10 が形成される。

[0030] [シミュレーション]

図 7 は、シミュレーションを行ったストリップ線路 90 の断面図である。図 7 のように、ストリップ線路 90 は、誘電体層 93 の上下面にグランド配線 92 が設けられ、内部に信号配線 91 が設けられている。ストリップ線路 90 の挿入損失 S_{21} をシミュレーションした。シミュレーション条件は以下である。

信号配線 91 : 厚さ T_1 が $30\ \mu\text{m}$ 、幅 W が $100\ \mu\text{m}$ 、長さが $10\ \text{cm}$ のアルミニウム (Al) 層または銅 (Cu) 層

グランド配線 92 : 厚さ T_2 が $30\ \mu\text{m}$ のアルミニウム (Al) 層または銅 (Cu) 層

誘電体層 93 : 厚さ T_3 が $100\ \mu\text{m}$ 、誘電率が 3.3、誘電正接が 0.004

温度 : $10\ \text{mK}$

[0031] 図 8 は、ストリップ線路 90 を伝送する高周波信号の挿入損失 S_{21} のシミュレーション結果である。図 8 において、横軸は周波数 [GHz] で、縦軸は挿入損失 S_{21} [dB/10 cm] である。信号配線 91 とグランド配線 92 の両方を Al 層とした場合のシミュレーション結果を実線で示している。信号配線 91 を Al 層とし、グランド配線 92 を Cu 層とした場合のシミュレーション結果を破線で示している。信号配線 91 を Cu 層とし、グラ

ンド配線 9 2 を A 1 層とした場合のシミュレーション結果を一点鎖線で示している。信号配線 9 1 とグランド配線 9 2 の両方を C u 層とした場合のシミュレーション結果を点線で示している。

[0032] 図 8 のように、信号配線 9 1 とグランド配線 9 2 の両方を A 1 層とした場合（実線）、信号配線 9 1 とグランド配線 9 2 の両方を C u 層とした場合（点線）に比べて、挿入損失 S 2 1 が大きく低減した。これは、C u は常伝導材料であるのに対し、A 1 は超伝導材料であるため、温度が 1 0 m K では A 1 は超伝導状態となって電気抵抗が小さくなったためと考えられる。信号配線 9 1 を A 1 層、グランド配線 9 2 を C u 層とした場合（破線）では、信号配線 9 1 とグランド配線 9 2 の両方を A 1 層とした場合（実線）に比べると挿入損失 S 2 1 は悪化したが、両方を C u 層とした場合（点線）に比べると低減した。信号配線 9 1 を C u 層、グランド配線 9 2 を A 1 層とした場合（一点鎖線）でも、信号配線 9 1 とグランド配線 9 2 の両方を C u 層とした場合（点線）に比べて挿入損失 S 2 1 は低減した。このシミュレーション結果から、挿入損失 S 2 1 の低減は、信号配線 9 1 とグランド配線 9 2 の両方を超伝導材料にする場合に効果が大いだが、信号配線 9 1 のみを超伝導材料にする場合でも十分な効果が得られることが分かる。

[0033] ここで、超伝導材料は、極低温下では熱抵抗が非常に高くなり、絶対零度では完全断熱となることが知られている。一方で、量子チップは、超伝導状態で動作するよう極低温に冷却される。

[0034] 図 9 は、実施例 1 に係る量子デバイス 1 0 0 の冷却構造を示す断面図である。図 9 では、冷却の説明の便宜上、プリント基板 1 0 は図 4 (a) と図 4 (b) を組み合わせた図としている。図 9 のように、プリント基板 1 0 が冷却プレート 6 6 の上面に配置される。これにより、プリント基板 1 0 の下面 1 2 に露出したグランド配線 1 4 c が冷却プレート 6 6 に接触する。冷却プレート 6 6 は、例えば厚さが 1 c m 程度の銅板である。冷却プレート 6 6 は、例えば 1 0 m K 程度まで冷却が可能な冷凍機（不図示）によって冷却される。したがって、プリント基板 1 0 を冷却プレート 6 6 上に配置することで

、量子チップ50と冷却プレート66との間で矢印67のようにプリント基板10のグランド配線14aとグランドビア17とグランド配線14cを介した熱の伝達が起こる。これにより、量子チップ50を極低温（例えば数十mK）に冷却することが可能となり、量子チップ50を超伝導状態で動作させることができる。

[0035] ここで、高周波信号の損失の低減のために、プリント基板10の信号配線13、グランド配線14a、14b、14c、信号ビア16、グランドビア17、およびランド18を全て超伝導材料（例えばAl）で形成することが考えられる。しかしながら、冷却プレート66によってプリント基板10も極低温まで冷却されることから、信号配線13およびグランド配線14a、14b、14c等も極低温まで冷却される。グランド配線14a、14b、14cおよびグランドビア17が超伝導材料で形成されている場合、グランド配線14a、14b、14cおよびグランドビア17は極低温に冷却されると熱抵抗が高くなる。したがって、矢印67のような熱の伝達が起こり難くなり、量子チップ50を極低温に冷却できないことがある。

[0036] そこで、実施例1では、信号配線13は超伝導材料で形成するが、グランド配線14a、14b、14cおよびグランドビア17は常伝導材料で形成している。これにより、グランド配線14a、14b、14cおよびグランドビア17は、極低温に冷却されても、超伝導材料で形成される場合に比べて熱抵抗が低く抑えられる。よって、量子チップ50を極低温まで冷却することが可能となる。また、信号配線13を超伝導材料で形成することで、信号配線13は極低温に冷却されて電気抵抗が小さくなるため、図8のように、高周波信号の損失を低減することができる。

[0037] [変形例]

図10(a)および図10(b)は、実施例1の変形例におけるプリント基板10aの断面図である。図10(a)および図10(b)のように、実施例1の変形例におけるプリント基板10aでは、下面12から上面11に向かって、グランド配線14c、絶縁層15c、グランド配線14b、絶縁

層 1 5 b、信号配線 1 3、絶縁層 1 5 a、グランド配線 1 4 a の順に積層されている。したがって、信号配線 1 3 は、上面が絶縁層 1 5 a を介してグランド配線 1 4 a に対向し、下面が絶縁層 1 5 b を介してグランド配線 1 4 b に対向し、グランド配線 1 4 a とグランド配線 1 4 b により挟まれている。このため、信号配線 1 3 とグランド配線 1 4 a、1 4 b とによりストリップ線路 1 9 が形成されている。その他の構成は実施例 1 と同じであるため説明を省略する。

[0038] 以上のように、実施例 1 およびその変形例によれば、信号配線 1 3 は超伝導材料により形成されている。これにより、高周波信号の損失を低減することができる。また、図 4 (b) および図 10 (b) のように、プリント基板 1 0、1 0 a の上面 1 1 に露出したグランド配線 1 4 a と下面 1 2 に露出したグランド配線 1 4 c はグランドビア 1 7 により接続されている。グランド配線 1 4 a、1 4 c およびグランドビア 1 7 は常伝導材料により形成されている。これにより、図 9 で説明したように、プリント基板 1 0、1 0 a 上に設けられた量子チップ 5 0 を極低温に冷却しようとしてプリント基板 1 0、1 0 a が極低温に冷却された場合でも、量子チップ 5 0 と冷却プレート 6 6 との間の熱の伝達が維持される。よって、量子チップ 5 0 を極低温に冷却することができる。このように、実施例 1 およびその変形例によれば、冷却性を確保しつつ、高周波信号の損失を低減することができる。

[0039] また、実施例 1 およびその変形例では、図 4 (a) および図 10 (a) のように、信号配線 1 3 は、グランド配線 1 4 a、1 4 c のうちの一方のグランド配線とグランド配線 1 4 b とに対向し、これらの間に挟まれている。これにより、量子チップ 5 0 に高周波信号を伝送するストリップ線路 1 9 が形成される。ストリップ線路 1 9 を形成するグランド配線の一方をグランド配線 1 4 a またはグランド配線 1 4 c とすることで、プリント基板 1 0、1 0 a を小型化することができる。

[0040] また、実施例 1 およびその変形例では、信号配線 1 3 に接続する信号ビア 1 6 は超伝導材料または常伝導材料により形成されている。信号ビア 1 6 が

超伝導材料により形成されている場合、高周波信号の損失を更に低減することができる。信号ビア 16 が常伝導材料により形成されている場合、グラウンドビア 17 と同時に形成することが可能となるため、製造コストを抑えることができる。

[0041] また、実施例 1 およびその変形例の製造方法によれば、図 5 (b) および図 6 (b) のように、超伝導材料を含む信号配線 13 と常伝導材料を含むグラウンド配線 14 a、14 b、14 c とが絶縁層 15 a、15 b、15 c を間に挟んで積層された積層体 72 を形成する。積層体 72 の上面 73 にグラウンド配線 14 a が露出し、下面 74 にグラウンド配線 14 c が露出している。図 5 (c) および図 6 (c) のように、積層体 72 にグラウンド配線 14 a とグラウンド配線 14 c とを接続する常伝導材料を含むグラウンドビア 17 を形成する。これにより、極低温に冷却された場合でも冷却性を確保し、かつ、高周波信号の損失を低減することができるプリント基板 10、10 a が得られる。

[0042] また、実施例 1 では、図 5 (b) および図 6 (b) のように、信号配線 13 がグラウンド配線 14 c とグラウンド配線 14 b とに対向してこれらの間に挟まれた積層体 72 を形成する。実施例 1 の変形例では、図 10 (a) のように、信号配線 13 がグラウンド配線 14 a とグラウンド配線 14 b とに対向してこれらの間に挟まれた積層体 72 を形成する。これにより、高周波信号を伝送するストリップ線路 19 が形成される。

[0043] また、実施例 1 では、図 5 (a) のように、グラウンド配線 14 a が形成された絶縁層 70 a と、グラウンド配線 14 c と信号配線 13 が形成された絶縁層 70 b と、の間に絶縁層 71 a を挟む。実施例 1 の変形例では、図 10 (a) から明らかなように、グラウンド配線 14 a と信号配線 13 が形成された絶縁層 70 a と、グラウンド配線 14 c が形成された絶縁層 70 b と、の間に絶縁層 71 a を挟む。その後、図 5 (b) のように、絶縁層 71 a を硬化させることで積層体 72 を形成する。これにより、プリント基板 10、10 a を容易に形成できる。

[0044] また、実施例1およびその変形例では、図6(a)のように、導電箔77a、77bの間に絶縁層71b、71cと信号配線13が形成された絶縁層70cを挟み、絶縁層71b、71cの間に絶縁層70cを挟む。その後、図6(b)のように、絶縁層71b、71cを硬化させた後、導電箔77a、77bを加工してグランド配線14a、14cを形成することで積層体72を形成する。これにより、プリント基板10、10aを容易に形成できる。

実施例 2

[0045] 図11(a)から図11(e)は、実施例2におけるプリント基板10bの分解平面図である。図12(a)は、図11(a)のA-A間に相当する箇所のプリント基板10bの断面図、図12(b)は、図11(a)のB-B間に相当する箇所のプリント基板10bの断面図である。図11(a)、図11(b)、図11(d)、および図11(e)は、各層を上方から見た平面図であり、図11(c)は、グランド配線14bを下方から見た平面図である。図11(a)から図11(e)では、図の明瞭化のために、信号配線13、グランド配線14a、14b、14c、信号ビア16、グランドビア17、およびランド18にハッチングを付している。

[0046] 図11(a)から図11(e)および図12(a)、図12(b)のように、実施例2におけるプリント基板10bでは、グランド配線14bは第1層21と第2層22を備える。第1層21は、第2層22の信号配線13側の面23に設けられている。第1層21は、超伝導材料により形成され、例えばAlにより形成されている。第2層22は、常伝導材料により形成され、例えばCuにより形成されている。

[0047] 第1層21は、第2層22の面23の全面に設けられているわけではなく、平面視において信号配線13に重なるように信号配線13よりも大きな面積で面23の一部に設けられている。第1層21は、例えば平面視において信号配線13の中心点に重なる点に対して点対称な矩形形状をしている。信号配線13の幅方向(Y方向)における信号配線13の中心線に重なる線が

らY方向における第1層21の端までの長さL1は、信号配線13の幅Wの3倍以上であり、5倍以上でもよい。一例として、信号配線13の幅Wが80 μm の場合、長さL1は500 μm である。信号配線13の長さ方向(X方向)における信号配線13の先端部に重なる箇所からX方向における第1層21の端までの長さL2も、信号配線13の幅Wの3倍以上であり、5倍以上でもよい。つまり、第1層21は、第2層22の面23に信号配線13に重なる箇所から信号配線13の幅Wの3倍以上の範囲にわたって設けられていて、5倍以上の範囲にわたって設けられてもよい。

[0048] グランド配線14cもグラント配線14bと同様に第1層24と第2層25を備える。第1層24は、第2層25の信号配線13側の面26に設けられている。第1層24は、超伝導材料により形成され、例えばAlにより形成されている。第2層25は、常伝導材料により形成され、例えばCuにより形成されている。

[0049] 第1層24は、第2層25の面26の全面に設けられているわけではなく、平面視において信号配線13に重なるように信号配線13よりも大きな面積で面26の一部に設けられている。第1層24は、グラント配線14bの第1層21と同じく、例えば平面視において信号配線13の中心点に重なる点に対して点対称な矩形形状をしている。第1層24は、グラント配線14bの第1層21と同じく、第2層25の面26に信号配線13に重なる箇所から信号配線13の幅Wの3倍以上の範囲にわたって設けられていて、5倍以上の範囲にわたって設けられてもよい。

[0050] グランドビア17は、グラント配線14a、14b、14cに接続するが、グラント配線14b、14cにおいては少なくとも第2層22、25に接続する。実施例2に係る量子デバイスのその他の構成は、実施例1に係る量子デバイス100と同じであるため図示および説明を省略する。

[0051] [プリント基板の製造方法]

図13(a)は、実施例2におけるプリント基板10bの第1の製造方法を示す断面図である。図13(a)のように、上面にグラント配線14aが

形成され、下面に第1層21と第2層22を備えるグラウンド配線14bが形成された絶縁層80aを準備する。また、上面に信号配線13が形成され、下面に第1層24と第2層25を備えるグラウンド配線14cが形成された絶縁層80bを準備する。そして、絶縁層80aと絶縁層80bとの間に絶縁層81aを挟むように配置する。その後、実施例1の図5(b)および図5(c)と同じ工程を行う。これにより、実施例2におけるプリント基板10bが形成される。

[0052] ここで、2層構造のグラウンド配線14b、14cの形成方法について説明する。グラウンド配線14b、14cは同様な方法によって形成されるため、ここではグラウンド配線14bを例に説明する。図14(a)および図14(b)は、実施例2における2層構造のグラウンド配線14bの第1の形成方法を示す断面図、図14(c)から図14(e)は、実施例2における2層構造のグラウンド配線14bの第2の形成方法を示す断面図である。

[0053] 第1の形成方法では、まず、図14(a)のように、絶縁層80aの上面に常伝導材料の導電膜83a(例えば導電箔(Cu箔))を貼り付ける。絶縁層80aの下面に、超伝導材料からなる膜85(例えばAl膜)と常伝導材料からなる膜86(例えばCu膜)とが一体化した導電膜87を貼り付ける。導電膜87は、例えば導電箔である膜86の表面に膜85をめっき法により形成したものである。次いで、図14(b)のように、絶縁層80aの上面の導電膜83aをパターニングすることでグラウンド配線14aを形成する。絶縁層80aの下面の導電膜87をパターニングすることで第1層21と第2層22の2層構造のグラウンド配線14bを形成する。

[0054] 第2の形成方法では、まず、図14(c)のように、絶縁層80aの上面および下面に常伝導材料の導電膜83b、83c(例えば導電箔(Cu箔))を貼り付ける。次いで、図14(d)のように、絶縁層80aの下面に貼り付けられた導電膜83cの表面に、めっきレジスト84をマスクとしためっき法によって超伝導材料からなる膜82(例えばAl膜)を形成する。図14(e)のように、絶縁層80aの上面の導電膜83bをパターニングす

ることでグランド配線 14 a を形成する。めっきレジスト 8 4 を除去した後、絶縁層 8 0 a の下面の導電膜 8 3 c をパターニングすることで第 1 層 2 1 と第 2 層 2 2 の 2 層構造のグランド配線 14 b を形成する。第 2 の形成方法によってグランド配線 14 b を形成することで、第 1 層 2 1 を位置精度良く形成することができる。

[0055] 図 1 3 (b) は、実施例 2 におけるプリント基板 1 0 b の第 2 の製造方法を示す断面図である。図 1 3 (b) のように、上面に第 1 層 2 1 と第 2 層 2 2 を備えるグランド配線 14 b が形成され、下面に信号配線 1 3 が形成された絶縁層 8 0 c を準備する。グランド配線 14 b および信号配線 1 3 は、図 1 4 (a) および図 1 4 (b) に示した第 1 の形成方法、または、図 1 4 (c) から図 1 4 (e) に示した第 2 の形成方法と同様の方法によって形成する。絶縁層 8 0 c の両側に絶縁層 8 1 b、8 1 c を配置し、絶縁層 8 1 b の外側に常伝導材料の導電膜 8 3 a を配置する。絶縁層 8 1 c の外側には、超伝導材料からなる膜 8 5 と常伝導材料からなる膜 8 6 とが一体化した導電膜 8 7 を配置する。その後、実施例 1 の図 6 (b) および図 6 (c) と同じ工程を行う。これにより、実施例 2 におけるプリント基板 1 0 b が形成される。

[0056] 図 1 5 は、実施例 2 に係る量子デバイス 2 0 0 の冷却構造を示す断面図である。図 1 5 では、冷却の説明の便宜上、プリント基板 1 0 b は図 1 2 (a) と図 1 2 (b) を組み合わせた図としている。図 1 5 のように、プリント基板 1 0 b が冷却プレート 6 6 の上面に配置される。これにより、プリント基板 1 0 b の下面 1 2 に露出したグランド配線 14 c の第 2 層 2 5 が冷却プレート 6 6 に接触する。グランド配線 14 c の第 2 層 2 5、グランドビア 1 7、およびグランド配線 14 a は、常伝導材料で形成されていることから、極低温に冷却されても熱抵抗が低く抑えられる。グランドビア 1 7 はグランド配線 14 c の第 2 層 2 5 に接続されていることから、極低温に冷却されても、量子チップ 5 0 と冷却プレート 6 6 の間での矢印 6 7 のような熱の伝達が維持される。したがって、量子チップ 5 0 を極低温に冷却することが可能

となる。

[0057] [変形例]

図16(a)および図16(b)は、実施例2の変形例におけるプリント基板10cの断面図である。図16(a)および図16(b)のように、実施例2の変形例におけるプリント基板10cでは、グランド配線14bは、第2層22の信号配線13側の面の全面に第1層21が設けられている。グランド配線14cは、第2層25の信号配線13側の面の全面に第1層24が設けられている。その他の構成は実施例2と同じであるため説明を省略する。

[0058] 図17(a)および図17(b)は、実施例2の変形例における2層構造のグランド配線14bの第1の形成方法を示す断面図、図17(c)から図17(e)は、実施例2の変形例における2層構造のグランド配線14bの第2の形成方法を示す断面図である。

[0059] 第1の形成方法では、図17(a)のように、絶縁層80aの上面に常伝導材料の導電膜83aを貼り付ける。絶縁層80aの下面に、超伝導材料からなる膜85と常伝導材料からなる膜86とが一体化した導電膜87を貼り付ける。導電膜87は、膜85を導電箔とし、その上面全面に膜86がめっきされたものであってもよいし、膜86を導電箔とし、その上面全面に膜85がめっきされたものであってもよい。次いで、図17(b)のように、絶縁層80aの上面の導電膜83aをパターニングすることでグランド配線14aを形成する。絶縁層80aの下面の導電膜87をパターニングすることで第1層21と第2層22の2層構造のグランド配線14bを形成する。

[0060] 第2の形成方法では、図17(c)のように、絶縁層80aの上面および下面に常伝導材料の導電膜83b、83cを貼り付ける。次いで、図17(d)のように、絶縁層80aの下面に貼り付けられた導電膜83cの表面全面にめっき法によって超伝導材料からなる膜82を形成する。図17(e)のように、絶縁層80aの上面の導電膜83bをパターニングすることでグランド配線14aを形成する。絶縁層80aの下面の膜82および導電膜8

3 c をパターンニングすることで第 1 層 2 1 と第 2 層 2 2 の 2 層構造のグラウンド配線 1 4 b を形成する。

[0061] なお、グラウンド配線 1 4 c を形成する場合では、第 1 の形成方法においては、超伝導材料からなる膜 8 5 と常伝導材料からなる膜 8 6 を入れ替えて硬化済樹脂の絶縁層に貼り付ければよい。第 2 の形成方法においては、導電膜 8 3 c に超伝導材料の導電箔を用い、その表面にめっき法によって常伝導材料からなる膜 8 2 を形成すればよい。

[0062] 図 1 8 は、実施例 2 の変形例に係る量子デバイス 2 1 0 の冷却構造を示す断面図である。図 1 8 では、冷却の説明の便宜上、プリント基板 1 0 c は図 1 6 (a) と図 1 6 (b) を組み合わせた図としている。図 1 8 のように、プリント基板 1 0 c が冷却プレート 6 6 の上面に配置される。これにより、実施例 2 と同様に、プリント基板 1 0 c の下面 1 2 に露出したグラウンド配線 1 4 c の第 2 層 2 5 が冷却プレート 6 6 に接触する。グラウンドビア 1 7 はグラウンド配線 1 4 c の第 2 層 2 5 に接続されていることから、実施例 2 と同様に、極低温に冷却されても量子チップ 5 0 と冷却プレート 6 6 の間での矢印 6 7 のような熱の伝達が維持される。よって、量子チップ 5 0 を極低温に冷却することが可能となる。

[0063] 実施例 2 およびその変形例においても、実施例 1 およびその変形例と同じく、信号配線 1 3 は超伝導材料により形成されている。これにより、高周波信号の損失を低減することができる。また、図 1 2 (b) および図 1 6 (b) のように、プリント基板 1 0 b、1 0 c の上面 1 1 に露出したグラウンド配線 1 4 a と下面 1 2 に露出したグラウンド配線 1 4 c はグラウンドビア 1 7 により接続されている。グラウンド配線 1 4 a、1 4 c およびグラウンドビア 1 7 は常伝導材料を含んで形成されている。これにより、量子チップ 5 0 を極低温に冷却することができる。よって、冷却性を確保しつつ、損失を低減することができる。

[0064] また、実施例 2 およびその変形例では、図 1 2 (a) および図 1 6 (a) のように、グラウンド配線 1 4 b は第 1 層 2 1 と第 2 層 2 2 を備え、グラウンド

配線 1 4 c は第 1 層 2 4 と第 2 層 2 5 を備えている。第 1 層 2 1、2 4 は、超伝導材料により形成され、信号配線 1 3 に対向して設けられている。第 2 層 2 2、2 5 は、常伝導材料により形成され、第 1 層 2 1、2 4 に対して信号配線 1 3 とは反対側に設けられている。別の言い方をすると、実施例 2 においては、図 1 1 (c) および図 1 1 (d) のように、第 2 層 2 2、2 5 は、常伝導材料により形成され、平面視において第 1 層 2 1、2 4 の周囲に設けられている。これにより、高周波信号が伝送するストリップ線路 1 9 の電磁界内に超伝導材料からなる第 1 層 2 1、2 4 が存在することになるため、高周波信号の損失をより低減することができる。また、グランド配線 1 4 c はプリント基板 1 0 b、1 0 c の下面 1 2 に常伝導材料からなる第 2 層 2 5 が露出し、グランドビア 1 7 はグランド配線 1 4 c の第 2 層 2 5 に少なくとも接続するため、量子チップ 5 0 の冷却性を確保することができる。

[0065] また、実施例 2 およびその変形例では、図 1 1 (c) および図 1 1 (e) のように、第 1 層 2 1、2 4 は、平面視において信号配線 1 3 から信号配線 1 3 の幅 W の少なくとも 3 倍離れた範囲にわたって覆うように設けられている。ストリップ線路 1 9 の電磁界は、信号配線 1 3 から信号配線 1 3 の幅 W の 3 倍の範囲内に集中することから、信号配線 1 3 から信号配線 1 3 の幅 W の少なくとも 3 倍の範囲にかけて第 1 層 2 1、2 4 が設けられることで、高周波信号の損失を更に低減できる。高周波信号の損失を低減する観点から、第 1 層 2 1、2 4 は、信号配線 1 3 から信号配線 1 3 の幅 W の少なくとも 4 倍の範囲にかけて設けられてもよいし、6 倍の範囲にかけて設けられてもよいし、8 倍の範囲にかけて設けられてもよい。例えば、図 1 1 (c) における長さ L_1 、 L_2 は $300\ \mu\text{m}$ 以上であってもよいし、 $400\ \mu\text{m}$ 以上であってもよいし、 $500\ \mu\text{m}$ 以上であってもよい。

[0066] また、実施例 2 の変形例では、図 1 6 (a) および図 1 6 (b) のように、グランド配線 1 4 b の第 1 層 2 1 は第 2 層 2 2 の信号配線 1 3 側の面全面に設けられている。グランド配線 1 4 c の第 1 層 2 4 は第 2 層 2 5 の信号配線 1 3 側の面全面に設けられている。これにより、第 1 層 2 1、2 4 と第 2

層 2 2、2 5 の 2 層構造をしたグラント配線 1 4 b、1 4 c の形成が容易となる。

[0067] 実施例 2 およびその変形例の製造方法によれば、図 1 2 (a) および図 1 6 (a) のように、信号配線 1 3 がグラント配線 1 4 c とグラント配線 1 4 b とに対向してこれらの間に挟まれた積層体 7 2 を形成する (図 5 (b) および図 6 (b) も参照)。このときに、グラント配線 1 4 b は第 1 層 2 1 と第 2 層 2 2 を備え、グラント配線 1 4 c は第 1 層 2 4 と第 2 層 2 5 を備える。第 1 層 2 1、2 4 は、超伝導材料により形成され、信号配線 1 3 に対向して設けられている。第 2 層 2 2、2 5 は、常伝導材料により形成され、第 1 層 2 1、2 4 に対して信号配線 1 3 とは反対側に設けられている。これにより、ストリップ線路 1 9 の電磁界内に超伝導材料からなる第 1 層 2 1、2 4 が存在するため、高周波信号の損失をより低減することができる。

[0068] なお、実施例 2 およびその変形例では、グラント配線 1 4 b が第 1 層 2 1 と第 2 層 2 2 を備え、グラント配線 1 4 c が第 1 層 2 4 と第 2 層 2 5 を備える場合を例に示したが、この場合に限られない。グラント配線 1 4 b、1 4 c のいずれか一方が第 1 層と第 2 層を備える場合でもよい。

[0069] また、実施例 2 およびその変形例の製造方法では、図 1 3 (a) および図 1 3 (b) のように、絶縁層 8 0 a、8 0 b と絶縁層 8 1 a を用い、または、絶縁層 8 0 c と絶縁層 8 1 b、8 1 c を用いて積層体 7 2 を形成する (図 5 (b) および図 6 (b) も参照)。図 1 4 (a)、図 1 4 (b) および図 1 7 (a)、図 1 7 (b) のように、グラント配線 1 4 b は、超伝導材料からなる膜 8 5 と常伝導材料からなる膜 8 6 とが一体化した導電膜 8 7 を絶縁層 8 0 a に貼り付け、膜 8 5 を第 1 層 2 1、膜 8 6 を第 2 層 2 2 とすることで形成する。または、図 1 4 (c) から図 1 4 (e) および図 1 7 (c) から図 1 7 (e) のように、グラント配線 1 4 b は、常伝導膜である導電膜 8 3 c を絶縁層 8 0 a に貼り付けた後、導電膜 8 3 c の表面に超伝導材料からなる膜 8 2 を形成し、膜 8 2 を第 1 層 2 1、導電膜 8 3 c を第 2 層 2 2 とすることで形成する。これにより、2 層構造をしたグラント配線 1 4 b を容易

に形成できる。なお、上述したように、グランド配線 14 c を形成する場合には、図 14 (a)、図 14 (b) および図 17 (a)、図 17 (b) においては、超伝導材料からなる膜 85 と常伝導材料からなる膜 86 を入れ替えて硬化済樹脂の絶縁層に貼り付けて形成する。図 14 (c) から図 14 (e) および図 17 (c) から図 17 (e) においては、導電膜 83 c に超伝導材料を用い、その表面にめっき法によって常伝導材料からなる膜 82 を形成することで形成する。

[0070] [グランド配線の第 1 層の厚さ]

高周波信号は、導体の表面付近を集中して流れ、導体の中心部はほとんど流れないことが知られている。高周波信号が集中して流れる導体の表面からの範囲は、以下の式 (1) のよる表皮深さ d によって定義される。

[数1]

$$d = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad \dots (式 1)$$

式 (1) における d は表皮深さ [m] である。 f は周波数 [Hz] である。 μ は透磁率 [H/m] である。 σ は導電率 [S/m] である。一例として、導体が Cu の場合、室温において、高周波信号の周波数が 1 GHz では表皮深さ d は $2.07 \mu\text{m}$ 程度であり、10 GHz では $0.66 \mu\text{m}$ 程度である。導体が Al の場合では、室温において、高周波信号の周波数が 1 GHz では表皮深さ d は $2.62 \mu\text{m}$ 程度、10 GHz では $0.83 \mu\text{m}$ 程度である。

[0071] 図 19 は、導体の表面からの距離に対する電流密度を示す図である。図 19 において、横軸は導体の表面からの距離であり、単位を表皮深さ d で表している。縦軸は電流密度であり、導体の表面での電流密度を 1 として表している。図 19 のように、電流密度は導体の表面から内部に向かって $1/e^d$ で減衰する。したがって、導体の表面からの距離が $3d$ の箇所では電流密度は

導体の表面に対して95%程度減衰し、4dの箇所では98%程度減衰し、5dの箇所では99%程度減衰し、6dの箇所では99.75%程度減衰する。

[0072] 極低温では式(1)における σ (導電率)が大きくなり、例えばCuの場合では、10mK程度になると室温の場合に比べて σ が100倍程度大きくなる可能性がある。この場合、表皮深さdは、1GHzでは0.21 μ m程度となり、10GHzでは0.07 μ m程度となる。

[0073] Alのような超伝導材料では、10mK程度になると室温の場合に比べて σ は10000倍以上大きくなる。例えば、 σ が10000倍となった場合、表皮深さdは、1GHzでは0.026 μ m程度、10GHzでは0.008 μ m程度となる。このときの3dは、1GHzでは0.078 μ m程度、10GHzでは0.024 μ m程度であり、4dは、1GHzでは0.104 μ m程度、10GHzでは0.032 μ m程度である。5dは、1GHzでは0.13 μ m程度であり、10GHzでは0.04 μ m程度であり、6dは、1GHzでは0.16 μ m程度であり、10GHzでは0.048 μ m程度である。

[0074] 以上のことから、超伝導材料からなる導体では、高周波信号の大部分は極低温においては導体の表面から0.01 μ mの範囲を流れることが言える。言い換えると、ストリップ線路を伝送する高周波信号がグランド配線に侵入する深さは概ね0.01 μ m程度であることが言える。

[0075] 実施例2およびその変形例では、グランド配線14bは、Cuからなる第2層22と、第2層22の信号配線13側の面23に設けられたAlからなる第1層21と、を備える。グランド配線14cは、Cuからなる第2層25と、第2層25の信号配線13側の面26に設けられたAlからなる第1層24と、を備える。ストリップ線路19を伝送する高周波信号は、グランド配線14b、14cの信号配線13側の領域に侵入する。損失を抑える観点から、高周波信号の大部分はAlからなる第1層21、24を流れ、Cuからなる第2層22、25はほとんど流れない場合が好ましい。したがって

、高周波信号が第2層22、25に侵入することを抑制するため、上記の表皮深さdの考察から、第1層21、24の厚さを0.01 μ m以上とすることが好ましい。

[0076] したがって、実施例2およびその変形例において、グラウンド配線14b、14cの第1層21、24の厚さを0.01 μ m以上とする。これにより、高周波信号の損失を更に低減することができる。損失を低減する観点から、第1層21、24の厚さは、0.05 μ m以上が好ましく、0.1 μ m以上がより好ましく、0.5 μ m以上が更に好ましく、1.0 μ m以上がより更に好ましい。別の言い方をすると、第1層21、24の厚さは、上記の式(1)により求まる表皮深さdの3倍以上が好ましく、4倍以上がより好ましく、5倍以上が更に好ましく、6倍以上がより更に好ましい。なお、常伝導金属と超伝導金属が接触している場合に、その界面で生じる近接効果は0.1 μ mオーダーであることが知られている。したがって、第1層21、24の厚さを0.5 μ m以上とすることで、近接効果の影響も抑制でき、高周波信号の電気特性は概ね第1層21、24を形成する超伝導材料の特性によって決まると言える。

[0077] なお、実施例1、実施例2、およびその変形例では、プリント基板に設けられた信号配線が超伝導材料を含み、グラウンド配線およびグラウンドビアが常伝導材料を含む場合を例に示したが、この場合に限られない。例えば、図1におけるパッケージ基板に設けられた信号配線が超伝導材料を含み、グラウンド配線およびグラウンドビアが常伝導材料を含む場合でもよい。

実施例 3

[0078] 図20(a)および図20(b)は、実施例3におけるプリント基板10dの断面図である。図20(a)および図20(b)のように、実施例3におけるプリント基板10dでは、常伝導材料からなるグラウンド配線14a、14b、14cおよびグラウンドビア17の代わりに、磁性材料が添加された超伝導材料からなるグラウンド配線34a、34b、34cおよびグラウンドビア37が設けられている。例えば、グラウンド配線34a、34b、34cお

よびランドビア37は、磁性材料として鉄(Fe)、ガドリニウム(Gd)、ニッケル(Ni)、およびコバルト(Co)のうちの少なくとも1種が添加されたアルミニウム(Al)、窒化チタン(TiN)、またはニオブ(Nb)である。磁性材料の添加量は極微量(例えば0.01atm%程度の原子数)である。実施例3に係る量子デバイスのその他の構成は、実施例1に係る量子デバイス100と同じであるため図示および説明を省略する。

[0079] 実施例3によれば、ランド配線34a、34b、34cおよびランドビア37は、磁性材料が添加された超伝導材料を含んで形成されている。磁性材料が添加された超伝導材料は、超伝導転移温度(T_c)が例えば10mK程度になることが知られている(例えば、第8版キッテル固体物理学入門(Introduction to Solid State Physics)、Charles Kittel、10:超伝導 p. 278 (Chapter10: Superconductivity p.260))。つまり、磁性材料が添加された超伝導材料は、磁性材料が添加されていない超伝導材料に比べて超伝導転移温度が低くなる。量子チップ50に備わるジョセフソン接合素子56は、磁性材料が添加されていない超伝導材料により形成される。このため、ランド配線34a、34b、34cおよびランドビア37は、量子チップ50を超伝導状態で動作させるために冷却する際に、熱抵抗が高くなることが抑制される。したがって、量子チップ50を冷却する過程において、量子チップ50と冷却プレート66との間の熱の伝達が維持され、量子チップ50を極低温に冷却することができる。また、量子チップ50が極低温に冷却された後、ランド配線34a、34b、34cが超伝導転移温度まで冷却されてランド配線34a、34b、34cが超伝導状態になることで、高周波信号の損失を低減することができる。また、到達温度10mK前後を目的とした冷却においては、微量の磁性材料を添加した超伝導体以外に、ベリリウム(Be) ($T_c = 26\text{ mK}$)、タングステン(W) ($T_c = 12\text{ mK}$)を用いてもよい。

[0080] なお、実施例3においても、図10(a)および図10(b)の実施例1の変形例のように、信号配線13とランド配線34bとを入れ替えてもよ

い。図 1 2 (a) および図 1 2 (b) の実施例 2 および図 1 6 (a) および図 1 6 (b) の実施例 2 の変形例のように、グランド配線 3 4 b、3 4 c を超伝導材料の第 1 層と磁性材料が添加された超伝導材料の第 2 層とを含む構成としてもよい。

[0081] なお、実施例 3 では、プリント基板に設けられた信号配線が超伝導材料を含み、グランド配線およびグランドビアが磁性材料が添加された超伝導材料を含む場合を例に示したが、この場合に限られない。例えば、図 1 におけるパッケージ基板に設けられた信号配線が超伝導材料を含み、グランド配線およびグランドビアが磁性材料が添加された超伝導材料を含む場合でもよい。

[0082] 以上、本発明の実施例について詳述したが、本発明はかかる特定の実施例に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載された本発明の要旨の範囲内において、種々の変形・変更が可能である。

符号の説明

[0083] 1 0、1 0 a、1 0 b、1 0 c、1 0 d…プリント基板、1 1…上面、1 2…下面、1 3…信号配線、1 4 a、1 4 b、1 4 c…グランド配線、1 5 a、1 5 b、1 5 c…絶縁層、1 6…信号ビア、1 7…グランドビア、1 8…ランド、1 9…ストリップ線路、2 1…第 1 層、2 2…第 2 層、2 3…面、2 4…第 1 層、2 5…第 2 層、2 6…面、3 0…パッケージ基板、3 4 a、3 4 b、3 4 c…グランド配線、3 7…グランドビア、4 0…インターポザ、5 0…量子チップ、5 1…量子ビット、5 2…量子ビット素子、5 3…共振器、5 4…フィルタ、5 5 a、5 5 b…電極、5 6…ジョセフソン接合素子、5 7 a、5 7 b…超伝導膜、5 8…絶縁膜、5 9…読出部、6 0、6 1、6 2…接合材、6 3…カバーチップ、6 4…コネクタ、6 5…ケーブル、6 6…冷却プレート、7 0 a、7 0 b、7 0 c…絶縁層（硬化済樹脂）、7 1 a、7 1 b、7 1 c…絶縁層（半硬化樹脂）、7 2…積層体、7 3…上面、7 4…下面、7 5…穴、7 6…貫通孔、7 7 a、7 7 b…導電箔、8 0 a、8 0 b、8 0 c…絶縁層（硬化済樹脂）、8 1 a、8 1 b、8 1 c…絶縁層（半硬化樹脂）、8 2…膜、8 3 a、8 3 b、8 3 c…導電膜、8 4

…めっきレジスト、８５…膜、８６…膜、８７…導電膜、９０…ストリップ
線路、９１…信号配線、９２…グランド配線、９３…誘電体層、１００、２
００、２１０…量子デバイス

請求の範囲

- [請求項1] 超伝導材料を含む第1配線と、常伝導材料を含む第2配線と、前記第2配線に接続され、常伝導材料を含むビアと、を備える多層配線基板と、
- 前記多層配線基板の第1面上に設けられ、前記第1配線及び前記ビアに電氣的に接続された量子チップと、を備え、
- 前記ビアは、前記多層配線基板の前記第1面から第2面に貫通して形成され、
- 前記第2配線は、前記多層配線基板の前記第2面に露出して形成される、量子デバイス。
- [請求項2] 前記第1配線は信号配線であり、前記第2配線はグラウンド配線である、請求項1に記載の量子デバイス。
- [請求項3] 前記多層配線基板の前記第1面に形成され、常伝導材料を含む第3配線を更に有し、
- 前記ビアは前記第2配線と前記第3配線を相互に接続する、請求項1または2に記載の量子デバイス。
- [請求項4] 前記第1配線は前記多層配線基板の内部に設けられ、平面視において少なくとも一部において前記第2配線及び前記第3配線の両方に重なる、請求項3に記載の量子デバイス。
- [請求項5] 前記第1配線は、前記第2配線および前記第3配線のうちの一方の配線に対向して設けられ、
- 前記第1配線に対向しかつ前記一方の配線とで前記第1配線を挟む第4配線を含み、
- 前記第1配線と前記一方の配線と前記第4配線とによりストリップ線路が形成される、請求項3に記載の量子デバイス。
- [請求項6] 前記一方の配線および前記第4配線のうちの少なくとも一方は、前記第1配線に対向して設けられた超伝導材料を含む第1層と、前記第1層に対して前記第1配線とは反対側に設けられた常伝導材料を含む

第2層と、を備え、

前記ビアは、前記第2層に接続する、請求項5に記載の量子デバイス。

[請求項7] 前記一方の配線および前記第4配線のうちの少なくとも一方は、前記第1配線に対向して設けられた超伝導材料を含む第1層と、平面視において前記第1層の周囲に設けられた常伝導材料を含む第2層と、を備え、

前記ビアは、前記第2層に接続する、請求項5に記載の量子デバイス。

[請求項8] 前記第1層は、平面視において前記第1配線から前記第1配線の幅の少なくとも3倍離れた範囲にわたって覆うように設けられている、請求項6に記載の量子デバイス。

[請求項9] 前記第1層は、前記第2層の前記第1配線側の面全面に設けられている、請求項6に記載の量子デバイス。

[請求項10] 前記第1層の厚さは0.01 μm 以上である、請求項6に記載の量子デバイス。

[請求項11] 前記一方の配線は前記第3配線である、請求項5に記載の量子デバイス。

[請求項12] 前記多層配線基板は、前記第1配線に接続する信号ビアを更に備え、

前記信号ビアは超伝導材料を含む、請求項1または2に記載の量子デバイス。

[請求項13] 前記多層配線基板は、前記第1配線に接続する信号ビアを更に備え、

前記信号ビアは常伝導材料を含む、請求項1または2に記載の量子デバイス。

[請求項14] 前記第1配線は前記超伝導材料としてアルミニウム、窒化チタン、またはニオブを含み、

前記第2配線および前記ビアは前記常伝導材料として銅を含む、請求項1または2に記載の量子デバイス。

[請求項15] 超伝導材料を含む第1配線と、磁性材料が添加された超伝導材料を含む第2配線と、前記第2配線に接続され、磁性材料が添加された超伝導材料を含むビアと、を備える多層配線基板と、

前記多層配線基板の第1面上に設けられ、前記第1配線及び前記ビアに電氣的に接続された量子チップと、を備え、

前記ビアは、前記多層配線基板の前記第1面から第2面に貫通して形成され、

前記第2配線は、前記多層配線基板の前記第2面に露出して形成される、量子デバイス。

[請求項16] 前記第1配線は前記超伝導材料としてアルミニウム、窒化チタン、またはニオブを含み、

前記第2配線および前記ビアは前記磁性材料が添加された超伝導材料として鉄、ガドリニウム、ニッケル、またはコバルトのうちの少なくとも1種が添加されたアルミニウム、窒化チタン、またはニオブを含む、請求項15に記載の量子デバイス。

[請求項17] 超伝導材料を含む信号配線と常伝導材料を含む複数のグランド配線とが絶縁層を間に挟んで積層された積層体の第1面に前記複数のグランド配線のうちの第1のグランド配線が露出し、前記第1面とは反対の第2面に前記複数のグランド配線のうちの第2のグランド配線が露出した前記積層体を形成する工程と、

前記積層体に前記第1のグランド配線と前記第2のグランド配線とを接続する常伝導材料を含むグランドビアを形成する工程と、を備える多層配線基板の製造方法。

[請求項18] 前記積層体を形成する工程は、前記信号配線が前記第1のグランド配線および前記第2のグランド配線のうちの一方のグランド配線に対向し、前記複数のグランド配線のうちの第3のグランド配線が前記信

号配線に対向しかつ前記一方のグランド配線とで前記信号配線を挟む前記積層体を形成し、

前記一方のグランド配線および前記第3のグランド配線のうちの少なくとも一方のグランド配線は、前記信号配線に対向して設けられた超伝導材料からなる第1層と、前記第1層に対して前記信号配線とは反対側に設けられた常伝導材料からなる第2層と、を備える、請求項17に記載の多層配線基板の製造方法。

[請求項19] 前記積層体を形成する工程は、硬化済みの第1絶縁層と半硬化状態の第2絶縁層とを用いて前記積層体を形成し、

前記少なくとも一方のグランド配線は、超伝導材料からなる膜と常伝導材料からなる膜とが一体化した膜を前記第1絶縁層に貼り付け、前記超伝導材料からなる膜を前記第1層、前記常伝導材料からなる膜を前記第2層とすることで形成する、請求項18に記載の多層配線基板の製造方法。

[請求項20] 前記積層体を形成する工程は、硬化済みの第1絶縁層と半硬化状態の第2絶縁層とを用いて前記積層体を形成し、

前記少なくとも一方のグランド配線は、超伝導材料または常伝導材料のいずれか一方からなる膜を前記第1絶縁層に貼り付けた後、前記一方からなる膜の表面に前記超伝導材料または前記常伝導材料の他方からなる膜を形成し、前記一方からなる膜および前記他方からなる膜のうち前記超伝導材料からなる膜を前記第1層、前記常伝導材料からなる膜を前記第2層とすることで形成する、請求項18に記載の多層配線基板の製造方法。

[図1]

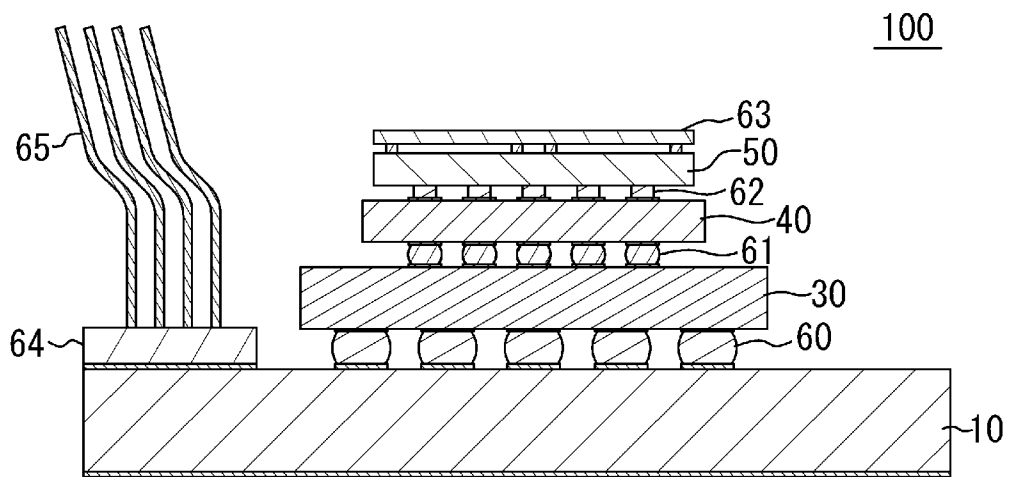
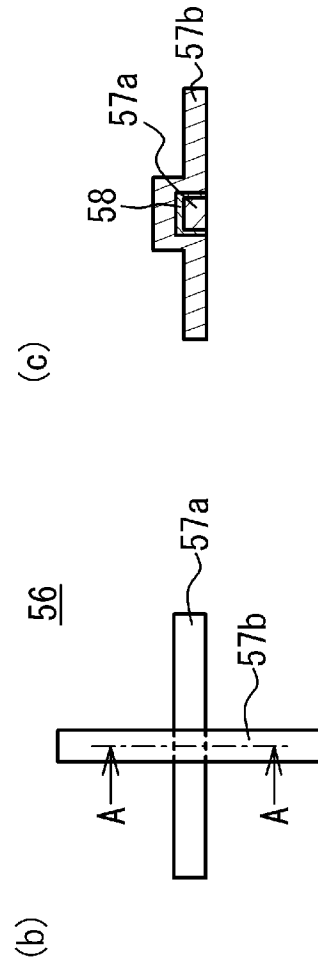
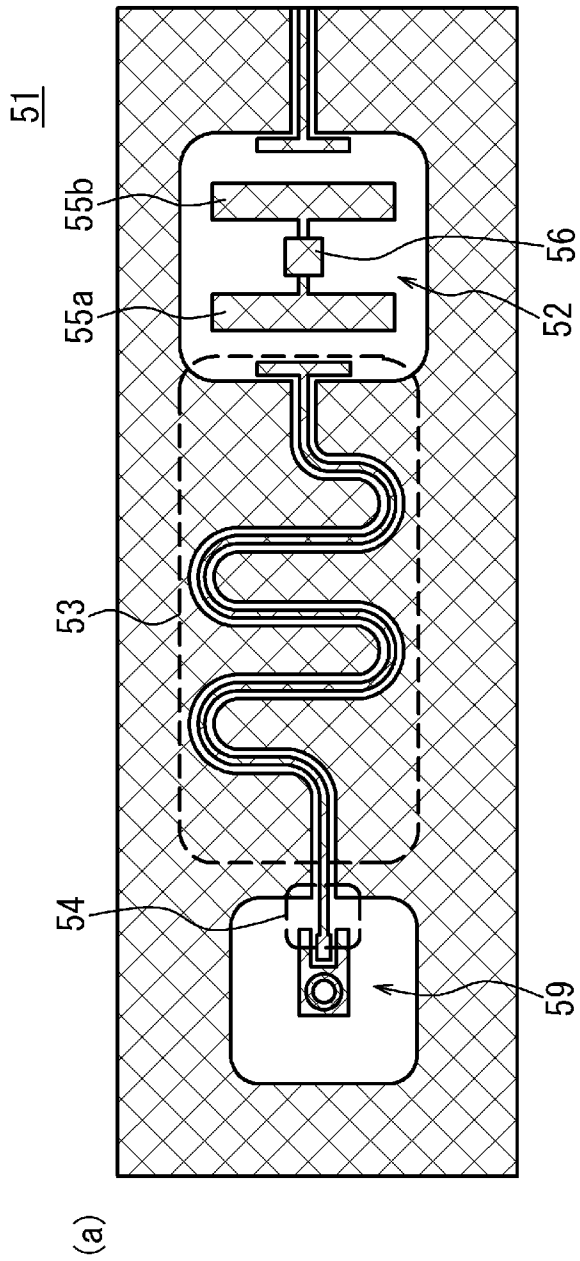


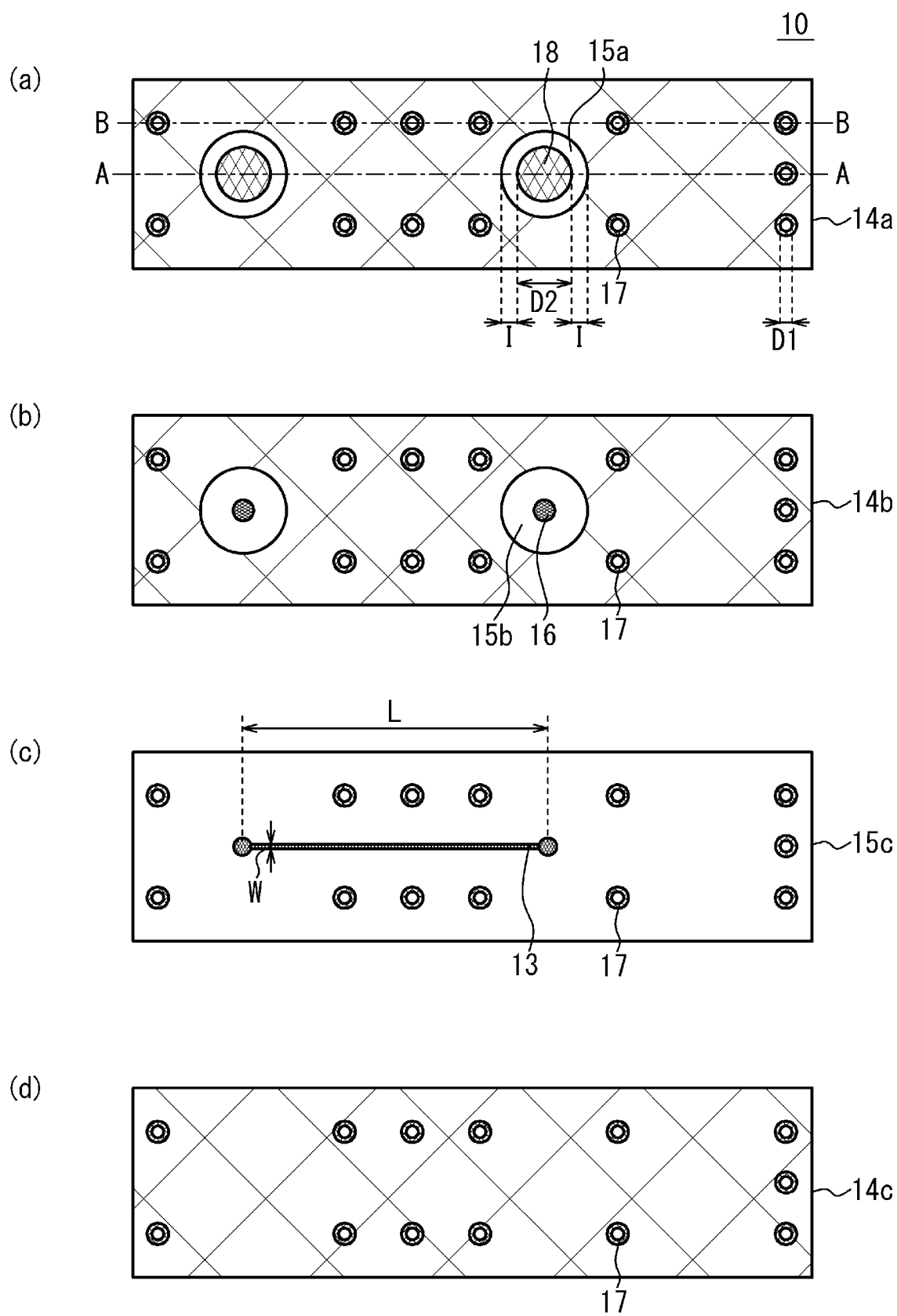
図1

[図2]



[図2]

[図3]



[図3]

[図4]

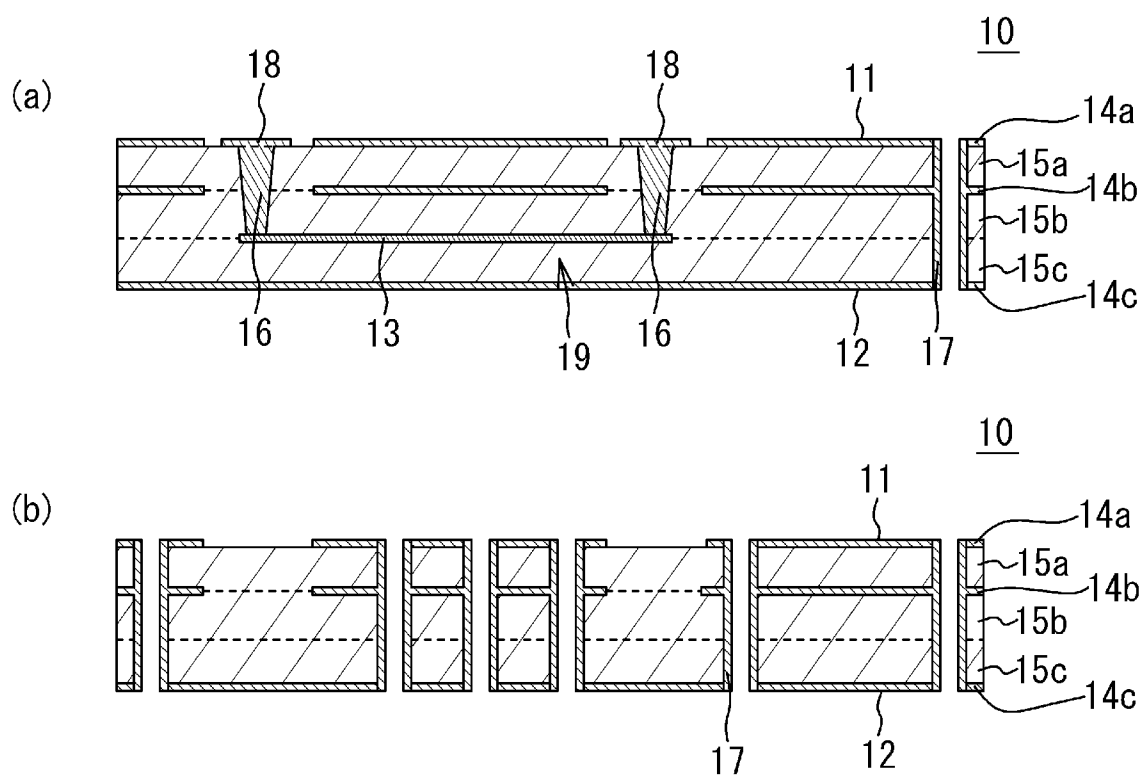


図4

[図5]

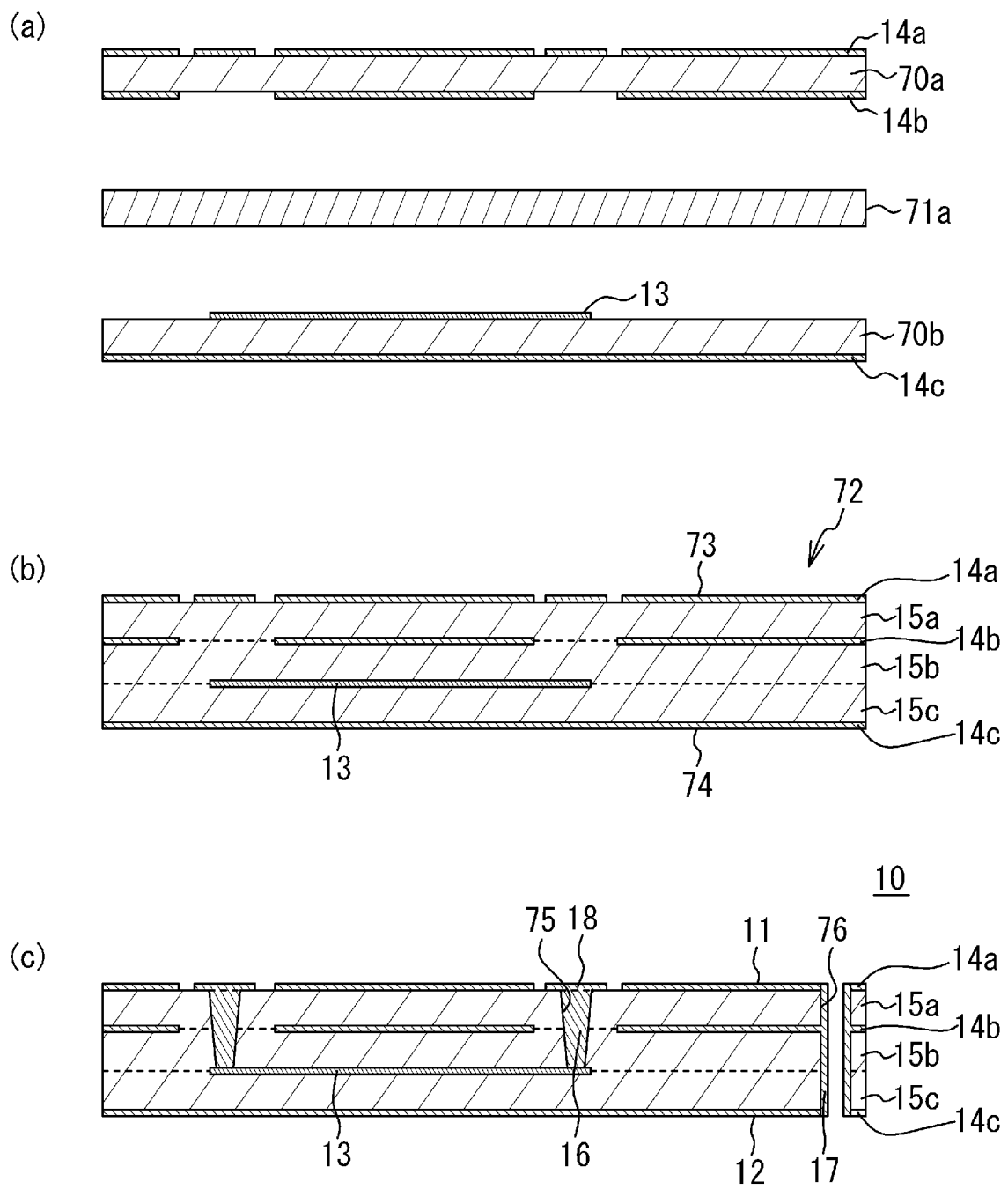
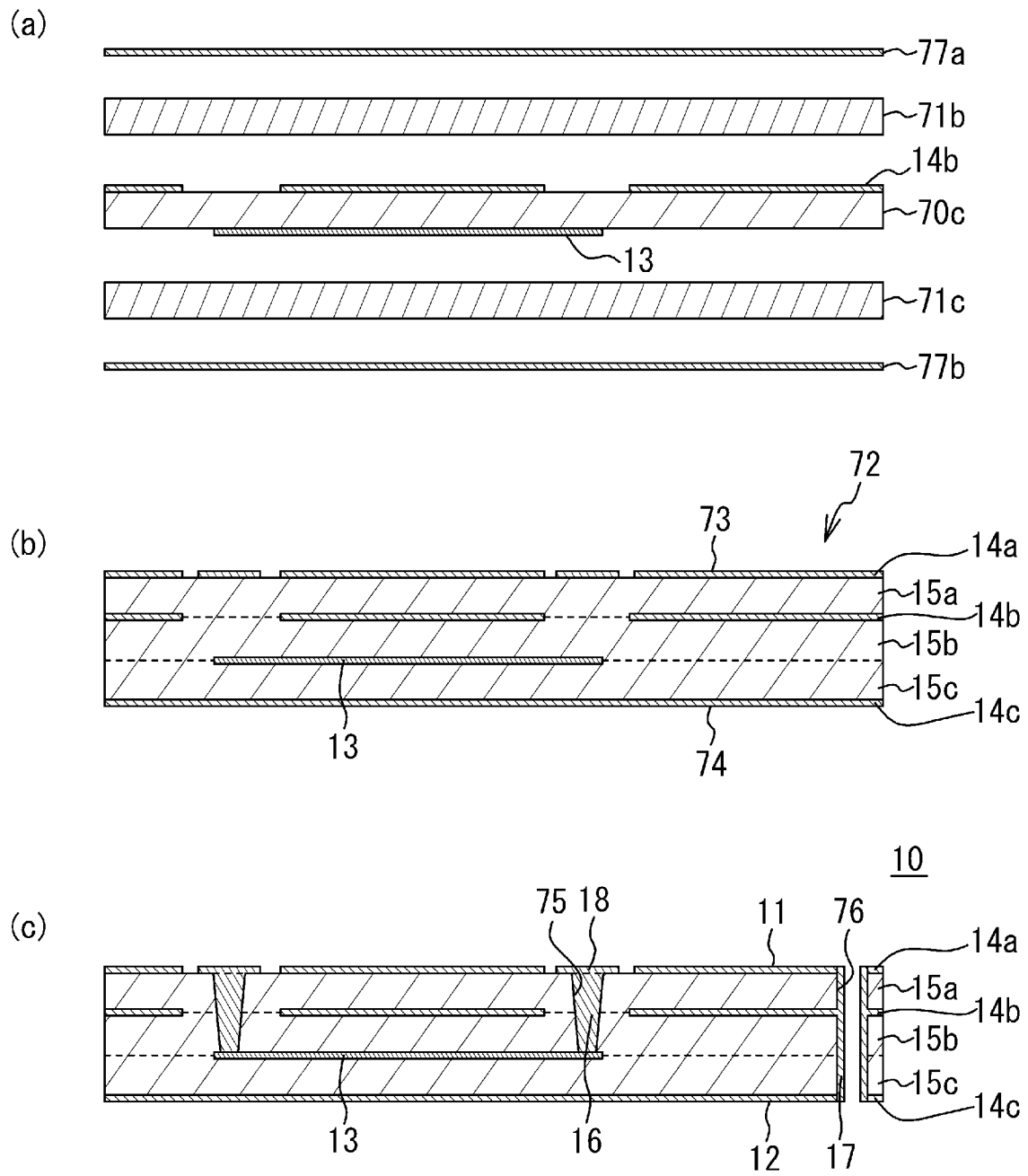


図5

[図6]



[図6]

[図7]

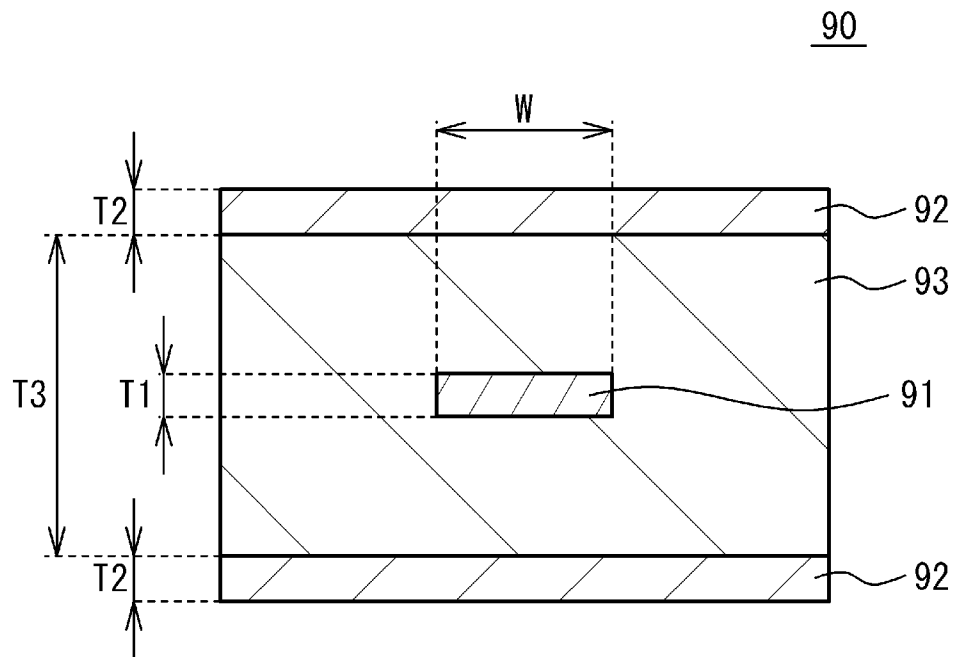


図7

[図8]

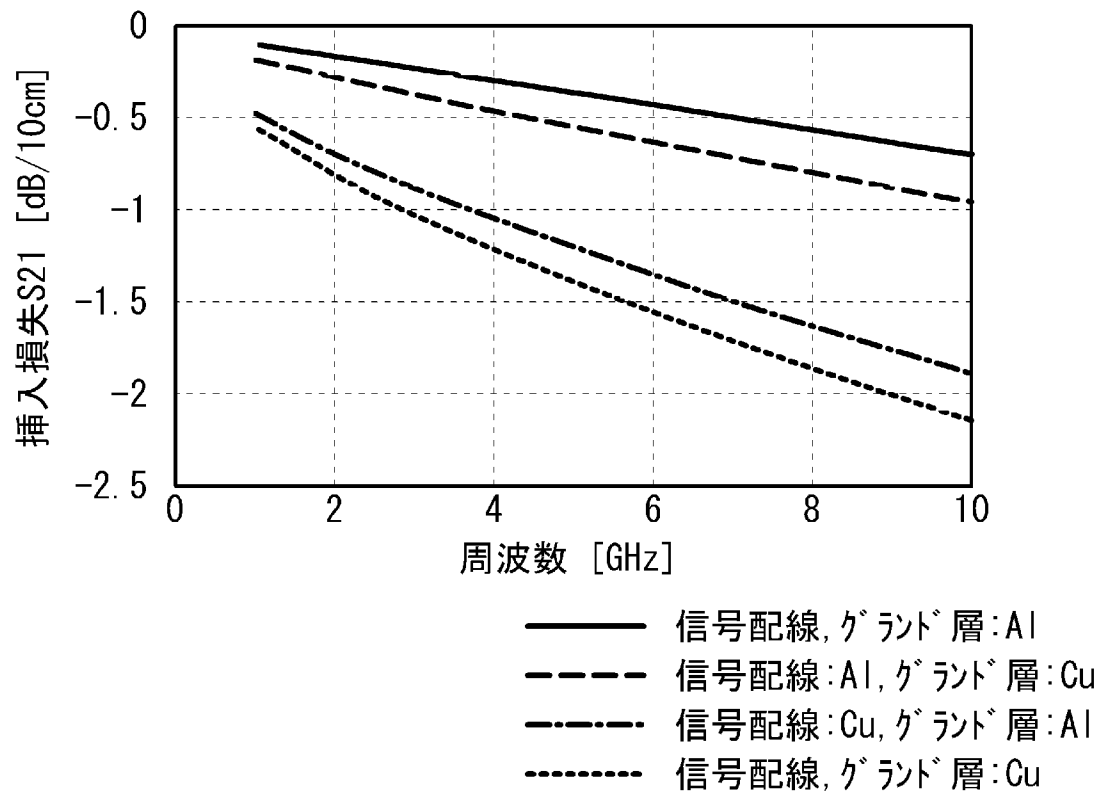
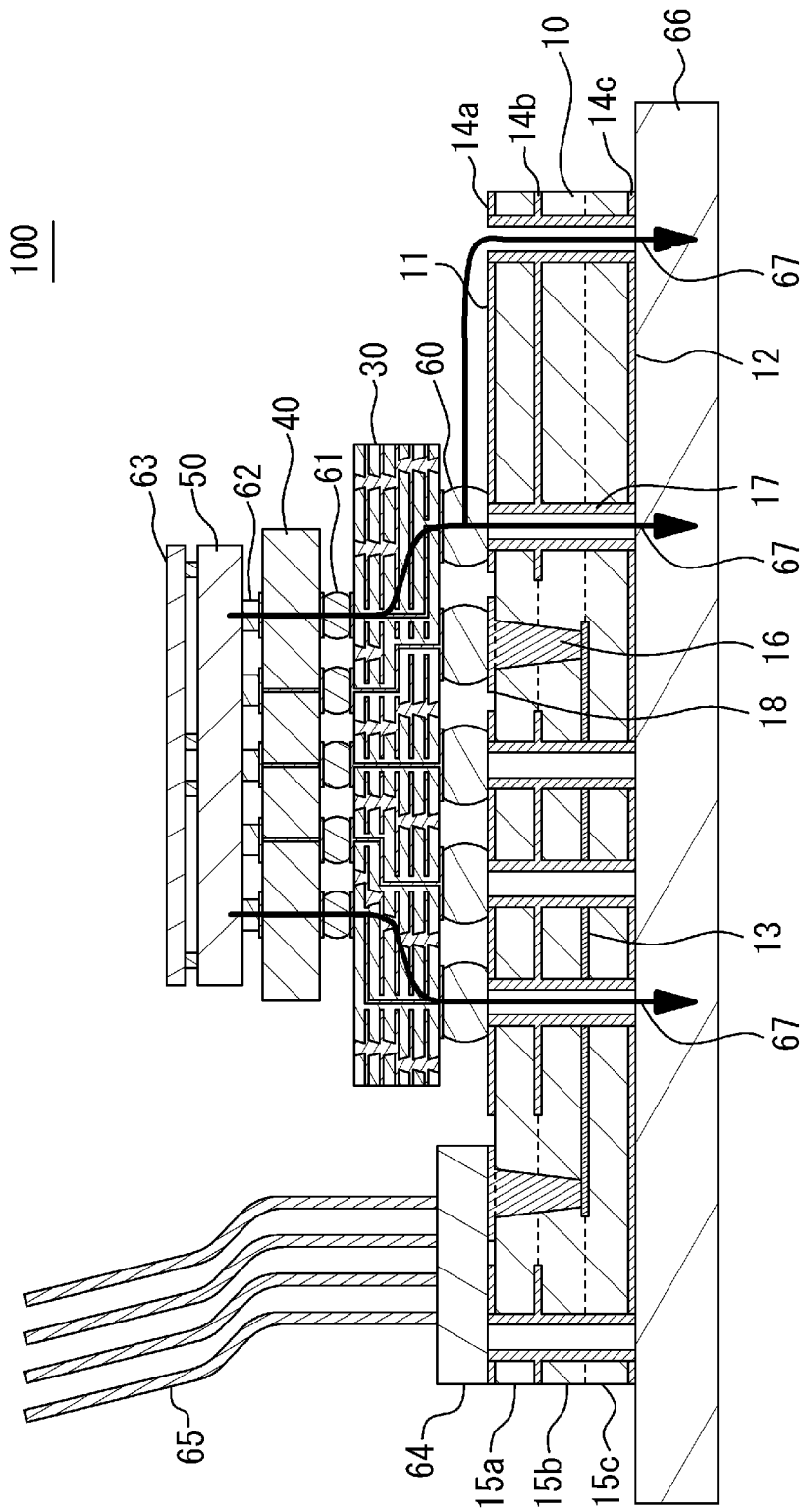


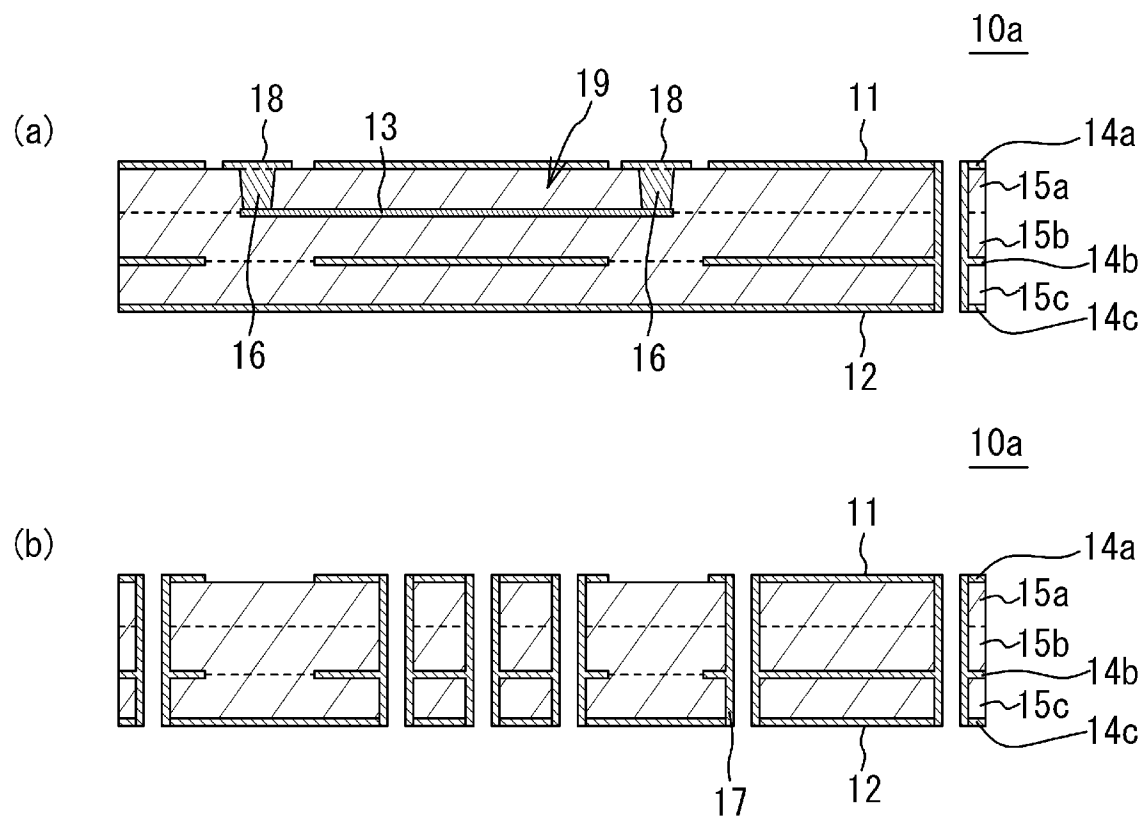
図8

【図9】



9
[X]

[図10]



[図10]

[図11]

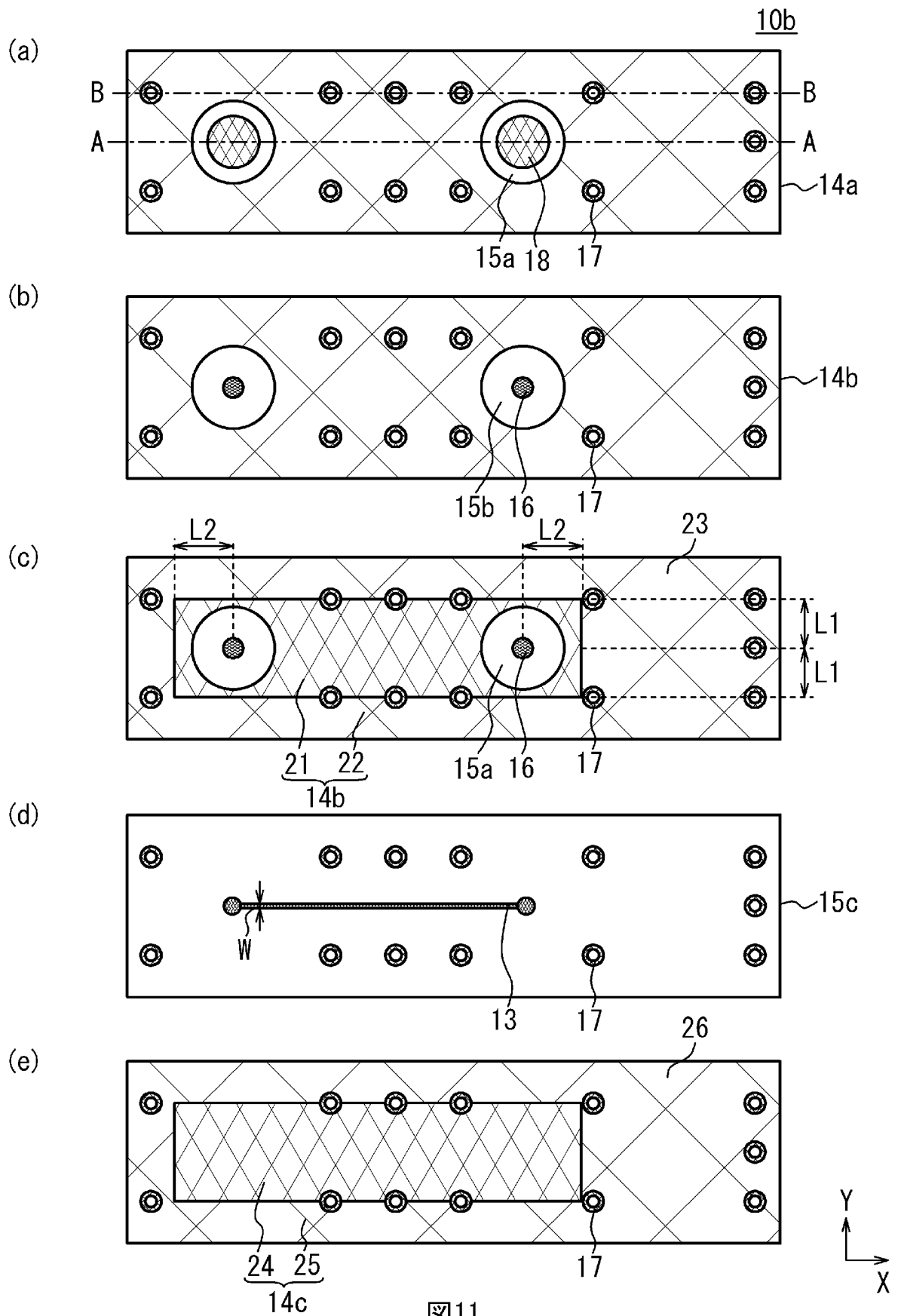


図11

[図12]

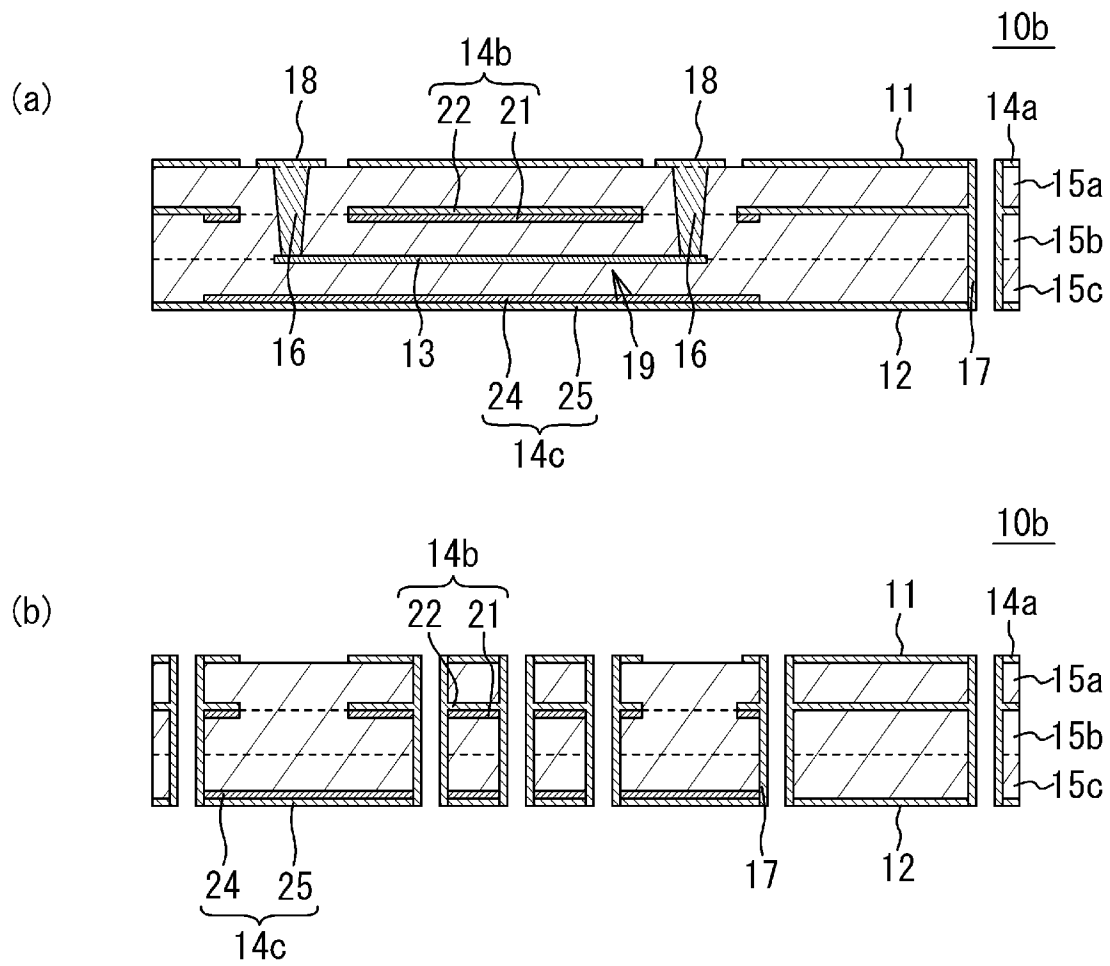


図12

[図13]

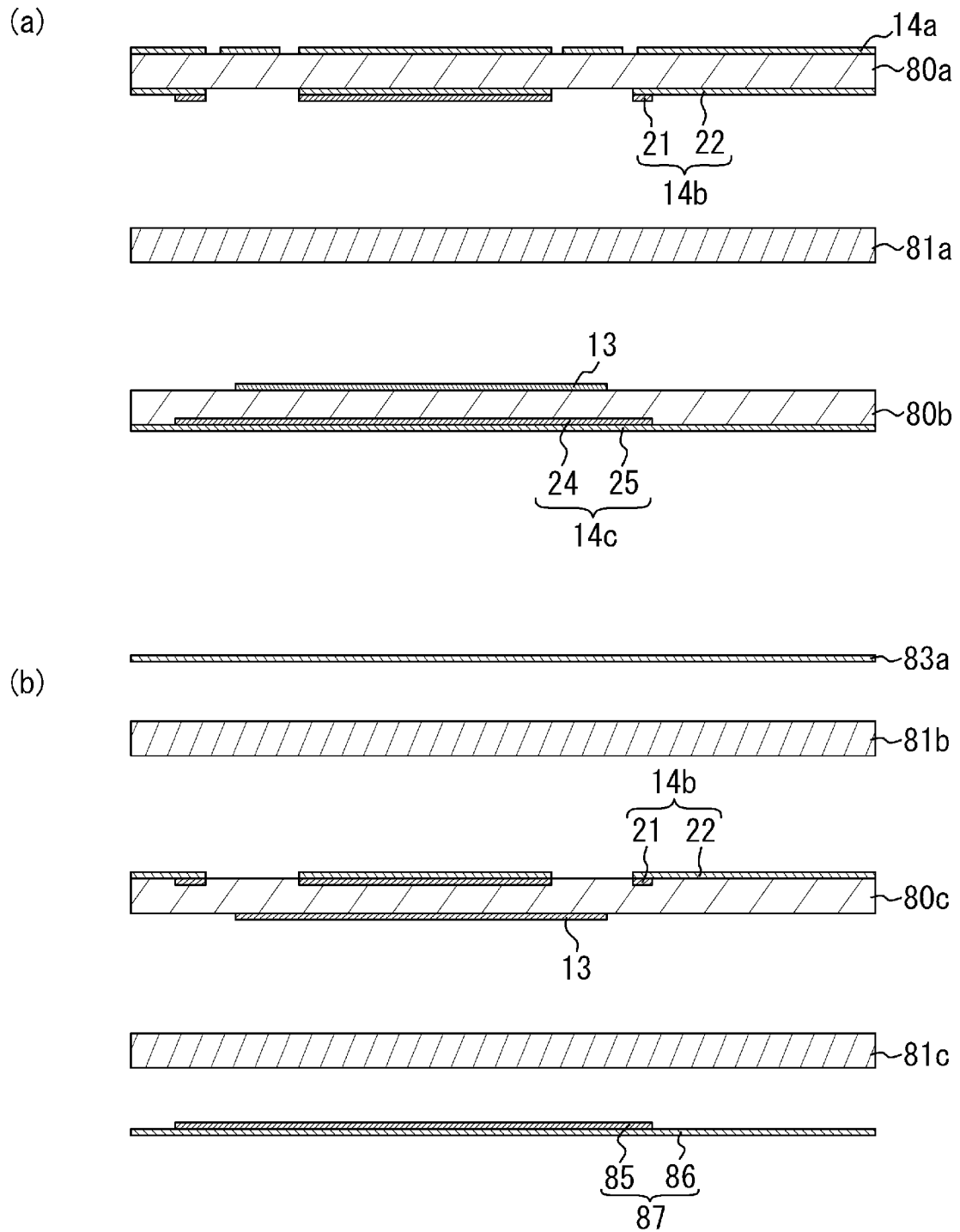


図13

[図14]

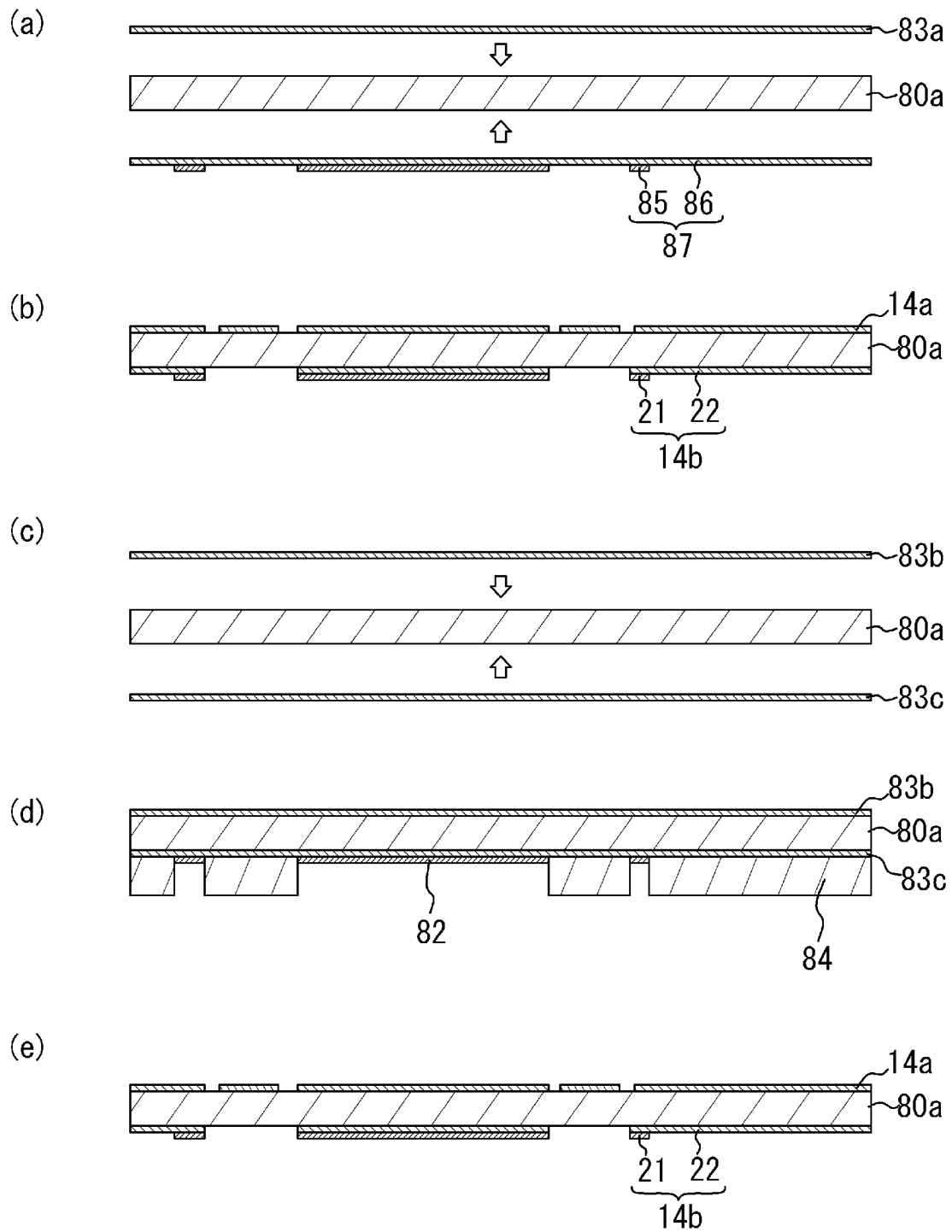


図14

[図17]

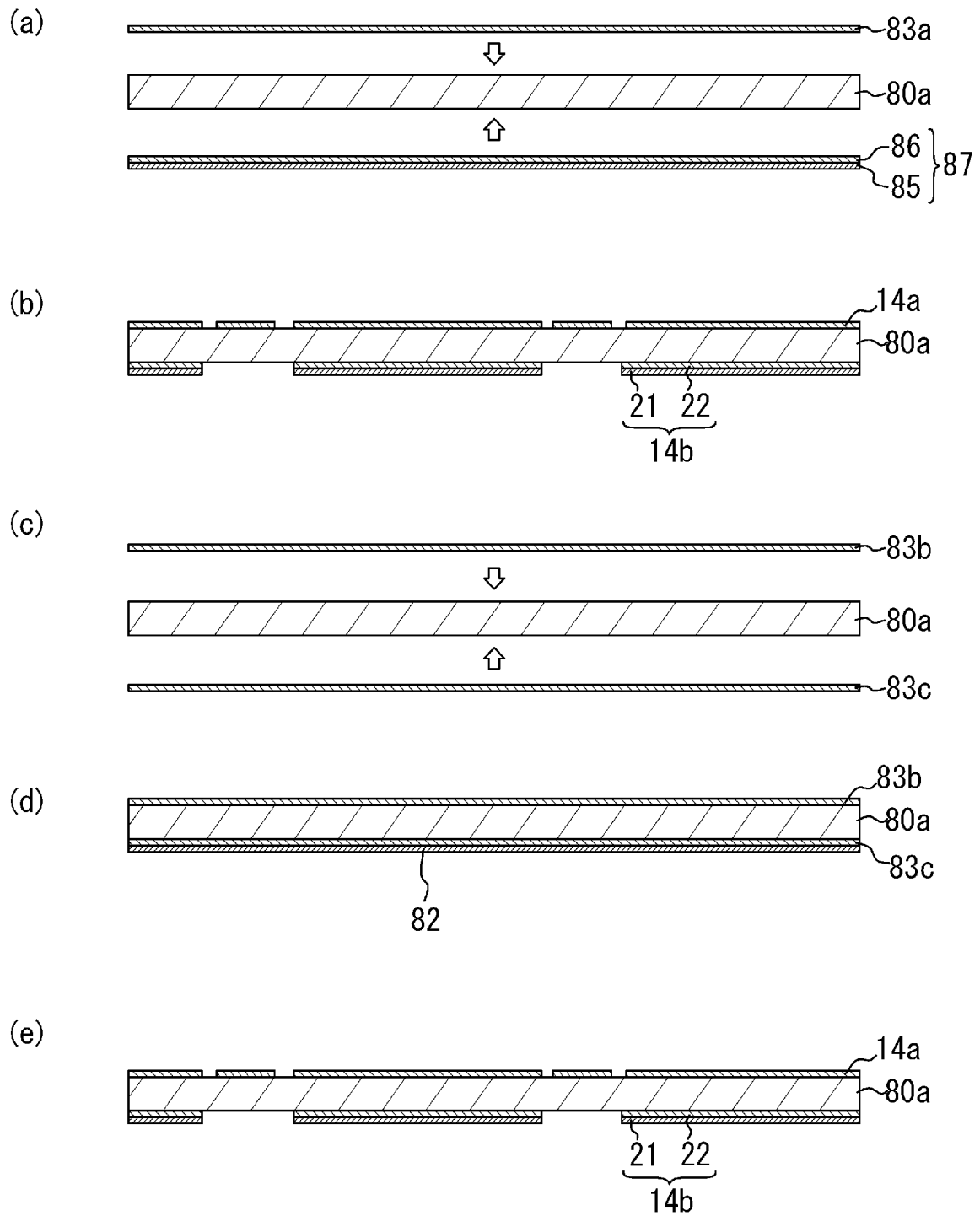


図17

[図19]

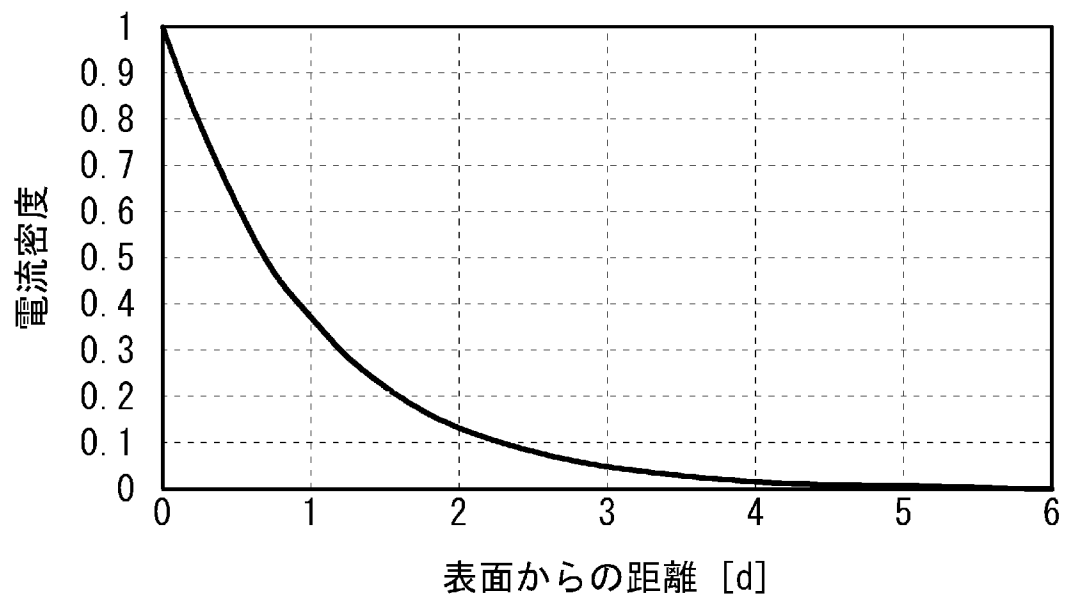


図19

[図20]

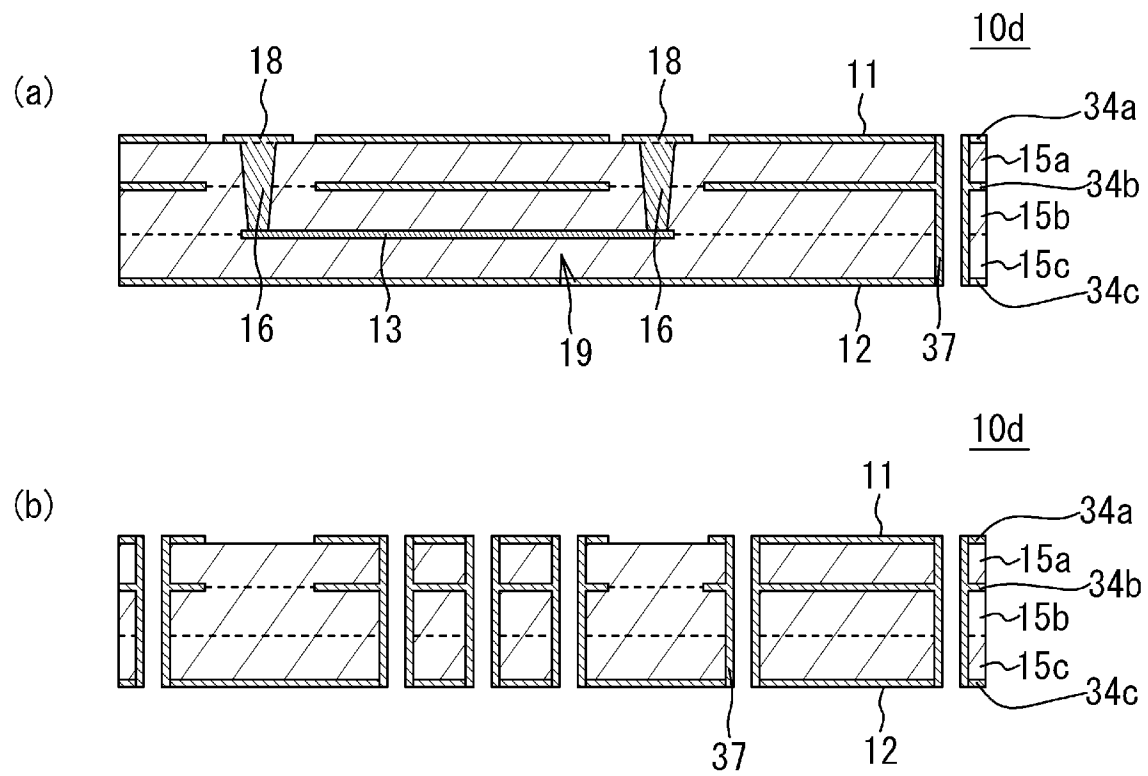


図20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/027712

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H01L 23/12**(2006.01)i; **H05K 1/09**(2006.01)i; **H05K 3/46**(2006.01)i; **H10N 60/80**(2023.01)i

FI: H01L23/12 301J; H01L23/12 Q; H10N60/80 A; H05K1/09 A; H05K3/46 S

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)

H01L23/12; H05K1/09; H05K3/46; H10N60/80

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023

Registered utility model specifications of Japan 1996-2023

Published registered utility model applications of Japan 1994-2023

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 2022-2235 A (NEC CORPORATION) 06 January 2022 (2022-01-06) entire text, all drawings	1-20

☐ 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

29 September 2023

Date of mailing of the international search report

10 October 2023

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)

3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915

Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2023/027712

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2022-2235 A	06 January 2022	US 2021/0399195 A1	
----- entire text, all drawings			

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01L 23/12(2006.01)i; H05K 1/09(2006.01)i; H05K 3/46(2006.01)i; H10N 60/80(2023.01)i FI: H01L23/12 301J; H01L23/12 Q; H10N60/80 A; H05K1/09 A; H05K3/46 S		
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）） H01L23/12; H05K1/09; H05K3/46; H10N60/80 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 - 2023年 日本国実用新案登録公報 1996 - 2023年 日本国登録実用新案公報 1994 - 2023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 2022-2235 A（日本電気株式会社）06.01.2022（2022 - 01 - 06） 全文、全図	1-20
☐ 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、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 29.09.2023	国際調査報告の発送日 10.10.2023	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 豊島 洋介 5F 9850 電話番号 03-3581-1101 内線 3516	

国際出願番号
PCT/JP2023/027712

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
JP	2022-2235	A	06.01.2022	US	2021/0399195	A1	
				全文、全図			