

(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
2022年6月9日(09.06.2022)



(10) 国際公開番号

WO 2022/118463 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 39/22 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2020/045247

(22) 国際出願日: 2020年12月4日(04.12.2020)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 佐藤 哲朗 (SATO Tetsuro); 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP). 山本 剛 (YAMAMOTO

Tsuyoshi); 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 家入 健 (IEIRI Takeshi); 〒2210835 神奈川県横浜市神奈川区鶴屋町三丁目3番8 アサヒビルディング5階 響国際特許事務所 Kanagawa (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, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,

(54) Title: QUANTUM DEVICE AND METHOD FOR PRODUCING SAME

(54) 発明の名称: 量子デバイス及びその製造方法

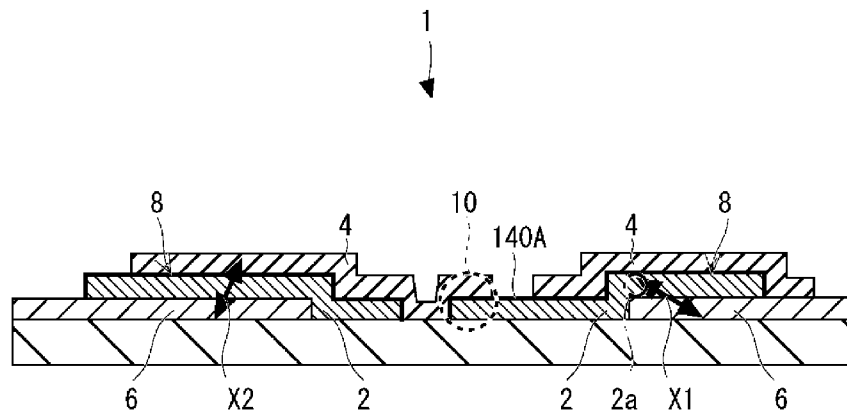


Fig. 1

(57) Abstract: Provided is a quantum device capable of curbing degradation in performance. A quantum device (1) comprises a plurality of first conductors (2), a plurality of second conductors (4), and a conductor layer (6). The first conductors (2), the second conductors (4), and the conductor layer (6) are formed from a superconductive material. An oxide film (8) is formed between the first conductors (2) and the second conductors (4). A Josephson junction (10) is formed by a portion of one first conductor (2) out of the plurality of first conductors (2), a portion of one second conductor (4) out of the plurality of second conductors (4), and the oxide film (8). At least one protruding part (2a) not covered



WO 2022/118463 A1

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

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

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第21条(3))

by a second conductor (4) is formed on the first conductors (2). The protruding part (2a) and the conductor layer (6) are connected, either directly or via another conductor. The second conductors (4) are connected to the conductor layer (6) either directly or via another conductor.

(57) 要約: 性能の劣化を抑制することが可能な量子デバイスを提供する。量子デバイス(1)は、複数の第1の導体(2)と、複数の第2の導体(4)と、導体層(6)とを有する。第1の導体(2)、第2の導体(4)及び導体層(6)は、超伝導材料で形成されている。第1の導体(2)と第2の導体(4)の間には、酸化膜(8)が形成されている。複数の第1の導体(2)のうちの1つの第1の導体(2)の一部と、複数の第2の導体(4)のうちの1つの第2の導体(4)の一部と、酸化膜(8)とによって、ジョセフソン接合(10)が形成されている。第1の導体(2)には、第2の導体(4)に覆われていない少なくとも1つの突出部(2a)が形成されている。突出部(2a)と導体層(6)とが、直接又は他の導体を介して接続されている。第2の導体(4)が、導体層(6)と、直接又は他の導体を介して接続されている。

明 細 書

発明の名称：量子デバイス及びその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、量子デバイス及びその製造方法に関する。

背景技術

[0002] 特許文献 1 は、量子コンピュータのキュービットを実現する方法を開示する。ベースアルミニウムワイヤリング層、ベースアルミニウムワイヤリング層の表面の上に形成されている第 1 のアルミニウム層、および、第 1 のアルミニウム層の表面の上に形成されている第 2 のアルミニウム層が、キュービットを形成するために使用される。また、第 2 のアルミニウム層に接触している第 1 のアルミニウム層の表面を酸化させることによって、第 1 のアルミニウム層と第 2 のアルミニウム層との間に、ジョセフソン接合におけるトンネルバリアが形成されている。特許文献 1 にかかるキュービットでは、ジョセフソン接合が、第 1 のアルミニウム層と、第 2 のアルミニウム層と、トンネルバリアとによって形成されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献 1：特表 2019-532506 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 特許文献 1 は、ベースアルミニウムワイヤリング層と第 1 のアルミニウム層との接続、および、ベースアルミニウムワイヤリング層と第 2 のアルミニウム層との接続について、開示していない。したがって、特許文献 1 にかかる技術では、キュービット（量子デバイス）の性能が劣化するおそれがある。

[0005] 本開示の目的の 1 つは、このような課題を解決するためになされたものであり、性能の劣化を抑制することが可能な量子デバイス及びその製造方法を

提供することにある。

課題を解決するための手段

[0006] 本開示にかかる量子デバイスは、超伝導材料で層状に形成された複数の第1の導体と、少なくとも一部が前記第1の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第2の導体と、超伝導材料で形成された導体層と、を有し、前記第1の導体と前記第2の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、前記第1の導体には前記第2の導体に覆われていない少なくとも1つの第1の突出部が形成されており、前記第1の突出部と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されており、前記第2の導体と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されている。

[0007] また、本開示にかかる量子デバイスの製造方法は、超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され第1の突出部を有する第1の導体と超伝導材料で形成された第2の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、前記レジストマスクが形成された基板に、第1の方向からの斜め蒸着によって、複数の前記第1の導体を積層し、前記第1の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、複数の前記第1の導体それぞれに、第2の方向からの斜め蒸着によって、前記第2の導体の少なくとも一部を積層し、これによって、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、前記第2の導体に覆われていない前記第1の突出部と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続し、前記第2の導体と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続する。

発明の効果

[0008] 本開示によれば、性能の劣化を抑制することが可能な量子デバイス及びその製造方法を提供できる。

図面の簡単な説明

- [0009] [図1]本実施の形態にかかる量子デバイスの概要を示す図である。
- [図2]第1の比較例にかかる量子デバイスを示す図である。
- [図3]第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図4]第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図5]第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図6]第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図7]第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図8]第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図9]第1の比較例にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。
- [図10]第2の比較例にかかる量子デバイスを示す図である。
- [図11]第2の比較例にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。
- [図12]第3の比較例にかかる量子デバイスを示す図である。
- [図13]第3の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。
- [図14]第3の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。
- [図15]第3の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。
- [図16]実施の形態1にかかる量子デバイスを示す図である。
- [図17]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図18]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図19]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図20]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図21]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- [図22]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図23]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図24]実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図25]実施の形態2にかかる量子デバイスを示す図である。

[図26]実施の形態2にかかる量子デバイスの実現例を示す図である。

[図27]図26に示した量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

[図28]実施の形態3にかかる量子デバイスを示す図である。

[図29]実施の形態3にかかる量子デバイスの実現例を示す図である。

[図30]実施の形態4にかかる量子デバイスを示す図である。

[図31]実施の形態4にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

[図32]実施の形態5にかかる量子デバイスを示す図である。

[図33]実施の形態5にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

[図34]実施の形態6にかかる量子デバイスを示す図である。

[図35]実施の形態6にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

[図36]実施の形態7にかかる量子デバイスを示す図である。

[図37]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図38]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図39]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図40]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図41]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図42]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図43]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図44]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図45]実施の形態7にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図46]実施の形態7にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。

[図47]実施の形態7にかかる量子デバイスの変形例を示す図である。

[図48]実施の形態7にかかる酸化膜除去工程の変形例を説明するための図である。

[図49]実施の形態8にかかる量子デバイスを示す図である。

[図50]実施の形態9にかかる量子デバイスを示す図である。

[図51]実施の形態9にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。

[図52]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図53]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図54]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図55]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図56]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図57]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図58]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図59]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図60]実施の形態9にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

[図61]実施の形態10にかかる量子デバイスを示す図である。

発明を実施するための形態

[0010] (本開示にかかる実施の形態の概要)

本開示の実施形態の説明に先立って、本開示にかかる実施の形態の概要について説明する。図1は、本実施の形態にかかる量子デバイス1の概要を示す図である。

[0011] 量子デバイス1は、複数の第1の導体2と、複数の第2の導体4と、導体層6（第3の導体）とを有する。第2の導体4は、第1の導体2に積層されている。第1の導体2、第2の導体4及び導体層6は、超伝導材料で形成されている。例えば、第1の導体2及び第2の導体4は、アルミニウム（Al）で形成されていてもよいが、これに限定されない。また、例えば、導体層6は、ニオブ（Nb）で形成されていてもよいが、これに限定されない。ま

た、導体層 6 は、例えば、量子デバイス 1 の回路を構成する。導体層 6 は、例えば、配線、共振器、キャパシタ及びグランドプレーン等の超伝導回路を構成していてもよい。

[0012] また、第 1 の導体 2 と第 2 の導体 4 との間には、酸化膜 8 が形成されている。酸化膜 8 は、例えば、第 1 の導体 2 に第 2 の導体 4 を積層する前に、第 1 の導体 2 の表面に酸化処理を施すことによって、形成され得る。また、複数の第 1 の導体 2 のうちの 1 つの第 1 の導体 2 の一部と、複数の第 2 の導体 4 のうちの 1 つの第 2 の導体 4 の一部と、酸化膜 8 とによって、ジョセフソン接合 10 が形成されている。

[0013] ここで、矢印 X 1 で示すように、ジョセフソン接合 10 を構成する第 1 の導体 2 が、導体層 6 と、直接又は他の導体を介して接続されている。例えば、第 1 の導体 2 と導体層 6 とが、導体ではない酸化膜（誘電体）を介さないで接続されていてもよい。同様に、矢印 X 2 で示すように、ジョセフソン接合 10 を構成する第 2 の導体 4 が、導体層 6 と、直接又は他の導体を介して接続されている。例えば、第 2 の導体 4 と導体層 6 とが、導体ではない酸化膜（誘電体）を介さないで接続されていてもよい。なお、例えば、第 1 の導体 2 と導体層 6 とは、第 1 の導体 2 と第 2 の導体 4 との間に形成された酸化膜 8 だけでなく、他の酸化膜も介さないで、（電氣的に）接続されていてもよい。同様に、例えば、第 2 の導体 4 と導体層 6 とは、第 1 の導体 2 と第 2 の導体 4 との間に形成された酸化膜 8 だけでなく、他の酸化膜も介さないで、（電氣的に）接続されていてもよい。なお、「（第 1 の導体 2 と導体層 6 とが）酸化膜（誘電体）を介さないで接続されている」とは、第 1 の導体 2 と導体層 6 との間に全く酸化膜が存在しないことのみを意味するわけではない。「酸化膜（誘電体）を介さないで接続されている」とは、第 1 の導体 2 と導体層 6 との間の接続ルートに、一部分でも、酸化膜（誘電体）を介さないで、直接又は他の導体を介して接続されている箇所があるという意味である。つまり、本実施の形態では、第 1 の導体 2 と導体層 6 との間の接続ルートに、直接又は他の導体を介して接続されている箇所があれば、その他の一

部については、酸化膜（誘電体）を介して接続されていてもよい。また、「（第１の導体２と導体層６とが）直接、接続されている」とは、第１の導体２と導体層６との接続面に、一部分でも、酸化膜（誘電体）を介さないで接している箇所があるという意味である。これらのことは、後述する実施の形態においても同様である。

[0014] なお、ジョセフソン接合１０を構成する第１の導体２には、第２の導体４に覆われていない少なくとも１つの突出部２ａ（第１の突出部）が形成されていてもよい。そして、突出部２ａと導体層６とが、直接又は他の導体を介して接続されていてもよい。例えば、突出部２ａと導体層６とが、酸化膜８を介さないで接続されていてもよい。

[0015] 本実施の形態にかかる量子デバイス１は、上記のように構成されていることによって、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、本実施の形態にかかる量子デバイス１は、デコヒーレンスを抑制することが可能である。詳しくは、以下に示す比較例とともに後述する。

[0016] （比較例）

<第１の比較例>

図２は、第１の比較例にかかる量子デバイス９０を示す図である。図２は、第１の比較例にかかる量子デバイス９０の断面図である。第１の比較例にかかる量子デバイス９０は、基板６０と、複数の第１の導体１１０（１１０Ａ，１１０Ｂ）と、複数の第２の導体１２０（１２０Ａ，１２０Ｂ）と、超伝導回路を構成する導体層１３０（１３０Ａ，１３０Ｂ）とを有する。第１の導体１１０、第２の導体１２０及び導体層１３０は、基板６０に積層されている。

[0017] 第１の導体１１０は、導体層１３０に積層されている。第２の導体１２０は、第１の導体１１０に積層されている。第１の導体１１０、第２の導体１２０及び導体層１３０は、超伝導材料で形成されている。以下の説明では、第１の導体１１０及び第２の導体１２０は、アルミニウム（Ａｌ）で形成されているとする。また、以下の説明では、導体層１３０（第３の導体）は、

ニオブ（Nb）で形成されているとする。

[0018] また、第1の導体110と第2の導体120との間には、酸化膜140（140A，140B）が形成されている。酸化膜140は、例えば、第1の導体110に第2の導体120を積層する前に、第1の導体110の表面に酸化処理を施すことによって、形成され得る。また、第1の導体110（110A）の一部（第1の導体部分110Aa）と、第2の導体120（120B）の一部（第2の導体部分120Ba）と、酸化膜140（140A）とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。

[0019] ここで、ジョセフソン接合100に対して、ジョセフソン接合100を構成する第1の導体110Aが導体層130Aの方に延びるように形成された側（図2の右側）を、第1の側70Aとする。つまり、第1の側70Aは、図2においてジョセフソン接合100よりも右側に対応する。また、ジョセフソン接合100に対して、ジョセフソン接合100を構成する第2の導体120Bが導体層130Bの方に延びるように形成された側（図2の左側）を、第2の側70Bとする。つまり、第2の側70Bは、図2においてジョセフソン接合100よりも左側に対応する。なお、後述するように、基板60の側から見て垂直方向から第1の側70Aの側に傾いた方向である第1の方向（矢印A1で示す）から斜め蒸着を行うことによって、2つの第1の導体110が蒸着される。また、基板60の側から見て垂直方向から第2の側70Bの側に傾いた方向である第2の方向（矢印A2で示す）から斜め蒸着を行うことによって、2つの第2の導体120が蒸着される。ここで、「垂直方向」とは、基板60の、ジョセフソン接合100が形成された表面、つまり、第1の導体110、第2の導体120及び導体層130が積層された表面に対して垂直な方向のことである。このことは、後述する説明においても同様である。

[0020] 第1の側70Aにおいて、基板60及び導体層130Aに、第1の導体110Aが積層されている。また、第1の導体110A及び導体層130Aに、第2の導体120Aが積層されている。また、導体層130Aの、基板60

0及び第1の導体110Aと接していない面には、酸化膜132A (NbO_x : ニオブ酸化物) が形成されている。また、第1の導体110Aの、基板60及び導体層130Aと接していない面には、酸化膜140A (AlO_x : アルミニウム酸化物) が形成されている。つまり、第1の導体110Aの、第2の導体120A及び第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140Aが形成されている。

[0021] 一方、第2の側70Bにおいて、基板60及び導体層130Bに、第1の導体110Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体110Bに、第2の導体120Bが積層されている。ここで、第1の導体110Aの、第2の側70Bの端部である第1の導体部分110Aaに、酸化膜140Aを介して、第2の導体120Bの、第1の側70Aの端部である第2の導体部分120Baが積層されている。第1の導体部分110Aaに酸化膜140A (トンネルバリア層102) を介して第2の導体部分120Baが積層されていることにより、ジョセフソン接合100が形成されている。また、導体層130Bの、基板60及び第1の導体110Bと接していない面には、酸化膜132B (NbO_x) が形成されている。また、第1の導体110Bの、基板60及び導体層130Bと接していない面には、酸化膜140B (AlO_x) が形成されている。つまり、第1の導体110Bの、第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140Bが形成されている。

[0022] ここで、第1の比較例にかかるジョセフソン接合100の生成方法の概要について説明する。ジョセフソン接合100は、斜め蒸着法を用いて生成する。この方法では、基板60上に、予め、第1の導体110及び第2の導体120の形状に対応するレジストマスクを設けておく。そして、基板60に対する蒸着方向を変えて、2回、超伝導材料の薄膜(第1の導体110及び第2の導体120)を蒸着する。つまり、1回目の蒸着処理で第1の導体110が蒸着され、2回目の蒸着処理で第2の導体120が蒸着される。1回目の蒸着処理の後で第1の導体110の表面を酸化させる。これによって形成された酸化膜140は、ジョセフソン接合100のトンネルバリア層10

2として機能する。また、後述するように、2回の蒸着処理で互いに同じレジストマスクを、基板60に対して移動させないで使用するため、同じ形状の超伝導体（第1の導体110及び第2の導体120）が少しずれた形で重なり合うこととなる。この重なり部分に、意図的に形成されるジョセフソン接合100と、意図せず形成されるスプリアス接合80（寄生接合）とが形成される。スプリアス接合80（spurious junction）については後述する。

[0023] 図3～図8は、第1の比較例にかかる量子デバイス90の製造方法を示す工程図である。図3～図8において、上図は平面図であり、下図は平面図のI—I線断面図である。また、平面図において、基板60は省略されている。これらのことは、後述する工程図においても同様である。また、平面図において、説明のため、第1の導体110と第2の導体120とが重なっている箇所については、第2の導体120の下にある第1の導体110が可視化されるようにしている。このことは、他の平面図においても同様である。

[0024] まず、図3に示すように、基板60を用意し、基板60に導体層130を成膜する（導体層成膜工程）。導体層130の成膜は、例えば、スパッタリングによって行われ得る。あるいは、導体層130の成膜は、蒸着又はCVD（Chemical Vapor Deposition）によって行われてもよい。そして、導体層130への回路パターンの形成は、例えば、光学のリソグラフィおよび反応性イオンエッチングの組み合わせによって行われ得る。なお、光学のリソグラフィに代えて電子線描画法等を用いてもよい。また、反応性イオンエッチングに代えてウェットエッチング等を用いてもよい。なお、導体層130の表面（基板60に接していない面）には、酸化膜132（ニオブ酸化物層）が形成されている。

[0025] 次に、図4に示すように、レジストマスク20（レジストパターン）が形成される（レジストマスク形成工程）。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉されて配置されている。また、レジストマスク20が除去されるまで、レジストマスク20は、基板60に対して移動されず、固定されている。レジス

トマスク 20 のレジストパターンによって、開口部 21 (21A, 21B) が形成される。開口部 21 は、平面図に太い破線で示されている。この太い破線で囲まれた領域が、開口部 21 に対応する (他の開口部が示された平面図においても同様)。なお、以後、レジストマスク 20 を除去するまで、開口部 21 と対向する箇所以外の基板 60 及び導体層 130 は、レジストマスク 20 で覆われている。また、レジストマスク 20 は、レジストブリッジ 20b を有する。これによって、開口部 21 が 2 つの開口部 21A, 21B に分離されている。

[0026] この状態で、導体層 130 の表面の酸化膜 132 を除去する (酸化膜除去工程)。酸化膜 132 の除去は、例えば、矢印 B で示すように開口部 21 を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。イオンミリングは、例えばアルゴンイオンビームを照射することによって行われる。なお、導体層 130 の表面の酸化膜 132 を除去するのは、導体層 130 と超伝導体 (第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120) との接続 (超伝導コンタクト) を形成するためである。なお、酸化膜除去工程では、開口部 21 に対応する面に形成された酸化膜 132 を全て除去する必要はない。導体層 130 と超伝導体との接続が確保されれば、酸化膜除去工程において、開口部 21 に対応する面に形成された酸化膜 132 の一部が、除去されずに残存してもよい。このことは、他の酸化膜除去工程においても同様である。

[0027] 次に、図 5 に示すように、矢印 A1 に示す方向からの斜め蒸着により、第 1 の導体 110 が蒸着される (第 1 の蒸着処理工程)。斜め蒸着の方向は、基板 60 の側から見て、基板 60 の表面に対する垂直方向に対して第 1 の側 70A の方に例えば 20 度程度傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、超伝導材料を蒸着する。図 5 に示すように、第 1 の蒸着処理工程では、基板 60 の側から見て、基板 60 の表面に対する垂直方向から第 1 の側 70A の方に角度 $\theta 1$ 傾いた方向から、超伝導材料が射出される。なお、斜め蒸着の方向の調整は、基板 60 を傾けることによって行われてもよいし、超伝導材料を射出するノズル

の向きを変えることによって行われてもよい。

[0028] このようにして、開口部21Aを介して、第1の導体110Aが蒸着される。また、開口部21Bを介して、第1の導体110Bが蒸着される。また、レジストマスク20には、第1の導体110とともに蒸着された超伝導材料110X(AI)が積層される。ここで、レジストブリッジ20bによって遮蔽されることで、第1の導体110が基板60上に成膜されない箇所がある。つまり、レジストブリッジ20bによって、第1の導体110Aと第1の導体110Bとを分離する隙間G1が形成される。

[0029] 次に、図6に示すように、第1の導体110の表面を酸化する（酸化工程）。具体的には、基板60等が配置された容器に酸素ガスを封入することで、第1の導体110の表面が酸化される。これにより、第1の導体110Aの表面に酸化膜140A(AIO_x)が形成される。また、第1の導体110Bの表面に酸化膜140B(AIO_x)が形成される。さらに、導体層130の第1の導体110A及びレジストマスク20に覆われていない箇所に、酸化膜132A(NbO_x)が形成される。

[0030] 次に、図7に示すように、矢印A2に示す方向からの斜め蒸着により、第2の導体120が蒸着される（第2の蒸着処理工程）。第2の蒸着処理工程では、基板60の側から見て、基板60の表面に対する垂直方向から第2の側70Bの方に角度θ1傾いた方向から、超伝導材料を射出する。このとき、開口部21Aを介して、第2の導体120Aが蒸着される。また、開口部21Bを介して、第2の導体120Bが蒸着される。また、レジストマスク20には、第2の導体120とともに蒸着された超伝導材料120X(AI)が積層される。ここで、レジストブリッジ20bによって遮蔽されることで、第2の導体120が第1の導体110上に成膜されない箇所がある。つまり、レジストブリッジ20bによって、第1の導体110A上に、第2の導体120Aと第2の導体120Bとを分離する隙間G2が形成される。また、第1の導体110Aと第2の導体120Bとが重なる箇所に、ジョセフソン接合100が形成される。また、隙間G1と隙間G2とによって、ジョ

セフソン接合１００の面積が小さくなる。逆に言うと、ジョセフソン接合１００の面積が適切となるように、斜め蒸着の方向（基板６０の表面に対する垂直方向に対する角度）が決定され得る。ジョセフソン接合１００の面積については後述する。

[0031] 次に、図８に示すように、レジストマスク２０が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク２０と、レジストマスク２０に積層された余分な超伝導材料１１０Ｘ、１２０Ｘが除去される。このようにして、図２に示した、第１の比較例にかかる量子デバイス９０が製造される。なお、図４～図７の工程は、同一の密閉状態で実行される。「同一の密閉状態」とは、一貫して、基板６０等が容器に密閉され、大気圧よりも低い気圧である密閉状態の環境から大気環境に開放されないことを意味する。なお、同一の密閉状態では、酸化膜除去工程（図４）ではアルゴン等が容器に封入され、酸化工程（図６）では酸素が容器に封入されるが、それ以外の工程では、容器内は真空環境下にある状態である。「同一の密閉状態」については、後述する比較例及び実施の形態においても同様である。

[0032] ここで、図２を用いて、上述したスプリアス接合８０について説明する。上述したように、第１の導体１１０Ａの第１の導体部分１１０Ａａと、第２の導体１２０Ｂの第２の導体部分１２０Ｂａと、両者の間の酸化膜１４０Ａとによって、ジョセフソン接合１００が形成される。一方、ジョセフソン接合１００以外にも、第１の導体１１０と第２の導体１２０との間に酸化膜１４０が形成されている箇所がある。この箇所に、スプリアス接合８０が形成されてしまう。具体的には、第１の導体１１０Ａと第２の導体１２０Ａと酸化膜１４０Ａとによって、スプリアス接合８０Ａが形成される。また、第１の導体１１０Ｂと第２の導体１２０Ｂと酸化膜１４０Ｂとによって、スプリアス接合８０Ｂが形成される。なお、スプリアス接合８０の面積は、ジョセフソン接合１００の面積よりも大きくなるように構成されている。スプリアス接合８０の面積がジョセフソン接合１００の面積よりも小さいと、スプリアス接合８０がジョセフソン接合１００として振る舞ってしまうからである。

。

[0033] ここで、スプリアス接合 80 は、以下に説明するように、量子デバイスの性能（コヒーレンス）の劣化の原因となり得る。すなわち、量子デバイス（超伝導量子ビット）のコヒーレンスを劣化させるデコヒーレンス要因の 1 つに二準位欠陥（T L S : Two-Level System）がある。二準位欠陥は、アモルファス等の材料中に自然に形成された一種の量子ビットであり、意図的に生成された量子ビットと結合して、この量子ビットのコヒーレンスを劣化させるなど、動作に悪影響を与え得る。二準位欠陥は、素子中の酸化物層やアモルファス層といった誘電体の中に広く存在している。つまり、酸化膜 140 及び酸化膜 132 の中でも、二準位欠陥が存在する。

[0034] ここで、スプリアス接合 80 は、ジョセフソン接合 100 と同じプロセス（図 5 ～図 7）で形成される。したがって、スプリアス接合 80 の酸化膜 140 の中には、ジョセフソン接合 100 のトンネルバリア層 102（酸化膜 140 A）の中と同じ密度で二準位欠陥が含まれている。ここで、上述したようにジョセフソン接合 100 の面積は小さいため、トンネルバリア層 102 に二準位欠陥が存在する確率は低い。言い換えると、二準位欠陥の存在確率を低下させるために、ジョセフソン接合 100 の面積がなるべく小さくなるように、量子デバイスが設計される。

[0035] 一方、上述したようにスプリアス接合 80 の面積はジョセフソン接合 100 の面積よりも大きいため、スプリアス接合 80 の酸化膜 140 に二準位欠陥が存在する確率は高い。このように、斜め蒸着法で製造される量子デバイスにおけるスプリアス接合 80 の存在は、主要なデコヒーレンスの要因となり得る。具体的には、酸化膜 140 によって構成されるスプリアス接合 80 は、第 1 の導体 110 と第 2 の導体 120 との間のキャパシタとして振る舞う。そして、このキャパシタを横切る電界が大きくなると、酸化膜 140 の中の二準位欠陥の電気双極子と量子ビットとが結合することで、デコヒーレンス（ロス）が引き起こされる。したがって、このスプリアス接合 80 がデコヒーレンスの要因とならないようにすることが望まれる。

[0036] 図9は、第1の比較例にかかる量子デバイス90の回路構成を模式的に示す図である。第2の側70Bでは、ジョセフソン接合100から導体層130Bとの間の電氣的な経路は、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Bを経由するものしか存在しない。すなわち、ジョセフソン接合100と第2の導体120Bとが接続され、酸化膜140Bに対応するスプリアス接合80Bを介して第2の導体120Bと第1の導体110Bとが接続され、第1の導体110Bが導体層130Bに接続されている。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界が大きくなるので、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与することとなる。

[0037] 一方、第1の側70Aでは、ジョセフソン接合100から導体層130Aとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第1の導体110Aとスプリアス接合80A（酸化膜140A）と第2の導体120Aと酸化膜132Aとを介して、導体層130Aと接続される経路である。なお、酸化膜132Aは、酸化工程（図6）によって形成されたものである。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第1の導体110Aと接続され、第1の導体110Aと導体層130Aとが直接接続される経路である。つまり、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）が短絡しており、スプリアス接合80Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Aに発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合80Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0038] ここで、第2の側70Bでも、スプリアス接合80Bを無効化することが望まれる。そこで、以下に説明するように、第2の導体120Bと導体層130Bとを短絡する方法を考える。そこで、以下に説明する第2の比較例では、接続導体によって、第2の導体120Bと導体層130Bとを短絡する方法を考える。

[0039] <第2の比較例>

図10は、第2の比較例にかかる量子デバイス90を示す図である。図10は、第2の比較例にかかる量子デバイス90の断面図である。第2の比較例にかかる量子デバイス90は、第1の比較例と同様に、基板60と、複数の第1の導体110（110A、110B）と、複数の第2の導体120（120A、120B）と、超伝導回路を構成する導体層130（130A、130B）とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、基板60に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、第1の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0040] また、第2の比較例にかかる量子デバイス90は、さらに、接続導体150（150A、150B）を有する。接続導体150は、超伝導材料で形成されている。以下の説明では、接続導体150は、アルミニウム（Al）で形成されているとする。

[0041] また、第1の導体110と第2の導体120との間には、酸化膜140（140A、140B）が形成されている。また、第1の導体110（110A）の一部（第1の導体部分110Aa）と、第2の導体120（120B）の一部（第2の導体部分120Ba）と、酸化膜140（140A）とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100の構成については、第1の比較例のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0042] また、第1の側70Aにおいて、基板60及び導体層130Aに、第1の導体110Aが積層されている。また、第1の導体110A及び導体層130Aに、第2の導体120Aが積層されている。また、導体層130A及び第2の導体120Aに、接続導体150Aが積層されている。また、導体層130Aの、第1の導体110A及び第2の導体120Aと接している面及び露出している面には、酸化膜132A（NbO_x）が形成されている。なお、導体層130Aの、接続導体150Aと接している面には、酸化膜132Aは形成されていない。また、第1の導体110Aの、基板60及び導体

層 130A と接していない面（第 2 の導体 120A 及び第 2 の導体 120B と接している面）には、酸化膜 140A (AlO_x) が形成されている。

[0043] 一方、第 2 の側 70B において、基板 60 及び導体層 130B に、第 1 の導体 110B が積層されている。また、基板 60 及び第 1 の導体 110B に、第 2 の導体 120B が積層されている。また、導体層 130B、第 1 の導体 110B 及び第 2 の導体 120B に、接続導体 150B が積層されている。また、導体層 130B の、第 1 の導体 110B と接している面及び露出している面には、酸化膜 132B (NbO_x) が形成されている。また、第 1 の導体 110B の、第 2 の導体 120B と接している面には、酸化膜 140B (AlO_x) が形成されている。なお、導体層 130B の、接続導体 150B と接している面には、酸化膜 132B は形成されていない。同様に、第 1 の導体 110B の、接続導体 150B と接している面には、酸化膜 140B は形成されていない。

[0044] ここで、第 1 の比較例では、図 4 で示したように、第 1 の導体 110 の蒸着処理の前に、導体層 130 の表面の酸化膜 132 を除去する酸化膜除去工程（イオンミリング）が実行される。これに対し、第 2 の比較例では、第 1 の導体 110 の蒸着処理の前に導体層 130 に対して酸化膜除去工程が実行されない。酸化膜除去工程を実行しない理由は、第 1 の導体 110 の蒸着処理の前に酸化膜除去工程が実行されると、基板 60 の表面にダメージ層が形成されてしまうおそれがあるからである。このダメージ層が、コヒーレンスを劣化させるロスを発生させる要因となる可能性がある。したがって、第 2 の比較例では、接続導体 150 を形成することで、第 1 の導体 110 の蒸着処理の前に酸化膜除去工程を実行しなくても、導体層 130 と超伝導体（第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120）との接続（超伝導コンタクト）を形成する。

[0045] 第 2 の比較例にかかる量子デバイス 90 の製造方法について、第 1 の比較例の場合と対比して説明する。まず、図 3 に示した導体層成膜工程が実行され、図 4 に示したレジストマスク形成工程が実行される。ここで、上述した

ように、この時点では、酸化膜除去工程は実行されない。そして、図5～図7に示した第1の蒸着処理工程、酸化工程及び第2の蒸着処理工程がそれぞれ実行される。そして、接続導体150用のレジストマスクが形成された状態で酸化膜除去工程が実行され、その後、接続導体150が蒸着される。なお、この酸化膜除去工程では、接続導体150が成膜される箇所の酸化膜が除去される。一方、基板60は接続導体150用のレジストマスクで覆われているので、基板60の表面にダメージ層が形成されない。

[0046] 図11は、第2の比較例にかかる量子デバイス90の回路構成を模式的に示す図である。第2の側70Bでは、ジョセフソン接合100から導体層130Bとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Bを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第2の導体120Bとスプリアス接合80B（酸化膜140B）と第1の導体110Bと酸化膜132Bとを介して、導体層130Bと接続される経路である。なお、酸化膜132Bは、酸化工程によって形成されたものである。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第2の導体120Bと接続され、第2の導体120Bと導体層130Bとが接続導体150Bを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が接続導体150Bによって短絡しており、スプリアス接合80Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0047] 一方、第1の側70Aでは、ジョセフソン接合100から導体層130Aとの間の電氣的な経路は、キャパシタとして機能する、スプリアス接合80A又は酸化膜132Aを経由するものしか存在しない。すなわち、ジョセフソン接合100が第1の導体110Aと接続され、第1の導体110Aが、スプリアス接合80A（酸化膜140A）、第2の導体120A及び接続導体150Aを介して、導体層130Aと接続されている。あるいは、第1の

導体 1 1 0 A が、酸化膜 1 3 2 A を介して、導体層 1 3 0 A と接続されている。したがって、スプリアス接合 8 0 の両端の導体は短絡されず、スプリアス接合 8 0 A に発生する電界が大きくなるので、スプリアス接合 8 0 A はロスの発生に寄与することとなる。

[0048] したがって、第 2 の比較例では、デコヒーレンスを抑制することが困難である。これに対し、上述したように、本実施の形態にかかる量子デバイス 1 では、ジョセフソン接合 1 0 を構成する第 1 の導体 2 と導体層 6 とが、超伝導コンタクトを形成している。同様に、ジョセフソン接合 1 0 を構成する第 2 の導体 4 と導体層 6 とが、超伝導コンタクトを形成している。これにより、本実施の形態にかかる量子デバイス 1 は、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、本実施の形態にかかる量子デバイス 1 は、デコヒーレンスを抑制することが可能である。

[0049] <第 3 の比較例>

図 1 2 は、第 3 の比較例にかかる量子デバイス 9 2 を示す図である。図 1 2 は、第 3 の比較例にかかる量子デバイス 9 2 の平面図である。第 3 の比較例にかかる量子デバイス 9 2 は、第 1 の比較例にかかる量子デバイス 9 0 に対応する構成を、別の製造方法によって製造したものである。

[0050] 第 1 の比較例及び第 2 の比較例では、図 4 等に応示するように、レジストブリッジ 2 0 b を有するレジストマスク 2 0 を用いて、量子デバイス 9 0 が製造される。つまり、第 1 の比較例及び第 2 の比較例では、レジストブリッジ 2 0 b によって、ジョセフソン接合 1 0 0 が形成される。したがって、第 1 の比較例及び第 2 の比較例の製造方法を、「ブリッジ型」と称する。これに対し、第 3 の比較例では、後述するように、レジストブリッジを有さないレジストマスクを用いて、ジョセフソン接合を形成する。したがって、第 3 の比較例の製造方法を、「ブリッジレス型」と称する。なお、第 3 の比較例においても、1 つのレジストマスクによって、ジョセフソン接合が形成されることに、留意されたい。

[0051] 第 3 の比較例にかかる量子デバイス 9 2 は、第 1 の導体 2 1 0 (2 1 0 A

、210B)と、第2の導体220(220A, 220B)と、超伝導回路を構成する導体層230(230A, 230B)とを有する。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、基板60に積層されている。

[0052] 第1の導体210は、導体層230に積層されている。第2の導体220は、第1の導体210に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、超伝導材料で形成されている。以下の説明では、第1の導体210及び第2の導体220は、アルミニウム(Al)で形成されているとする。また、以下の説明では、導体層230(第3の導体)は、ニオブ(Nb)で形成されているとする。

[0053] また、第1の比較例と同様に、第1の導体210と第2の導体220の間には、酸化膜(AlO_x)が形成されている。酸化膜は、例えば、第1の導体210に第2の導体220を積層する前に、第1の導体210の表面に酸化処理を施すことによって、形成され得る。また、第1の比較例と同様に、第1の導体210(210A)の一部(第1の導体部分210Aa)と、第2の導体220(220B)の一部(第2の導体部分220Ba)と、酸化膜とによって、ジョセフソン接合200が形成されている。つまり、第1の導体部分210Aaと、第1の導体部分210Aaに積層された第2の導体部分220Baと、第1の導体部分210Aaと第2の導体部分220Baとの間の酸化膜とによって、ジョセフソン接合200が形成されている。

[0054] 図12に示すように、第3の比較例にかかる量子デバイス92は、平面視で、概ね、ジョセフソン接合200を中心として逆L字型に形成されている。また、ジョセフソン接合200の近傍は、平面視で、第1の導体210(210A)と第2の導体220(220B)とが交差することによって、十字型に形成されている。また、第1の導体210Aのジョセフソン接合200の近傍には、細く伸びるように形成された細幅部212Aが形成されている。また、第2の導体220Bのジョセフソン接合200の近傍には、細く伸びるように形成された細幅部222Bが形成されている。そして、細幅部212Aと細幅部222Bとが交差することによって、ジョセフソン接合2

00が形成されている。なお、第1の導体210Bには、細幅部は形成されていない。また、第2の導体220Aには、細幅部は形成されていない。

[0055] ここで、ジョセフソン接合200に対して、ジョセフソン接合200を構成する第1の導体210Aが導体層230Aの方に延びるように形成された側（図12の左下側）を、第1の側72Aとする。つまり、第1の側72Aは、図12においてジョセフソン接合200よりも左側に対応する。また、ジョセフソン接合200に対して、ジョセフソン接合200を構成する第2の導体220Bが導体層230Bの方に延びるように形成された側（図12の右上側）を、第2の側72Bとする。つまり、第2の側72Bは、図12においてジョセフソン接合200よりも上側に対応する。なお、後述するように、基板60の表面に対する垂直方向（紙面手前から奥に向かう方向）から第1の側72Aの側に傾いた方向である第1の方向（矢印C1で示す）から斜め蒸着を行うことによって、第1の導体210が蒸着される。また、基板60の表面に対する垂直方向（紙面手前から奥に向かう方向）から第2の側72Bの側に傾いた方向である第2の方向（矢印C2で示す）から斜め蒸着を行うことによって、第2の導体220が蒸着される。

[0056] 第1の側72Aにおいて、基板60及び導体層230Aに、第1の導体210Aが積層されている。また、第1の導体210A及び導体層230Aに、第2の導体220Aが積層されている。また、導体層230Aの、基板60及び第1の導体210Aと接していない面には、酸化膜（NbO_x）が形成されている。また、第1の導体210Aの、基板60及び導体層230Aと接していない面には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。つまり、第1の導体210Aの、第2の導体220A及び第2の導体220Bと接している面には、酸化膜が形成されている。

[0057] 一方、第2の側72Bにおいて、基板60及び導体層230Bに、第1の導体210Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体210Bに、第2の導体220Bが積層されている。ここで、第1の導体210Aの細幅部212Aの一部である第1の導体部分210Aaに、酸化膜を介して、

第2の導体220Bの細幅部222Bの一部である第2の導体部分220Baが積層されている。第1の導体部分210Aaに酸化膜（トンネルバリア層）を介して第2の導体部分220Baが積層されていることにより、ジョセフソン接合200が形成されている。また、導体層230Bの、基板60及び第1の導体210Bと接していない面には、酸化膜（NbO_x）が形成されている。また、第1の導体210Bの、基板60及び導体層230Bと接していない面には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。つまり、第1の導体210Bの、第2の導体220Bと接している面には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。

[0058] ここで、第3の比較例にかかるジョセフソン接合200の生成方法の概要について説明する。ジョセフソン接合200は、ブリッジレス型による斜め蒸着法を用いて生成する。この方法では、基板60上に、予め、第1の導体210及び第2の導体220の形状に対応するレジストマスクを設けておく（レジストマスク形成工程）。この状態で、導体層230の表面の酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。そして、基板60に対する蒸着方向を変えて、2回、超伝導材料の薄膜（第1の導体210及び第2の導体220）を蒸着する。つまり、1回目の蒸着処理で第1の導体210が蒸着され（第1の蒸着処理工程）、2回目の蒸着処理で第2の導体220が蒸着される（第2の蒸着処理工程）。1回目の蒸着処理の後で第1の導体210の表面を酸化させる（酸化工程）。これによって形成された酸化膜は、ジョセフソン接合200のトンネルバリア層として機能する。

[0059] また、後述するように、2回の蒸着処理で互いに同じレジストマスクを使用するため、導体層230の上で、対応する形状の超伝導体（第1の導体210及び第2の導体220）が少しずれた形で重なり合うこととなる。この重なり部分に、意図的に形成されるジョセフソン接合200とは異なり、意図せず形成されるスプリアス接合82が形成される。つまり、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと第2の導体220Aとが酸化膜を介して接続された箇所に、スプリアス接合82Aが形成される。また、第2の側7

2 Bにおいて、第1の導体210 Bと第2の導体220 Bとが酸化膜を介して接続された箇所に、スプリアス接合82 Bが形成される。

[0060] 図13～図15は、第3の比較例にかかる量子デバイス92の製造方法を説明するための図である。図13～図15を用いて、第3の比較例にかかるジョセフソン接合200の生成方法の概要について説明する。ジョセフソン接合200は、ブリッジレス型による斜め蒸着法を用いて生成する。まず、図13に示すように、基板60上に、予め、第1の導体210及び第2の導体220の形状に対応するレジストマスク30を設けておく（レジストマスク形成工程）。レジストマスク30は、ジョセフソン接合200が形成される箇所の周囲において十字型の開口部31 Aが形成されるように、レジストマスク部分30 a, 30 b, 30 c, 30 dを有する。

[0061] レジストマスク30が配置された基板60を容器内に密閉して真空環境下に置く。そして、導体層230の表面の酸化膜を除去した後で、図13の矢印C1に示す方向からの斜め蒸着により、第1の導体210が蒸着される（第1の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60の表面に対する垂直方向に対して例えば45度程度、開口部分31 a（後述）の長手方向に沿った方向に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 2$ とすると、 $\theta 2 = 45$ 度程度の方向から、超伝導材料が蒸着される。なお、開口部分31 aは、レジストマスク部分30 aとレジストマスク部分30 bとの間の部分、レジストマスク部分30 cとレジストマスク部分30 dとの間の部分、及びこれらの間の中央部分31 cから構成される。図13の例では、第1の蒸着処理工程では、基板60の側から見て、垂直方向に対して、開口部分31 aの長手方向に沿った方向のレジストマスク部分30 a及びレジストマスク部分30 bの側に $\theta 2$ 傾いた方向から、超伝導材料が蒸着される。なお、斜め蒸着の方向の調整は、基板60を回転させることによって行われてもよいし、超伝導材料を射出するノズルの向きを変えることによって行われてもよい。

[0062] ここで、第1の蒸着処理工程では、十字型の開口部31 Aのうち、矢印C

1 に示す方向に沿った方向の、開口部分 3 1 a の底部（基板 6 0 の表面）に、第 1 の導体 2 1 0 が蒸着される。つまり、図 1 4 を用いて説明するように、第 1 の蒸着処理工程では、レジストマスク部分 3 0 a とレジストマスク部分 3 0 c との間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分 3 0 a に遮蔽されることにより、到達しない。同様に、第 1 の蒸着処理工程では、レジストマスク部分 3 0 b とレジストマスク部分 3 0 d との間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分 3 0 b に遮蔽されることにより、到達しない。

[0063] 次に、図 6 に示した方法と同様にして、第 1 の導体 2 1 0 の表面を酸化する（酸化工程）。具体的には、基板 6 0 等が配置された容器に酸素ガスを封入することで、第 1 の導体 2 1 0 の表面が酸化される。これにより、第 1 の導体 2 1 0 A の表面に酸化膜（ AlO_x ）が形成される。また、第 1 の導体 2 1 0 B に表面に酸化膜（ AlO_x ）が形成される。さらに、図 1 3 には図示されていないが、導体層 2 3 0 の第 1 の導体 2 1 0 及びレジストマスク 3 0 に覆われていない箇所に、酸化膜（ NbO_x ）が形成される。

[0064] 次に、図 1 3 の矢印 C 2 に示す方向からの斜め蒸着により、第 2 の導体 2 2 0 が蒸着される（第 2 の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板 6 0 の側から見て、基板 6 0 の表面に対する垂直方向に対して例えば 4 5 度程度、開口部分 3 1 b（後述）の長手方向に沿った方向に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 2$ とすると、 $\theta 2 = 4 5$ 度程度の方向から、超伝導材料を蒸着する。なお、開口部分 3 1 b は、レジストマスク部分 3 0 a とレジストマスク部分 3 0 c との間の部分、レジストマスク部分 3 0 b とレジストマスク部分 3 0 d との間の部分、及びこれらの間の中央部分 3 1 c から構成される。図 1 3 の例では、第 2 の蒸着処理工程では、基板 6 0 の側から見て、垂直方向に対して、開口部分 3 1 b の長手方向に沿った方向のレジストマスク部分 3 0 b 及びレジストマスク部分 3 0 d の側に $\theta 2$ 傾いた方向から、超伝導材料が蒸着される。斜め蒸着の方向を C 1 の方向から C 2 の方向に変更することは、例えば、第 1 の蒸着処理工程の後で、矢印 R 1 の方

向に基板60を90度回転させることによって行われてもよい。

[0065] ここで、第2の蒸着処理工程では、十字型の開口部31Aのうち、矢印C2に示す方向に沿った方向の、開口部分31bの底部に、第2の導体220が蒸着される。つまり、図14を用いて説明するように、第2の蒸着処理工程では、レジストマスク部分30aとレジストマスク部分30bとの間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分30bに遮蔽されることにより、到達しない。同様に、第2の蒸着処理工程では、レジストマスク部分30cとレジストマスク部分30dとの間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分30dに遮蔽されることにより、到達しない。なお、中央部分31cでは、既に第1の導体210が積層されているので、第2の導体220が、第1の導体210に積層されることとなる。そして、図15に示すように、レジストマスク30が除去される（リフトオフ工程）。

[0066] 図14に示すように、レジストマスク30において、レジストマスク部分30xとレジストマスク部分30yとの間を開口部31Xとする。この場合、開口部31Xの蒸着の方向（矢印Cで示す）に対応する方向の幅Wが狭い場合には、開口部31Xの底部31Xbは、レジストマスク部分30xの陰になる。言い換えると、底部31Xbは、レジストマスク部分30xによって遮蔽される。したがって、矢印Cの方向に射出された超伝導材料210Xは、レジストマスク30の上面、及び、レジストマスク部分30yの開口部31Xにおける壁面に積層されるのみであって、底部31Xbに積層されない。

[0067] したがって、図15に示すように、第1の導体210Aと第2の導体220Bとが十字に交差した形状で形成される。そして、中央部分31cにおいて第1の導体210Aと第2の導体220とが重なった部分に、ジョセフソン接合200が形成される。また、レジストマスク30の開口部31が狭い箇所において、ジョセフソン接合200を構成する細幅部212A（第1の導体210A）及び細幅部222B（第2の導体220B）が形成される。

[0068] なお、第3の比較例にかかる量子デバイス92の回路構成は、図9に示し

たものと実質的に同様である。つまり、第1の側72Aでは、ジョセフソン接合200から導体層230Aとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合82Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合200が、第1の導体210Aとスプリアス接合82Aと第2の導体220Aと導体層230Aに形成された酸化膜とを介して、導体層230Aと接続される経路である。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合200が第1の導体210Aと接続され、第1の導体210Aと導体層230Aとが直接接続される経路である。つまり、スプリアス接合82Aの両端の導体が短絡しており、スプリアス接合82Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82Aに発生する電界は大きくなりませんので、スプリアス接合82Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0069] 一方、第2の側72Bでは、ジョセフソン接合200から導体層230Bとの間の電氣的な経路は、キャパシタとして機能するスプリアス接合82Bを経由するものしか存在しない。すなわち、ジョセフソン接合200と第2の導体220Bとが接続され、酸化膜に対応するスプリアス接合82Bを介して第2の導体220Bと第1の導体210Bとが接続され、第1の導体210Bが導体層230Bに接続されている。したがって、スプリアス接合82Bに発生する電界が大きくなるので、スプリアス接合82Bはロスの発生に寄与することとなる。

[0070] したがって、第3の比較例では、デコヒーレンスを抑制することが困難である。これに対し、上述したように、本実施の形態にかかる量子デバイス1では、ジョセフソン接合10を構成する第1の導体2と導体層6とが、超伝導コンタクトを形成している。同様に、ジョセフソン接合10を構成する第2の導体4と導体層6とが、超伝導コンタクトを形成している。これにより、本実施の形態にかかる量子デバイス1は、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、本実施の形態にかかる量子デバイス1は、デコヒーレンスを抑制することが可能である。

[0071] (実施の形態1)

以下、実施形態について、図面を参照しながら説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

[0072] 図16は、実施の形態1にかかる量子デバイス50を示す図である。図16は、実施の形態1にかかる量子デバイス50の断面図である。実施の形態1にかかる量子デバイス50は、第2の比較例と同様に、基板60と、複数の第1の導体110(110A, 110B)と、複数の第2の導体120(120A, 120B)と、超伝導回路を構成する導体層130(130A, 130B)とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、第2の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0073] 第1の導体110は、図1に示した第1の導体2に対応する。第1の導体110は、導体層130に積層されている。なお、導体層130は、図1に示した導体層6に対応する。また、第2の導体120は、図1に示した第2の導体4に対応する。第2の導体120は、第1の導体110に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、後で列挙するような超伝導材料で形成されている(後述する他の実施の形態でも同様)。例えば、第1の導体110及び第2の導体120は、アルミニウム(Al)で形成されている。また、例えば、導体層130(第3の導体)は、ニオブ(Nb)で形成されている。しかしながら、第1の導体110及び第2の導体120は、アルミニウム(Al)で形成されていなくてもよい。また、導体層130は、ニオブ(Nb)で形成されていなくてもよい。

[0074] また、実施の形態1にかかる量子デバイス50は、さらに、接続導体150(150A, 150B)を有する。接続導体150は、後で列挙するような超伝導材料で形成されている(後述する他の実施の形態でも同様)。例えば、接続導体150は、アルミニウム(Al)等の超伝導材料で形成されて

いる。また、第1の導体110と第2の導体120との間には、第1の導体110の表面が酸化されることにより酸化膜140（140A，140B）が形成されている。酸化膜140は、図1に示した酸化膜8に対応する。また、第1の導体110（110A）の一部（第1の導体部分110Aa）と、第2の導体120（120B）の一部（第2の導体部分120Ba）と、酸化膜140（140A）とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100は、図1に示したジョセフソン接合10に対応する。ジョセフソン接合100の構成については、第1の比較例及び第2の比較例のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0075] ここで、本実施の形態では、基板60には、例えば、シリコン基板が用いられるが、基板の材料はこれに限られない。例えば、基板60には、サファイヤ基板又はガラス基板などが用いられてもよい。また、超伝導材料としては、例えば、ニオブ、ニオブ窒化物、アルミニウム、インジウム、鉛、錫、レニウム、チタン、チタン窒化物、タンタル、または、これらのいずれかを含む合金が挙げられる。なお、必ずしも、導体層130の全てが、超伝導材料により実現されていなくてもよく、導体層130の少なくとも一部に常伝導材料が用いられてもよい。常伝導材料としては、例えば、銅、銀、金、白金、または、これらのいずれかを含む合金が挙げられる。なお、超伝導状態を実現するため、冷凍機により実現される例えば10mK（ミリケルビン）程度の温度環境において、量子デバイス50は利用される。これらのことは、他の実施の形態でも同様である。

[0076] また、第2の比較例と同様に、第1の側70Aにおいて、基板60及び導体層130Aに、第1の導体110Aが積層されている。また、第1の導体110A及び導体層130Aに、第2の導体120Aが積層されている。また、導体層130A及び第2の導体120Aに、接続導体150Aが積層されている。

[0077] また、第2の比較例と同様に、導体層130Aの、第1の導体110A及び第2の導体120Aと接している面には、酸化膜132A（NbO_x）が

形成されている。また、第2の比較例と同様に、第1の導体110Aの、基板60及び導体層130Aと接していない面（第2の導体120A及び第2の導体120Bと接している面）には、酸化膜140A（ AlO_x ）が形成されている。

[0078] ここで、実施の形態1では、第1の導体110Aには、第2の導体120Aに覆われていない突出部112A（第1の突出部）が形成されている。突出部112Aは、第1の導体110Aと一体に形成されている。突出部112Aは、図1の突出部2aに対応する。矢印X1で示すように、この突出部112Aに、接続導体150Aが積層されて接続されている（超伝導コンタクト）。突出部112Aは、レジストマスクの形状を工夫することによって、形成され得る。このように、突出部112Aが接続導体150Aと接続されていることによって、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）が短絡する。したがって、スプリアス接合80Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Aに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合80Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0079] 一方、第2の側70Bにおいて、第2の比較例と同様に、基板60及び導体層130Bに、第1の導体110Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体110Bに、第2の導体120Bが積層されている。また、導体層130B、第1の導体110B及び第2の導体120Bに、接続導体150Bが積層されている。これにより、矢印X2で示すように、第2の導体120Bが接続導体150Bと接続される。したがって、第2の導体120Bは、導体層130Bと、接続導体150Bを介して接続されている。例えば、第2の導体120Bは、導体層130Bと、酸化膜（誘電体）を介さずに接続されていてもよい。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が接続導体150Bによって短絡するので、スプリアス接合80Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合

80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0080] また、第2の比較例と同様に、導体層130Bの、第1の導体110Bと接している面及び露出している面には、酸化膜132B (NbO_x) が形成されている。また、第1の導体110Bの、第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140B (AlO_x) が形成されている。ここで、実施の形態1では、第2の比較例と同様に、第1の導体110の蒸着処理の前に導体層130に対して酸化膜除去工程が実行されない。そして、接続導体150を形成することで、第1の導体110の蒸着処理の前に酸化膜除去工程を実行しなくても、上述したように、導体層130と超伝導体（第1の導体110及び第2の導体120）との接続（超伝導コンタクト）を形成する。

[0081] 上述したように、実施の形態1にかかる量子デバイス50では、突出部112Aと導体層130Aとが、接続導体150Aを介して接続されている。これにより、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）の接続経路に、酸化膜140, 132を介さないものが存在することとなる。つまり、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）が短絡する。したがって、上述したように、スプリアス接合80Aはロスの発生に寄与しないこととなる。また、実施の形態1にかかる量子デバイス50では、第2の導体120Bと導体層130Bとが、接続導体150Bを介して接続されている。これにより、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）の接続経路に、酸化膜140, 132を介さないものが存在することとなる。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が短絡する。したがって、上述したように、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。したがって、実施の形態1にかかる量子デバイス50は、性能の劣化を抑制することが可能となる。

[0082] また、実施の形態1にかかる量子デバイス50では、突出部112Aと接続導体150Aとが接続されることによって、第1の導体110Aと接続導体150Aとを接続させるための別途の工程が不要となる。つまり、第2の

比較例から工程を実質的に増加させることなく、実施の形態１にかかる量子デバイス５０を製造することができる。したがって、実施の形態１では、簡易な方法で、性能の劣化を抑制した量子デバイス５０を製造することが可能となる。

[0083] 図１７～図２４は、実施の形態１にかかる量子デバイス５０の製造方法を示す工程図である。まず、図１７に示すように、基板６０を用意し、基板６０に導体層１３０を成膜する（導体層成膜工程）。導体層１３０の成膜は、例えば、スパッタリングによって行われ得る。あるいは、導体層１３０の成膜は、蒸着又はＣＶＤによって行われてもよい。そして、導体層１３０への回路パターンの形成は、例えば、光学的リソグラフィおよび反応性イオンエッチングの組み合わせによって行われ得る。なお、光学的リソグラフィに代えて電子線描画法等を用いてもよい。また、反応性イオンエッチングに代えてウェットエッチング等を用いてもよい。なお、導体層１３０の表面（基板６０に接していない面）には、酸化膜１３２（ NbO_x ）が形成されている。

[0084] 次に、図１８に示すように、レジストマスク３００（レジストパターン）が基板６０の上に形成される（レジストマスク形成工程）。このとき、基板６０等は真空環境下に置かれる。つまり、基板６０等は、内部が真空状態となった容器内に密閉された状態で配置されている。レジストマスク３００のレジストパターンによって、開口部３０２（３０２Ａ，３０２Ｂ）が形成される。なお、以後、レジストマスク３００を除去するまで、開口部３０２と対向する箇所以外の基板６０及び導体層１３０は、レジストマスク３００で覆われている。また、レジストマスク３００は、レジストブリッジ３００ｂを有する。これによって、開口部３０２が２つの開口部３０２Ａ，３０２Ｂに分離されている。

[0085] また、実施の形態１では、レジストマスク３００は、第１の導体１１０Ａが突出部１１２Ａを有するように形成されている。つまり、実施の形態１にかかるレジストマスク３００は、突出部１１２Ａを有する第１の導体１１０

と第2の導体120とによってジョセフソン接合100を形成するように、形成されている。

[0086] 実施の形態1では、この段階では、第1の比較例と異なり、酸化膜除去工程が実行されない。この状態で、矢印A1に示す方向からの斜め蒸着により、第1の導体110が蒸着される（第1の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60に対する垂直方向（断面図における下向き方向）に対して例えば20度程度、第1の側70Aの方に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する第1の側70Aの方に傾いた角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、超伝導材料が蒸着される。

[0087] このようにして、開口部302Aを介して、第1の導体110Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第1の導体110Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第1の導体110とともに蒸着された超伝導材料110X（A1）が積層される。また、レジストブリッジ300bによって、第1の導体110Aと第1の導体110Bとを分離する隙間G1が形成される。また、酸化膜除去工程が実行されなかったので、第1の導体110Aと導体層130Aとの間には、酸化膜132Aが形成されている。また、第1の導体110Bと導体層130Bとの間には、酸化膜132Bが形成されている。

[0088] 次に、図19に示すように、第1の比較例（図6）と同様にして、第1の導体110の表面を酸化する（酸化工程）。これにより、第1の導体110Aの表面に酸化膜140A（A1Ox）が形成される。また、第1の導体110Bの表面に酸化膜140B（A1Ox）が形成される。

[0089] 次に、図20に示すように、第1の比較例（図7）と同様にして、矢印A2に示す方向からの斜め蒸着により、第2の導体120が蒸着される（第2の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60に対する垂直方向（断面図における下向き方向）に対して例えば20度程度、第2の側70Bの方に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する第2の側70Bの方に傾いた角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、

超伝導材料を蒸着する。

[0090] このとき、開口部302Aを介して、第2の導体120Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第2の導体120Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第2の導体120とともに蒸着された超伝導材料120X(A1)が積層される。また、レジストブリッジ300bによって、第1の導体110A上に、第2の導体120Aと第2の導体120Bとを分離する隙間G2が形成される。また、第1の導体110Aと第2の導体120Bとが重なる箇所に、ジョセフソン接合100が形成される。

[0091] さらに、実施の形態1では、開口部302Aを形成する第1の側70Aの側の壁部303Aの近傍には、第1の蒸着処理工程において超伝導材料が到達するので、第1の導体110Aが成膜されている。一方、壁部303Aの近傍では、第2の蒸着処理工程において、壁部303Aによって遮蔽されることで、第1の導体110Aの上に第2の導体120Aが成膜されない箇所がある。この、第2の導体120Aが成膜されない箇所に、第1の導体110Aの突出部112Aが形成される。

[0092] 次に、図21に示すように、レジストマスク300が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク300と、レジストマスク300に積層された余分な超伝導材料110X、120Xが除去される。このとき、真空状態（密閉状態）が大気環境に開放される。つまり、基板60を配置する装置は、真空状態（密閉状態）から大気環境下に置かれる。なお、大気環境下であるので、第2の導体120の表面に、酸化膜142が形成される。つまり、第2の導体120Aの表面に酸化膜142Aが形成され、第2の導体120Bの表面に酸化膜142Bが形成される。

[0093] 次に、図22に示すように、接続導体150を形成するためのレジストマスク400（レジストパターン）が形成される（接続導体用レジストマスク形成工程）。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉された状態で配置されている。レジストマスク400のレジストパターンによって、開口部402（4

02A, 402B)が形成される。レジストマスク400において、第1の側70Aに開口部402Aが設けられ、第2の側70Bに開口部402Bが設けられる。なお、以後、レジストマスク400を除去するまで、開口部402と対向する箇所以外の基板60等は、レジストマスク400で覆われている。なお、後述するように、開口部402に対向する箇所に、接続導体150が形成される。

[0094] この状態で、第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の、レジストマスク400に覆われずに露出している箇所に形成されている酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。これにより、レジストマスク400に覆われていない、導体層130の表面の酸化膜132、第2の導体120の表面の酸化膜142及び第1の導体110の表面の酸化膜140が除去される。酸化膜132, 140, 142の除去は、例えば、矢印Bで示すように開口部402を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。なお、酸化膜132, 140, 142を除去するのは、接続導体150によって導体層130と超伝導体（第1の導体110及び第2の導体120）との接続（超伝導コンタクト）を形成するためである。

[0095] 次に、図23に示すように、開口部402を介して接続導体150が蒸着される（接続導体蒸着工程）。なお、接続導体150の蒸着処理は、斜め蒸着である必要はない。これにより、開口部402Aを介して、接続導体150Aが成膜される。また、開口部402Bを介して、接続導体150Bが成膜される。また、レジストマスク400には、接続導体150とともに蒸着された超伝導材料150X（A1）が積層される。

[0096] 開口部402Aに対向する箇所に接続導体150Aが成膜されることによって、第1の導体110Aに形成された突出部112Aが、接続導体150Aと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層130Aが、接続導体150Aと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第1の導体110Aに形成された突出部112Aと導体層130Aとが、導体（接続導体150A）を介して接続される。なお、第2の導体120A

が、接続導体150Aと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第2の導体120Aと導体層130Aとが、導体（接続導体150A）を介して接続される。

[0097] また、開口部402Bに対向する箇所、接続導体150Bが成膜されることによって、第2の導体120Bが、接続導体150Bと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層130Bが、接続導体150Bと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第2の導体120Bと導体層130Bとが、導体（接続導体150B）を介して接続される。なお、第1の導体110Bが、接続導体150Bと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第1の導体110Bと導体層130Bとが、導体（接続導体150B）を介して接続される。

[0098] 次に、図24に示すように、レジストマスク400が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク400と、レジストマスク400に積層された余分な超伝導材料150Xが除去される。このようにして、図16に示した、実施の形態1にかかる量子デバイス50が製造される。なお、図18～図20の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図18～図20の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。また、図22～図23の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図22～図23の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。

[0099] （実施の形態2）

次に、実施の形態2について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態2では、接続導体150が形成される位置が、実施の形態1と異なる。

[0100] 図25は、実施の形態2にかかる量子デバイス50を示す図である。図25は、実施の形態2にかかる量子デバイス50の断面図である。実施の形態2にかかる量子デバイス50は、実施の形態1と同様に、基板60と、複数

の第1の導体110(110A, 110B)と、複数の第2の導体120(120A, 120B)と、超伝導回路を構成する導体層130(130A, 130B)とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、実施の形態1と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0101] ここで、実施の形態2では、量子デバイス50の説明の便宜のため、XYZ直交座標軸を導入している。図25には、右手系のXYZ座標系が示されている。基板60の導体層130及び超伝導体等が実装された面に沿った面をXY平面とし、この面に直交する方向をZ軸方向とする。図25における上方を+Z方向とし、図25における下方を-Z方向とする。なお、上方及び下方は、説明の便宜のためであり、実際の量子デバイス50を使用する際の配置される方向を示すものではない。また、XYZ直交座標軸の原点の位置は任意である。また、XY平面に沿った方向(XY方向)は、図25の横方向に対応する。また、Z軸方向は、図25の縦方向(基板60の表面に対する垂直方向)に対応する。また、ジョセフソン接合100から第1の側70Aを見た方向を+Y方向とし、ジョセフソン接合100から第2の側70Bを見た方向を-Y方向とする。また、紙面奥から手前に向かう方向を+X方向とする。これらのことは、以下に説明する他のブリッジ型の実施の形態でも同様である。

[0102] 第1の導体110は、導体層130に積層されている。第2の導体120は、第1の導体110に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、超伝導材料で形成されている。また、第1の導体110と第2の導体120との間には、酸化膜140(140A, 140B)が形成されている。また、第1の導体110(110A)の一部(第1の導体部分110Aa)と、第2の導体120(120B)の一部(第2の導体部分120Ba)と、酸化膜140(140A)とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100の構成については、実施の形態1、第1の比較例及び第2の比較例のものと実質的に同様であ

るので、適宜、説明を省略する。

[0103] 実施の形態2にかかる量子デバイス50は、さらに、接続導体152（152A、152B）を有する。接続導体152は、超伝導材料で形成されている。接続導体152は、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体152Aは、第1の側70Aにおいて、第1の導体110A及び導体層130Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体152Aは、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aと導体層130Aとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態2では、接続導体152Aは、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aと接続されていない。

[0104] また、接続導体152Bは、第2の側70Bにおいて、第2の導体120B及び導体層130Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体152Bは、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bと導体層130Bとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態2では、接続導体152Bは、第2の側70Bにおいて、第1の導体110Bと接続されていない。

[0105] 図26は、実施の形態2にかかる量子デバイス50の実現例を示す図である。図26は、実施の形態2にかかる量子デバイス50の平面図である。図26は、実施の形態2にかかる量子デバイス50が、ブリッジ型によって製造された例を示す。なお、図26の平面図においても、図25（断面図）で定義されたものに対応するXYZ直交座標軸を導入している。

[0106] 第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aは、+Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部114A（第1の突出部）を有する。また、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aは、+Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部124Aを有する。突出部114Aは、第1の導体110Aに積層されている第2の導体120Aに覆われないように突出している。ここで、突出部124Aは、突出部114Aの近傍に設けられている。なお、実施の形態2では、突出部114Aは、+X方向に1つ、-X方向に1つ設けられている。突出部124Aについても同様である。なお、上述したよう

に、第1の導体110A及び第2の導体120Aは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部114Aと突出部124Aとで、これらの形状及び数は互いに対応することとなる。

[0107] 接続導体152Aは、突出部114A及び導体層130Aに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aと導体層130Aとが、直接、接続されている。なお、実施の形態2では、接続導体152Aは、突出部124Aには接続されていない。

[0108] また、第2の側70Bにおいて、第1の導体110Bは、-Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部114Bを有する。また、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bは、-Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部124Bを有する。突出部124Bは、第2の導体120Bが積層している第1の導体110BよりもX軸方向に突出している。ここで、突出部124Bは、突出部114Bの近傍に設けられている。なお、実施の形態2では、突出部114Bは、+X方向に1つ、-X方向に1つ設けられている。突出部124Bについても同様である。なお、上述したように、第1の導体110B及び第2の導体120Bは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部114Bと突出部124Bとで、これらの形状及び数は互いに対応することとなる。

[0109] 接続導体152Bは、突出部124B及び導体層130Bに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bと導体層130Bとが、直接、接続されている。なお、実施の形態2では、接続導体152Bは、突出部114Bには接続されていない。

[0110] 図27は、図26に示した量子デバイス50の製造方法を説明するための図である。実施の形態2にかかる量子デバイス50は、実施の形態1と実質的に同様の方法（図17～図24）で製造される。しかしながら、実施の形

態2で使用されるレジストマスクの形状が、実施の形態1で使用されるレジストマスクの形状と異なる。

[0111] 図27には、第1の導体110及び第2の導体120を形成するために使用されるレジストマスク310の開口部312（312A，312B）が、太い一点鎖線で示されている。開口部312と対向する箇所以外の領域が、レジストマスク310で覆われている。第1の側70Aに開口部312Aが形成され、第2の側70Bに開口部312Bが形成されている。

[0112] また、開口部312Aの+Y方向の端部には、X軸方向に凹んだ凹部314Aが設けられている。凹部314Aの形状及び数は、突出部114A，124Aの形状及び数に対応する。また、開口部312Bの-Y方向の端部には、X軸方向に凹んだ凹部314Bが設けられている。凹部314Bの形状及び数は、突出部114B，124Bの形状及び数に対応する。

[0113] 実施の形態2では、実施の形態1の場合と同様に、導体層成膜工程（図17）の後、レジストマスク形成工程（図18）において、レジストマスク310が基板60の上に形成される。そして、第1の蒸着処理工程（図18）において、基板60の側から見て、-Z方向に対して+Y方向に角度 θ_1 傾いた方向から、第1の導体110が蒸着される。具体的には、開口部312Aを介して、第1の導体110Aが蒸着される。また、開口部312Bを介して、第1の導体110Bが蒸着される。このとき、凹部314Aに対応する形状の突出部114Aが形成される。また、凹部314Bに対応する形状の突出部114Bが形成される。

[0114] そして、酸化工程（図19）の後、第2の蒸着処理工程（図20）において、基板60の側から見て、-Z方向に対して-Y方向に角度 θ_1 傾いた方向から、第2の導体120が蒸着される。具体的には、開口部312Aを介して、第2の導体120Aが蒸着される。また、開口部312Bを介して、第2の導体120Bが蒸着される。このとき、凹部314Aに対応する形状の突出部124Aが形成される。また、凹部314Bに対応する形状の突出部124Bが形成される。

[0115] 次に、リフトオフ工程（図21）においてレジストマスク310が除去された後、接続導体152を形成するためのレジストマスクが形成される（図22）。なお、接続導体152を形成するためのレジストマスクは、接続導体152が形成されている位置とZ軸方向に対向する位置に、開口部が設けられている。そして、酸化膜除去工程（図22）の後、接続導体蒸着工程（図23）において、接続導体152が形成される。具体的には、第1の側70Aで、接続導体152Aが、突出部124Aに接しないように、突出部114A及び導体層130Aに積層される。また、第2の側70Bで、接続導体152Bが、突出部114Bに接しないように、突出部124B及び導体層130Bに積層される。これにより、第1の側70Aで、突出部114Aと導体層130Aとが、接続導体152Aによって接続される。また、第2の側70Bで、突出部124B（第2の導体120B）と導体層130Bとが、接続導体152Bによって接続される。

[0116] 実施の形態2では、第1の側70Aで第1の導体110A（突出部114A）と導体層130Aとが接続され、第2の側70Bで第2の導体120B（突出部124B）と導体層130Bとが接続されている。ここで、ジョセフソン接合100を構成しているのは、第1の導体110A及び第2の導体120Bである。そして、実施の形態2では、ジョセフソン接合100を構成しない第2の導体120Aは、接続導体152Aと接続されていない。同様に、ジョセフソン接合100を構成しない第1の導体110Bは、接続導体152Bと接続されていない。

[0117] ここで、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aと導体層130Aとを接続する接続導体152Aに、ジョセフソン接合100を構成しない第2の導体120Aが接続されると、コヒーレンスが低下するおそれがある。すなわち、この場合、ジョセフソン接合100を構成しない第2の導体120Aが第1の導体110Aと導体層130Aとの間の電気的なパスに接続されてしまうので、スプリアス接合80Aを完全に無効化できない可能性がある。したがって、スプリアス接合80Aがロスの発生に寄与する可能性を排

除できない。同様に、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bと導体層130Bとを接続する接続導体152Bに、ジョセフソン接合100を構成しない第1の導体110Bが接続されると、コヒーレンスが低下するおそれがある。すなわち、この場合、ジョセフソン接合100を構成しない第1の導体110Bが第2の導体120Bと導体層130Bとの間の電気的なパスに接続されてしまうので、スプリアス接合80Bを完全に無効化できない可能性がある。したがって、スプリアス接合80Bがロスの発生に寄与する可能性を排除できない。

[0118] これに対し、上述したように、実施の形態2にかかる量子デバイス50では、ジョセフソン接合100を構成しない第2の導体120Aは、接続導体152Aと接続されていない。同様に、ジョセフソン接合100を構成しない第1の導体110Bは、接続導体152Bと接続されていない。したがって、実施の形態2では、スプリアス接合80を無効化できる可能性が高い。したがって、実施の形態2にかかる量子デバイス50は、コヒーレンス（性能）の劣化をさらに抑制することが可能となる。

[0119] （実施の形態3）

次に、実施の形態3について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態3では、接続導体150が形成される位置が、実施の形態2と異なる。

[0120] 図28は、実施の形態3にかかる量子デバイス50を示す図である。図28は、実施の形態3にかかる量子デバイス50の断面図である。実施の形態3にかかる量子デバイス50は、実施の形態2と同様に、基板60と、第1の導体110（110A、110B）と、第2の導体120（120A、120B）と、超伝導回路を構成する導体層130（130A、130B）とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、実施の形態2と実質的に同様であるので、適宜

、説明を省略する。また、実施の形態3においても、実施の形態2で導入したXYZ直交座標軸を導入する。

[0121] 第1の導体110は、導体層130に積層されている。第2の導体120は、第1の導体110に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、超伝導材料で形成されている。また、第1の導体110と第2の導体120との間には、酸化膜140（140A，140B）が形成されている。また、第1の導体110（110A）の一部（第1の導体部分110Aa）と、第2の導体120（120B）の一部（第2の導体部分120Ba）と、酸化膜140（140A）とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100の構成については、実施の形態2のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0122] 実施の形態3にかかる量子デバイス50は、さらに、接続導体154（154A，154B）を有する。接続導体154は、超伝導材料で形成されている。接続導体154は、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体154Aは、第1の側70Aにおいて、第1の導体110A及び導体層130Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体154Aは、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aと導体層130Aとを接続する（超伝導コンタクト）。また、接続導体154Aは、第1の側70Aにおいて、第2の導体120A及び導体層130Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体154Aは、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aと導体層130Aとを接続する（超伝導コンタクト）。

[0123] また、接続導体154Bは、第2の側70Bにおいて、第2の導体120B及び導体層130Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体154Bは、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bと導体層130Bとを接続する（超伝導コンタクト）。また、接続導体154Bは、第2の側70Bにおいて、第1の導体110Bと及び導体層130Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体154Bは、第2の側70Bにおいて、第1の導体110Bと導体層130Bとを接続する（超伝導コンタクト）。

[0124] 図29は、実施の形態3にかかる量子デバイス50の実現例を示す図である。図29は、実施の形態3にかかる量子デバイス50の平面図である。図29は、実施の形態3にかかる量子デバイス50が、ブリッジ型によって製造された例を示す。なお、実施の形態3にかかる量子デバイス50の製造方法については、図27を用いて説明したものと実質的に同様であるので、説明を省略する。

[0125] 図26に示した実施の形態2と同様に、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aは、+Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部114A（第1の突出部）を有する。また、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aは、+Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部124Aを有する。突出部114Aは、第1の導体110Aに積層されている第2の導体120Aに覆われないように突出している。また、突出部124Aは、突出部114Aの近傍に設けられている。

[0126] 接続導体154Aは、突出部114A、第2の導体120A及び導体層130Aに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。なお、図26に示すように、物理的に一体の接続導体154Aが、突出部114A及び突出部124Aの近傍全体を覆うようにして、成膜されていてもよい。言い換えると、接続導体154Aは、第1の導体110A（突出部114A）及び第2の導体120A（突出部124A）の両方を覆っている。このようにして、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aと導体層130Aとが、直接、接続されている。さらに、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aと導体層130Aとが、直接、接続されている。ここで、少なくとも突出部124Aは、突出部114Aの近傍に設けられているので、突出部114Aの近傍で、第2の導体120Aと導体層130Aとが接続されている。

[0127] また、図26に示した実施の形態2と同様に、第2の側70Bにおいて、第1の導体110Bは、-Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部114Bを有する。また、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bは、-Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部124Bを有する。突出部12

4 Bは、第2の導体120Bが積層している第1の導体110BよりもX軸方向に突出している。ここで、突出部124Bは、突出部114Bの近傍に設けられている。

[0128] 接続導体154Bは、第1の導体110B（突出部114B）、第2の導体120B（突出部124B）及び導体層130Bに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。なお、図26に示すように、物理的に一体の接続導体154Bが、突出部114B及び突出部124Bの近傍全体を覆うようにして、成膜されていてもよい。言い換えると、接続導体154Bは、第1の導体110B及び第2の導体120Bの両方を覆っている。このようにして、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bと導体層130Bとが、直接、接続されている。さらに、第2の側70Bにおいて、第1の導体110Bと導体層130Bとが、直接、接続されている。ここで、突出部124Bは、突出部114Bの近傍に設けられているので、突出部114Bの近傍で、第2の導体120Bと導体層130Bとが接続されている。

[0129] 実施の形態2にかかる量子デバイス50を斜め蒸着で製造する場合、同じレジストマスク310を使用して、第1の導体110と第2の導体120とを蒸着する。この場合、以下に説明するように、突出部114Aと突出部124Aとの間隔（Y軸方向の距離）を大きくすることは困難である。同様に、突出部114Bと突出部124Bとの間隔（Y軸方向の距離）を大きくすることは困難である。

[0130] 蒸着処理工程における、開口部312の位置と、対応する超伝導体（第1の導体110及び第2の導体120）の位置との間の、Y軸方向の位置ずれ量（シフト量）を考える。レジストマスク310の+Z方向の端部（上面）と導体層130Aの表面との間のZ軸方向の距離（レジストマスク310の高さ）を h とする。この場合、-Z方向に見たときの、凹部314Aと突出部114Aと間のY軸方向のずれ量（シフト量に対応）は、 $h * \tan \theta 1$ となる。したがって、凹部314A（突出部114A及び突出部124A）のY軸方向の幅を W とすると、突出部114Aと突出部124Aとの間隔 L

は、レジストマスク 310 の厚さを考慮せずに考えると、概念的に、 $L = 2 * h * \tan \theta 1 - W$ と表され得る。 $L > 0$ であれば、突出部 114 A と突出部 124 A とは、物理的に分離している。ここで、レジストマスク 310 の高さ h は、概ね $1 \mu m$ 以下となることが多い。したがって、斜め蒸着方法では、シフト量 ($h * \tan \theta 1$) を大きくすることは困難である。したがって、突出部 114 A と突出部 124 A とを分離しようとする、凹部 314 A (突出部 114 A 及び突出部 124 A) の幅 W を、非常に小さく (概ね $1 \mu m$ 以下) する必要がある。このことは、突出部 114 B 及び突出部 124 B でも同様である。したがって、実施の形態 2 のように、第 1 の側 70 A で接続導体 152 A を突出部 114 A に接続させて突出部 124 A に接続させないようにすることは、困難である。また、接続できたとしても、突出部 114 A と接続導体 152 A との間の接触面積は非常に小さい。第 2 の側 70 B でも同様である。

[0131] これに対し、実施の形態 3 では、第 1 の側 70 A で、第 1 の導体 110 A 及び第 2 の導体 120 A が、接続導体 154 A を介して導体層 130 A に接続されている。これにより、突出部 114 A と突出部 124 A とを物理的に分離する必要はない。つまり、実施の形態 2 よりも簡易な方法で、第 1 の導体 110 A と導体層 130 A とを超伝導コンタクトで接続することが可能となる。また、突出部 114 A と接続導体 154 A との間の接触面積を、実施の形態 2 の場合よりも大きくすることができる。したがって、後述する実施の形態 4 と同様に、第 1 の導体 110 A (突出部 114 A) と接続導体 154 A との間の接触面積を大きくすることができるので、両者の間の電気抵抗を小さくすることができる。したがって、第 1 の導体 110 A と導体層 130 A との間を、接続導体 154 A を介してより確実に短絡することができる。したがって、酸化膜 140 A に対応するスプリアス接合 80 A に発生する電界をより抑制できるので、スプリアス接合 80 A を無効化することができる可能性がさらに高くなる。第 2 の側 70 B における第 1 の導体 110 B 及び第 2 の導体 120 B についても同様である。

[0132] (実施の形態4)

次に、実施の形態4について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態4では、突出部の形状及び数が、実施の形態3の場合と異なる。なお、第1の導体110と導体層130との接続状態、及び、第2の導体120と導体層130との接続状態については、実施の形態3と実質的に同様であるので、説明を省略する。

[0133] 図30は、実施の形態4にかかる量子デバイス50を示す図である。図30は、実施の形態4にかかる量子デバイス50の一部を示す平面図である。具体的には、図30は、実施の形態4にかかる量子デバイス50の第1の側70Aを示す。なお、第2の側70Bについても、図30と実質的に同様の構成としてもよい。また、実施の形態4においても、実施の形態2で導入したXYZ直交座標軸を導入する。

[0134] 第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aは、X軸方向に突出する複数の突出部116A（第1の突出部）を有する。また、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aは、X軸方向に突出する複数の突出部126A（第2の突出部）を有する。複数の突出部116Aそれぞれは、第1の導体110Aに積層されている第2の導体120Aに覆われないように突出している。ここで、突出部116Aと突出部126Aとが、Y軸方向に交互に配置（成膜）されている。したがって、突出部126Aは、隣接する突出部116Aの近傍に設けられている。また、複数の突出部116Aは、互いに同じ側（図30では+X方向及び-X方向）に突出するように形成されている。同様に、複数の突出部126Aは、互いに同じ側（図30では+X方向及び-X方向）に突出するように形成されている。

[0135] 第1の導体110Aは、突出部116A1～116A5を有する。また、第2の導体120Aは、突出部126A1～126A5を有する。そして、突出部116A1の+Y方向に突出部126A1が配置されている。また、突

突出部 1 2 6 A 1 の + Y 方向に突出部 1 1 6 A 2 が配置されている。また、突出部 1 1 6 A 2 の + Y 方向に突出部 1 2 6 A 2 が配置されている。また、突出部 1 2 6 A 2 の + Y 方向に突出部 1 1 6 A 3 が配置されている。また、突出部 1 1 6 A 3 の + Y 方向に突出部 1 2 6 A 3 が配置されている。また、突出部 1 2 6 A 3 の + Y 方向に突出部 1 1 6 A 4 が配置されている。また、突出部 1 1 6 A 4 の + Y 方向に突出部 1 2 6 A 4 が配置されている。また、突出部 1 2 6 A 4 の + Y 方向に突出部 1 1 6 A 5 が配置されている。また、突出部 1 1 6 A 5 の + Y 方向に突出部 1 2 6 A 5 が配置されている。

[0136] なお、後述するように、上述した他の実施の形態と同様に、突出部 1 1 6 A 及び突出部 1 2 6 A（例えば突出部 1 1 6 A 1 及び突出部 1 2 6 A 1）は斜め蒸着法により同じレジストマスクを用いて形成される。したがって、突出部 1 1 6 A の形状と突出部 1 2 6 A の形状とは互いに対応している。なお、「形状が対応している」とは、一方の形状と他方の形状とが完全に一致することを意味するわけではない。例えば突出部 1 2 6 A 1 が突出部 1 1 6 A 1 に積層される場合、突出部 1 2 6 A 1 の形状は突出部 1 1 6 A 1 の形状と異なり得る。さらに、突出部 1 1 6 A 及び突出部 1 2 6 A が同じレジストマスクを用いて形成されるので、突出部 1 1 6 A 及び突出部 1 2 6 A の数は同じである。なお、突出部 1 1 6 A 及び突出部 1 2 6 A の数は、それぞれ 5 個である必要はない。レジストマスクの形状を図 30 及び後述する図 31 に対応するものから変更することによって、突出部 1 1 6 A 及び突出部 1 2 6 A の数を、適宜、変更することは可能である。また、複数の突出部 1 1 6 A（突出部 1 1 6 A 1 ～ 1 1 6 A 5）それぞれの形状は、互いに異なってもよい。同様に、突出部 1 2 6 A（突出部 1 2 6 A 1 ～ 1 2 6 A 5）それぞれの形状は、互いに異なってもよい。

[0137] 接続導体 1 5 6 A は、突出部 1 1 6 A、第 2 の導体 1 2 0 A（突出部 1 2 6 A）及び導体層 1 3 0 A に、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。なお、図 30 に示すように、物理的に一体の接続導体 1 5 6 A が、複数の突出部 1 1 6 A 及び複数の突出部 1 2 6 A それぞれの少なくとも一部を覆う

ようにして、成膜されていてもよい。言い換えると、接続導体 156A は、第1の導体 110A（突出部 116A）及び第2の導体 120A（突出部 126A）の両方を覆っている。図30の例では、接続導体 156A は、突出部 116A2 から突出部 126A5 にかけて、形成されている。このようにして、第1の側70Aにおいて、第1の導体 110A と導体層 130A とが、直接、接続されている。さらに、第1の側70Aにおいて、第2の導体 120A と導体層 130A とが、直接、接続されている。ここで、少なくとも突出部 126A は、突出部 116A の近傍に設けられているので、突出部 116A の近傍で、第2の導体 120A と導体層 130A とが接続されている。

[0138] なお、実施の形態4にかかる複数の突出部 116A（及び複数の突出部 126A）は、それらのX軸方向の長さが実施の形態2及び実施の形態3にかかる突出部 114（及び突出部 124）のX軸方向の長さよりも長くなるように、形成されている。さらに、実施の形態4にかかる突出部 116A（及び突出部 126A）は、複数設けられている。これにより、第1の導体 110A と接続導体 156A との接触面積を大きくすることができる。突出部 116A（及び突出部 126A）の数を多くすることにより、第1の導体 110A と接続導体 156A との接触面積をさらに大きくすることができる。

[0139] なお、突出部 116A 及び突出部 126A の長さを長くする場合に、図18等にしたようなレジストブリッジを有するレジストマスクを用いると、レジストブリッジの構造が不安定となるおそれがある。すなわち、超伝導体（第1の導体 110 及び第2の導体 120）を形成する際に、レジストマスクの、図30の矢印Dで示す箇所に対応する位置には、レジストブリッジが形成される。ここで、このレジストブリッジは、片持ち梁の構造をしている。そして、この片持ち梁は、固定端のサイズよりも梁の長さ（スパン）が極端に長く、したがって、強度上、不安定である。したがって、このレジストブリッジの形状を保持することは極めて困難である。したがって、図31を用いて以下に説明する方法により、レジストブリッジを使用しないで実施の

形態４にかかる超伝導体を形成することができる。

[0140] 図３１は、実施の形態４にかかる量子デバイス５０の製造方法を説明するための図である。実施の形態４にかかる量子デバイス５０は、実施の形態１と実質的に同様の方法（図１７～図２４）で製造される。しかしながら、実施の形態４で使用するレジストマスクの形状が、実施の形態１で 사용되는レジストマスクの形状と異なる。

[0141] 図３１は、図３０を－Ｘ方向に見た断面図に対応する。導体層１３０Ａに、レジストマスク３２０を形成する。ここで、レジストマスク３２０は、Ｙ軸方向に間隔を空けて配置されたレジストマスク部分３２１Ａ～３２１Ｆを有する。レジストマスク部分３２１Ａとレジストマスク部分３２１Ｂとの間には、開口部３２２Ａが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｂとレジストマスク部分３２１Ｃとの間には、開口部３２２Ｂが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｃとレジストマスク部分３２１Ｄとの間には、開口部３２２Ｃが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｄとレジストマスク部分３２１Ｅとの間には、開口部３２２Ｄが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｅとレジストマスク部分３２１Ｆとの間には、開口部３２２Ｅが設けられている。

[0142] 図１８と同様に、第１の蒸着処理工程において、矢印Ａ１の方向から、開口部３２２を介して、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａが蒸着される。具体的には、開口部３２２Ａを介して、レジストマスク部分３２１Ａとレジストマスク部分３２１Ｂとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ１が蒸着される。開口部３２２Ｂを介して、レジストマスク部分３２１Ｂとレジストマスク部分３２１Ｃとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ２が蒸着される。開口部３２２Ｃを介して、レジストマスク部分３２１Ｃとレジストマスク部分３２１Ｄとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ３が蒸着される。開口部３２２Ｄを介して、レジストマスク部分３２１Ｄとレジストマスク部分３２１Ｅとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ４が蒸着される。開口部３２２Ｅを介して、レジストマスク部分３２１

Eとレジストマスク部分321Fとの間に、第1の導体110Aの突出部116A5が蒸着される。

[0143] そして、酸化工程（図19）の後、図20と同様に、第2の蒸着処理工程において、矢印A2の方向から、開口部322を介して、第2の導体120Aの突出部126Aが蒸着される。具体的には、開口部322Aを介して、レジストマスク部分321Aとレジストマスク部分321Bとの間の、突出部116A1の+Y方向の側に、第2の導体120Aの突出部126A1が蒸着される。開口部322Bを介して、レジストマスク部分321Bとレジストマスク部分321Cとの間の、突出部116A2の+Y方向の側に、第2の導体120Aの突出部126A2が蒸着される。開口部322Cを介して、レジストマスク部分321Cとレジストマスク部分321Dとの間の、突出部116A3の+Y方向の側に、第2の導体120Aの突出部126A3が蒸着される。開口部322Dを介して、レジストマスク部分321Dとレジストマスク部分321Eとの間の、突出部116A4の+Y方向の側に、第2の導体120Aの突出部126A4が蒸着される。開口部322Eを介して、レジストマスク部分321Eとレジストマスク部分321Fとの間の、突出部116A5の+Y方向の側に、第2の導体120Aの突出部126A5が蒸着される。

[0144] 開口部322のサイズ及びレジストマスク部分321の高さを調整することで、隣り合う突出部116Aと突出部126Aとを離間することができる。また、図30において、実際には、突出部126A1と突出部116A2との間には、レジストマスク部分321Bが形成されていた領域に対応する空間が設けられている。突出部126A2と突出部116A3との間、突出部126A3と突出部116A4との間、及び突出部126A4と突出部116A5との間についても同様である。

[0145] 実施の形態3（図29）のように、第1の側70Aにおいて、第1の導体110A（突出部114A）と接続導体154Aとの間の接触面積が小さすぎると、両者の間の電気抵抗が大きくなり、超伝導コンタクトとして機能し

ないおそれがある。この場合、第2の導体120Aと導体層130Aとの間の接触面積は大きいので、ジョセフソン接合100を構成する第1の導体110Aと、酸化膜140Aと、第2の導体120Aと、接続導体154Aと、導体層130Aとの間で、電流が流れる可能性がある。この場合、酸化膜140Aに対応するスプリアス接合80Aに発生する電界が大きくなり、スプリアス接合80Aを無効化できない可能性がある。

[0146] これに対し、実施の形態4では、第1の側70Aにおいて、第1の導体110A（突出部116A）と接続導体156Aとの間の接触面積を大きくすることができるので、両者の間の電気抵抗を小さくすることができる。したがって、第1の導体110Aと導体層130Aとの間を、接続導体156Aを介してより確実に短絡することができる。したがって、酸化膜140Aに対応するスプリアス接合80Aに発生する電界を抑制できるので、スプリアス接合80Aを無効化することができる。したがって、実施の形態4にかかる量子デバイス50は、実施の形態3と比較して、性能の劣化を、より抑制することが可能となる。

[0147] （実施の形態5）

次に、実施の形態5について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

[0148] 図32は、実施の形態5にかかる量子デバイス52を示す図である。図32は実施の形態5にかかる量子デバイス52の平面図である。実施の形態5にかかる量子デバイス52は、実施の形態1にかかる量子デバイス50に対応する構成を、ブリッジレス型の製造方法（第2の比較例）によって製造したものである。

[0149] 実施の形態5にかかる量子デバイス52は、複数の第1の導体210（210A，210B）と、複数の第2の導体220（220A，220B）と、超伝導回路を構成する導体層230（230A，230B）とを有する。

第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、基板60に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230の構成については、特記しない限り、第3の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0150] ここで、実施の形態5では、量子デバイス52の説明の便宜のため、XYZ直交座標軸を導入している。基板60の導体層230及び超伝導体等が実装された面に沿った面をXY平面とし、この面に直交する方向をZ軸方向とする。また、XY平面に沿った方向をXY方向と称する。図32における左方を+Y方向とし、図32における下方を+X方向とする。なお、X方向及びY方向は、説明の便宜のためであり、実際の量子デバイス52を使用する際の配置される方向を示すものではない。また、XYZ直交座標軸の原点の位置は任意である。また、+Z方向は、図32の紙面奥から手前に向かう方向に対応する。また、ジョセフソン接合100から第1の側72Aを見た方向を+Y方向とし、ジョセフソン接合100から第2の側72Bを見た方向を+X方向とする。これらのことは、以下に説明する他のブリッジレス型の実施の形態でも同様である。

[0151] 第1の導体210は、図1に示した第1の導体2に対応する。第1の導体210は、導体層230に積層されている。なお、導体層230は、図1に示した導体層6に対応する。また、第2の導体220は、図1に示した第2の導体4に対応する。第2の導体220は、第1の導体210に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、超伝導材料で形成されている。例えば、第1の導体210及び第2の導体220は、アルミニウム（Al）で形成されている。また、例えば、導体層230（第3の導体）は、ニオブ（Nb）で形成されているとする。しかしながら、第1の導体210及び第2の導体220は、アルミニウム（Al）で形成されていなくてもよい。また、導体層230は、ニオブ（Nb）で形成されていなくてもよい。

[0152] また、第1の導体210と第2の導体220との間には、酸化膜（AlO

x) が形成されている。この酸化膜は、図 1 に示した酸化膜 8 に対応する。また、第 1 の導体 210 (210A) の一部 (第 1 の導体部分 210Aa) と、第 2 の導体 220 (220B) の一部 (第 2 の導体部分 220Ba) と、酸化膜 (AlOx) とによって、ジョセフソン接合 200 が形成されている。ジョセフソン接合 200 は、図 1 に示したジョセフソン接合 10 に対応する。ジョセフソン接合 200 の構成については、第 3 の比較例及び他の実施の形態のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0153] また、第 1 の導体 210A のジョセフソン接合 200 の近傍には、Y 軸方向に延びるように細幅部 212A が形成されている。また、第 2 の導体 220B のジョセフソン接合 200 の近傍には、X 軸方向に延びるように細幅部 222B が形成されている。そして、細幅部 212A と細幅部 222B とが交差することによって、ジョセフソン接合 200 が形成されている。なお、第 1 の導体 210B には、細幅部は形成されていない。また、第 2 の導体 220A には、細幅部は形成されていない。

[0154] 第 3 の比較例と同様に、第 1 の側 72A において、基板 60 及び導体層 230A に、第 1 の導体 210A が積層されている。また、第 1 の導体 210A 及び導体層 230A に、第 2 の導体 220A が積層されている。ここで、実施の形態 5 では、導体層 230A の、第 1 の導体 210A 及び第 2 の導体 220A と接している面には、酸化膜 (NbOx) が形成されている。また、第 1 の導体 210A の、基板 60 及び導体層 230A と接していない面には、酸化膜 (AlOx) が形成されている。つまり、第 1 の導体 210A の、第 2 の導体 220A 及び第 2 の導体 220B と接している面には、酸化膜が形成されている。

[0155] 一方、第 3 の比較例と同様に、第 2 の側 72B において、基板 60 及び導体層 230B に、第 1 の導体 210B が積層されている。また、基板 60 及び第 1 の導体 210B に、第 2 の導体 220B が積層されている。ここで、第 1 の導体 210A の細幅部 212A の一部である第 1 の導体部分 210Aa に、酸化膜を介して、第 2 の導体 220B の細幅部 222B の一部である

第2の導体部分220Baが積層されている。第1の導体部分210Aaに酸化膜（トンネルバリア層）を介して第2の導体部分220Baが積層されていることにより、ジョセフソン接合200が形成されている。ここで、実施の形態5では、導体層230Bの、第1の導体210B及び第2の導体220Bと接している面には、酸化膜（NbO_x）が形成されている。また、第1の導体210Bの、基板60及び導体層230Bと接していない面には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。つまり、第1の導体210Bの、第2の導体220Bと接している面には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。

[0156] また、実施の形態5にかかる量子デバイス52は、さらに、接続導体250（250A、250B）を有する。接続導体250は、超伝導材料で形成されている。接続導体250は、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体250Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210A及び導体層230Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体250Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態5では、接続導体250Aは、第1の側72Aにおいて、第2の導体220Aと接続されていない。

[0157] また、接続導体250Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220B及び導体層230Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体250Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態5では、接続導体250Bは、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bと接続されていない。

[0158] ここで、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aは、+X方向に突出する突出部214A（第1の突出部）を有する。また、第1の側72Aにおいて、第2の導体220Aは、+X方向に突出する突出部224Aを有する。突出部214Aは、第1の導体210Aに積層されている第2の導体2

20Aに覆われないように突出している。ここで、突出部224Aは、突出部214Aの近傍に設けられている。なお、上述したように、第1の導体210A及び第2の導体220Aは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部214Aと突出部224Aとで、これらの形状及び数は互いに対応することとなる。

[0159] 接続導体250Aは、突出部214A及び導体層230Aに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとが、直接、接続されている。なお、実施の形態5では、接続導体250Aは、突出部224Aには接続されていない。

[0160] また、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bは、+Y方向に突出する突出部214Bを有する。また、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bは、+Y方向に突出する突出部224Bを有する。突出部214Bは、第2の導体220Bが積層している第1の導体210Bよりも+Y方向に突出している。ここで、突出部224Bは、突出部214Bの近傍に設けられている。なお、上述したように、第1の導体210B及び第2の導体220Bは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部214Bと突出部224Bとで、これらの形状及び数は互いに対応することとなる。

[0161] 接続導体250Bは、突出部224B及び導体層230Bに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとが、直接、接続されている。なお、実施の形態5では、接続導体250Bは、突出部214Bには接続されていない。

[0162] 図33は、実施の形態5にかかる量子デバイス52の製造方法を説明するための図である。実施の形態5にかかる量子デバイス52は、第3の比較例と実質的に同様の方法（図13～図15）で製造される。しかしながら、実施の形態5では、実施の形態1と同様に、第1の導体210を成膜する前の

酸化膜除去工程は実行されない。

[0163] 図33には、第1の導体210及び第2の導体220を形成するために使用されるレジストマスク500の開口部502（502A，502B）が、太い一点鎖線で示されている。実際には、図33において、開口部502と対向する箇所以外の領域が、レジストマスク500で覆われている。第1の側72Aに開口部502Aが形成され、第2の側72Bに開口部502Bが形成されている。

[0164] また、開口部502Aは、Y軸方向に延びるように形成されX軸方向の幅が狭い細穴部504Aを有する。細穴部504Aは、図13の開口部分31aに対応する。また、開口部502Bは、X軸方向に延びるように形成されY軸方向の幅が狭い細穴部504Bを有する。細穴部504Bは、図13の開口部分31bに対応する。細穴部504Aと細穴部504Bは、交差部分504Cで十字型に交差している。したがって、実施の形態5では、開口部502A及び開口部502Bは、一体に形成されている。なお、細穴部504Aの形状は細幅部212AのXY方向の形状に対応し、細穴部504Bの形状は細幅部222BのXY方向の形状に対応する。

[0165] また、開口部502Aの導体層230Aと対向する箇所には、+X方向に凹んだ凹部506Aが設けられている。凹部506Aの形状は、突出部214A，224Aの形状に対応する。また、開口部502Bの導体層230Bと対向する箇所には、+Y方向に凹んだ凹部506Bが設けられている。凹部506Bの形状は、突出部214B，224Bの形状に対応する。

[0166] 実施の形態5では、実施の形態1等の場合と同様に、導体層成膜工程（図17）の後、レジストマスク形成工程（図18）において、レジストマスク500が基板60の上に形成される。そして、第1の蒸着処理工程（図18）において、矢印C1で示すように、基板60の側から見て、-Z方向に対して+Y方向に角度 $\theta 2$ 傾いた方向から、第1の導体210が蒸着される。具体的には、開口部502Aを介して、第1の導体210Aが蒸着される。また、開口部502Bを介して、第1の導体210Bが蒸着される。このと

き、凹部506Aに対応する形状の突出部214Aが形成される。また、凹部506Bに対応する形状の突出部214Bが形成される。

[0167] なお、第1の蒸着処理工程においては、開口部502の+Y方向の側の壁の近傍の底部（基板60等）には、超伝導材料は、その壁によって遮蔽されることによって、到達しない。したがって、第1の蒸着処理工程で成膜される第1の導体210は、平面視（-Z方向を見た視点）において、開口部502の+Y方向の側の壁から離れた箇所に成膜される。したがって、凹部506Bに対応する突出部224Bの位置には、第1の導体210が成膜されない。

[0168] ここで、細穴部504Bについては、Y軸方向の幅が狭い。したがって、図14を用いて説明したように、第1の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部504Bに対応する底部（基板60）には到達しない。したがって、第1の蒸着処理工程では、細穴部504Bに対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部504Aについては、Y軸方向に延びている。したがって、第1の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部504Aに対応する底部（基板60）に到達するので、細幅部212Aが形成される。

[0169] そして、酸化工程（図19）の後、第2の蒸着処理工程（図20）において、矢印C2で示すように、基板60の側から見て、-Z方向に対して+X方向に角度 θ_2 傾いた方向から、第2の導体220が蒸着される。具体的には、開口部502Aを介して、第2の導体220Aが蒸着される。また、開口部502Bを介して、第2の導体220Bが蒸着される。このとき、凹部506Aに対応する形状の突出部224Aが形成される。また、凹部506Bに対応する形状の突出部224Bが形成される。

[0170] なお、第2の蒸着処理工程においては、開口部502の+X方向の側の壁の近傍の底部（基板60等）には、超伝導材料は、その壁によって遮蔽されることによって、到達しない。したがって、第2の蒸着処理工程で成膜される第2の導体220は、平面視において、開口部502の+X方向の側の壁から離れた箇所に成膜される。したがって、突出部214Aの位置には第2

の導体 220 が成膜されないので、突出部 214 A は、第 2 の導体 220 に覆われない。

[0171] ここで、細穴部 504 A については、X 軸方向の幅が狭い。したがって、図 14 を用いて説明したように、第 2 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部 504 A に対応する底部（基板 60）には到達しない。したがって、第 2 の蒸着処理工程では、細穴部 504 A に対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部 504 B については、X 軸方向に延びている。したがって、第 2 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部 504 B に対応する底部（基板 60）に到達するので、細幅部 222 B が形成される。

[0172] 次に、リフトオフ工程（図 21）においてレジストマスク 500 が除去された後、接続導体 250 を形成するためのレジストマスクが形成される（図 22）。なお、接続導体 250 を形成するためのレジストマスクは、接続導体 250 が形成されている位置と Z 軸方向に対向する位置に、開口部が設けられている。そして、酸化膜除去工程（図 22）の後、接続導体蒸着工程（図 23）において、接続導体 250 が形成される。これにより、第 1 の側 72 A で、突出部 214 A（第 1 の導体 210 A）と導体層 230 A とが、接続導体 250 A によって接続される。また、第 2 の側 72 B で、突出部 224 B（第 2 の導体 220 B）と導体層 230 B とが、接続導体 250 B によって接続される。

[0173] 実施の形態 5 にかかる量子デバイス 52 は、上記のように構成されているので、実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 と実質的に同様の効果を奏する。つまり、第 1 の側 72 A で第 1 の導体 210 A（突出部 214 A）と導体層 230 A とが接続され、第 2 の側 72 B で第 2 の導体 220 B と導体層 230 B とが接続されている。つまり、実施の形態 5 では、ジョセフソン接合 200 を構成する第 1 の導体 210 A が、接続導体 250 A を介して、導体層 230 A と接続されている。また、ジョセフソン接合 200 を構成する第 2 の導体 220 B が、接続導体 250 B を介して、導体層 230 B と接続されている。そして、実施の形態 5 では、ジョセフソン接合 200 を構成し

ない第2の導体220Aは、接続導体250Aと接続されていない。同様に、ジョセフソン接合200を構成しない第1の導体210Bは、接続導体250Bと接続されていない。したがって、実施の形態5では、実施の形態2の場合と同様に、スプリアス接合82を無効化できる可能性が高い。したがって、実施の形態5にかかる量子デバイス52は、コヒーレンス（性能）の劣化をさらに抑制することが可能となる。

[0174] なお、実施の形態5では、斜め蒸着方法でジョセフソン接合200を形成することから、シフト量が小さいことに起因する、実施の形態2にかかる問題点と実質的に同様の問題点が懸念される。つまり、実施の形態2で上述したシフト量が小さいことから、第2の蒸着処理工程で形成される突出部224Aと、凹部506Aの+X方向の壁部との間の、X軸方向の距離は、非常に短い。したがって、第2の導体220に覆われていない突出部214AのXY方向の面積は非常に狭い。したがって、突出部224A（第2の導体220）に接触させないようにしつつ接続導体250Aを突出部214Aに接続させることは、困難である。また、接続できたとしても、突出部214Aと接続導体250Aとの間の接触面積は非常に小さい。

[0175] （実施の形態6）

次に、実施の形態6について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態6では、突出部の構成が、実施の形態5と異なる。

[0176] 図34は、実施の形態6にかかる量子デバイス52を示す図である。図34は実施の形態6にかかる量子デバイス52の平面図である。実施の形態6にかかる量子デバイス52は、複数の第1の導体210（210A，210B）と、複数の第2の導体220（220A，220B）と、超伝導回路を構成する導体層230（230A，230B）とを有する。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、基板60に積層されている。第

1の導体210、第2の導体220及び導体層230の構成については、特記しない限り、実施の形態5と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0177] また、実施の形態6にかかる量子デバイス52は、さらに、接続導体256(256A, 256B)を有する。接続導体256は、超伝導材料で形成されている。接続導体256は、例えば、アルミニウム(A1)で形成されてもよい。接続導体256Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210A及び導体層230Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体256Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとを接続する(超伝導コンタクト)。なお、実施の形態6では、接続導体256Aは、第1の側72Aにおいて、第2の導体220Aと接続されていない。

[0178] また、接続導体256Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220B及び導体層230Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体256Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとを接続する(超伝導コンタクト)。なお、実施の形態6では、接続導体256Bは、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bと接続されていない。

[0179] ここで、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aは、+Y方向に突出する複数の突出部216A(第1の突出部)を有する。複数の突出部216Aそれぞれは、第1の導体210Aに積層されている第2の導体220Aに覆われないように突出している。図34には、4個の突出部216A1~216A4が示されている。しかしながら、突出部216Aの数は、4個に限定されず、1つ以上であればよい。突出部216A1の-X方向に突出部216A2が配置されている。突出部216A2の-X方向に突出部216A3が配置されている。突出部216A3の-X方向に突出部216A4が配置されている。なお、実施の形態4と異なり、突出部216Aの近傍には、第2の導体220Aにかかる突出部は形成されていない。ここで、複数の

突出部 216A それぞれは、細幅部 212A と同様に、Y 軸方向に延びるように形成されている。つまり、突出部 216A は、X 軸方向の幅が狭くなるように形成されている。

[0180] 接続導体 256A は、突出部 216A 及び導体層 230A に、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第 1 の側 72A において、第 1 の導体 210A と導体層 230A とが、直接、接続されている。ここで、図 34 に示すように、物理的に一体の接続導体 256A が、複数の突出部 216A1～216A4 それぞれの少なくとも一部を覆うようにして、成膜されていてもよい。なお、突出部 216A の近傍には第 2 の導体 220A にかかる突出部は形成されていないので、接続導体 256A は、第 2 の導体 220A とは接触していない。

[0181] なお、実施の形態 6 にかかる複数の突出部 216A は、これらの +Y 方向の長さが、実施の形態 5 にかかる突出部 214A の第 2 の導体 220 に覆われていない箇所の +X 方向の長さよりも長くなるように、形成されている。さらに、実施の形態 6 にかかる突出部 216A は、複数設けられている。これにより、実施の形態 5 と比較して、第 1 の導体 210A と接続導体 256A との接触面積を大きくすることができる。

[0182] また、第 2 の側 72B において、第 2 の導体 220B は、+X 方向に突出する複数の突出部 226B（第 2 の突出部）を有する。複数の突出部 226B それぞれは、第 2 の導体 220B が積層されている第 1 の導体 210B よりも突出している。図 34 には、4 個の突出部 226B1～226B4 が示されている。しかしながら、突出部 226B の数は、4 個に限定されず、1 つ以上であればよい。突出部 226B1 の -Y 方向に突出部 226B2 が配置されている。突出部 226B2 の -Y 方向に突出部 226B3 が配置されている。突出部 226B3 の -Y 方向に突出部 226B4 が配置されている。なお、実施の形態 4 と異なり、突出部 226B の近傍には、第 1 の導体 210B にかかる突出部は形成されていない。ここで、複数の突出部 226B それぞれは、細幅部 222B と同様に、X 軸方向に延びるように形成されて

いる。つまり、突出部 2 2 6 B は、Y 軸方向の幅が狭くなるように形成されている。

[0183] 接続導体 2 5 6 B は、突出部 2 2 6 B 及び導体層 2 3 0 B に、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第 2 の側 7 2 B において、第 2 の導体 2 2 0 B と導体層 2 3 0 B とが、直接、接続されている。ここで、図 3 4 に示すように、物理的に一体の接続導体 2 5 6 B が、複数の突出部 2 2 6 B 1 ～ 2 2 6 B 4 それぞれの少なくとも一部を覆うようにして、成膜されていてもよい。なお、突出部 2 2 6 B の近傍には第 1 の導体 2 1 0 B にかかる突出部は形成されていないので、接続導体 2 5 6 B は、第 1 の導体 2 1 0 B とは接触していない。

[0184] なお、実施の形態 6 にかかる複数の突出部 2 2 6 B は、これらの + X 方向の長さが、実施の形態 5 にかかる突出部 2 2 4 B の第 1 の導体 2 1 0 よりも突出した箇所の + Y 方向の長さよりも長くなるように、形成されている。さらに、実施の形態 6 にかかる突出部 2 2 6 B は、複数設けられている。これにより、第 2 の導体 2 2 0 B と接続導体 2 5 6 B との接触面積を大きくすることができる。

[0185] 図 3 5 は、実施の形態 6 にかかる量子デバイス 5 2 の製造方法を説明するための図である。実施の形態 6 にかかる量子デバイス 5 2 は、実施の形態 5 と実質的に同様の方法で製造される。

[0186] 図 3 5 には、第 1 の導体 2 1 0 及び第 2 の導体 2 2 0 を形成するために使用されるレジストマスク 5 1 0 の開口部 5 1 2（5 1 2 A，5 1 2 B）が、太い一点鎖線で示されている。実際には、図 3 5 において、開口部 5 1 2 と対向する箇所以外の領域が、レジストマスク 5 1 0 で覆われている。第 1 の側 7 2 A に開口部 5 1 2 A が形成され、第 2 の側 7 2 B に開口部 5 1 2 B が形成されている。

[0187] また、開口部 5 1 2 A は、Y 軸方向に延びるように形成され X 軸方向の幅が狭い細穴部 5 0 4 A を有する。また、開口部 5 1 2 B は、X 軸方向に延びるように形成され Y 軸方向の幅が狭い細穴部 5 0 4 B を有する。細穴部 5 0

4 Aと細穴部5 0 4 Bは、交差部分5 0 4 Cで十字型に交差している。なお、細穴部5 0 4 Aの形状は細幅部2 1 2 AのX Y方向の形状に対応し、細穴部5 0 4 Bの形状は細幅部2 2 2 BのX Y方向の形状に対応する。

[0188] また、開口部5 1 2 Aの導体層2 3 0 Aと対向する箇所には、+ Y方向に凹んだ複数の凹部5 1 6 Aが設けられている。凹部5 1 6 Aの形状は、突出部2 1 6 Aの形状に対応する。したがって、凹部5 1 6 Aは、Y軸方向に延びるように形成され、X軸方向の幅が狭くなるように形成されている。開口部5 1 2 Aは、それぞれ+ Y方向に凹んだ凹部5 1 6 A 1～5 1 6 A 4を有する。凹部5 1 6 A 1の-X方向に凹部5 1 6 A 2が配置されている。凹部5 1 6 A 2の-X方向に凹部5 1 6 A 3が配置されている。凹部5 1 6 A 3の-X方向に凹部5 1 6 A 4が配置されている。そして、凹部5 1 6 A 1～5 1 6 A 4の形状は、それぞれ、突出部2 1 6 A 1～2 1 6 A 4の形状に対応する。

[0189] また、開口部5 1 2 Bの導体層2 3 0 Bと対向する箇所には、+ X方向に凹んだ凹部5 1 6 Bが設けられている。凹部5 1 6 Bの形状は、突出部2 2 6 Bの形状に対応する。したがって、凹部5 1 6 Bは、X軸方向に延びるように形成され、Y軸方向の幅が狭くなるように形成されている。開口部5 1 2 Bは、それぞれ+ X方向に凹んだ凹部5 1 6 B 1～5 1 6 B 4を有する。凹部5 1 6 B 1の-Y方向に凹部5 1 6 B 2が配置されている。凹部5 1 6 B 2の-Y方向に凹部5 1 6 B 3が配置されている。凹部5 1 6 B 3の-Y方向に凹部5 1 6 B 4が配置されている。そして、凹部5 1 6 B 1～5 1 6 B 4の形状は、それぞれ、突出部2 2 6 B 1～2 2 6 B 4の形状に対応する。

[0190] 実施の形態6では、実施の形態5の場合と同様に、導体層成膜工程（図1 7）の後、レジストマスク形成工程（図1 8）において、レジストマスク5 1 0が基板6 0の上に形成される。そして、第1の蒸着処理工程（図1 8）において、矢印C 1で示すように、基板6 0の側から見て、- Z方向に対して+ Y方向に角度 θ 2傾いた方向から、第1の導体2 1 0が蒸着される。具

体的には、開口部512Aを介して、第1の導体210Aが蒸着される。また、開口部512Bを介して、第1の導体210Bが蒸着される。

[0191] なお、実施の形態5において上述したように、細穴部504Bについては、Y軸方向の幅が狭いので、第1の蒸着処理工程では、細穴部504Bに対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部504Aについては、Y軸方向に伸びているので、第1の蒸着処理工程では、細幅部212Aが形成される。

[0192] また、細穴部504Bと同様に、凹部516Bについては、Y軸方向の幅が狭いので、第1の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部516Bに対応する底部（導体層230B）には到達しない。したがって、第1の蒸着処理工程では、凹部516Bに対応する導体の層（突出部）は形成されない。一方、細穴部504Aと同様に、凹部516Aについては、Y軸方向に伸びているので、第1の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部516Aに対応する底部（導体層230A）に到達する。したがって、第1の蒸着処理工程では、凹部516Aに対応する突出部216Aが形成される。

[0193] そして、酸化工程（図19）の後、第2の蒸着処理工程（図20）において、矢印C2で示すように、基板60の側から見て、-Z方向に対して+X方向に角度 θ_2 傾いた方向から、第2の導体220が蒸着される。具体的には、開口部512Aを介して、第2の導体220Aが蒸着される。また、開口部512Bを介して、第2の導体220Bが蒸着される。

[0194] なお、実施の形態5において上述したように、細穴部504Aについては、X軸方向の幅が狭いので、第2の蒸着処理工程では、細穴部504Aに対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部504Bについては、X軸方向に伸びているので、第2の蒸着処理工程では、細幅部222Bが形成される。

[0195] また、細穴部504Aと同様に、凹部516Aについては、X軸方向の幅が狭いので、第2の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部516Aに対応する底部（導体層230A）には到達しない。したがって、第2の蒸着処理

工程では、凹部516Aに対応する導体の層（突出部）は形成されない。一方、細穴部504Bと同様に、凹部516Bについては、X軸方向に延びているので、第2の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部516Bに対応する底部（導体層230B）に到達する。したがって、第2の蒸着処理工程では、凹部516Bに対応する突出部226Bが形成される。

[0196] 次に、リフトオフ工程（図21）においてレジストマスク510が除去された後、接続導体256を形成するためのレジストマスクが形成される（図22）。なお、接続導体256を形成するためのレジストマスクは、接続導体256が形成されている位置とZ軸方向に対向する位置に、開口部が設けられている。そして、酸化膜除去工程（図22）の後、接続導体蒸着工程（図23）において、接続導体256が形成される。これにより、第1の側72Aで、突出部216A（第1の導体210A）と導体層230Aとが、接続導体256Aによって接続される。また、第2の側72Bで、突出部226B（第2の導体220B）と導体層230Bとが、接続導体256Bによって接続される。

[0197] 実施の形態6にかかる量子デバイス52は、上記のように構成されているので、実施の形態2にかかる量子デバイス50と実質的に同様の効果を奏する。つまり、第1の側72Aで第1の導体210A（突出部216A）と導体層230Aとが接続され、第2の側72Bで第2の導体220B（突出部226B）と導体層230Bとが接続されている。つまり、実施の形態6では、ジョセフソン接合200を構成する第1の導体210Aが、接続導体256Aを介して、導体層230Aと接続されている。また、ジョセフソン接合200を構成する第2の導体220Bが、接続導体256Bを介して、導体層230Bと接続されている。そして、実施の形態6では、ジョセフソン接合200を構成しない第2の導体220Aは、接続導体252Aと接続されていない。同様に、ジョセフソン接合200を構成しない第1の導体210Bは、接続導体252Bと接続されていない。したがって、実施の形態6では、スプリアス接合82を無効化できる可能性が高い。したがって、実施

の形態6にかかる量子デバイス52は、コヒーレンス（性能）の劣化をさらに抑制することが可能となる。

[0198] また、実施の形態6では、第1の側72Aにおいて第1の導体210Aに突出部216Aが形成されている。そして、突出部216Aは、第1の導体210Aに積層された第2の導体220Aよりも突出している。ここで、突出部216Aの突出量は、実施の形態5にかかる突出部214Aの突出量よりも大きい。そして、突出部216Aの近傍には、第2の導体220Aに関する突出部は形成されていない。したがって、第1の側72Aにおいて、接続導体256Aは、より確実に、第2の導体220Aに接触しないで、第1の導体210A（突出部216A）に接触することができる。さらに、実施の形態6では、突出部216Aの突出量が大きいので、実施の形態5の場合と比較して、突出部216Aと接続導体256Aとの間の接触面積を大きくすることができる。したがって、第1の導体210Aと導体層230Aとの間を、接続導体256Aを介してより確実に短絡することができる。したがって、スプリアス接合82Aに発生する電界をより抑制できるので、スプリアス接合82Aを無効化することができる可能性がさらに高くなる。

[0199] また、実施の形態6では、第2の側72Bにおいて第2の導体220Bに突出部226Bが形成されている。そして、突出部226Bは、第2の導体220Bが積層している第1の導体210Bよりも突出している。ここで、突出部226Bの突出量は、実施の形態5にかかる突出部224Bの突出量よりも大きい。そして、突出部226Bの近傍には、第1の導体210Bに関する突出部は形成されていない。したがって、第2の側72Bにおいて、接続導体256Bは、より確実に、第1の導体210Bに接触しないで、第2の導体220B（突出部226B）に接触することができる。さらに、実施の形態6では、突出部226Bの突出量が大きいので、実施の形態5の場合と比較して、突出部226Bと接続導体256Aとの間の接触面積を大きくすることができる。したがって、第2の導体220Bと導体層230Bとの間を、接続導体256Bを介してより確実に短絡することができる。した

がって、スプリアス接合 8 2 B に発生する電界をより抑制できるので、スプリアス接合 8 2 B を無効化することができる可能性がさらに高くなる。

[0200] さらに、実施の形態 6 では、突出部 2 1 6 A が複数設けられているので、突出部 2 1 6 A と接続導体 2 5 6 A との間の接触面積をさらに大きくすることができる。したがって、第 1 の導体 2 1 0 A と導体層 2 3 0 A との間を、接続導体 2 5 6 A を介してさらに確実に短絡することができる。したがって、スプリアス接合 8 2 A に発生する電界をさらに抑制できるので、スプリアス接合 8 2 A を無効化することができる可能性がさらに高くなる。突出部 2 2 6 B についても同様である。

[0201] また、実施の形態 6 では、第 1 の側 7 2 A において、第 2 の導体 2 2 0 A が導体層 2 3 0 A と接続しないで第 1 の導体 2 1 0 A が導体層 2 3 0 A と接続している。一方、第 2 の側 7 2 B において、第 1 の導体 2 1 0 B が導体層 2 3 0 B と接続しないで第 2 の導体 2 2 0 B が導体層 2 3 0 B と接続している。このように、第 1 の側 7 2 A と第 2 の側 7 2 B とで、導体層 2 3 0 と接続する超伝導体を、より確実に、異なるものとすることができる。これにより、スプリアス接合 8 2 A を無効化することができる可能性がさらに高くなる。

[0202] (実施の形態 7)

次に、実施の形態 7 について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

[0203] 図 3 6 は、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 を示す図である。図 3 6 は、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 の断面図である。実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 は、上述したブリッジ型の製造方法によって製造される。実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 は、第 1 の比較例及び実施の形態 1 と同様に、基板 6 0 と、複数の第 1 の導体 1 1 0 (1 1 0 A, 1 1 0 B) と、複数の第 2 の導体 1 2 0 (1 2 0 A, 1 2 0 B) と、導体層 1

30 (130A, 130B) とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、第1の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、実施の形態7においても、実施の形態2で導入したXYZ直交座標軸を導入する。

[0204] 第1の導体110は、導体層130に積層されている。第2の導体120は、第1の導体110に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、超伝導材料で形成されている。例えば、第1の導体110及び第2の導体120は、アルミニウム (Al) で形成されているとする。また、例えば、導体層130 (第3の導体) は、ニオブ (Nb) で形成されているとする。しかしながら、第1の導体110及び第2の導体120は、アルミニウム (Al) で形成されていなくてもよい。また、導体層130は、ニオブ (Nb) で形成されていなくてもよい。

[0205] また、第1の導体110と第2の導体120との間には、酸化膜140 (140A, 140B) が形成されている。また、第1の導体110 (110A) の一部 (第1の導体部分110Aa) と、第2の導体120 (120B) の一部 (第2の導体部分120Ba) と、酸化膜140 (140A) とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100の構成については、第1の比較例及び実施の形態1のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0206] 第1の側70Aにおいて、基板60及び導体層130Aに、第1の導体110Aが積層されている。また、第1の導体110A及び導体層130Aに、第2の導体120Aが積層されている。また、導体層130Aの、基板60及び第1の導体110Aと接していない面には、酸化膜132A (NbOx) が形成されている。また、第1の導体110Aの、基板60及び導体層130Aと接していない面には、酸化膜140A (AlOx) が形成されている。つまり、第1の導体110Aの、第2の導体120A及び第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140Aが形成されている。上述したように、第1の導体110Aと第2の導体120Aとの間の酸化膜140A

は、スプリアス接合 80A として機能する。

[0207] 第2の側70Bにおいて、基板60及び導体層130Bに、第1の導体110Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体110Bに、第2の導体120Bが積層されている。また、導体層130Bの、基板60及び第1の導体110Bと接していない面には、酸化膜132B (NbO_x) が形成されている。また、第1の導体110Bの、基板60及び導体層130Bと接していない面には、酸化膜140B (AlO_x) が形成されている。つまり、第1の導体110Bの、第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140Bが形成されている。上述したように、酸化膜140Bは、スプリアス接合80Bとして機能する。

[0208] ここで、実施の形態7では、実施の形態1等と異なり、導体層130Aの第1の導体110Aと接している面130Aaの少なくとも一部には、酸化膜132Aが形成されていない。同様に、導体層130Bの第1の導体110Bと接している面130Baの少なくとも一部には、酸化膜132Bが形成されていない。なお、第1の比較例と同様に、第1の導体110の蒸着処理の前に導体層130に対して酸化膜除去工程を実行することによって、導体層130Aの面130Aa及び導体層130Bの面130Baの酸化膜132を除去することができる。これにより、導体層130と超伝導体（第1の導体110）との接続（超伝導コンタクト）を形成する。つまり、第1の導体110と導体層130とが、第1の導体110が導体層130に積層された面において、直接、接続されている。具体的には、第1の側70Aにおいて、導体層130Aと第1の導体110Aとの接続（超伝導コンタクト）を形成する。同様に、第2の側70Bにおいて、導体層130Bと第1の導体110Bとの接続（超伝導コンタクト）を形成する。なお、第1の比較例の説明で述べたように、第1の導体110の蒸着処理の前に酸化膜除去工程が実行されるので、基板60の表面にダメージ層62が形成され得る。

[0209] また、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、第2の側70Bにおいて、接続導体158Bを有する。接続導体158Bは、アルミニウム (Al)

）等の超伝導材料で形成されている。接続導体158Bは、少なくとも、導体層130B及び第2の導体120Bに、直接、接続されている。例えば、接続導体158Bは、導体層130B及び第2の導体120Bに積層されている。ここで、接続導体158Bと、導体層130B及び第2の導体120Bとの間には、酸化膜等の誘電体は形成されていない。したがって、第2の導体120Bは、接続導体158Bを介して、導体層130Bと酸化膜（誘電体）を介さないで接続されている。なお、上述したように、実施の形態7では、第1の側70Aにおいて導体層130Aと第1の導体110Aとの接続（超伝導コンタクト）が形成されているので、第1の側70Aには、接続導体が形成されていなくてもよい。

[0210] 図37～図45は、実施の形態7にかかる量子デバイス50の製造方法を示す工程図である。まず、図37に示すように、第1の比較例（図3）と同様にして、基板60を用意し、基板60に導体層130を成膜する（導体層成膜工程）。導体層130の成膜は、例えば、スパッタリングによって行われ得る。あるいは、導体層130の成膜は、蒸着又はCVDによって行われてもよい。そして、導体層130への回路パターンの形成は、例えば、光学のリソグラフィおよび反応性イオンエッチングの組み合わせによって行われ得る。なお、光学のリソグラフィに代えて電子線描画法等を用いてもよい。また、反応性イオンエッチングに代えてウェットエッチング等を用いてもよい。なお、導体層130の表面（基板60に接していない面）には、酸化膜132（ニオブ酸化物層）が形成されている。

[0211] 次に、図38に示すように、第1の比較例（図4）と同様にして、レジストマスク300（レジストパターン）が形成される（レジストマスク形成工程）。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉された状態で配置されている。また、レジストマスク300が除去されるまで、レジストマスク300は、基板60に対して移動されず、固定されている。レジストマスク300のレジストパターンによって、開口部302（302A, 302B）が形成される

。なお、以後、レジストマスク300を除去するまで、開口部302と対向する箇所以外の基板60及び導体層130は、レジストマスク300で覆われている。また、レジストマスク300は、レジストブリッジ300bを有する。これによって、開口部302が2つの開口部302A、302Bに分離されている。この状態で、導体層130の表面の酸化膜132を除去する（酸化膜除去工程）。酸化膜132の除去は、例えば、矢印Bで示すように開口部302を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。

[0212] 次に、図39に示すように、第1の比較例（図5）と同様にして、矢印A1に示す方向からの斜め蒸着により、第1の導体110が蒸着される（第1の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60の表面に対する垂直方向に対して例えば20度程度傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、超伝導材料を蒸着する。第1の蒸着処理工程では、基板60の側から見て、基板60の表面に対する垂直方向から第1の側70Aの方に角度 $\theta 1$ 傾いた方向から、超伝導材料を射出する。

[0213] このようにして、開口部302Aを介して、第1の導体110Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第1の導体110Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第1の導体110とともに蒸着された超伝導材料110X（A1）が積層される。また、レジストブリッジ300bによって、第1の導体110Aと第1の導体110Bとを分離する隙間G1が形成される。ここで、酸化膜除去工程（図38）が実行されたので、第1の導体110Aと導体層130Aとの間には、酸化膜132Aが形成されていない。また、第1の導体110Bと導体層130Bとの間には、酸化膜132Bが形成されていない。

[0214] 次に、図40に示すように、第1の比較例（図6）と同様にして、第1の導体110の表面を酸化する（酸化工程）。これにより、第1の導体110Aの表面に酸化膜140A（A1Ox）が形成される。また、第1の導体1

10Bの表面に酸化膜140B (AlO_x) が形成される。

[0215] 次に、図41に示すように、第1の比較例(図7)と同様にして、矢印A2に示す方向からの斜め蒸着により、第2の導体120が蒸着される(第2の蒸着処理工程)。このとき、開口部302Aを介して、第2の導体120Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第2の導体120Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第2の導体120とともに蒸着された超伝導材料120X (Al) が積層される。また、レジストブリッジ300bによって、第1の導体110A上に、第2の導体120Aと第2の導体120Bとを分離する隙間G2が形成される。また、第1の導体110Aと第2の導体120Bとが重なる箇所に、ジョセフソン接合100が形成される。

[0216] 次に、図42に示すように、レジストマスク300が除去される(リフトオフ工程)。これにより、レジストマスク300と、レジストマスク300に積層された余分な超伝導材料110X, 120Xが除去される。このとき、真空状態(密閉状態)が大気環境に開放される。つまり、基板60を配置する装置は、真空状態(密閉状態)から大気環境下に置かれる。なお、大気環境下であるので、第2の導体120の表面に、酸化膜142が形成される。つまり、第2の導体120Aの表面に酸化膜142Aが形成され、第2の導体120Bの表面に酸化膜142Bが形成される。

[0217] 次に、図43に示すように、接続導体158Bを形成するためのレジストマスク410(レジストパターン)が形成される(接続導体用レジストマスク形成工程)。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉されて配置されている。レジストマスク410のレジストパターンによって、第2の側70Bに開口部412Bが形成される。なお、実施の形態1等と異なり、第1の側70Aには接続導体は形成されないで、第1の側70Aにはレジストマスク410の開口部は設けられていない。

[0218] この状態で、第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の、

レジストマスク 410 に覆われずに露出している箇所に形成されている酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。これにより、レジストマスク 410 に覆われていない、導体層 130 の表面の酸化膜 132、第 2 の導体 120 の表面の酸化膜 142 及び第 1 の導体 110 の表面の酸化膜 140 が除去される。酸化膜 132、140、142 の除去は、例えば、矢印 B で示すように開口部 402 を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。

[0219] 次に、図 44 に示すように、開口部 412 B を介して接続導体 158 B が蒸着される（接続導体蒸着工程）。なお、接続導体 158 B の蒸着処理は、斜め蒸着である必要はない。これにより、開口部 412 B を介して、接続導体 158 B が成膜される。また、レジストマスク 410 には、接続導体 158 B とともに蒸着された超伝導材料 150 X（Al）が積層される。

[0220] 開口部 412 B に対向する箇所に、接続導体 158 B が成膜されることによって、第 2 の導体 120 B が、接続導体 158 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層 130 B が、接続導体 158 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 2 の導体 120 B と導体層 130 B とが、導体（接続導体 158 B）を介して接続される。なお、第 1 の導体 110 B が、接続導体 158 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 1 の導体 110 B と導体層 130 B とが、導体（接続導体 158 B）を介して接続される。

[0221] 次に、図 45 に示すように、レジストマスク 410 が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク 410 と、レジストマスク 410 に積層された余分な超伝導材料 150 X が除去される。このようにして、図 36 に示した、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 50 が製造される。なお、図 38～図 41 の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図 38～図 41 の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。また、図 43～図 44 の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図 43～図 44 の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。

[0222] 図46は、実施の形態7にかかる量子デバイス50の回路構成を模式的に示す図である。第1の側70Aでは、ジョセフソン接合100から導体層130Aとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第1の導体110Aとスプリアス接合80A（酸化膜140A）と第2の導体120Aと酸化膜132Aとを介して、導体層130Aと接続される経路である。なお、酸化膜132Aは、酸化工程（図40）によって形成されたものである。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第1の導体110Aと接続され、第1の導体110Aと導体層130Aとが、直接接続される経路である。つまり、酸化膜除去工程（図38）によって第1の導体110Aと導体層130Aとの間に酸化膜が形成されていないので、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）が短絡している。したがって、スプリアス接合80Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Aに発生する電界は大きくなりませんので、スプリアス接合80Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0223] また、第2の側70Bでは、ジョセフソン接合100から導体層130Bとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Bを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第2の導体120Bとスプリアス接合80B（酸化膜140B）と第1の導体110Bとを介して、導体層130Bと接続される経路である。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第2の導体120Bと接続され、第2の導体120Bと導体層130Bとが接続導体158Bを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が接続導体158Bによって短絡しており、スプリアス接合80Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界は大きくなりませんので、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0224] したがって、実施の形態7では、スプリアス接合80A、80Bを無効化することができる。これにより、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態7では、実施の形態1等において第1の導体110及び第2の導体120に形成されている突出部が、形成されていない。したがって、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、実施の形態1等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

[0225] なお、実施の形態7では、導体層130に第1の導体110を形成する前に、導体層130の表面の酸化膜132を除去する必要がある。したがって、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、実施の形態1等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。逆に言うと、実施の形態1等については、実施の形態7と比較して少ない工程で、スプリアス接合80を無効化した量子デバイス52を製造することができる。

[0226] 図47は、実施の形態7にかかる量子デバイス50の変形例を示す図である。図47は、実施の形態7にかかる量子デバイス50の変形例を示す平面図である。図47に示す量子デバイス50の第1の導体110及び第2の導体120は、実施の形態2のものと実質的に同様の形状を有する。そして、第2の側70Bにおいて、接続導体158Bは、突出部124Bに接するようにして、第2の導体120Bに積層されている。ここで、接続導体158Bは、第1の導体110Bに形成された突出部114Bに接しないようにして、第2の導体120Bに積層されている。また、接続導体158Bは、第2の導体120Bについて、突出部124B以外の箇所にも接している。したがって、接続導体158Bが第1の導体110Bに接することなく、第2の導体120Bと接続導体158Bとの間の接触面積を大きくすることができる。

[0227] 図48は、実施の形態7にかかる酸化膜除去工程（図38）の変形例を説明するための図である。上述したように、図38で示したように、第1の導

体 1 1 0 の蒸着処理の前に酸化膜除去工程が実行されると、基板 6 0 の表面にダメージ層 6 2 が形成されるおそれがある。そこで、図 4 8 に示す方法によって、基板 6 0 の表面にダメージ層 6 2 が形成されることを抑制する。

[0228] レジストマスク 3 0 0 が形成された状態で、酸化膜 1 3 2 を除去するためのイオンビームを、矢印 D で示すように、基板 6 0 の側から見て、 $-Z$ 方向から $+X$ 方向に傾いた方向（第 3 の方向）から照射する。イオンビームを照射する方向は、例えば、基板 6 0 の側から見て、 $-Z$ 方向から $+X$ 方向に 45 度程度傾いた方向であってもよい。この場合、平面視で、イオンビームは、矢印 D で示すように、 $-X$ 方向に照射される。一方、斜め蒸着の方向は、平面視で、 $-Y$ 方向（第 1 の方向）、及び、 $+Y$ 方向（第 2 の方向）である。したがって、イオンビームを照射する方向は、斜め蒸着の方向と異なる。言い換えると、酸化膜除去工程において、イオンビームを、斜め蒸着の方向とは異なる方向から照射する。

[0229] これにより、第 1 の側 7 0 A において、イオンビームは、照射領域 $A_r A$ に照射される。また、第 2 の側 7 0 B において、イオンビームは、照射領域 $A_r B$ に照射される。ここで、開口部 3 0 2 A は、ジョセフソン接合 1 0 0 を構成する第 1 の導体部分 1 1 0 A a を形成するための細穴部 3 0 4 A を有する。細穴部 3 0 4 A は、 Y 軸方向に延びるように形成されている。そして、細穴部 3 0 4 A は、少なくとも基板 6 0 と対向する箇所において、 X 軸方向の幅が狭くなるように形成されている。同様に、開口部 3 0 2 B は、ジョセフソン接合 1 0 0 を構成する第 2 の導体部分 1 2 0 B a を形成するための細穴部 3 0 4 B を有する。細穴部 3 0 4 B は、 Y 軸方向に延びるように形成されている。そして、細穴部 3 0 4 B は、少なくとも基板 6 0 と対向する箇所において、 X 軸方向の幅が狭くなるように形成されている。

[0230] 細穴部 3 0 4 がこのように形成されていることによって、イオンビームを照射する際に、細穴部 3 0 4 においては、イオンビームは、レジストマスク 3 0 0 の $+X$ 方向の側の壁によって遮蔽されるので、基板 6 0 に照射されない。したがって、基板 6 0 にダメージ層 6 2 が形成されることを抑制できる。

。なお、開口部 302 の導体層 130 と対向する箇所については、X 軸方向の幅は、イオンビームの少なくとも一部が導体層 130 に照射される程度に大きい。したがって、第 1 の導体 110 が積層される箇所の少なくとも一部の導体層 130 の表面の酸化膜 132 を除去できる。

[0231] 図 48 にかかる方法では、イオンビームを導体層 130 の表面に照射し、イオンビームを導体層 130 の表面以外の領域には照射しないようにして、酸化膜 132 を除去する。このような方法によって、基板 60 の表面にダメージ層 62 が形成されることを抑制しつつ、実施の形態 7 にかかる効果を奏することが可能となる。

[0232] (実施の形態 8)

次に、実施の形態 8 について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

[0233] 図 49 は、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 52 を示す図である。図 49 は、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 52 の平面図である。実施の形態 8 にかかる量子デバイス 52 は、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 50 に対応する構成を、ブリッジレス型の製造方法によって製造したものである。

[0234] 実施の形態 8 にかかる量子デバイス 52 は、複数の第 1 の導体 210 (210A, 210B) と、複数の第 2 の導体 220 (220A, 220B) と、超伝導回路を構成する導体層 230 (230A, 230B) とを有する。第 1 の導体 210、第 2 の導体 220 及び導体層 230 は、基板 60 に積層されている。第 1 の導体 210、第 2 の導体 220 及び導体層 230 の構成については、特記しない限り、第 3 の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、実施の形態 8 においても、実施の形態 5 で導入した XYZ 直交座標軸を導入する。

[0235] 第 1 の導体 210 は、導体層 230 に積層されている。第 2 の導体 220 は、第 1 の導体 210 に積層されている。第 1 の導体 210、第 2 の導体 2

20及び導体層230は、超伝導材料で形成されている。例えば、第1の導体210及び第2の導体220は、アルミニウム（Al）で形成されている。また、例えば、導体層230（第3の導体）は、ニオブ（Nb）で形成されている。

[0236] また、第1の導体210と第2の導体220との間には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。また、第1の導体210（210A）の一部（第1の導体部分210Aa）と、第2の導体220（220B）の一部（第2の導体部分220Ba）と、酸化膜とによって、ジョセフソン接合200が形成されている。ジョセフソン接合200の構成については、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、細幅部212A及び細幅部222Bについても、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、説明を省略する。

[0237] また、第3の比較例等と同様に、第1の側72Aにおいて、基板60及び導体層230Aに、第1の導体210Aが積層されている。また、第1の導体210A及び導体層230Aに、第2の導体220Aが積層されている。また、第1の導体210Aの、第2の導体220A及び第2の導体220Bと接している面には、酸化膜が形成されている。また、第3の比較例と同様に、導体層230Aの、第1の導体210Aが積層されている面には、酸化膜が形成されていない。したがって、導体層230Aと第1の導体210Aとが、直接、接続されている。つまり、第1の導体210Aと導体層230Aとが、第1の導体210Aが導体層230Aに積層された面において、直接、接続されている。

[0238] 一方、第3の比較例と同様に、第2の側72Bにおいて、基板60及び導体層230Bに、第1の導体210Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体210Bに、第2の導体220Bが積層されている。また、第1の導体210Bの、第2の導体220Bと接している面には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。また、第3の比較例と同様に、導体層230Bの、第1の導体210Bが積層されている面には、酸化膜が形成されてい

い。したがって、導体層 230B と第 1 の導体 210B とが、直接、接続されている。

[0239] また、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 52 は、第 2 の側 72B において、接続導体 258B を有する。接続導体 258B は、超伝導材料で形成されている。接続導体 258B は、例えば、アルミニウム (Al) で形成されてもよい。接続導体 258B は、第 2 の側 72B において、第 2 の導体 220B 及び導体層 230B に、直接、接続されている。これにより、接続導体 258B は、第 2 の側 72B において、第 2 の導体 220B と導体層 230B とを接続する (超伝導コンタクト)。なお、実施の形態 8 では、接続導体 258B は、第 2 の側 72B において、第 1 の導体 210B と接続されていてもよい。なお、実施の形態 8 では、第 1 の側 72A において導体層 230A と第 1 の導体 210A との接続 (超伝導コンタクト) が形成されているので、第 1 の側 72A には、接続導体が形成されていない。

[0240] なお、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 52 の回路構成は、図 46 に示したものと実質的に同様である。つまり、第 1 の側 72A では、ジョセフソン接合 200 から導体層 230A との間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 82A を経由する第 1 の経路以外にも、第 2 の経路が存在する。すなわち、第 1 の経路は、ジョセフソン接合 200 が、第 1 の導体 210A とスプリアス接合 82A と第 2 の導体 220A と導体層 230A に形成された酸化膜とを介して、導体層 230A と接続される経路である。一方、第 2 の経路は、ジョセフソン接合 200 が第 1 の導体 210A と接続され、第 1 の導体 210A と導体層 230A とが直接接続される経路である。つまり、スプリアス接合 82A の両端の導体が短絡しており、スプリアス接合 82A は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 82A に発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合 82A はロスの発生に寄与しないこととなる。

[0241] また、第 2 の側 72B では、ジョセフソン接合 200 から導体層 230B との間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 8

2 Bを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合200が、第2の導体220 Bとスプリアス接合82 Bと第1の導体210 Bとを介して、導体層230 Bと接続される経路である。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合200が第2の導体220 Bと接続され、第2の導体220 Bと導体層230 Bとが接続導体258 Bを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合82 Bの両端の導体（第2の導体220 B及び導体層230 B）が接続導体258 Bによって短絡しており、スプリアス接合82 Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82 Bに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合82 Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0242] したがって、実施の形態8では、スプリアス接合82 A、82 Bを無効化することができる。これにより、実施の形態8にかかる量子デバイス52は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態8では、実施の形態5等において第1の導体210及び第2の導体220に形成されている突出部が、形成されていなくてもよい。したがって、実施の形態8にかかる量子デバイス52は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態8にかかる量子デバイス52は、実施の形態5等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

[0243] なお、実施の形態8では、導体層230に第1の導体210を形成する前に、導体層230の表面の酸化膜を除去する必要がある。したがって、実施の形態8にかかる量子デバイス52は、実施の形態5等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。逆に言うと、実施の形態5については、実施の形態8と比較して少ない工程で、スプリアス接合82を無効化した量子デバイス52を製造することができる。

[0244] （実施の形態9）

次に、実施の形態9について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省

略されている。

[0245] 図50は、実施の形態9にかかる量子デバイス50を示す図である。図50は、実施の形態9にかかる量子デバイス50の断面図である。実施の形態9にかかる量子デバイス50は、上述したブリッジ型の製造方法によって製造される。実施の形態9にかかる量子デバイス50は、実施の形態1と同様に、基板60と、複数の第1の導体110（110A，110B）と、複数の第2の導体120（120A，120B）と、導体層130（130A，130B）とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、実施の形態1と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0246] 第1の導体110は、導体層130に積層されている。第2の導体120は、第1の導体110に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、超伝導材料で形成されている。例えば、第1の導体110及び第2の導体120は、アルミニウム（Al）で形成されている。また、例えば、導体層130（第3の導体）は、ニオブ（Nb）で形成されている。

[0247] また、実施の形態9にかかる量子デバイス50は、接続導体160（160A，160B）を有する。接続導体160は、例えば、アルミニウム（Al）等の超伝導材料で形成されている。また、第1の導体110と第2の導体120との間には、酸化膜140（140A，140B）が形成されている。また、第1の導体110（110A）の一部（第1の導体部分110Aa）と、第2の導体120（120B）の一部（第2の導体部分120Ba）と、酸化膜140（140A）とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100の構成については、第1の比較例及び実施の形態1のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

[0248] 第1の側70Aにおいて、基板60及び導体層130Aに、第1の導体110Aが積層されている。また、第1の導体110A及び導体層130Aに、第2の導体120Aが積層されている。また、導体層130A及び第2の

導体 120A に、接続導体 160A が積層されている。ここで、第 1 の側 70A において、接続導体 160A と第 2 の導体 120A と第 1 の導体 110A とが積層された箇所には、接続穴 162A が形成されている。つまり、接続穴 162A は、第 1 の側 70A における、第 1 の導体 110A が第 2 の導体 120A に覆われている箇所に形成されている。そして、接続穴 162A は、第 2 の導体 120A 及び酸化膜 140A を貫通し、第 1 の導体 110A に達している。そして、接続導体 160A が、接続穴 162A の底部まで積層されている。これにより、接続導体 160A が、接続穴 162A において、第 1 の導体 110A に、直接、接続されている。

[0249] これにより、第 1 の導体 110A と、導体層 130A とが、接続導体 160A を介して接続される（超伝導コンタクト）。これにより、スプリアス接合 80A の両端の導体（第 1 の導体 110A 及び導体層 130A）が短絡する。したがって、スプリアス接合 80A は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80A に発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合 80A はロスの発生に寄与しないこととなる。

[0250] 一方、第 2 の側 70B において、基板 60 及び導体層 130B に、第 1 の導体 110B が積層されている。また、基板 60 及び第 1 の導体 110B に、第 2 の導体 120B が積層されている。また、導体層 130B、第 1 の導体 110B 及び第 2 の導体 120B に、接続導体 160B が積層されている。これにより、第 2 の導体 120B が接続導体 160B と接続される。したがって、第 2 の導体 120B は、導体層 130B 及び接続導体 160B を介して、接続されている。つまり、スプリアス接合 80B の両端の導体（第 2 の導体 120B 及び導体層 130B）が接続導体 160B によって短絡するので、スプリアス接合 80B は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80B に発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合 80B はロスの発生に寄与しないこととなる。

[0251] 図 51 は、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 50 の回路構成を模式的に示す図である。第 1 の側 70A では、ジョセフソン接合 100 から導体層 1

30Aとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路及び第3の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第1の導体110Aとスプリアス接合80A（酸化膜140A）と第2の導体120Aと酸化膜132Aとを介して、導体層130Aと接続される経路である。また、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第1の導体110Aと接続され、第1の導体110Aと導体層130Aとが、酸化膜132Aを介して接続される経路である。一方、第3の経路は、ジョセフソン接合100が第1の導体110Aと接続され、第1の導体110Aと導体層130Aとが、接続穴162Aに形成された接続導体160Aを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）が接続導体160Aによって短絡している。したがって、スプリアス接合80Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Aに発生する電界は大きくなるので、スプリアス接合80Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0252] また、第2の側70Bでは、ジョセフソン接合100から導体層130Bとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Bを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第2の導体120Bとスプリアス接合80B（酸化膜140B）と第1の導体110Bと酸化膜132Bとを介して、導体層130Bと接続される経路である。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第2の導体120Bと接続され、第2の導体120Bと導体層130Bとが接続導体160Bを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が接続導体160Bによって短絡しており、スプリアス接合80Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界は大きくなるので、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0253] 図52～図60は、実施の形態9にかかる量子デバイス50の製造方法を示す工程図である。まず、図52に示すように、実施の形態1（図17）と同様にして、基板60を用意し、基板60に導体層130を成膜する（導体層成膜工程）。なお、導体層130の表面（基板60に接していない面）には、酸化膜132（NbO_x）が形成されている。

[0254] 次に、図53に示すように、実施の形態1（図18）と同様にして、レジストマスク300（レジストパターン）が基板60の上に形成される（レジストマスク形成工程）。実施の形態9では、この段階では、実施の形態1と同様に、酸化膜除去工程が実行されない。この状態で、矢印A1に示す方向からの斜め蒸着により、第1の導体110が蒸着される（第1の蒸着処理工程）。このとき、開口部302Aを介して、第1の導体110Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第1の導体110Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第1の導体110とともに蒸着された超伝導材料110X（Al）が積層される。また、酸化膜除去工程が実行されなかったため、第1の導体110Aと導体層130Aとの間には、酸化膜132Aが形成されている。また、第1の導体110Bと導体層130Bとの間には、酸化膜132Bが形成されている。

[0255] 次に、図54に示すように、実施の形態1（図19）と同様にして、第1の導体110の表面を酸化する（酸化工程）。これにより、第1の導体110Aの表面に酸化膜140A（AlO_x）が形成される。また、第1の導体110Bの表面に酸化膜140B（AlO_x）が形成される。

[0256] 次に、図55に示すように、実施の形態1（図20）と同様にして、矢印A2に示す方向からの斜め蒸着により、第2の導体120が蒸着される（第2の蒸着処理工程）。このとき、開口部302Aを介して、第2の導体120Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第2の導体120Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第2の導体120とともに蒸着された超伝導材料120X（Al）が積層される。また、第1の導体110Aと第2の導体120Bとが重なる箇所に、ジョセフソン接合100が

形成される。

[0257] 次に、図56に示すように、実施の形態1（図21）と同様にして、レジストマスク300が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク300と、レジストマスク300に積層された余分な超伝導材料110X、120Xが除去される。このとき、真空状態（密閉状態）が大気環境に開放される。つまり、基板60を配置する装置は、真空状態（密閉状態）から大気環境下に置かれる。なお、大気環境下であるので、第2の導体120の表面に、酸化膜142が形成される。つまり、第2の導体120Aの表面に酸化膜142Aが形成され、第2の導体120Bの表面に酸化膜142Bが形成される。

[0258] 次に、図57に示すように、接続穴162Aが形成される（接続穴形成工程）。具体的には、接続穴162Aを形成するためのレジストマスク420（レジストパターン）が形成される（接続穴用レジストマスク形成工程）。レジストマスク420において、第1の側70Aの、第1の導体110Aに第2の導体120Aが積層された箇所に、開口部422Aが設けられている。そして、エッチング等の表面加工処理によって、開口部422Aに対応する箇所の、第2の導体120A及び酸化膜140Aを除去する。その際に、第1の導体110Aの一部を除去してもよい。これにより、開口部422Aに対応する箇所に、接続穴162Aが形成され、第1の導体110Aが露出する。そして、レジストマスク420が除去される。

[0259] 次に、図58に示すように、接続導体160を形成するためのレジストマスク430（レジストパターン）が形成される（接続導体用レジストマスク形成工程）。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉されて配置されている。レジストマスク430のレジストパターンによって、開口部432（432A、432B）が形成される。レジストマスク430において、第1の側70Aに開口部432Aが設けられ、第2の側70Bに開口部432Bが設けられる。なお、以後、レジストマスク430を除去するまで、開口部432と

対向する箇所以外の基板 60 等は、レジストマスク 430 で覆われている。
なお、後述するように、開口部 432 に対向する箇所に、接続導体 160 が形成される。

[0260] ここで、開口部 432 A に対応する箇所には、接続穴 162 A が設けられている。言い換えると、開口部 432 A を介して接続穴 162 A が露出するように、レジストマスク 430 が形成される。さらに言い換えると、接続穴 162 A を覆わないように、レジストマスク 430 が形成される。

[0261] 実施の形態 1 と同様に、この状態で、第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 の、レジストマスク 430 に覆われずに露出している箇所に形成されている酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。これにより、レジストマスク 430 に覆われていない、導体層 130 の表面の酸化膜 132、第 2 の導体 120 の表面の酸化膜 142 及び第 1 の導体 110 の表面の酸化膜 140 が除去される。酸化膜 132、140、142 の除去は、例えば、矢印 B で示すように開口部 402 を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。なお、酸化膜 132、140、142 を除去するのは、接続導体 160 によって導体層 130 と超伝導体（第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120）との接続（超伝導コンタクト）を形成するためである。

[0262] 次に、図 59 に示すように、実施の形態 1（図 23）と同様にして、開口部 432 を介して接続導体 160 が蒸着される（接続導体蒸着工程）。なお、接続導体 160 の蒸着処理は、斜め蒸着である必要はない。これにより、開口部 432 A を介して、接続導体 160 A が成膜される。このとき、接続穴 162 A に、接続導体 160 A が成膜される。また、接続穴 162 A を介して第 1 の導体 110 A に、接続導体 160 A が成膜される。また、開口部 432 B を介して、接続導体 160 B が成膜される。また、レジストマスク 430 には、接続導体 160 とともに蒸着された超伝導材料 160 X（A1）が積層される。

[0263] 開口部 432 A に対向する箇所に、接続導体 160 A が成膜されることに

よって、接続穴162Aを介して、第1の導体110Aが、接続導体160Aと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層130Aが、接続導体160Aと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第1の導体110Aと導体層130Aとが、導体（接続導体160A）を介して接続される。なお、第2の導体120Aが、接続導体160Aと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第2の導体120Aと導体層130Aとが、導体（接続導体160A）を介して接続される。

[0264] また、開口部432Bに対向する箇所、接続導体160Bが成膜されることによって、第2の導体120Bが、接続導体160Bと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層130Bが、接続導体160Bと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第2の導体120Bと導体層130Bとが、導体（接続導体160B）を介して接続される。なお、第1の導体110Bが、接続導体160Bと、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第1の導体110Bと導体層130Bとが、導体（接続導体160B）を介して接続される。

[0265] 次に、図60に示すように、実施の形態1（図24）と同様にして、レジストマスク430が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク430と、レジストマスク430に積層された余分な超伝導材料160Xが除去される。このようにして、図50に示した、実施の形態9にかかる量子デバイス50が製造される。なお、図53～図55の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図53～図55の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。また、図58～図59の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図58～図59の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。

[0266] 上述したように、実施の形態9では、スプリアス接合80A、80Bを無効化することができる。これにより、実施の形態9にかかる量子デバイス50は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態9では、実施の形態1等において第1の導体110及び第2の導体120に形成され

ている突出部が、形成されていない。したがって、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 50 は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 50 は、実施の形態 1 等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

[0267] なお、実施の形態 9 では、接続導体 160 を成膜する前に、接続穴 162 A を形成する必要がある。したがって、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 50 は、実施の形態 1 等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。逆に言うと、実施の形態 1 等については、実施の形態 9 と比較して少ない工程で、スプリアス接合 80 を無効化した量子デバイス 50 を製造することができる。

[0268] (実施の形態 10)

次に、実施の形態 10 について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

[0269] 図 61 は、実施の形態 10 にかかる量子デバイス 52 を示す図である。図 61 は、実施の形態 10 にかかる量子デバイス 52 の平面図である。実施の形態 10 にかかる量子デバイス 52 は、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 50 に対応する構成を、ブリッジレス型の製造方法によって製造したものである。

[0270] 実施の形態 10 にかかる量子デバイス 52 は、複数の第 1 の導体 210 (210A, 210B) と、複数の第 2 の導体 220 (220A, 220B) と、超伝導回路を構成する導体層 230 (230A, 230B) とを有する。第 1 の導体 210、第 2 の導体 220 及び導体層 230 は、基板 60 に積層されている。第 1 の導体 210、第 2 の導体 220 及び導体層 230 の構成については、特記しない限り、第 3 の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、実施の形態 10 においても、実施の形態 5 で導入した XYZ 直交座標軸を導入する。

- [0271] 第1の導体210は、導体層230に積層されている。第2の導体220は、第1の導体210に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、超伝導材料で形成されている。例えば、第1の導体210及び第2の導体220は、アルミニウム（Al）で形成されている。また、例えば、導体層230（第3の導体）は、ニオブ（Nb）で形成されている。
- [0272] また、第1の導体210と第2の導体220との間には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。また、第1の導体210（210A）の一部（第1の導体部分210Aa）と、第2の導体220（220B）の一部（第2の導体部分220Ba）と、酸化膜とによって、ジョセフソン接合200が形成されている。ジョセフソン接合200の構成については、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、細幅部212A及び細幅部222Bについても、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、説明を省略する。
- [0273] また、第3の比較例等と同様に、第1の側72Aにおいて、基板60及び導体層230Aに、第1の導体210Aが積層されている。また、第1の導体210A及び導体層230Aに、第2の導体220Aが積層されている。また、第1の導体210Aの、第2の導体220A及び第2の導体220Bと接している面には、酸化膜が形成されている。また、実施の形態5等と同様に、導体層230Aの、第1の導体210A及び第2の導体220Aが積層されている面には、酸化膜が形成されている。
- [0274] 一方、第3の比較例と同様に、第2の側72Bにおいて、基板60及び導体層230Bに、第1の導体210Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体210Bに、第2の導体220Bが積層されている。また、第1の導体210Bの、第2の導体220Bと接している面には、酸化膜（AlO_x）が形成されている。また、実施の形態5等と同様に、導体層230Bの、第1の導体210B及び第2の導体220Bが積層されている面には、酸化膜が形成されている。

[0275] また、実施の形態 10 にかかる量子デバイス 52 は、接続導体 260 (260A, 260B) を有する。接続導体 260 は、超伝導材料で形成されている。接続導体 260 は、例えば、アルミニウム (Al) で形成されてもよい。接続導体 260A は、第 1 の側 72A において、第 1 の導体 210A 及び導体層 230A に、直接、接続されている。これにより、接続導体 260A は、第 1 の側 72A において、第 1 の導体 210A と導体層 230A とを接続する (超伝導コンタクト)。なお、実施の形態 10 では、接続導体 260A は、第 1 の側 72A において、第 2 の導体 220A と接続されていてもよい。接続導体 260A は、導体層 230A 及び第 2 の導体 220A に積層されている。

[0276] ここで、第 1 の側 72A において、接続導体 260A と第 2 の導体 220A と第 1 の導体 210A とが積層された箇所には、接続穴 262A が形成されている。つまり、接続穴 262A は、第 1 の側 72A における、第 1 の導体 210A が第 2 の導体 220A に覆われている箇所に形成されている。そして、接続穴 262A は、第 2 の導体 220A 及び第 1 の導体 210A の酸化膜を貫通し、第 1 の導体 210A に達している。そして、接続導体 260A が、接続穴 262A の底部まで積層されている。これにより、接続導体 260A が、接続穴 262A において、第 1 の導体 210A に、直接、接続されている。

[0277] これにより、第 1 の導体 210A と、導体層 230A とが、接続穴 262A に形成された接続導体 260A を介して接続される (超伝導コンタクト)。これにより、スプリアス接合 82A の両端の導体 (第 1 の導体 210A 及び導体層 230A) が短絡する。したがって、スプリアス接合 82A は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 82A に発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合 82A はロスの発生に寄与しないこととなる。

[0278] また、接続導体 260B は、第 2 の側 72B において、第 2 の導体 220B 及び導体層 230B に、直接、接続されている。これにより、接続導体 2

60Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態10では、接続導体260Bは、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bと接続されていてもよい。接続導体260Bは、導体層230B、第1の導体210B及び第2の導体220Bに積層されている。これにより、第2の導体220Bが接続導体260Bと接続される。スプリアス接合82Bの両端の導体（第2の導体220B及び導体層230B）が接続導体260Bによって短絡するので、スプリアス接合82Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82Bに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合82Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0279] なお、実施の形態10にかかる量子デバイス52の回路構成は、図51に示したものと実質的に同様である。つまり、第1の側72Aでは、ジョセフソン接合200から導体層230Aとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合82Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路及び第3の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合200が、第1の導体210Aとスプリアス接合82Aと第2の導体220Aと導体層230Aに形成された酸化膜とを介して、導体層230Aと接続される経路である。また、第2の経路は、ジョセフソン接合200が第1の導体210Aと接続され、第1の導体210Aと導体層230Aとが、導体層230Aに形成された酸化膜を介して接続される経路である。一方、第3の経路は、ジョセフソン接合200が第1の導体210Aと接続され、第1の導体210Aと導体層230Aとが、接続穴262Aに形成された接続導体260Aを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合82Aの両端の導体（第1の導体210A及び導体層230A）が短絡している。したがって、スプリアス接合82Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82Aに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合82Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

[0280] また、第2の側70Bでは、ジョセフソン接合200から導体層230B

との間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 8 2 B を経由する第 1 の経路以外にも、第 2 の経路が存在する。すなわち、第 1 の経路は、ジョセフソン接合 2 0 0 が、第 2 の導体 2 2 0 B とスプリアス接合 8 2 B と第 1 の導体 2 1 0 B と導体層 2 3 0 B に形成された酸化膜とを介して、導体層 2 3 0 B と接続される経路である。一方、第 2 の経路は、ジョセフソン接合 2 0 0 が第 2 の導体 2 2 0 B と接続され、第 2 の導体 2 2 0 B と導体層 2 3 0 B とが接続導体 2 6 0 B を介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合 8 2 B の両端の導体（第 2 の導体 2 2 0 B 及び導体層 2 3 0 B）が接続導体 2 6 0 B によって短絡しており、スプリアス接合 8 2 B は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 8 2 B に発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合 8 2 B はロスの発生に寄与しないこととなる。

[0281] したがって、実施の形態 1 0 では、スプリアス接合 8 2 A, 8 2 B を無効化することができる。これにより、実施の形態 1 0 にかかる量子デバイス 5 2 は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態 1 0 では、実施の形態 5 等において第 1 の導体 2 1 0 及び第 2 の導体 2 2 0 に形成されている突出部が、形成されていなくてもよい。したがって、実施の形態 1 0 にかかる量子デバイス 5 2 は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態 1 0 にかかる量子デバイス 5 2 は、実施の形態 5 等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

[0282] なお、実施の形態 1 0 では、接続導体 2 6 0 を成膜する前に、接続穴 2 6 2 A を形成する必要がある。したがって、実施の形態 1 0 にかかる量子デバイス 5 2 は、実施の形態 5 等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。したがって、実施の形態 5 等については、実施の形態 1 0 と比較して少ない工程で、スプリアス接合 8 2 を無効化した量子デバイス 5 2 を製造することができる。

[0283] (変形例)

なお、本発明は上記実施の形態に限られたものではなく、趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更することが可能である。例えば、複数の実施の形態のそれぞれは、互いに適用可能である。例えば、実施の形態 1 に実施の形態 9 を適用してもよい。これにより、接続導体と第 1 の導体 110A との接続面積を大きくすることができる。また、上述した実施の形態 1 では、第 1 の導体 110 が導体層 130 に積層されているが、このような構成に限られない。第 1 の導体 110 が導体層 130 に積層されていなくても、接続導体 150 によって、第 1 の導体 110 と導体層 130 とを接続するようにしてもよい。他の実施の形態についても同様である。

[0284] 以上、実施の形態を参照して本願発明を説明したが、本願発明は上記によって限定されるものではない。本願発明の構成や詳細には、発明のScope内で当業者が理解し得る様々な変更をすることができる。

[0285] 上記の実施形態の一部又は全部は、以下の付記のようにも記載されうるが、以下には限られない。

(付記 1)

超伝導材料で層状に形成された複数の第 1 の導体と、
少なくとも一部が前記第 1 の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第 2 の導体と、

超伝導材料で形成された導体層と、
を有し、

前記第 1 の導体と前記第 2 の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、

前記第 1 の導体には前記第 2 の導体に覆われていない少なくとも 1 つの第 1 の突出部が形成されており、

前記第 1 の突出部と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されており、

前記第 2 の導体と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されている、
量子デバイス。

(付記 2)

超伝導材料で形成された少なくとも 1 つの接続導体、
をさらに有し、
前記接続導体によって、前記第 1 の突出部と前記導体層とが接続されている、
付記 1 に記載の量子デバイス。

(付記 3)

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 1 の側で、少なくとも前記第 1 の突出部と前記導体層とが前記接続導体によって接続され、

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 2 の側で、少なくとも前記第 2 の導体と前記導体層とが前記接続導体によって接続されている、

付記 2 に記載の量子デバイス。

(付記 4)

前記第 1 の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体に少なくとも 1 つの前記第 1 の突出部が形成され、前記接続導体によって当該第 1 の突出部が前記導体層と接続されており、

前記第 2 の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体には前記第 1 の導体よりも突出した少なくとも 1 つの第 2 の突出部が形成され、前記接続導体によって前記第 2 の突出部が前記導体層と接続されている、

付記 3 に記載の量子デバイス。

(付記 5)

前記第 1 の側において複数の前記第 1 の突出部が形成され、複数の前記第 1 の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されており、

前記第 2 の側において複数の前記第 2 の突出部が形成され、複数の前記第 2 の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されている、

付記 4 に記載の量子デバイス。

(付記 6)

前記第 1 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 2 の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されておらず、

前記第 2 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 1 の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されていない、

付記 4 又は 5 に記載の量子デバイス。

(付記 7)

前記第 1 の導体に形成された前記第 1 の突出部の近傍で、前記第 2 の導体と前記導体層とが前記接続導体によって接続されている、

付記 2 に記載の量子デバイス。

(付記 8)

複数の前記第 1 の突出部の近傍において、前記第 2 の導体には、前記第 1 の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第 2 の突出部が形成され、前記接続導体によって、第 1 の突出部及び前記第 2 の突出部が前記導体層と接続されている、

付記 7 に記載の量子デバイス。

(付記 9)

超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され第 1 の突出部を有する第 1 の導体と超伝導材料で形成された第 2 の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、

前記レジストマスクが形成された基板に、第 1 の方向からの斜め蒸着によって、複数の前記第 1 の導体を積層し、

前記第 1 の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、

複数の前記第 1 の導体それぞれに、第 2 の方向からの斜め蒸着によって、前記第 2 の導体の少なくとも一部を積層し、これによって、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、

前記第 2 の導体に覆われていない前記第 1 の突出部と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続し、

前記第 2 の導体と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続する、
量子デバイスの製造方法。

(付記 10)

前記第 1 の突出部と前記導体層とに、超伝導材料で形成された接続導体を積層することによって、前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続する、

付記 9 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 11)

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 1 の側で、少なくとも前記第 1 の突出部と前記導体層とを前記接続導体によって接続し、

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 2 の側で、少なくとも前記第 2 の導体と前記導体層とを前記接続導体によって接続する、

付記 10 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 12)

前記導体層に前記第 1 の導体を積層する際に、前記第 1 の側において、少なくとも 1 つの前記第 1 の突出部を形成し、

前記第 1 の導体に前記第 2 の導体を積層する際に、

前記第 1 の導体の一部と前記第 2 の導体の一部とが重なるように前記第 2 の導体の斜め蒸着を行うことによって、前記ジョセフソン接合を形成し、

前記第 2 の側において、前記第 2 の導体に前記第 1 の導体よりも突出した少なくとも 1 つの第 2 の突出部を形成し、

前記接続導体によって前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続し、前記接続導体によって前記第 2 の突出部と前記導体層とを接続する、

付記 1 1 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 3)

前記第 1 の導体を積層する際に、前記第 1 の側に複数の前記第 1 の突出部を形成し、

前記第 2 の導体を積層する際に、前記第 2 の側に複数の前記第 2 の突出部を形成し、

前記接続導体によって、複数の前記第 1 の突出部を前記導体層と接続し、

前記接続導体によって、複数の前記第 2 の突出部を前記導体層と接続する

、

付記 1 2 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 4)

前記第 1 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 2 の導体が前記導体層と前記接続導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続し、

前記第 2 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 1 の導体が前記導体層と直接又は導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第 2 の突出部と前記導体層とを接続する、

付記 1 2 又は 1 3 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 5)

前記第 1 の導体に形成された前記第 1 の突出部の近傍で、前記第 2 の導体と前記導体層とを前記接続導体によって接続する、

付記 1 0 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 6)

前記第 2 の導体を積層する際に、複数の前記第 1 の突出部の近傍において

、前記第2の導体に、前記第1の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第2の突出部を形成し、

前記接続導体によって、第1の突出部及び前記第2の突出部を前記導体層と接続する、

付記15に記載の量子デバイスの製造方法。

符号の説明

- [0286] 1 量子デバイス
- 2 第1の導体
- 2 a 突出部
- 4 第2の導体
- 6 導体層
- 8 酸化膜
- 10 ジョセフソン接合
- 50, 52 量子デバイス
- 60 基板
- 70A, 72A 第1の側
- 70B, 72B 第2の側
- 80, 82 スプリアス接合
- 100 ジョセフソン接合
- 102 トンネルバリア層
- 110 第1の導体
- 110A a 第1の導体部分
- 110B 第1の導体
- 112A 突出部
- 114 突出部
- 116A 突出部
- 120 第2の導体
- 120B a 第2の導体部分

1 2 0 X 超伝導材料
1 2 4 突出部
1 2 6 A 突出部
1 3 0 導体層
1 3 2 酸化膜
1 4 0 酸化膜
1 4 2 酸化膜
1 5 0 接続導体
1 5 2 接続導体
1 5 4 接続導体
1 5 6 A 接続導体
1 5 8 B 接続導体
1 6 0 接続導体
1 6 2 A 接続穴
2 0 0 ジョセフソン接合
2 1 0 第1の導体
2 1 0 A a 第1の導体部分
2 1 2 A 細幅部
2 1 4 A 突出部
2 1 4 B 突出部
2 1 6 A 突出部
2 2 0 第2の導体
2 2 0 B a 第2の導体部分
2 2 2 B 細幅部
2 2 4 A 突出部
2 2 4 B 突出部
2 2 6 B 突出部
2 3 0 導体層

2 5 0 接続導体
2 5 6 接続導体
2 5 8 B 接続導体
2 6 0 接続導体
2 6 2 A 接続穴
3 0 0 レジストマスク
3 0 0 b レジストブリッジ
3 0 2 開口部
3 0 4 細穴部
3 1 0 レジストマスク
3 1 2 開口部
3 1 4 A 凹部
3 1 4 B 凹部
3 2 0 レジストマスク
3 2 1 レジストマスク部分
3 2 2 開口部
4 0 0 レジストマスク
4 0 2 開口部
4 1 0 レジストマスク
4 1 2 B 開口部
4 2 0 レジストマスク
4 2 2 A 開口部
4 3 0 レジストマスク
4 3 2 開口部
5 0 0 レジストマスク
5 0 2 開口部
5 0 4 A 細穴部
5 0 4 B 細穴部

5 0 6 A 凹部

5 0 6 B 凹部

5 1 0 レジストマスク

5 1 2 開口部

5 1 6 A 凹部

5 1 6 B 凹部

請求の範囲

[請求項1]

超伝導材料で層状に形成された複数の第1の導体と、
少なくとも一部が前記第1の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第2の導体と、
超伝導材料で形成された導体層と、
を有し、
前記第1の導体と前記第2の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、
前記第1の導体には前記第2の導体に覆われていない少なくとも1つの第1の突出部が形成されており、
前記第1の突出部と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されており、
前記第2の導体と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されている、
量子デバイス。

[請求項2]

超伝導材料で形成された少なくとも1つの接続導体、
をさらに有し、
前記接続導体によって、前記第1の突出部と前記導体層とが接続されている、
請求項1に記載の量子デバイス。

[請求項3]

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第1の側で、少なくとも前記第1の突出部と前記導体層とが前記接続導体によって接続され、
前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第

2の側で、少なくとも前記第2の導体と前記導体層とが前記接続導体によって接続されている、

請求項2に記載の量子デバイス。

[請求項4]

前記第1の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体に少なくとも1つの前記第1の突出部が形成され、前記接続導体によって当該第1の突出部が前記導体層と接続されており、

前記第2の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体には前記第1の導体よりも突出した少なくとも1つの第2の突出部が形成され、前記接続導体によって前記第2の突出部が前記導体層と接続されている、

請求項3に記載の量子デバイス。

[請求項5]

前記第1の側において複数の前記第1の突出部が形成され、複数の前記第1の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されており、

前記第2の側において複数の前記第2の突出部が形成され、複数の前記第2の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されている、

請求項4に記載の量子デバイス。

[請求項6]

前記第1の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第2の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されておらず、

前記第2の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第1の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されていない、

請求項4又は5に記載の量子デバイス。

[請求項7]

前記第1の導体に形成された前記第1の突出部の近傍で、前記第2の導体と前記導体層とが前記接続導体によって接続されている、

請求項2に記載の量子デバイス。

[請求項8]

複数の前記第1の突出部の近傍において、前記第2の導体には、前記第1の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第2の突出部が形成

され、前記接続導体によって、第1の突出部及び前記第2の突出部が前記導体層と接続されている、

請求項7に記載の量子デバイス。

[請求項9]

超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され第1の突出部を有する第1の導体と超伝導材料で形成された第2の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、

前記レジストマスクが形成された基板に、第1の方向からの斜め蒸着によって、複数の前記第1の導体を積層し、

前記第1の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、

複数の前記第1の導体それぞれに、第2の方向からの斜め蒸着によって、前記第2の導体の少なくとも一部を積層し、これによって、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、

前記第2の導体に覆われていない前記第1の突出部と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続し、

前記第2の導体と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続する、

量子デバイスの製造方法。

[請求項10]

前記第1の突出部と前記導体層とに、超伝導材料で形成された接続導体を積層することによって、前記第1の突出部と前記導体層とを接続する、

請求項9に記載の量子デバイスの製造方法。

[請求項11]

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第1の側で、少なくとも前記第1の突出部と前記導体層とを前記接続導体によって接続し、

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第2の側で、少なくとも前記第2の導体と前記導体層とを前記接続導体によって接続する、

請求項10に記載の量子デバイスの製造方法。

[請求項12] 前記導体層に前記第1の導体を積層する際に、前記第1の側において、少なくとも1つの前記第1の突出部を形成し、

前記第1の導体に前記第2の導体を積層する際に、

前記第1の導体の一部と前記第2の導体の一部とが重なるように前記第2の導体の斜め蒸着を行うことによって、前記ジョセフソン接合を形成し、

前記第2の側において、前記第2の導体に前記第1の導体よりも突出した少なくとも1つの第2の突出部を形成し、

前記接続導体によって前記第1の突出部と前記導体層とを接続し、前記接続導体によって前記第2の突出部と前記導体層とを接続する、

請求項11に記載の量子デバイスの製造方法。

[請求項13] 前記第1の導体を積層する際に、前記第1の側に複数の前記第1の突出部を形成し、

前記第2の導体を積層する際に、前記第2の側に複数の前記第2の突出部を形成し、

前記接続導体によって、複数の前記第1の突出部を前記導体層と接続し、

前記接続導体によって、複数の前記第2の突出部を前記導体層と接続する、

請求項12に記載の量子デバイスの製造方法。

[請求項14] 前記第1の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第2の導体が前記導体層と前記接続導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第1の突出部と前記導体層とを接続し、

前記第2の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第1の導体が前記導体層と直接又は導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第2の突出部と前記導体層とを接続する、

請求項12又は13に記載の量子デバイスの製造方法。

[請求項15] 前記第1の導体に形成された前記第1の突出部の近傍で、前記第2の導体と前記導体層とを前記接続導体によって接続する、

請求項10に記載の量子デバイスの製造方法。

[請求項16] 前記第2の導体を積層する際に、複数の前記第1の突出部の近傍において、前記第2の導体に、前記第1の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第2の突出部を形成し、

前記接続導体によって、第1の突出部及び前記第2の突出部を前記導体層と接続する、

請求項15に記載の量子デバイスの製造方法。

[図1]

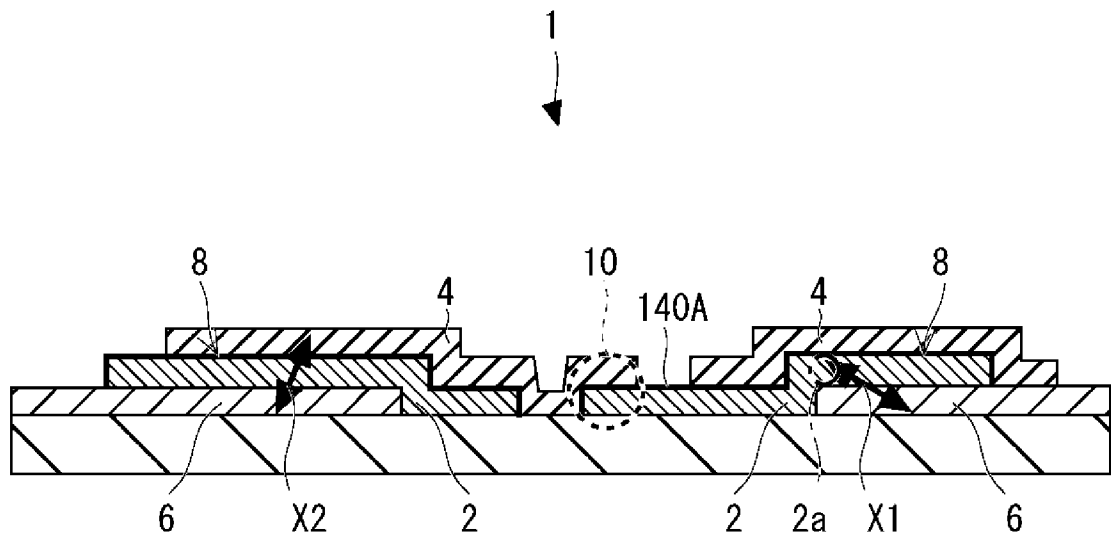


Fig. 1

[図2]

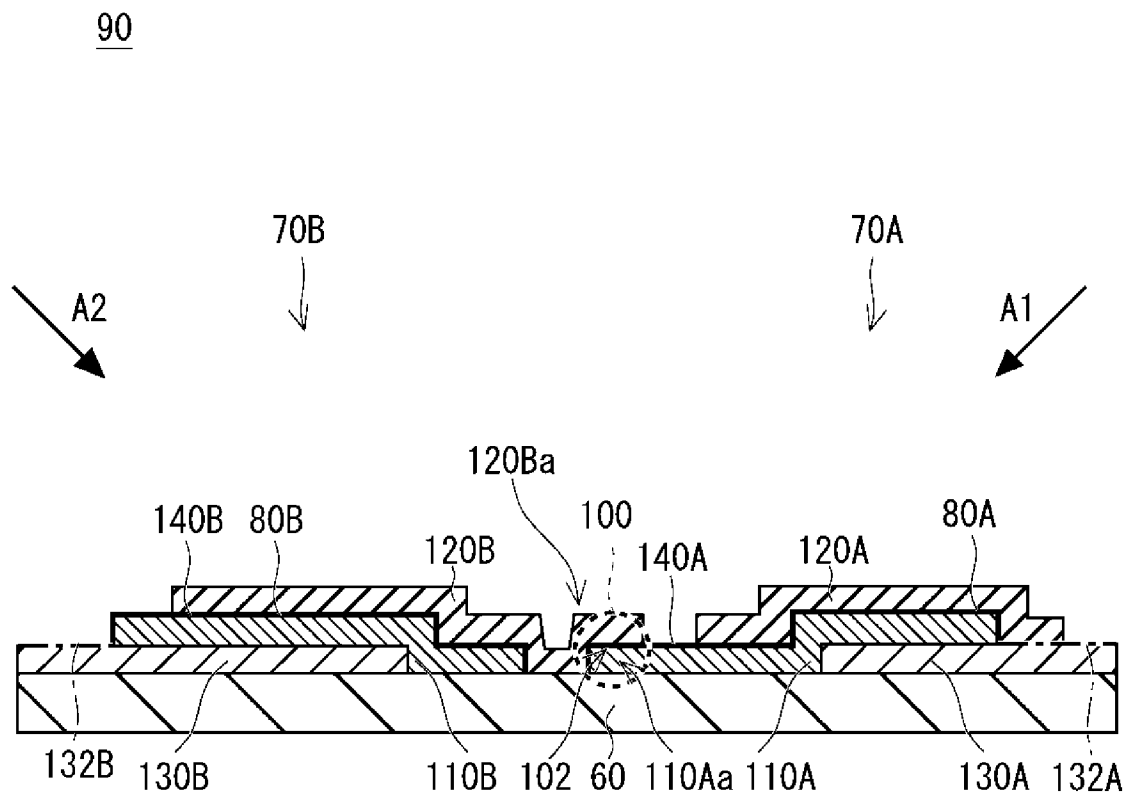


Fig. 2

[図3]

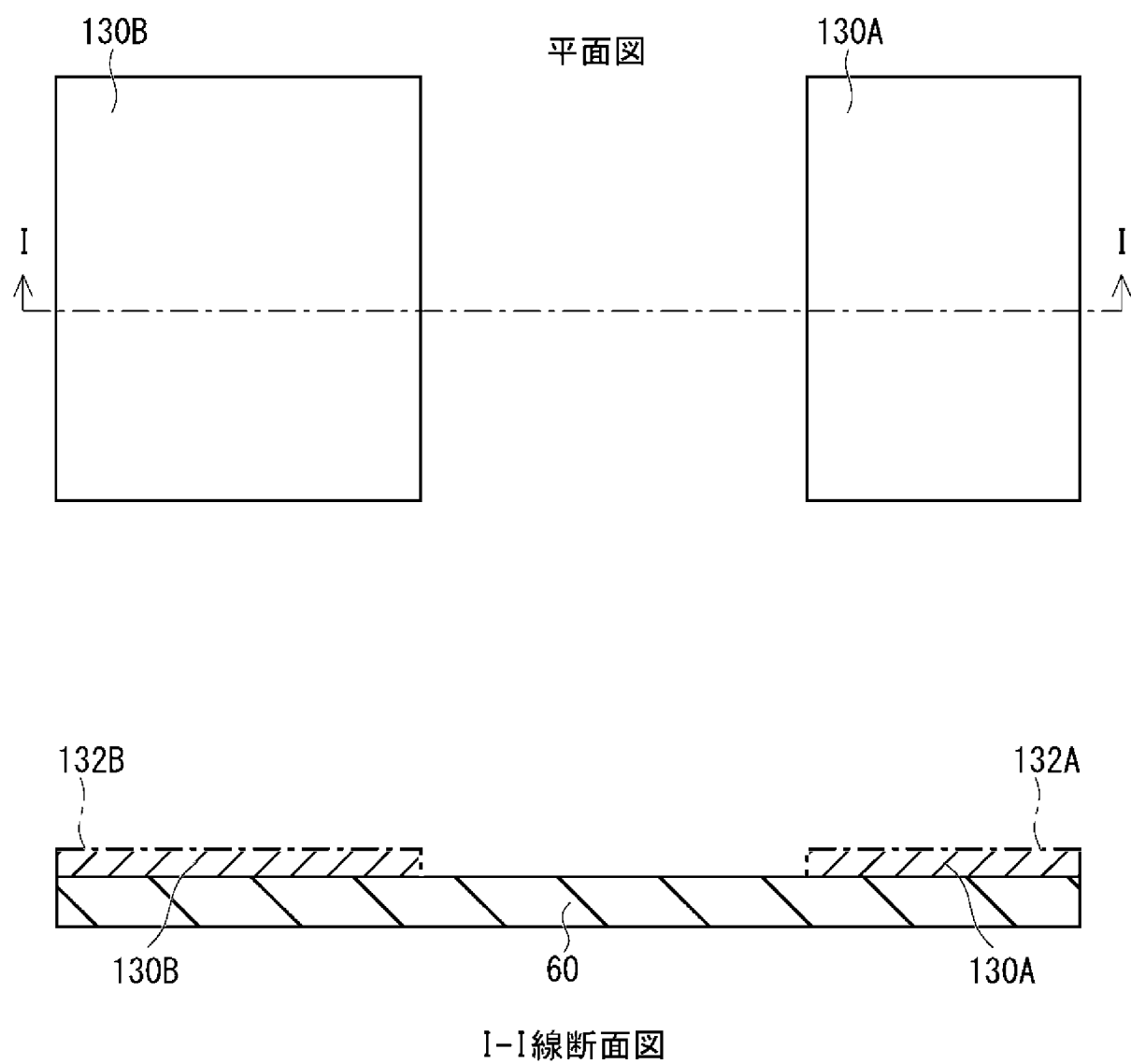


Fig. 3

[図4]

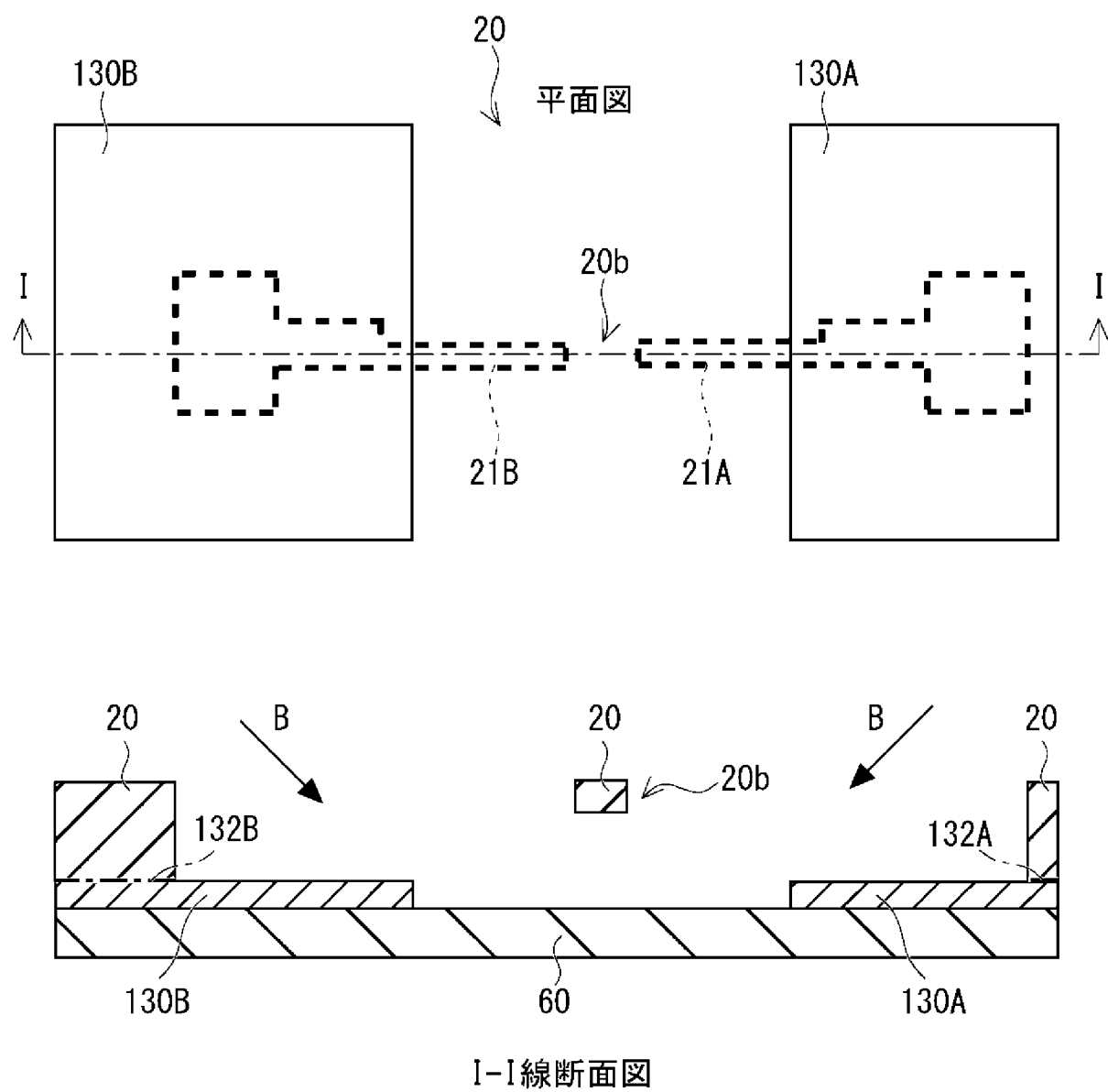


Fig. 4

[図5]

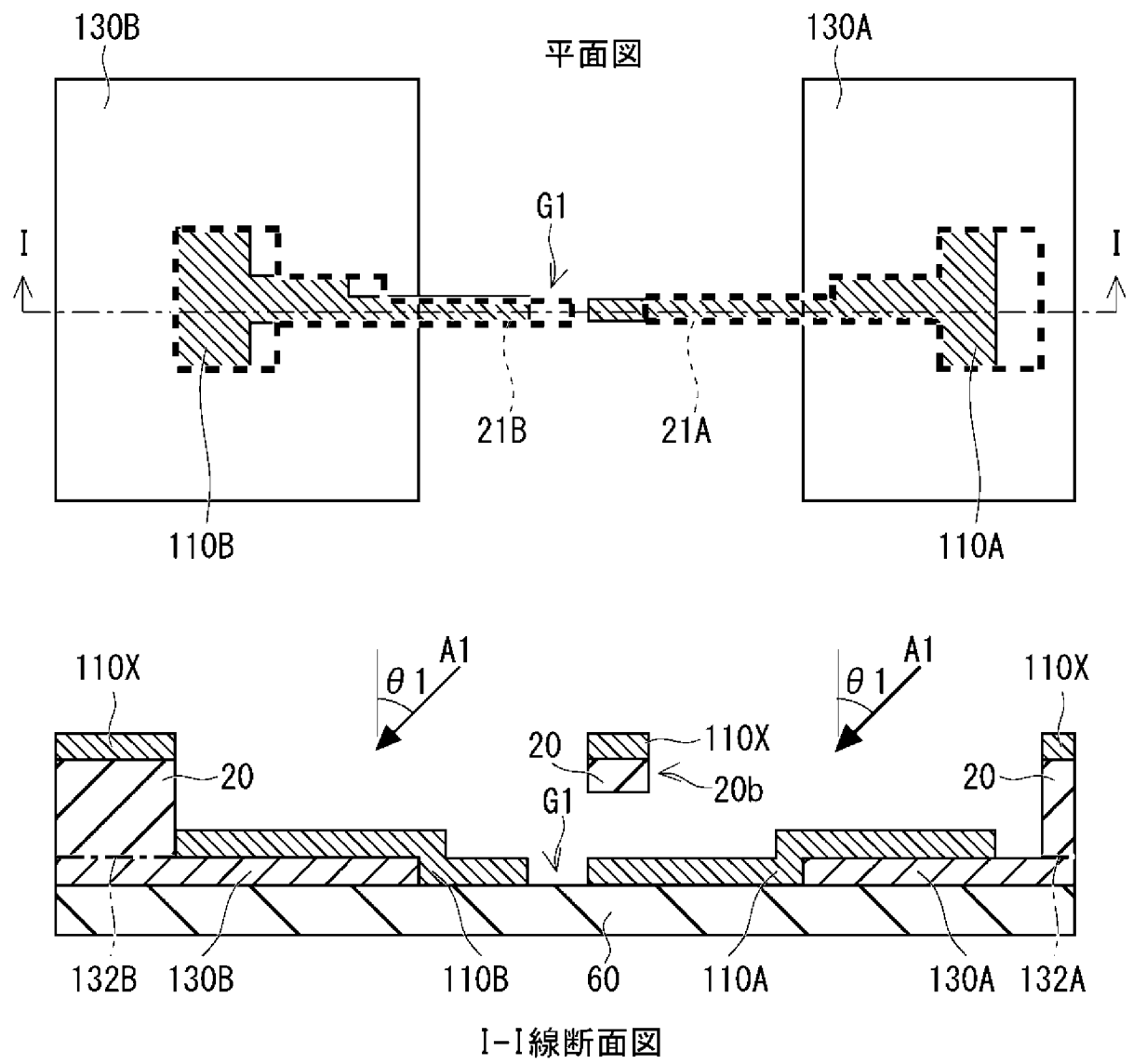


Fig. 5

[図6]

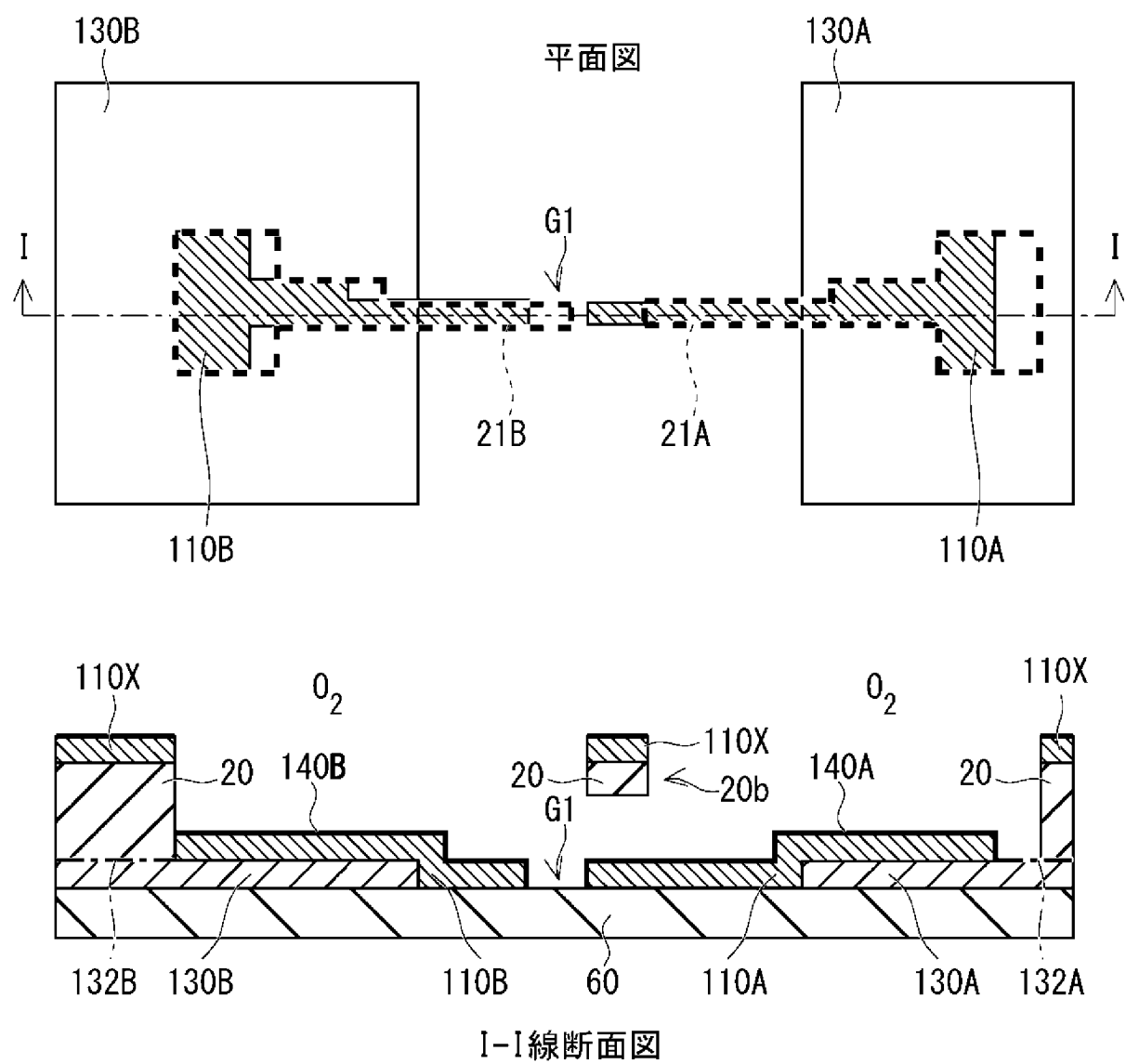


Fig. 6

[図7]

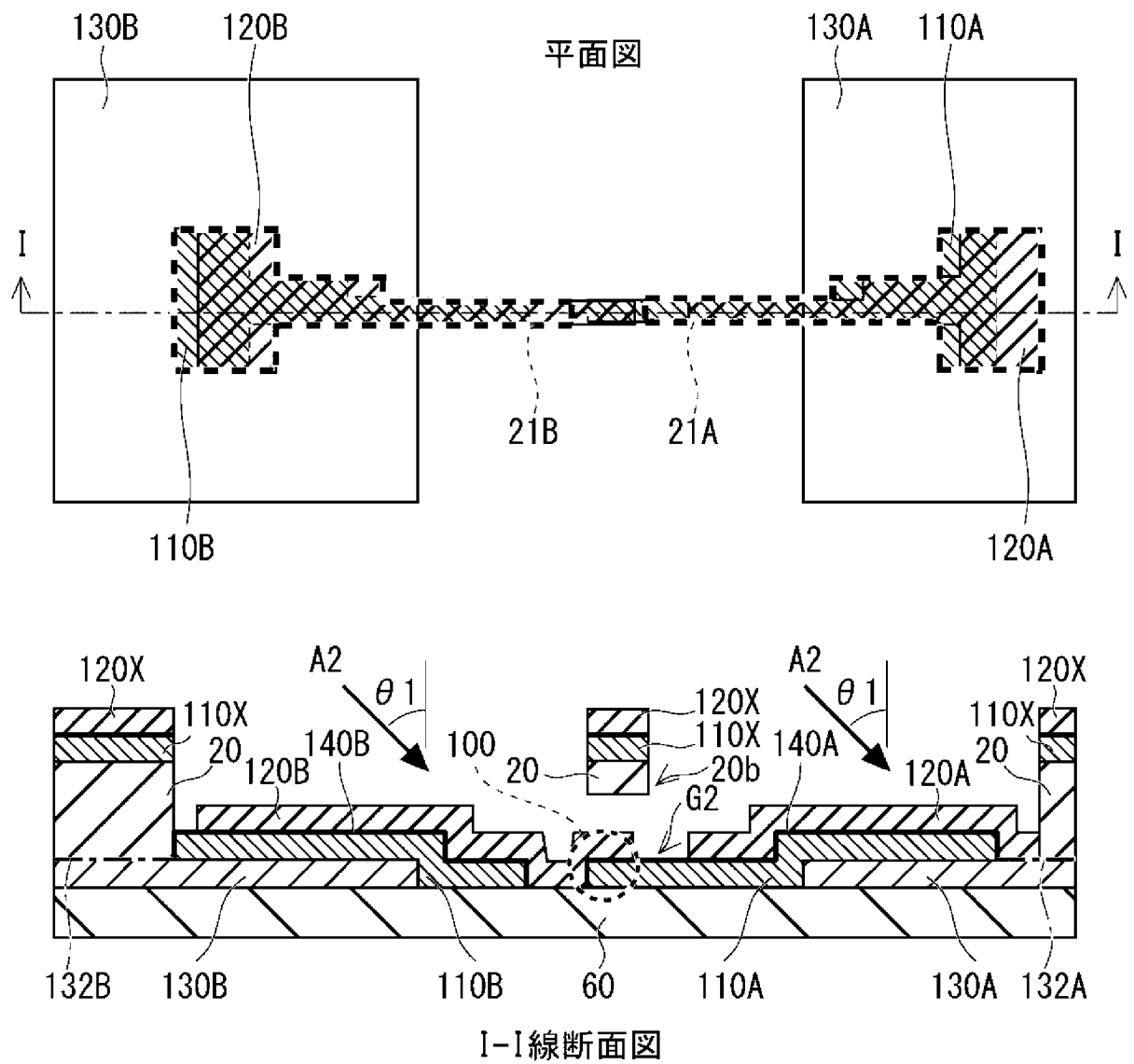


Fig. 7

[図8]

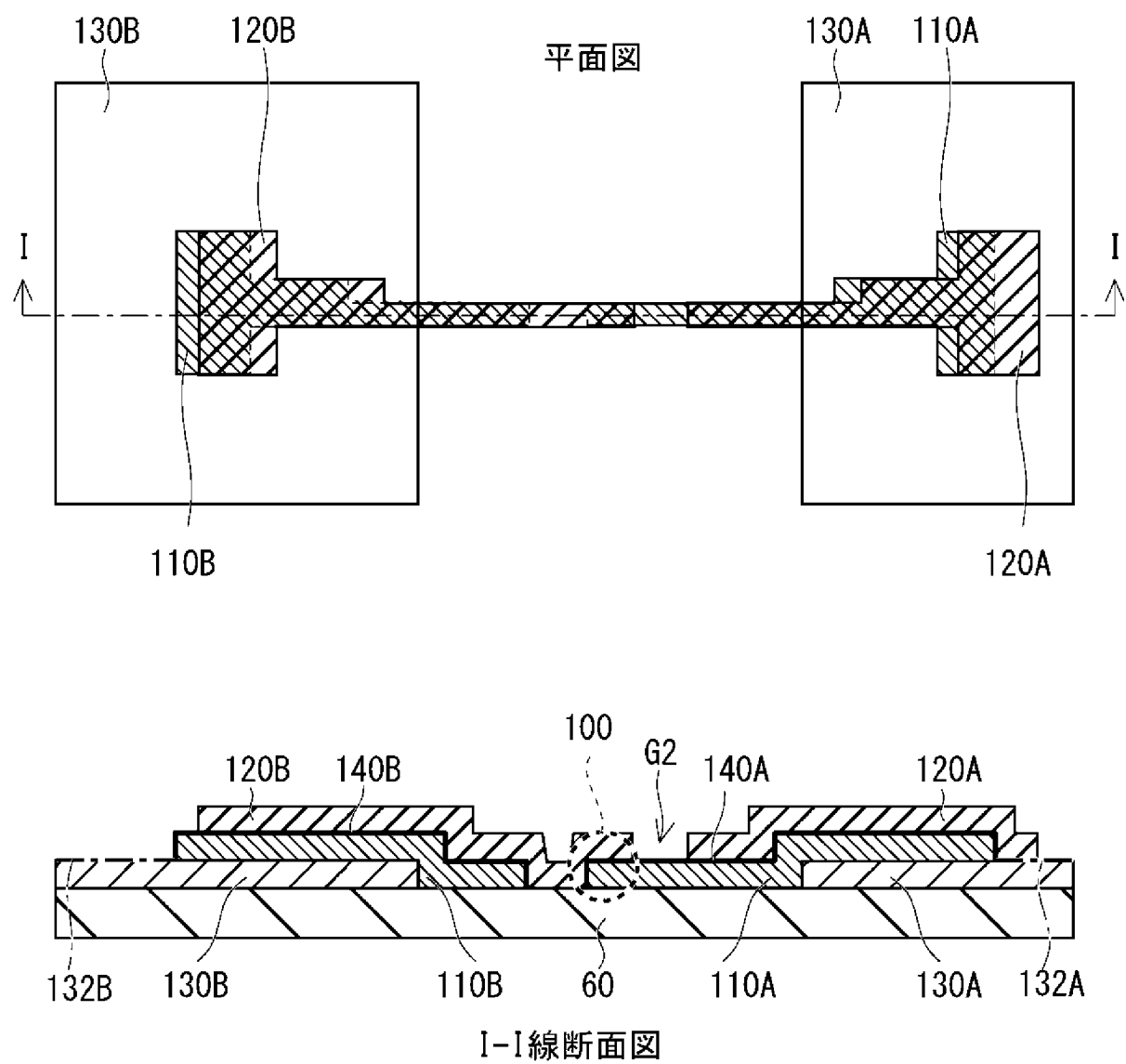


Fig. 8

[図9]

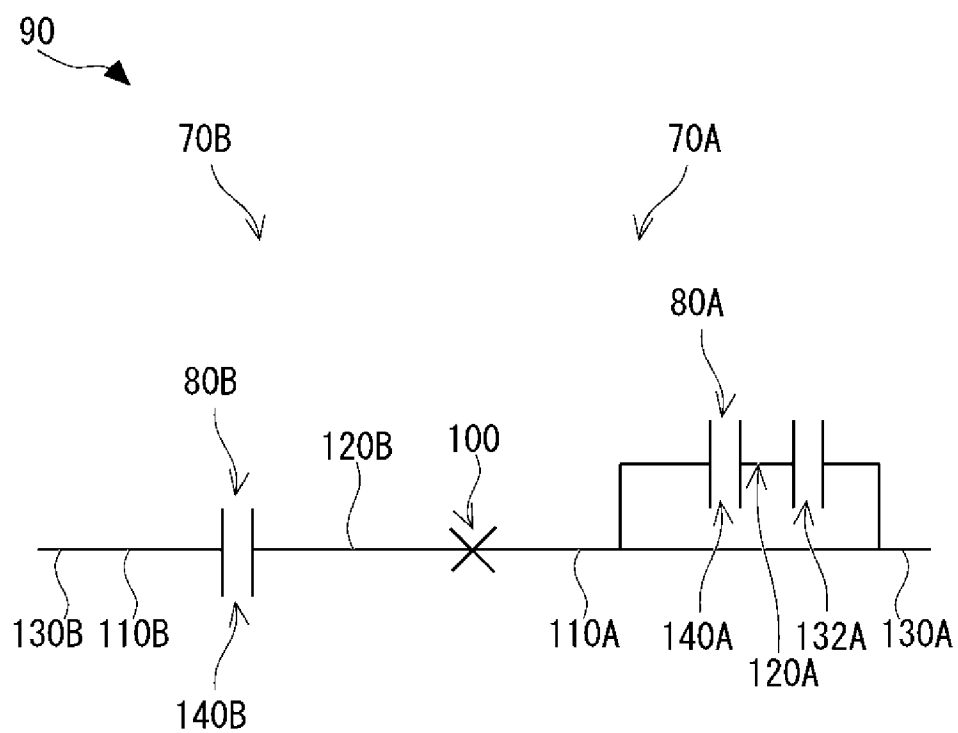


Fig. 9

[図10]

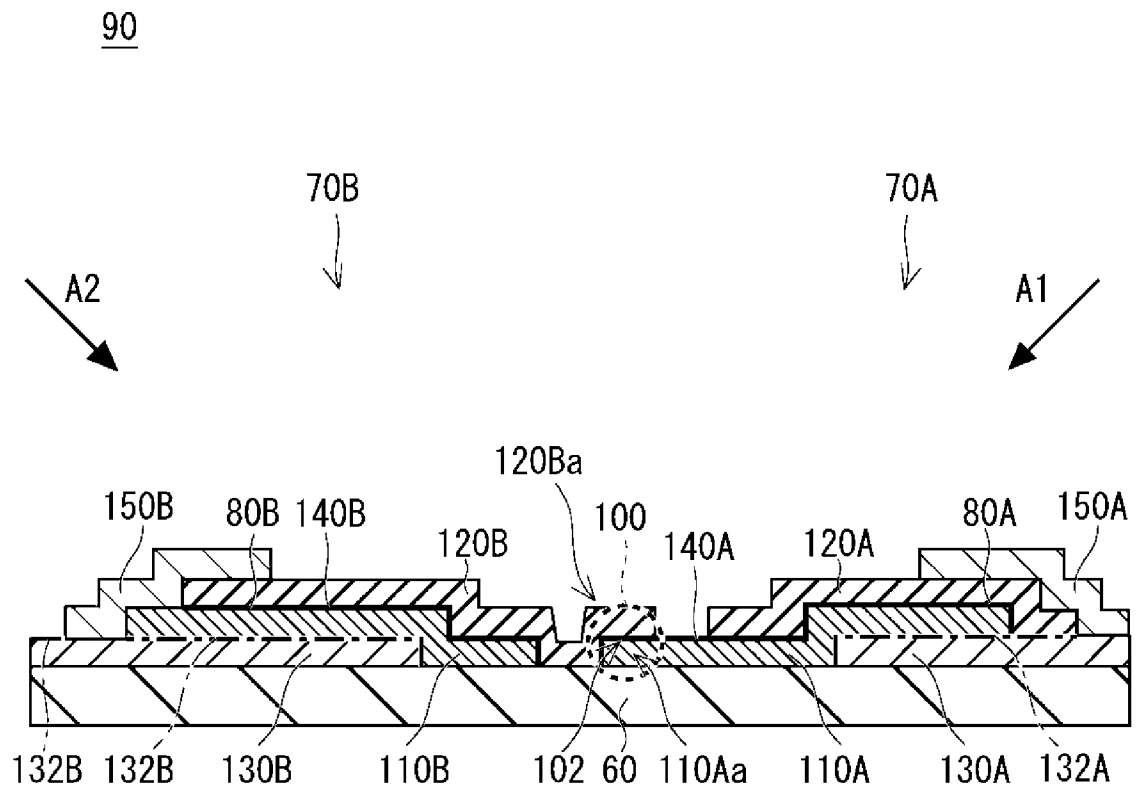


Fig. 10

[図11]

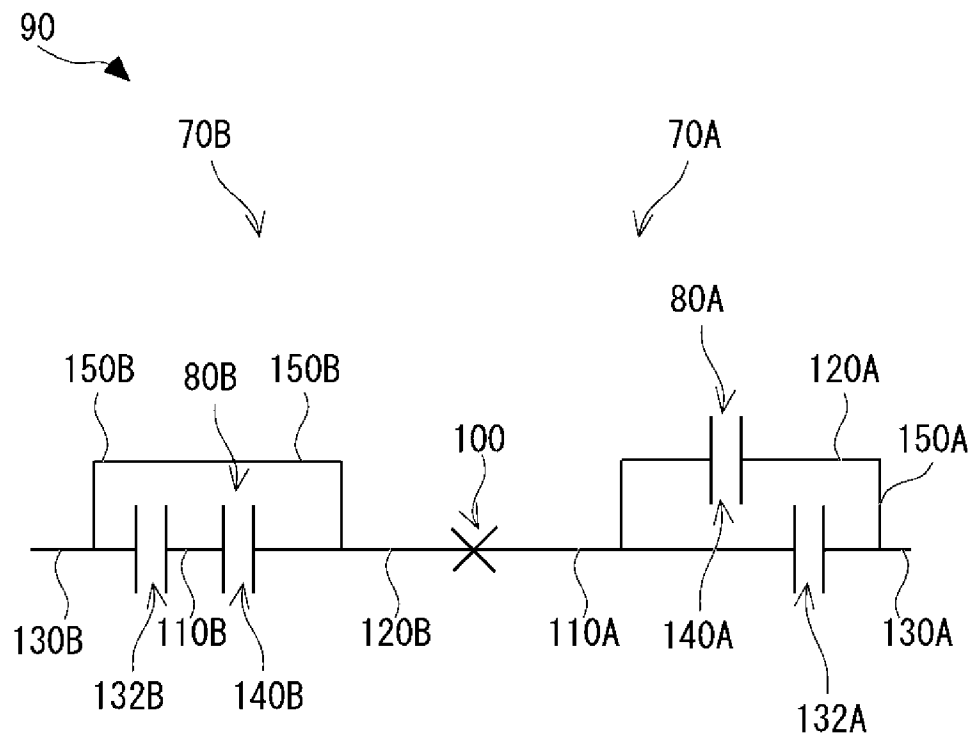


Fig. 11

[図14]

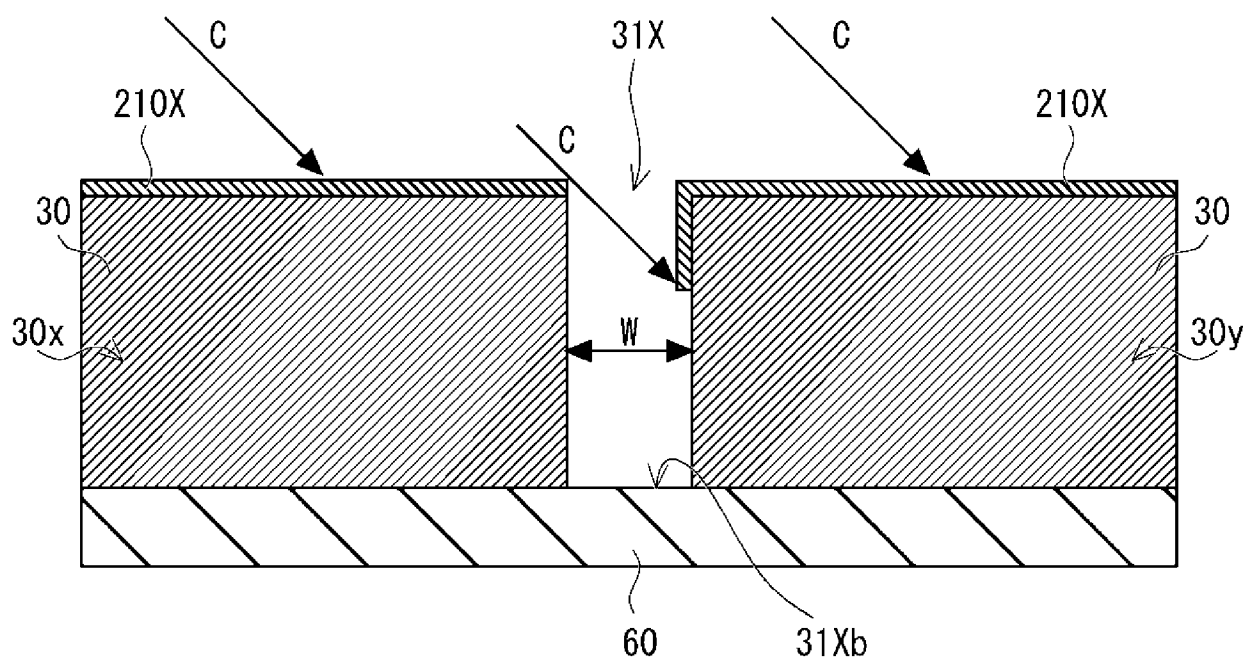


Fig. 14

[図15]

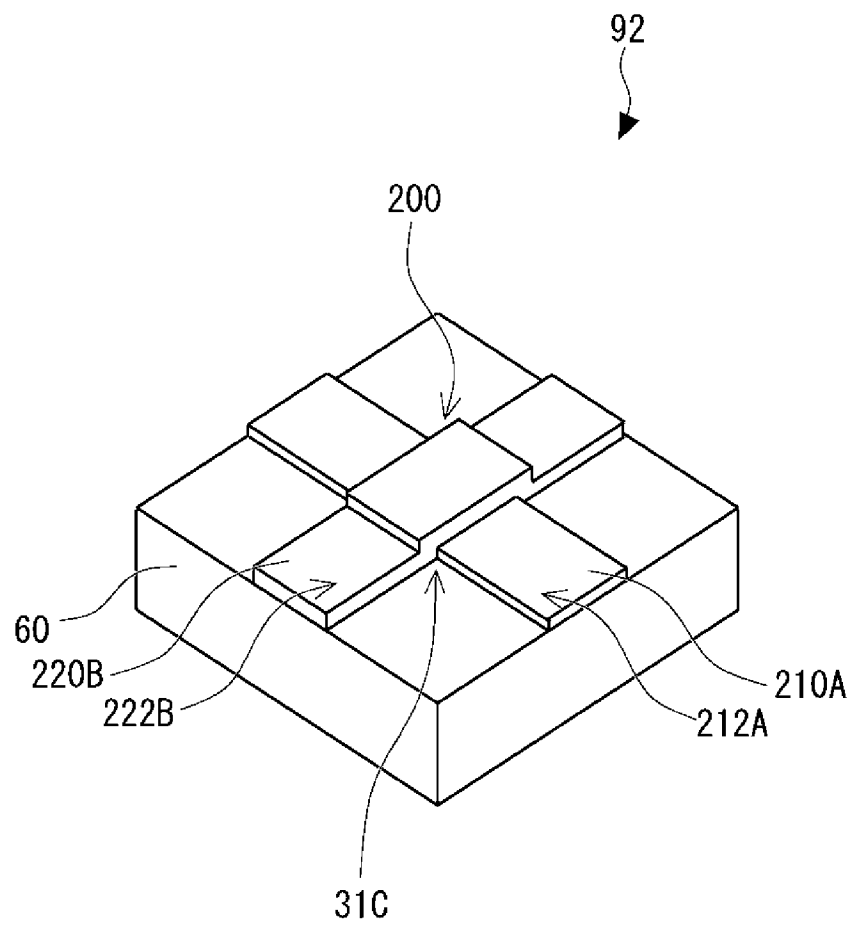


Fig. 15

[図16]

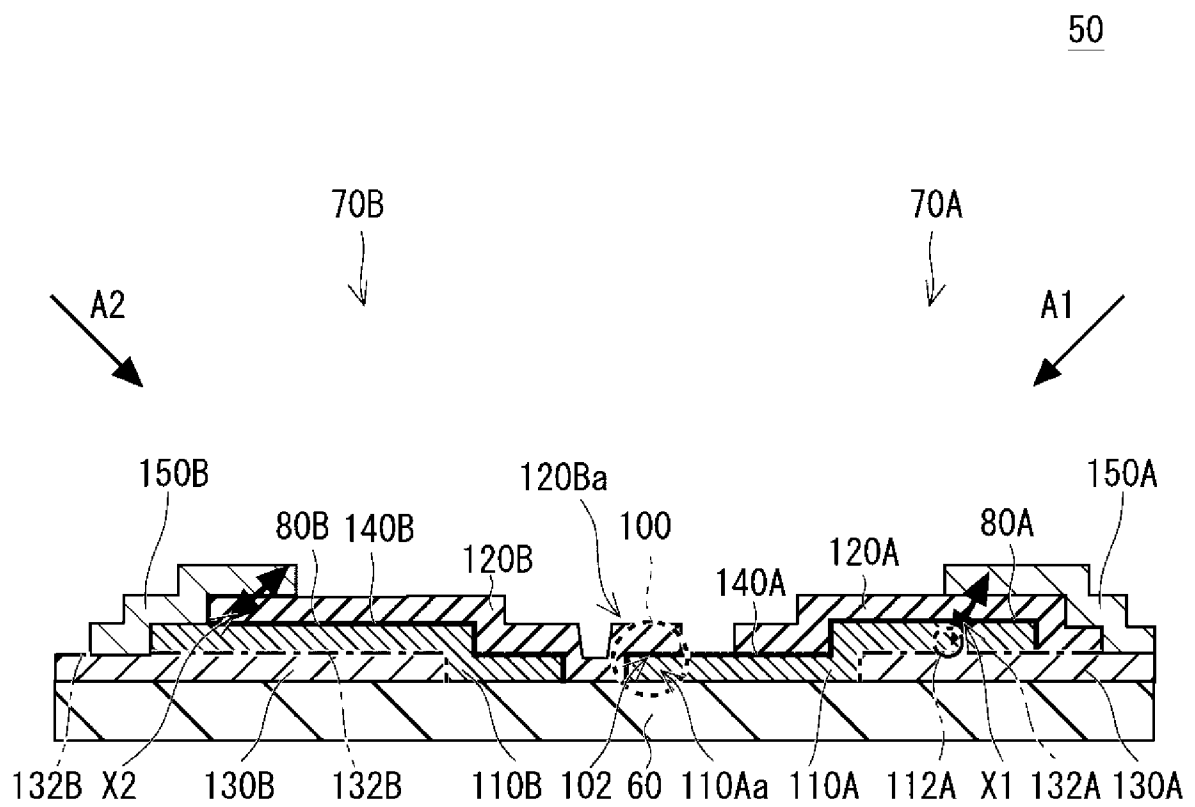


Fig. 16

[図17]

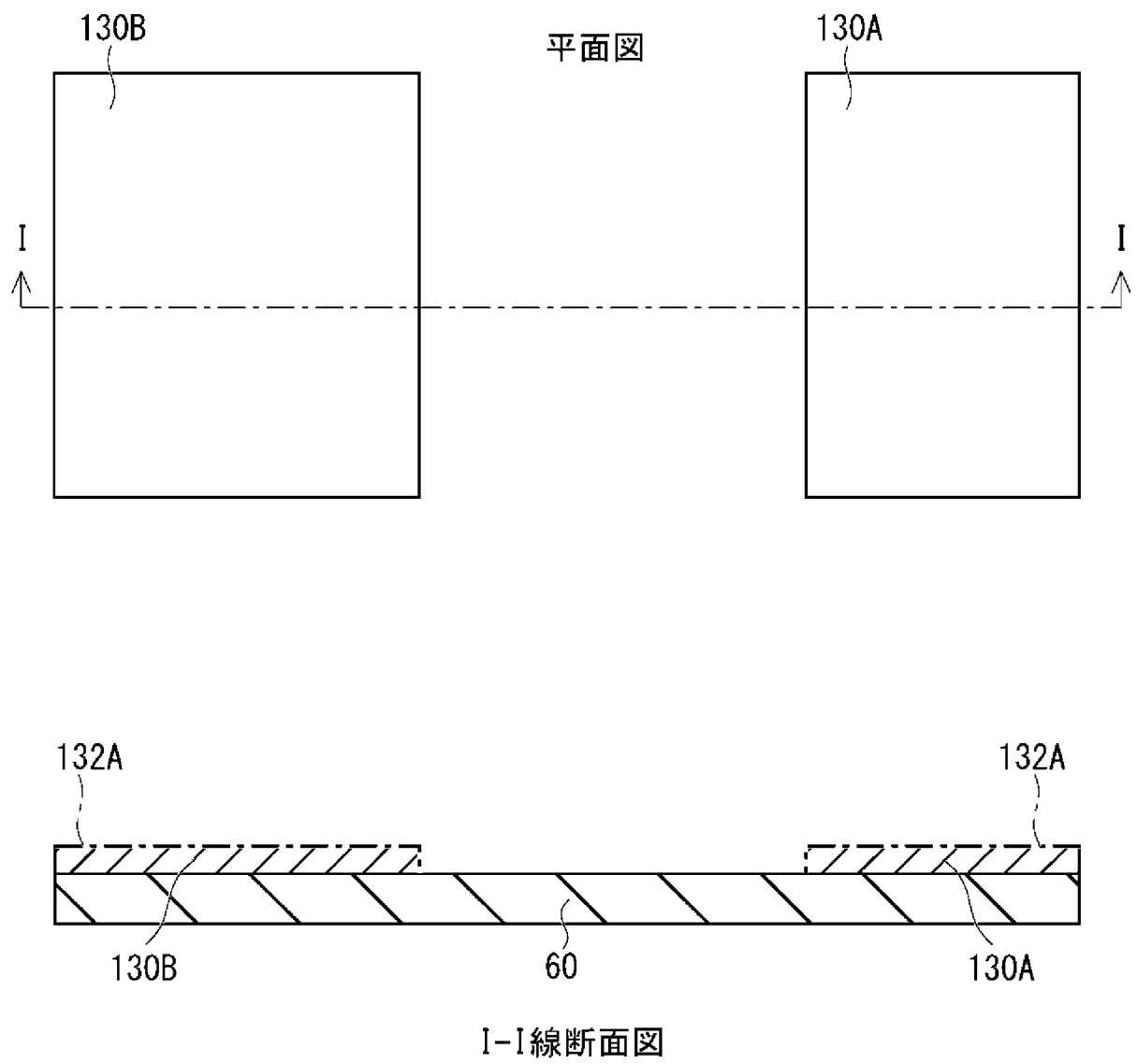


Fig. 17

[図18]

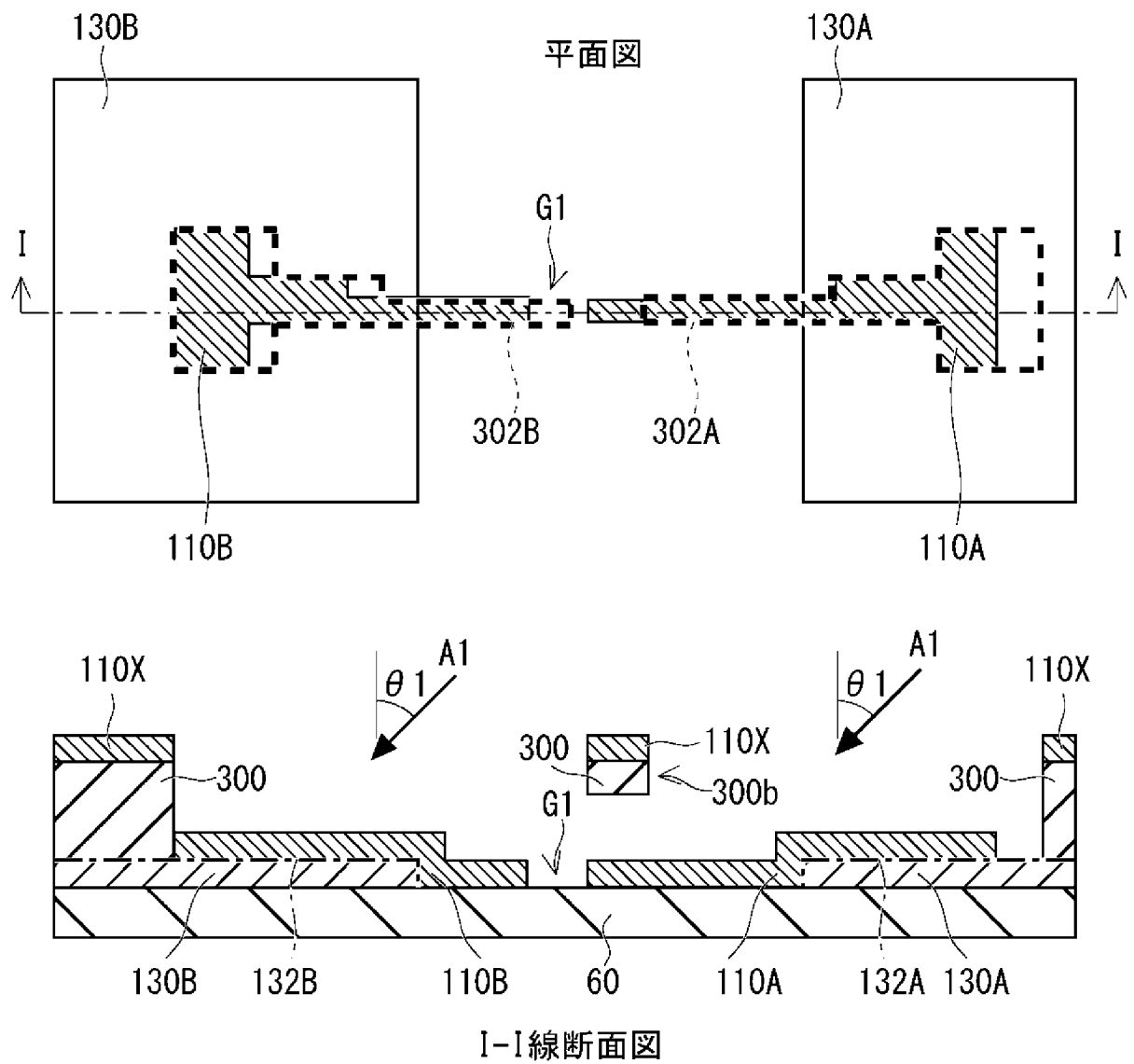


Fig. 18

[図19]

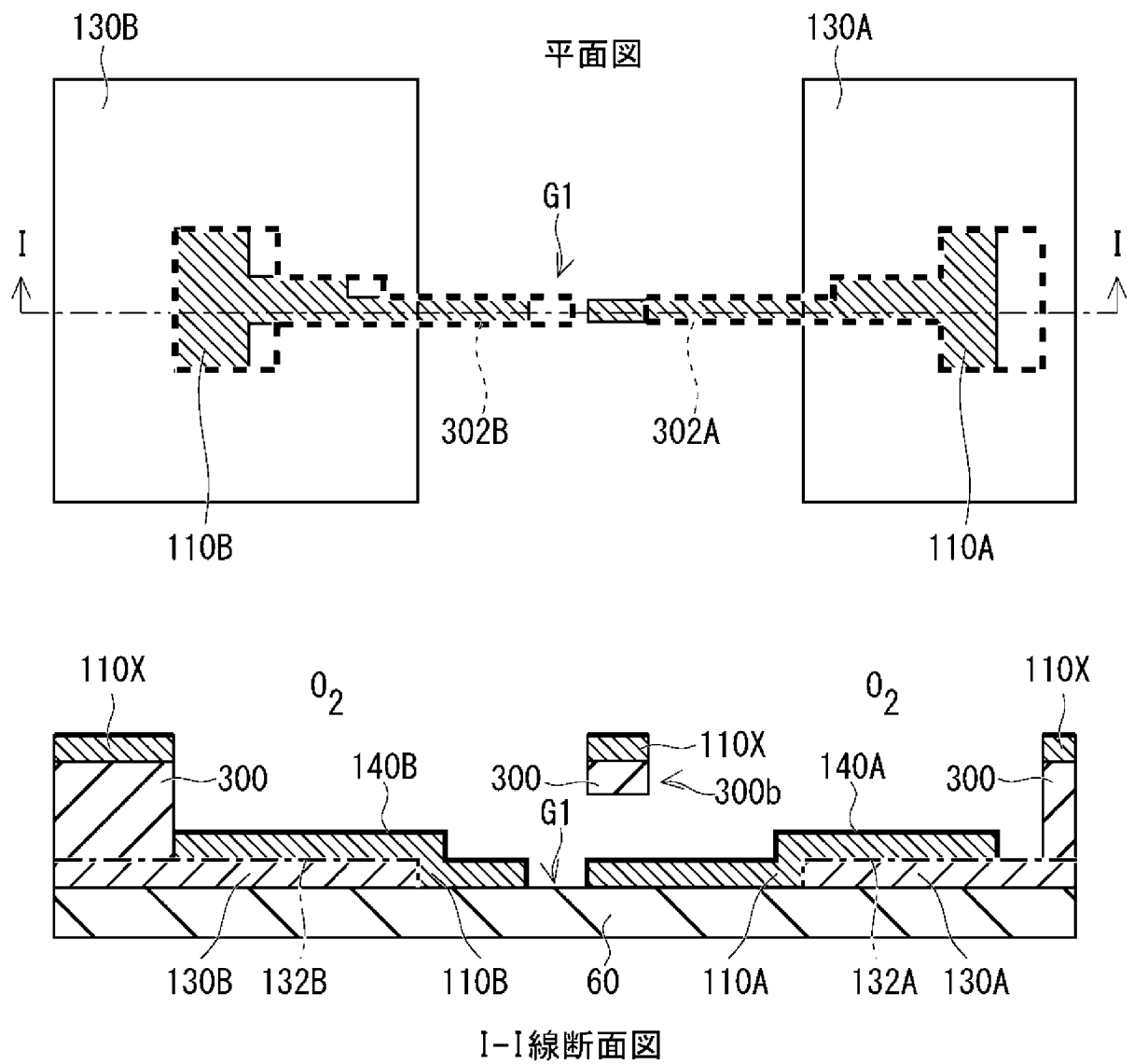


Fig. 19

[図21]

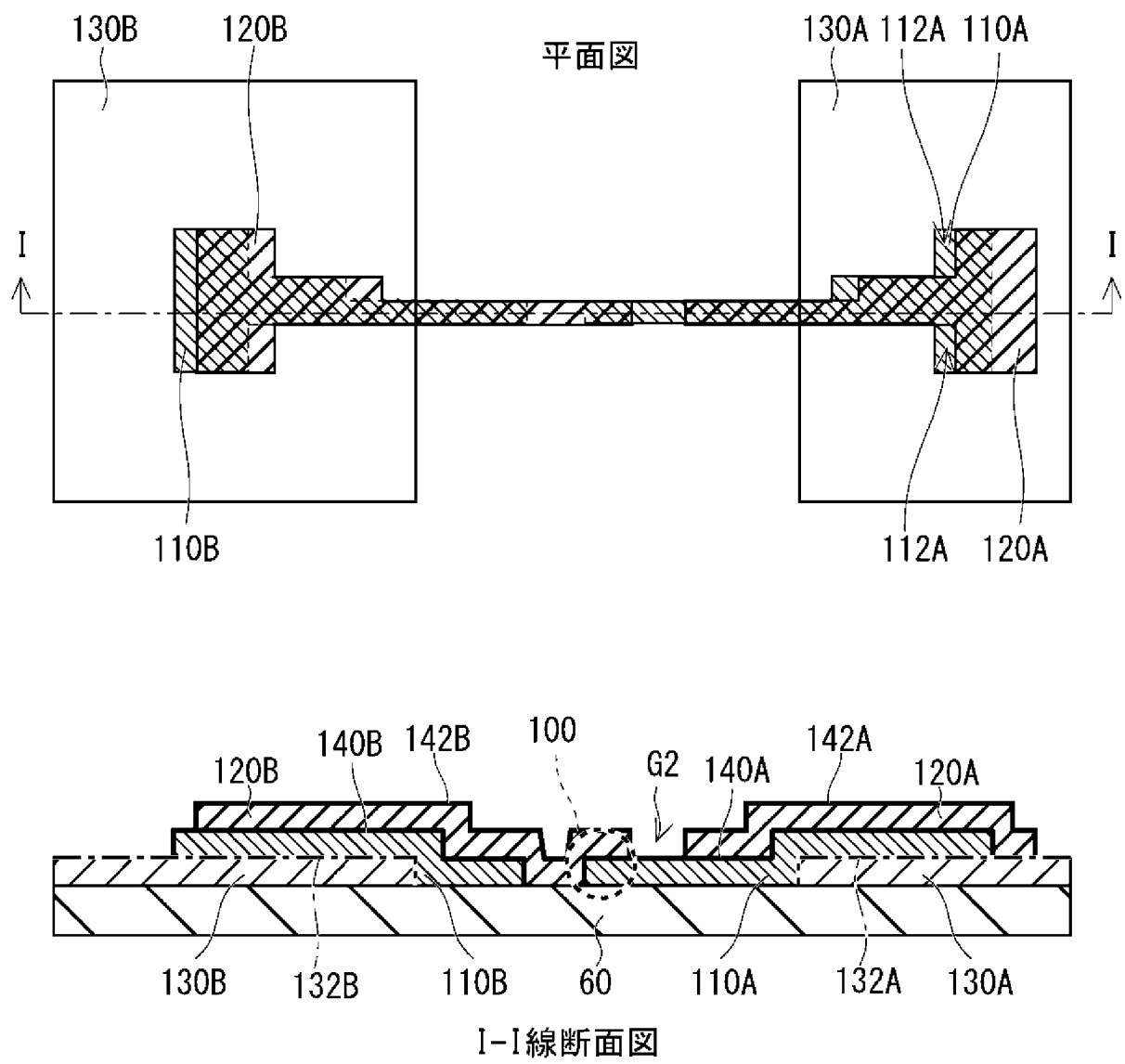


Fig. 21

[図22]

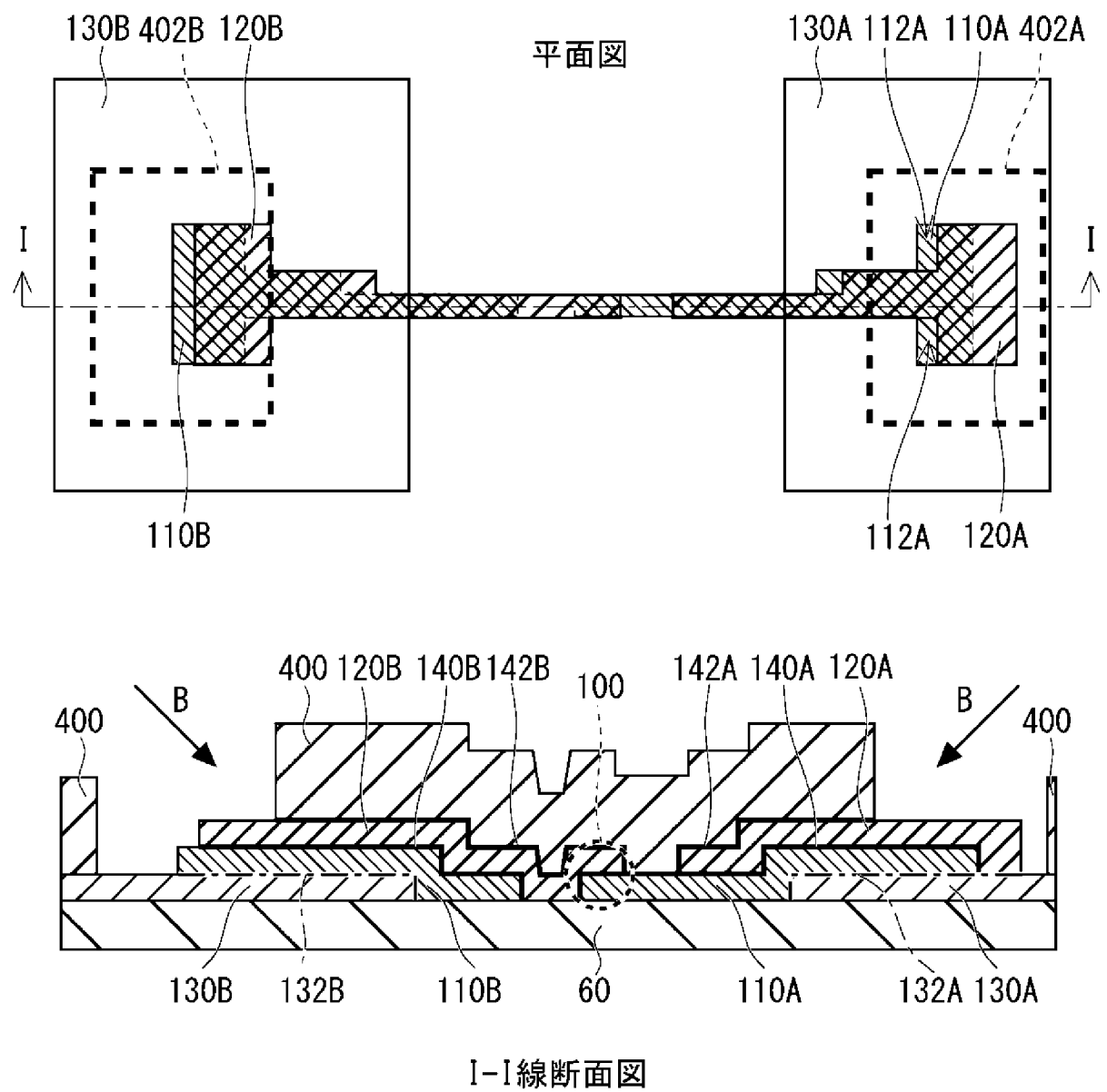


Fig. 22

[図23]

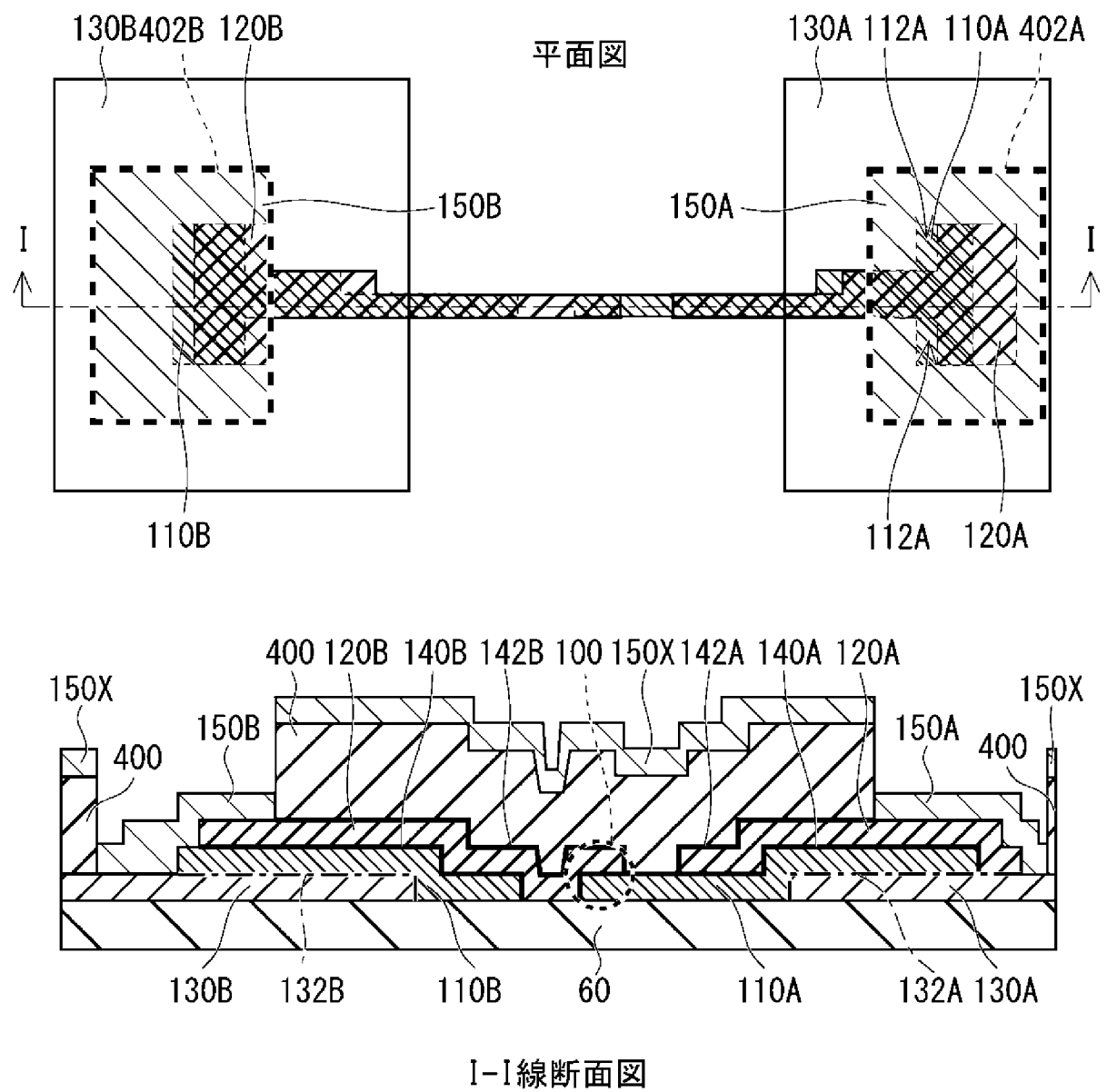


Fig. 23

[図24]

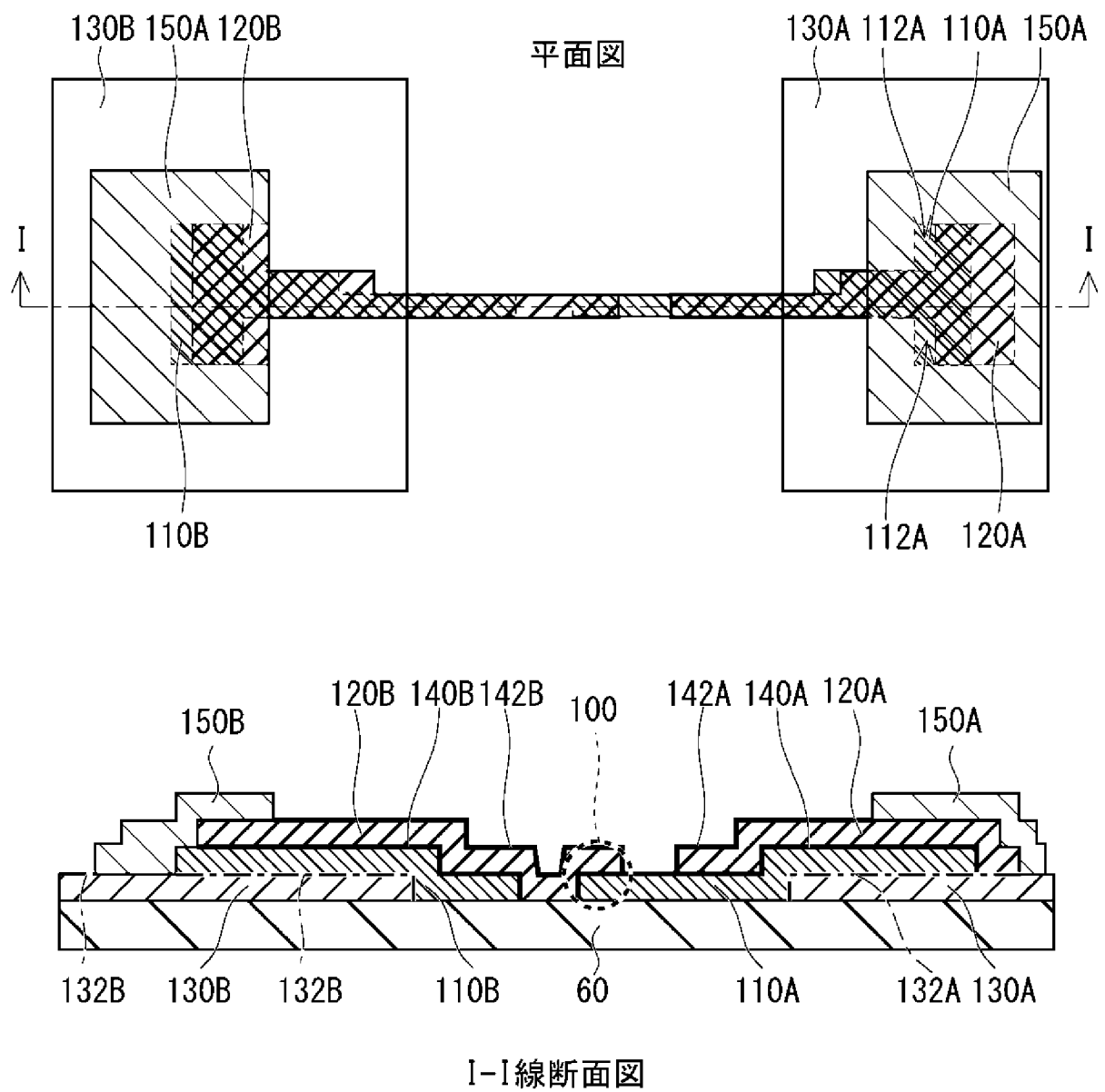


Fig. 24

[図25]

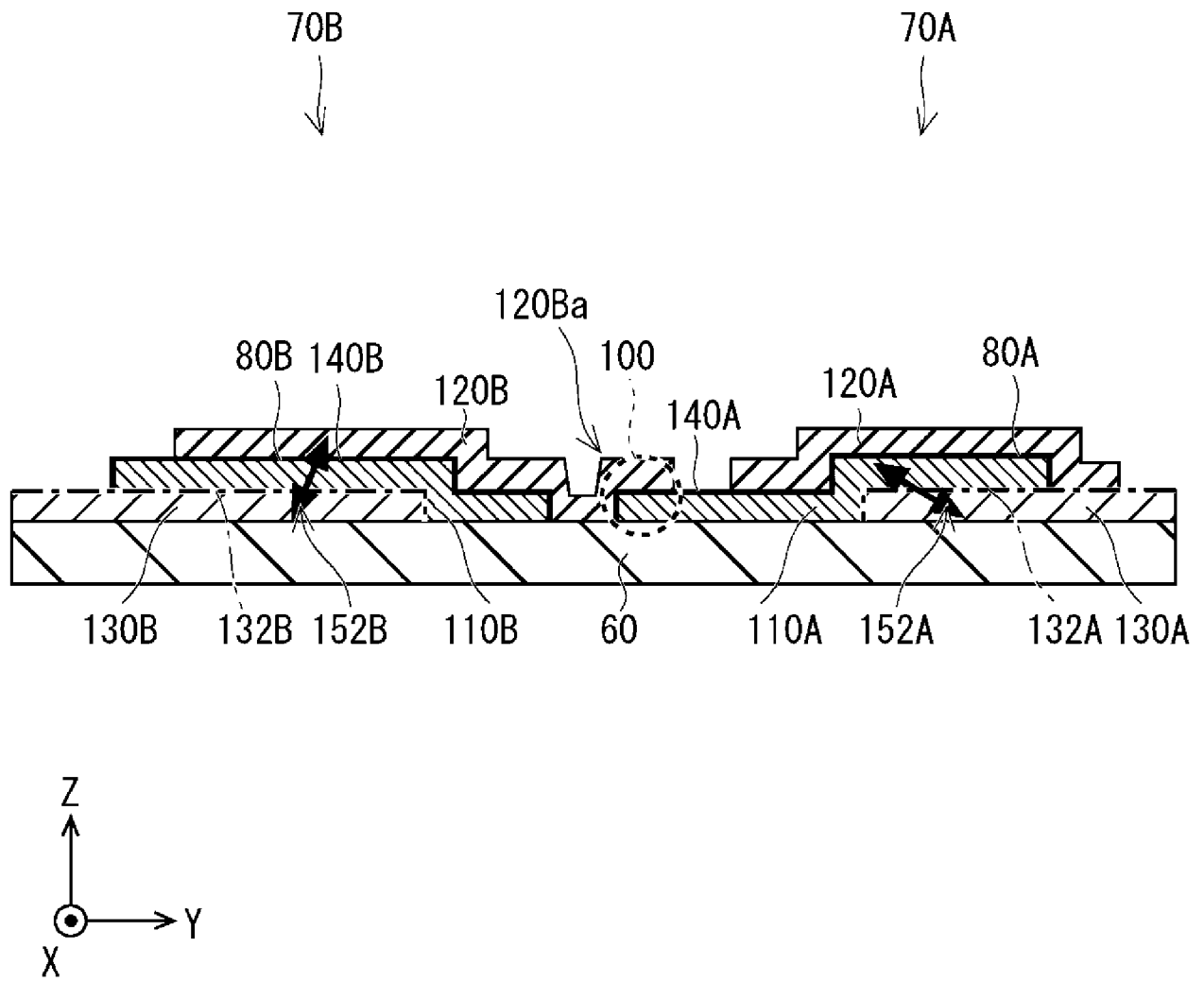
50

Fig. 25

[図26]

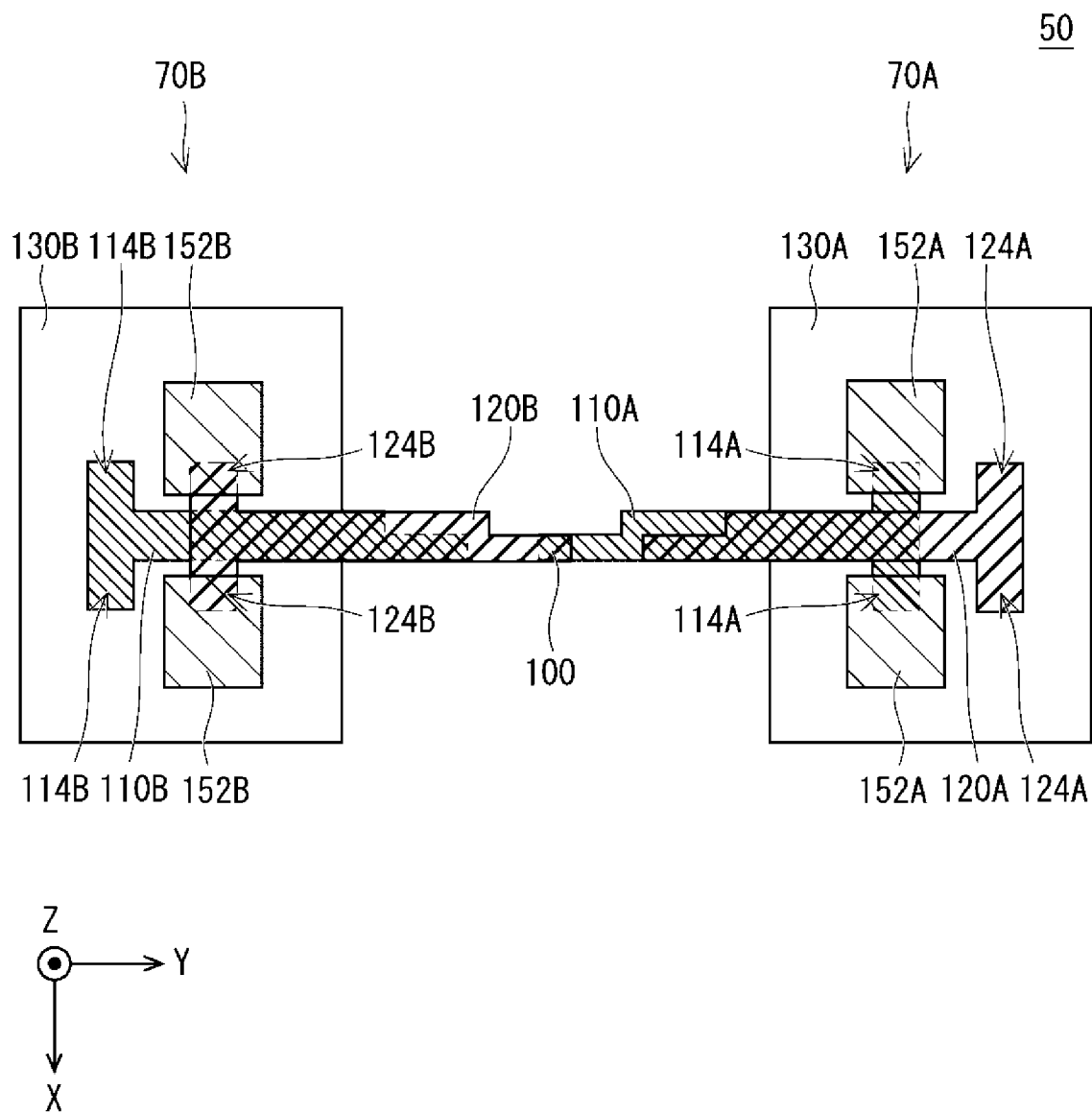


Fig. 26

[図27]

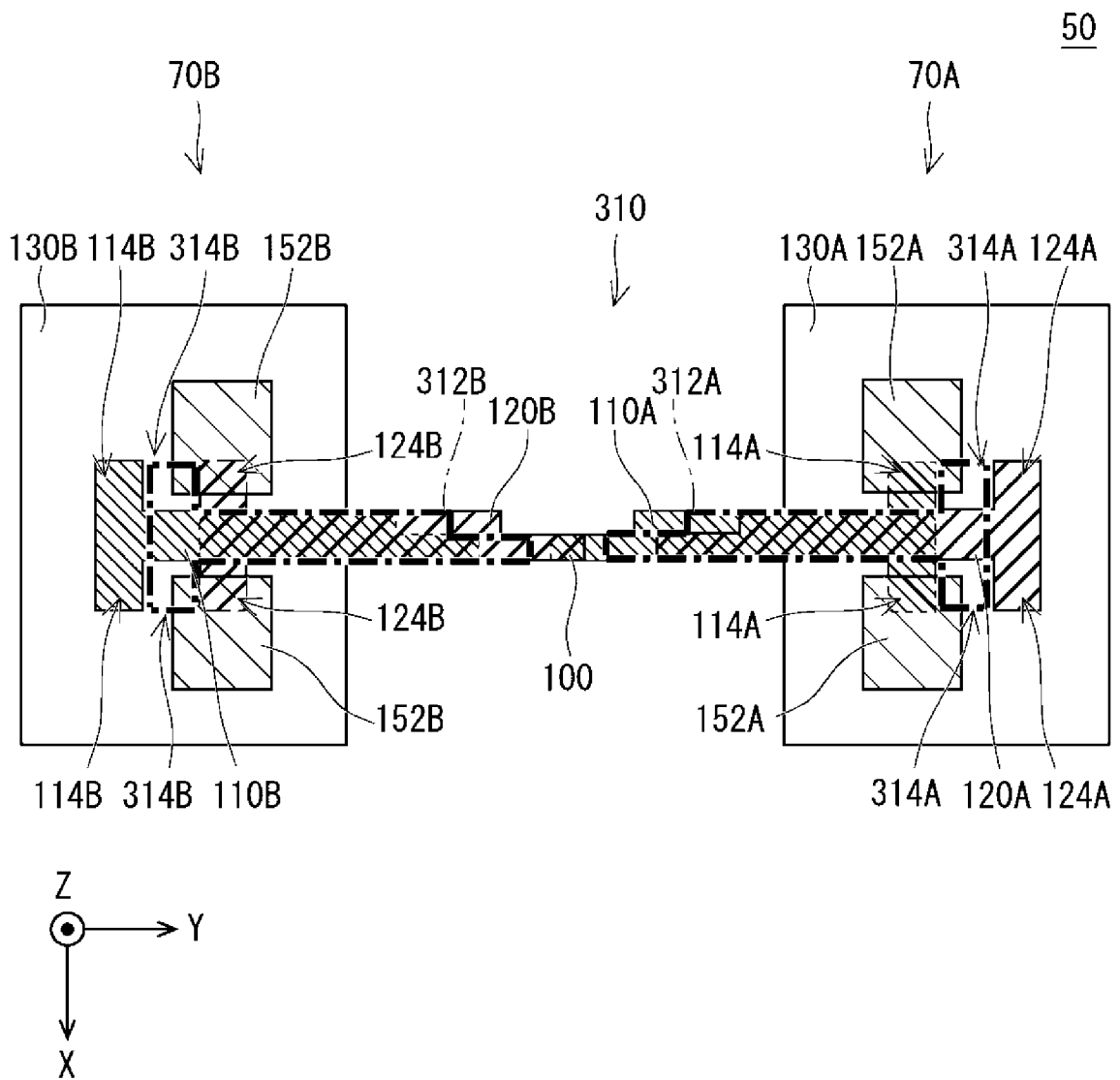


Fig. 27

[図28]

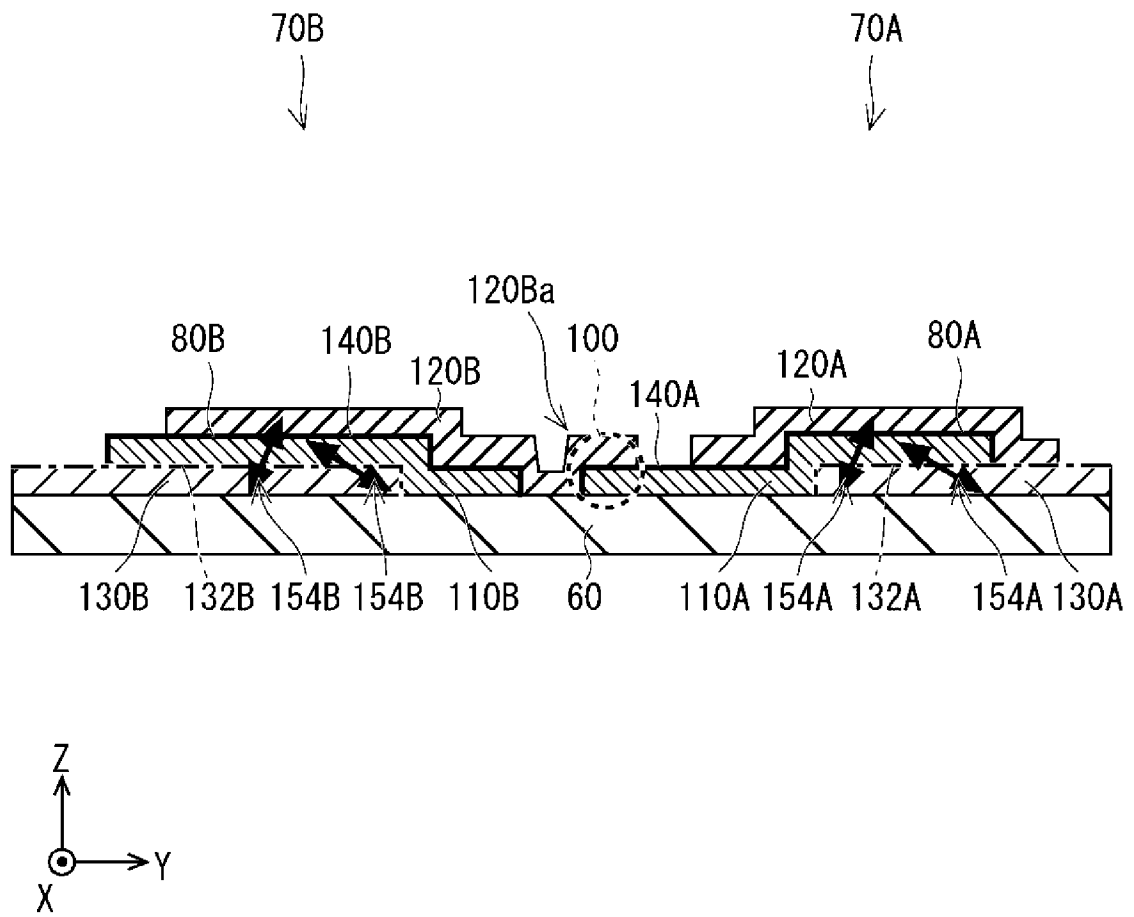
50

Fig. 28

[図29]

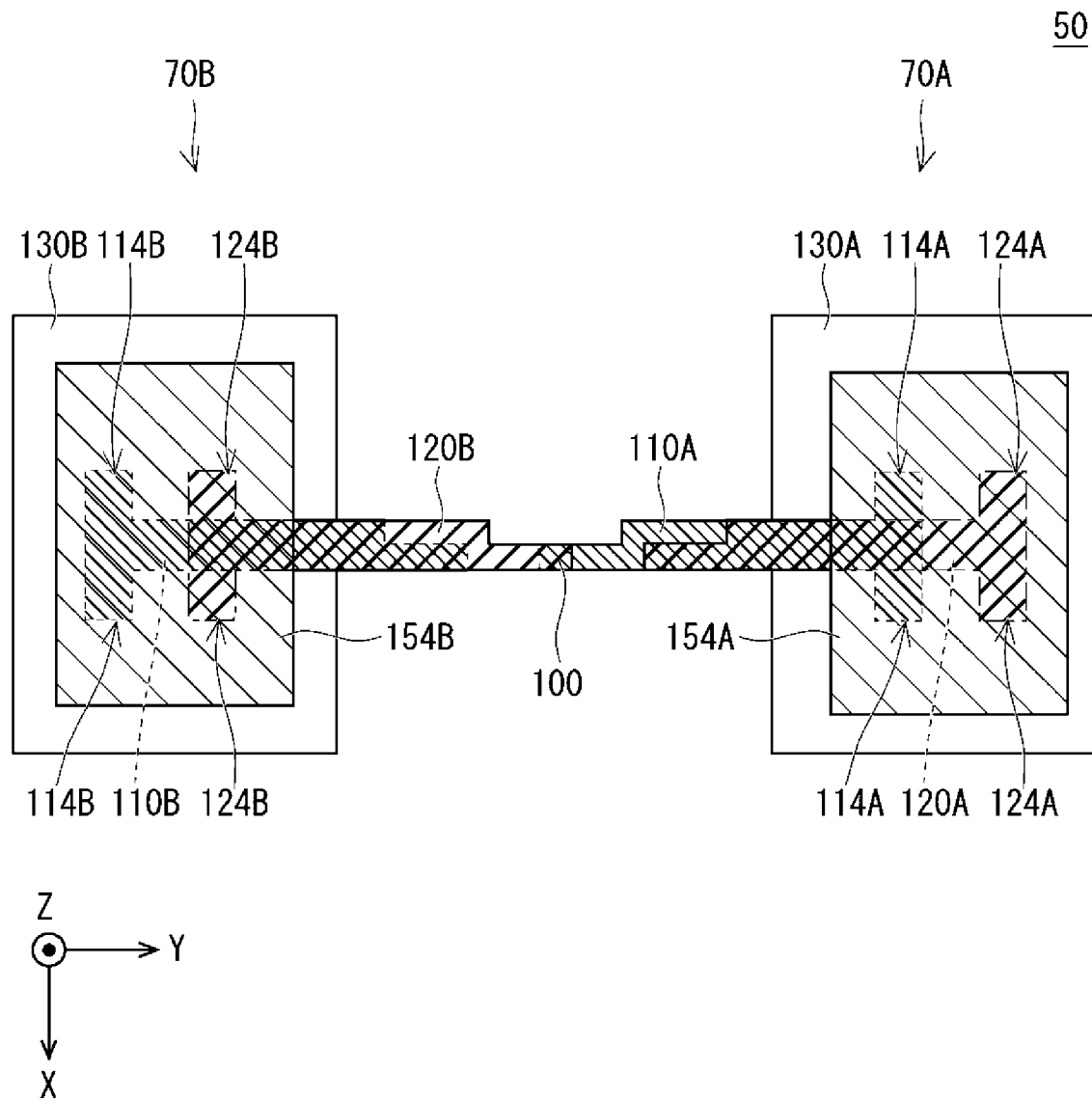


Fig. 29

[図30]

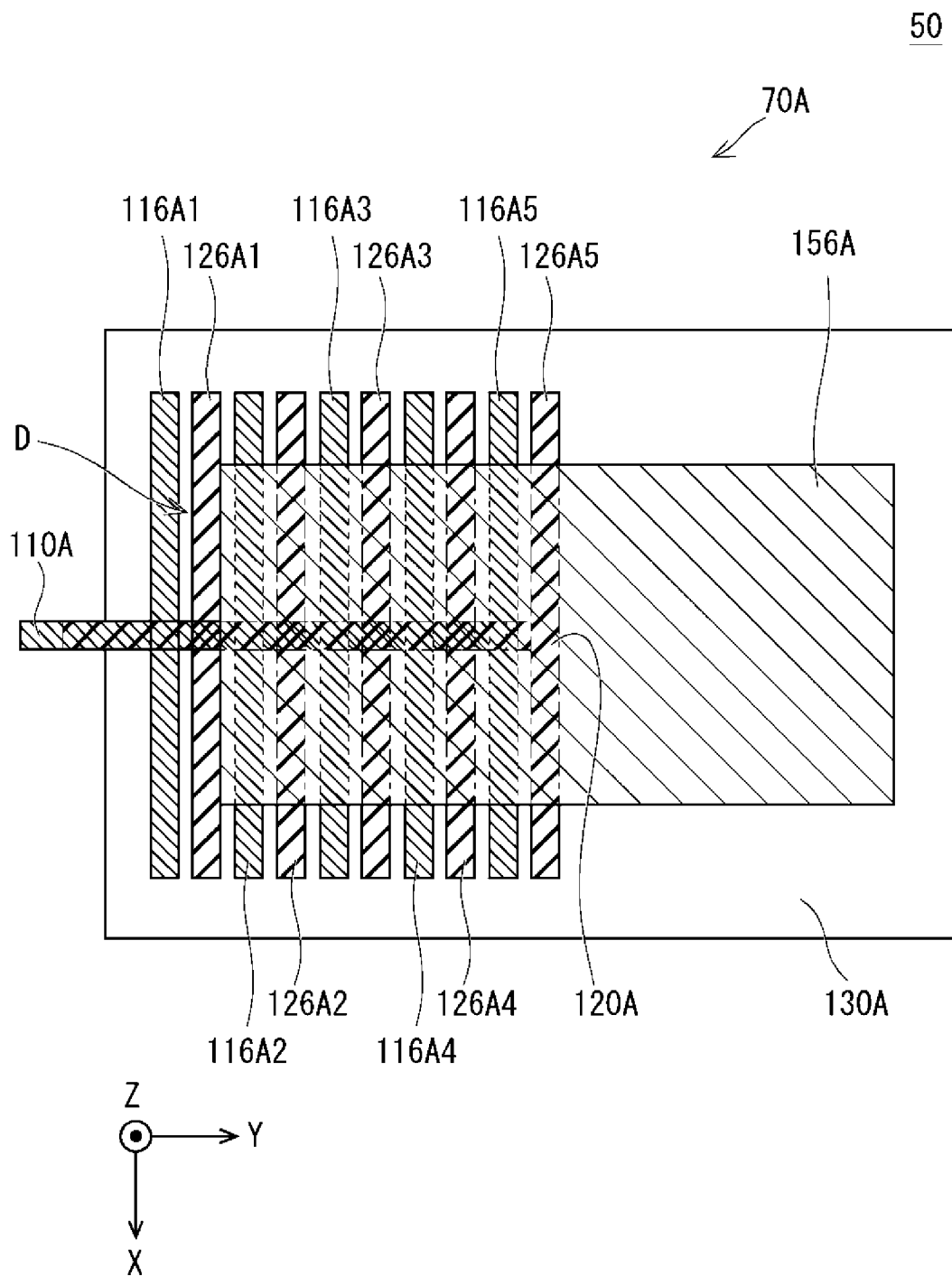


Fig. 30

[図31]

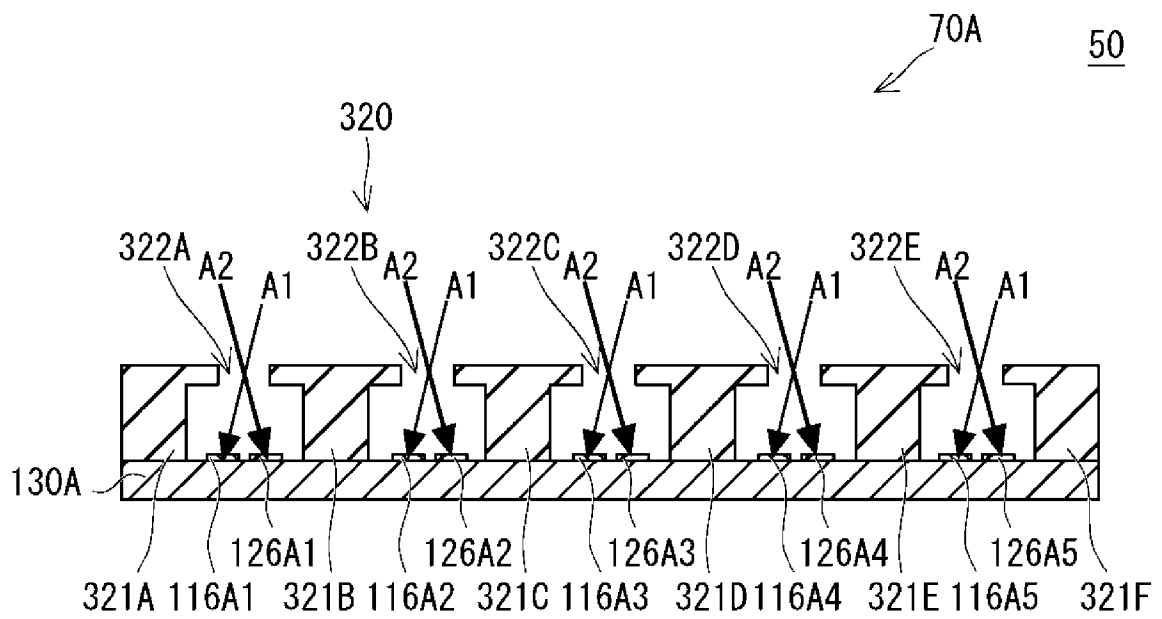


Fig. 31

[図32]

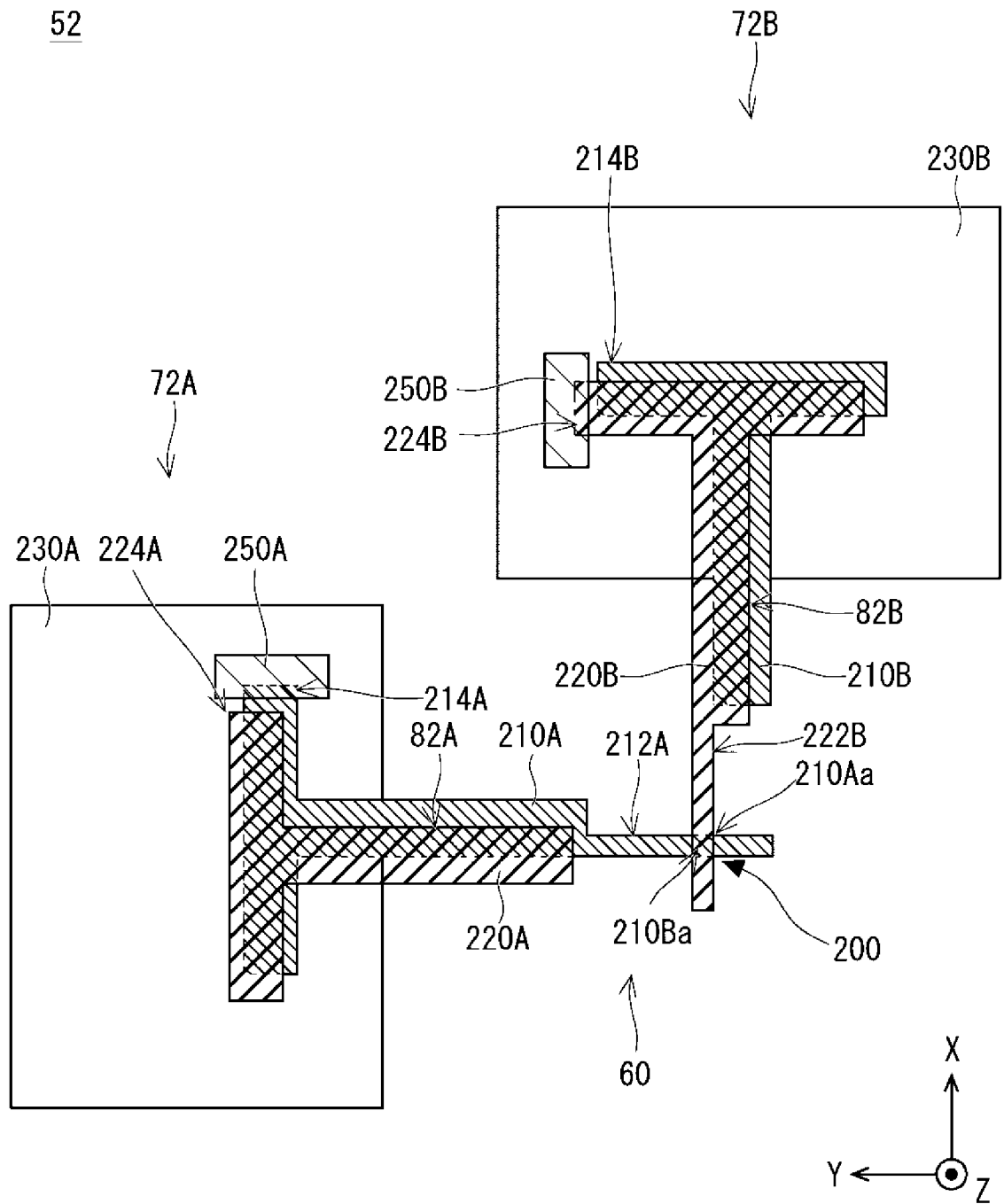


Fig. 32

[図33]

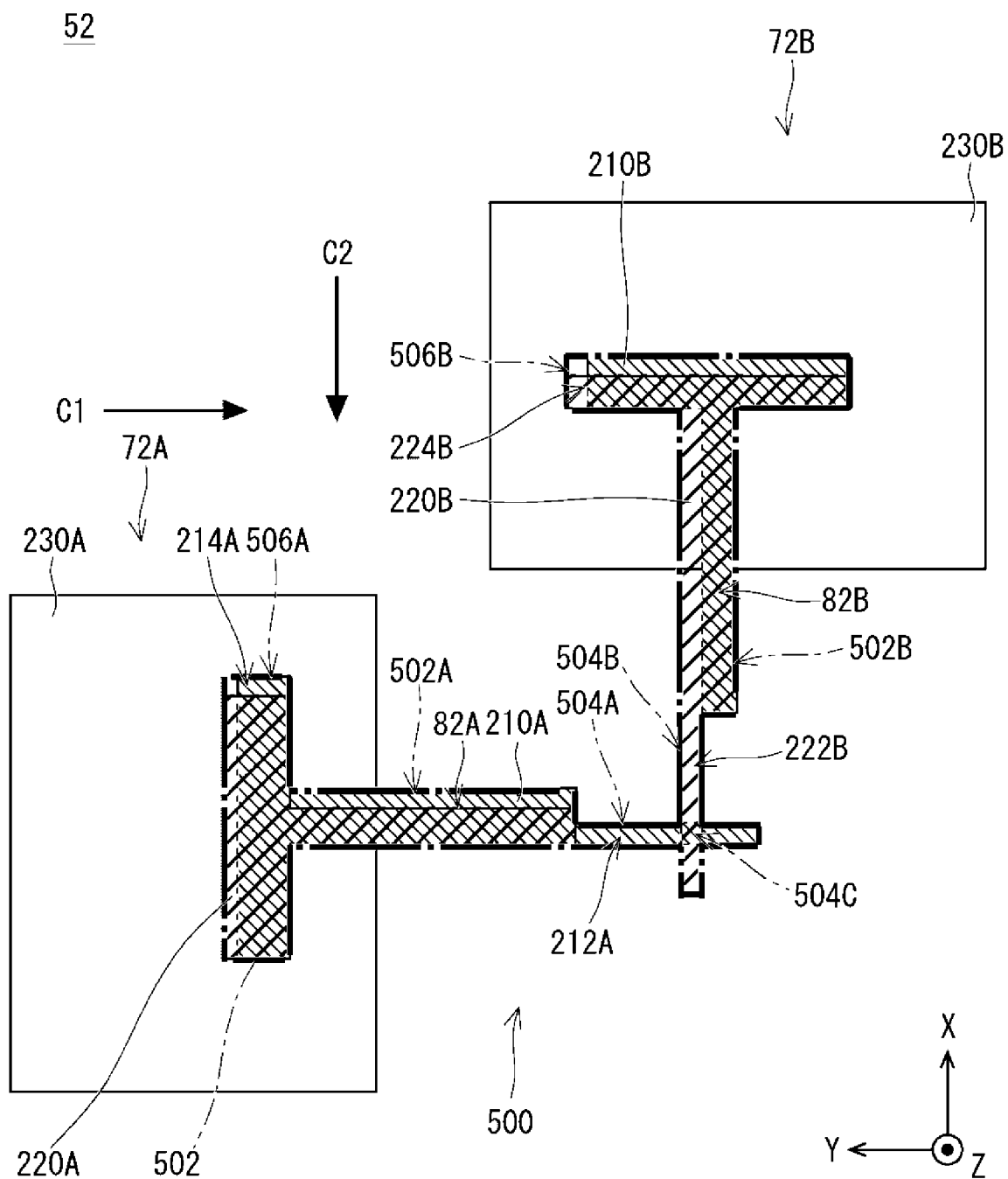


Fig. 33

[図34]

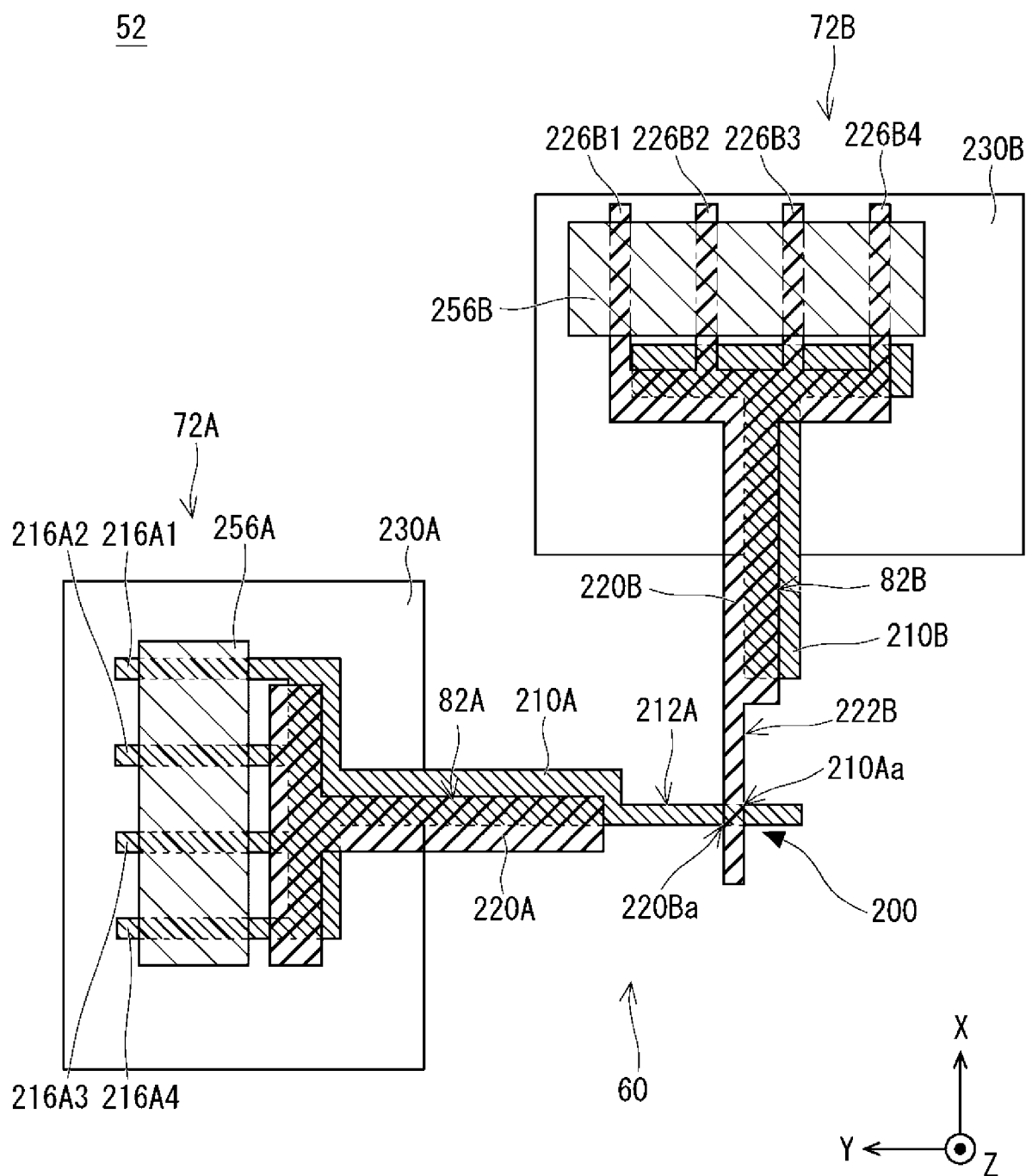


Fig. 34

[図36]

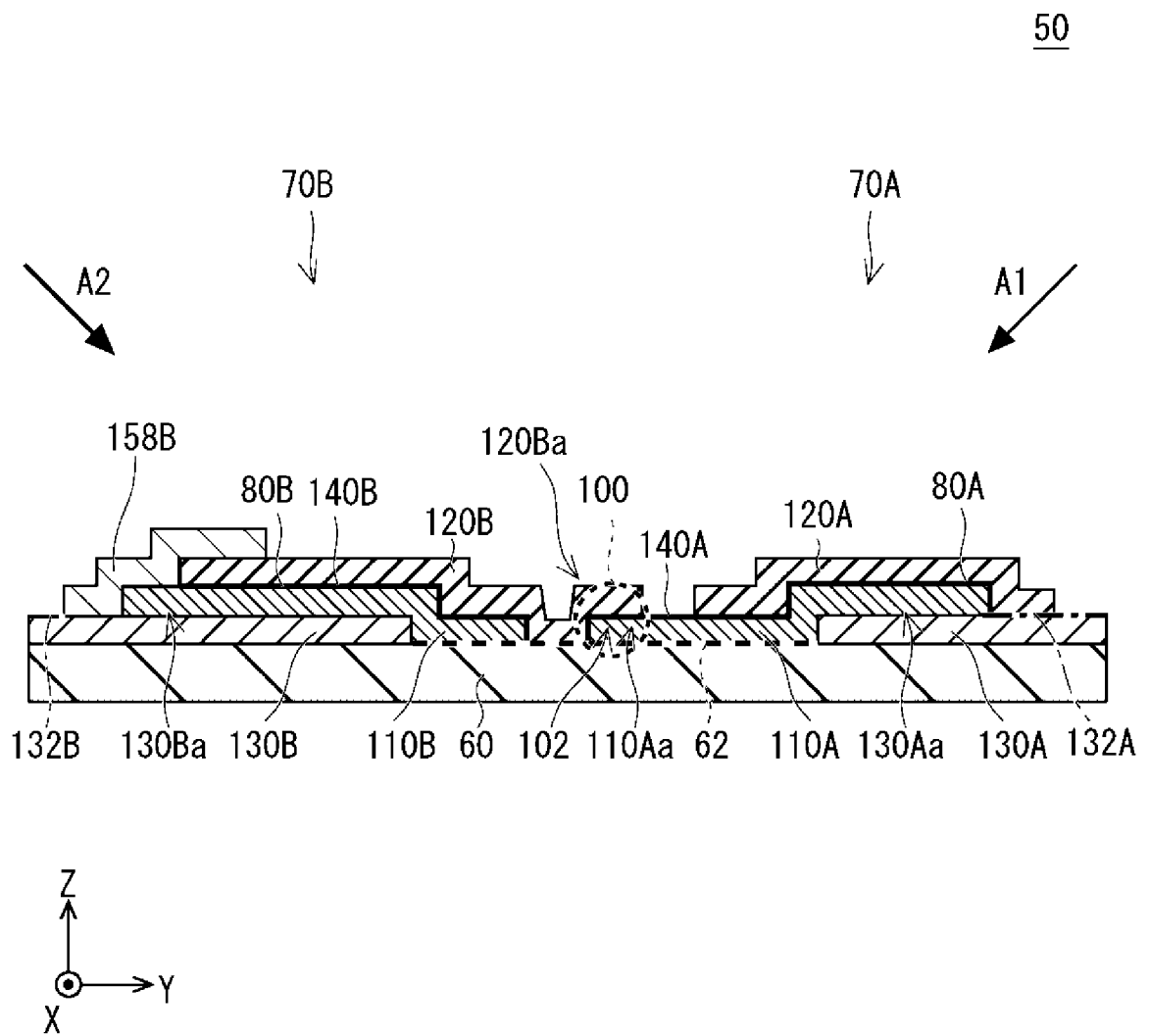


Fig. 36

[図37]

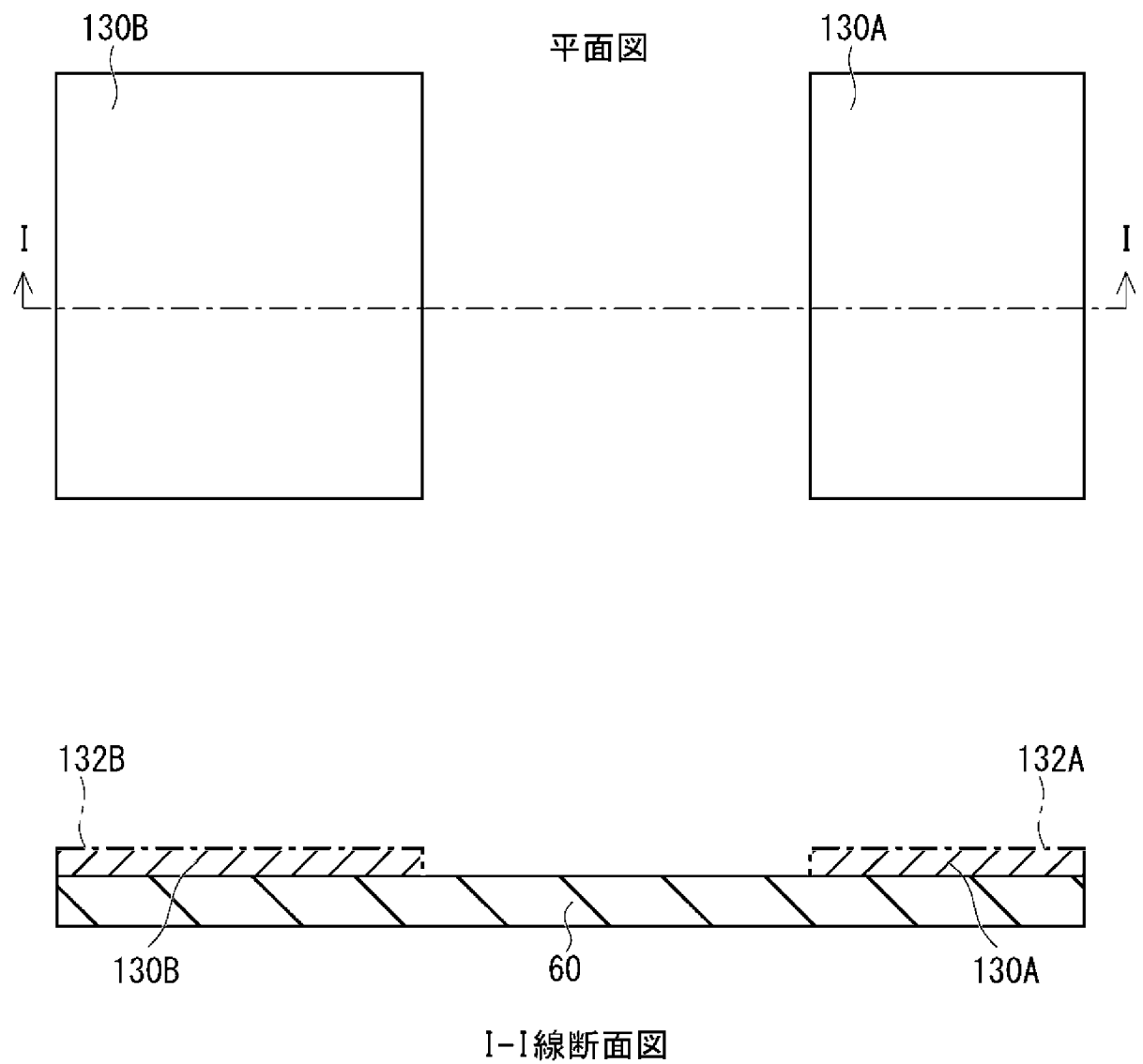


Fig. 37

[図38]

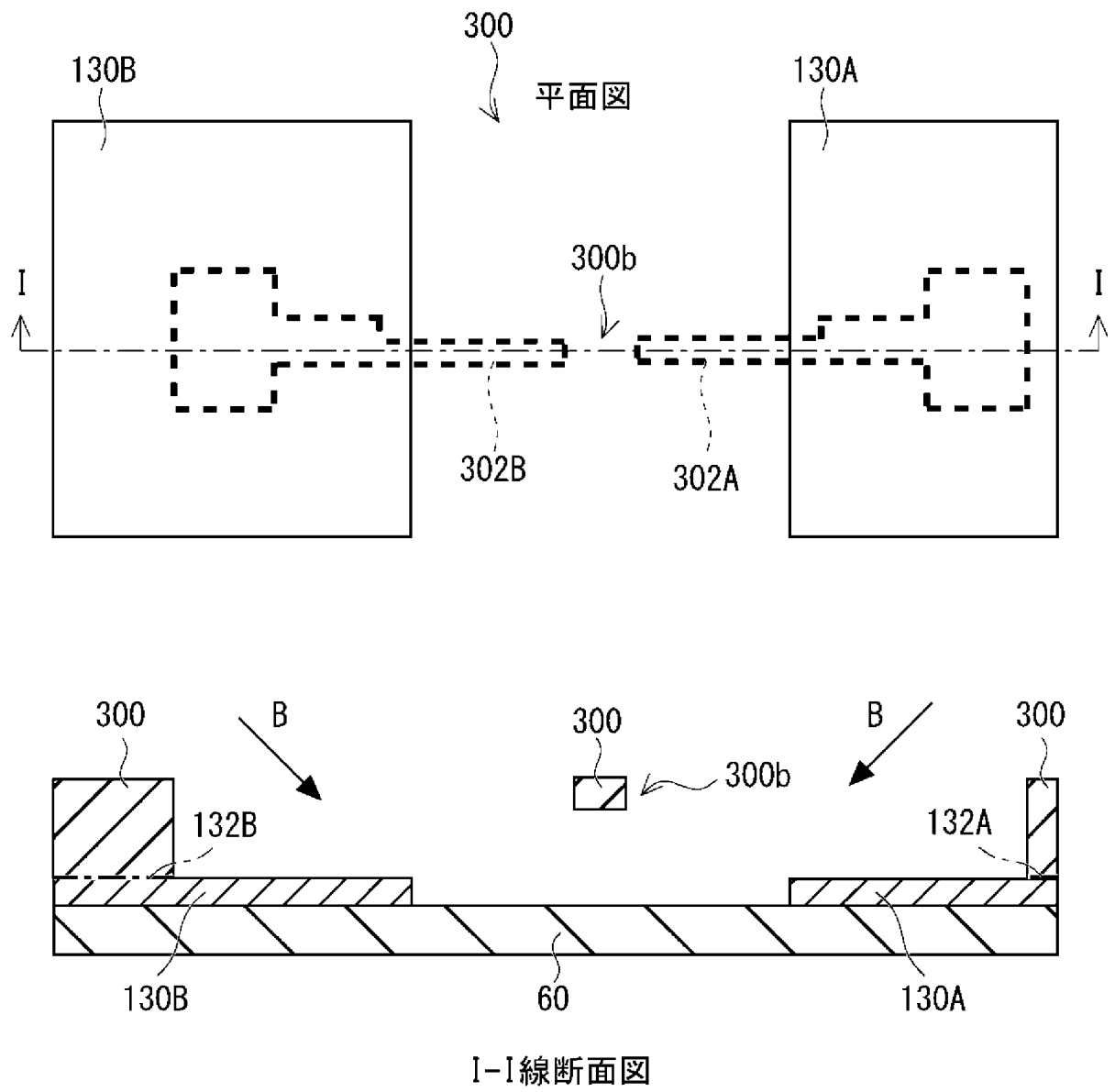


Fig. 38

[図39]

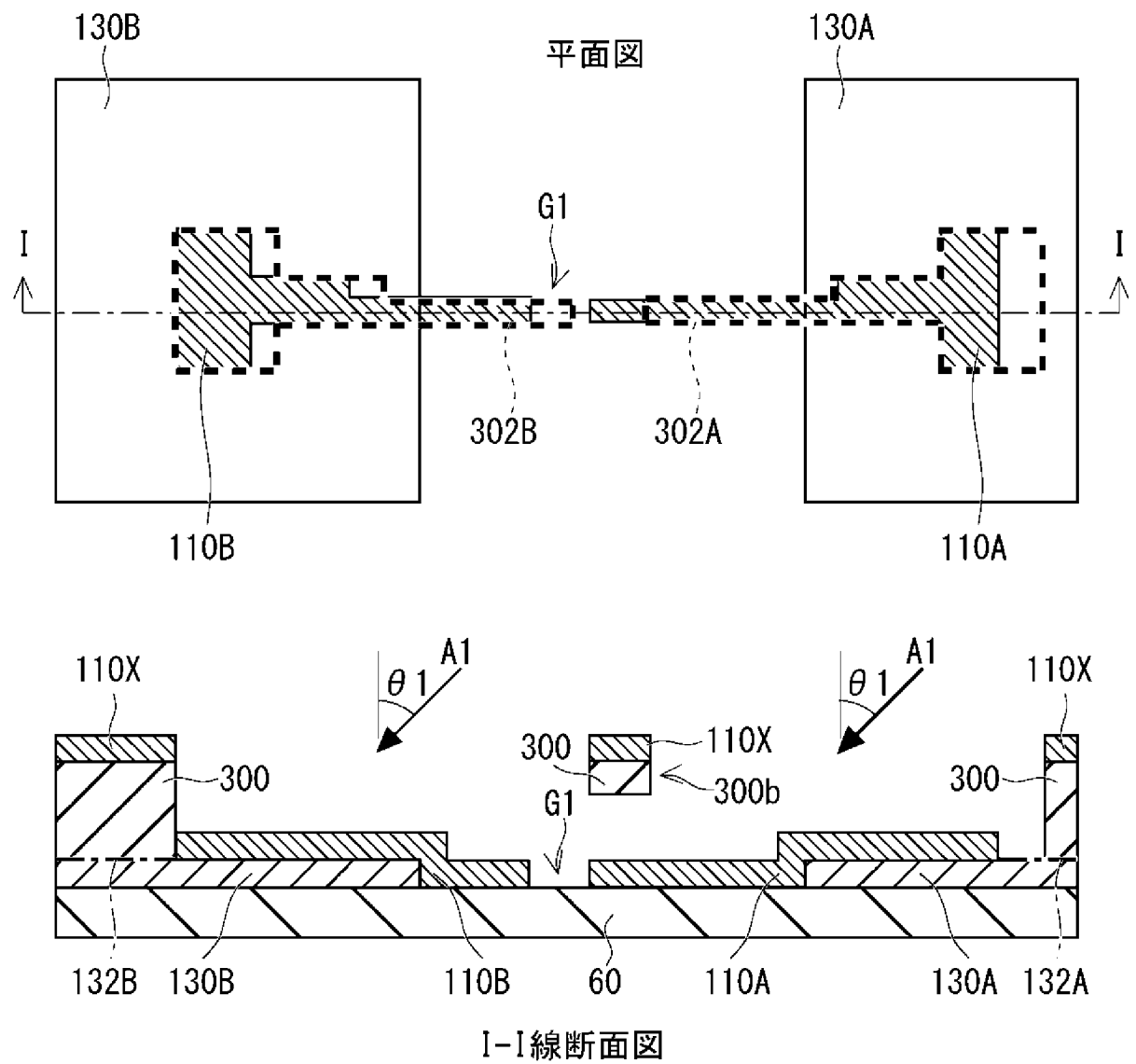


Fig. 39

[図40]

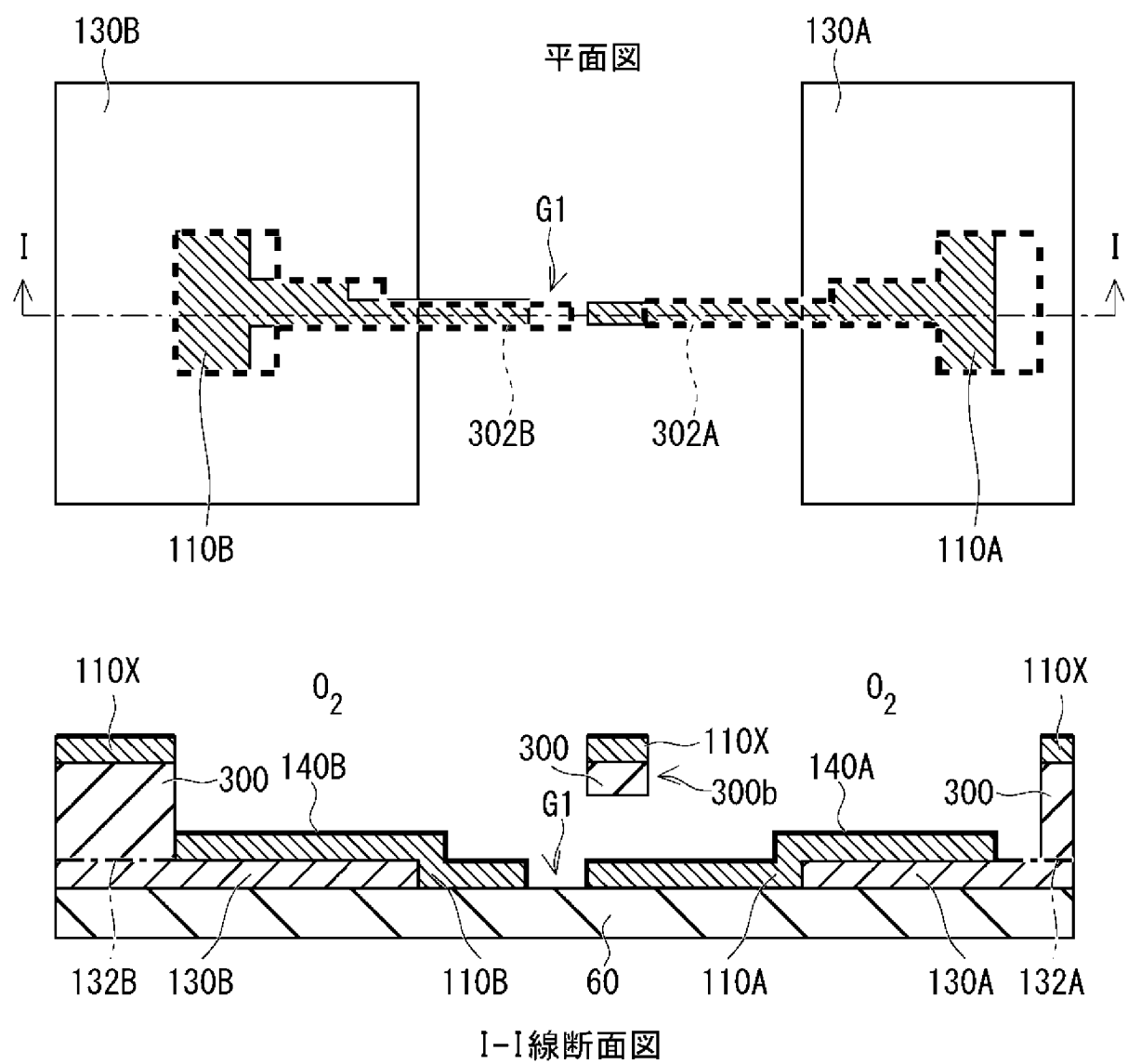


Fig. 40

[図41]

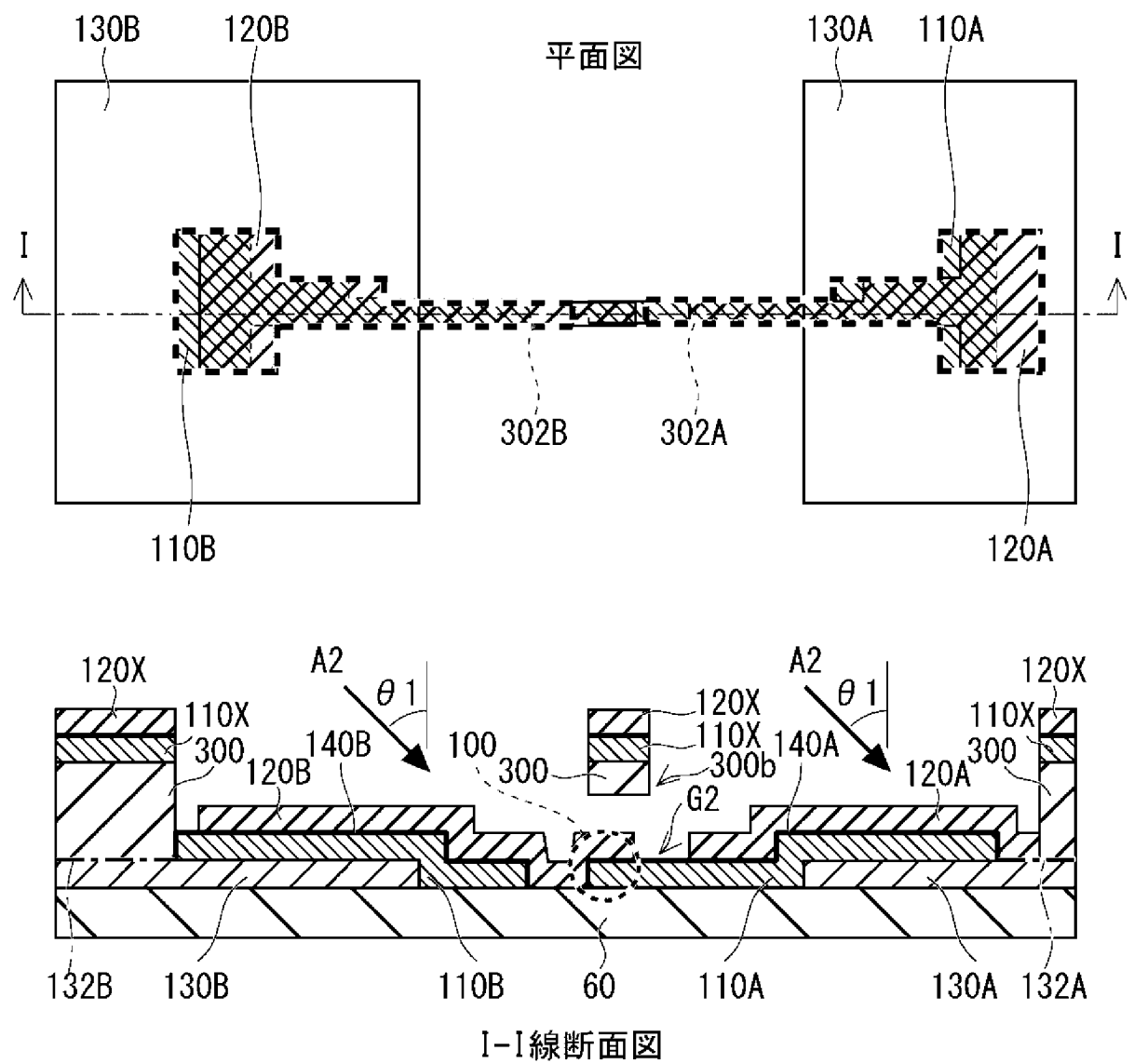


Fig. 41

[図42]

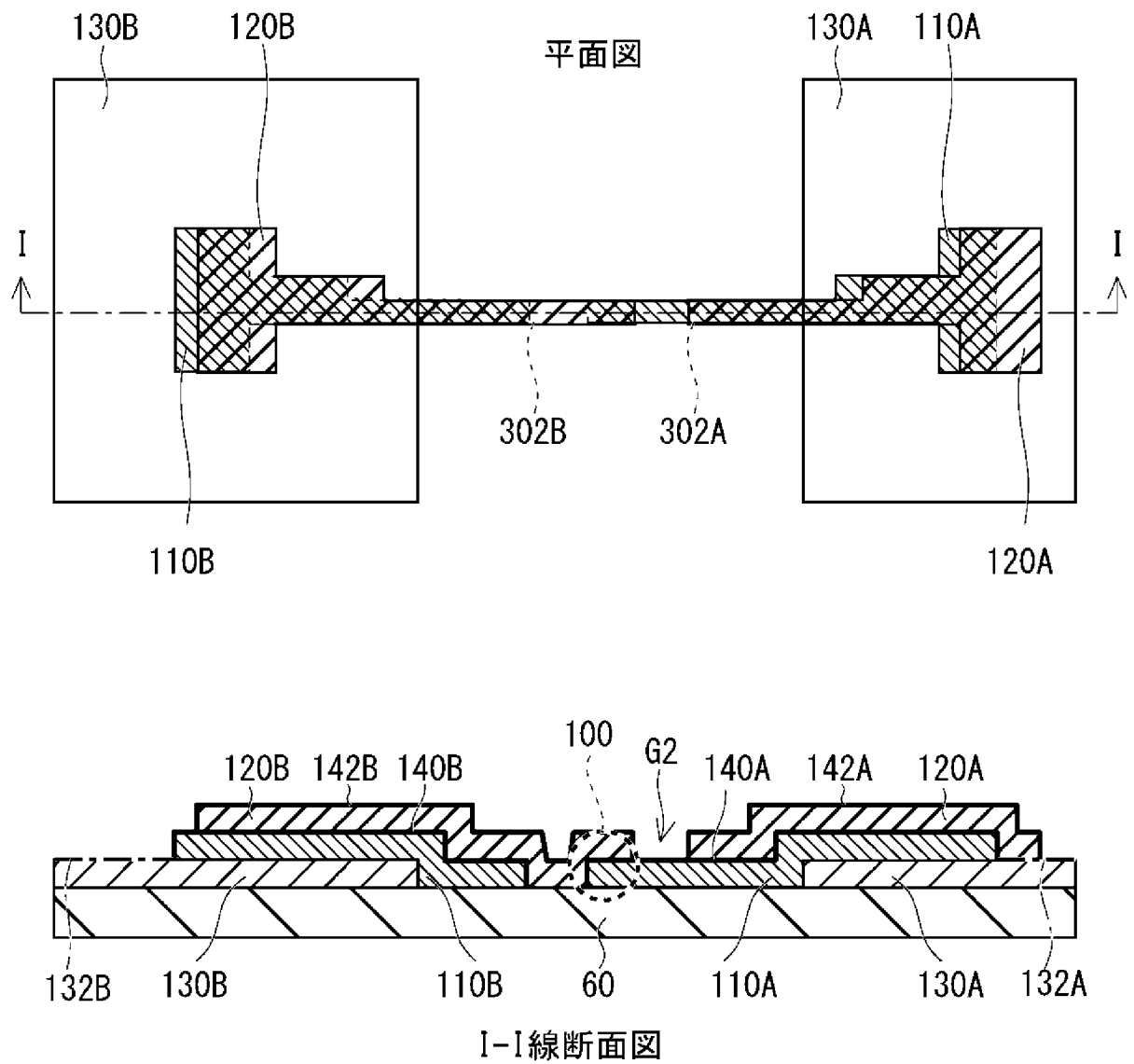


Fig. 42

[図43]

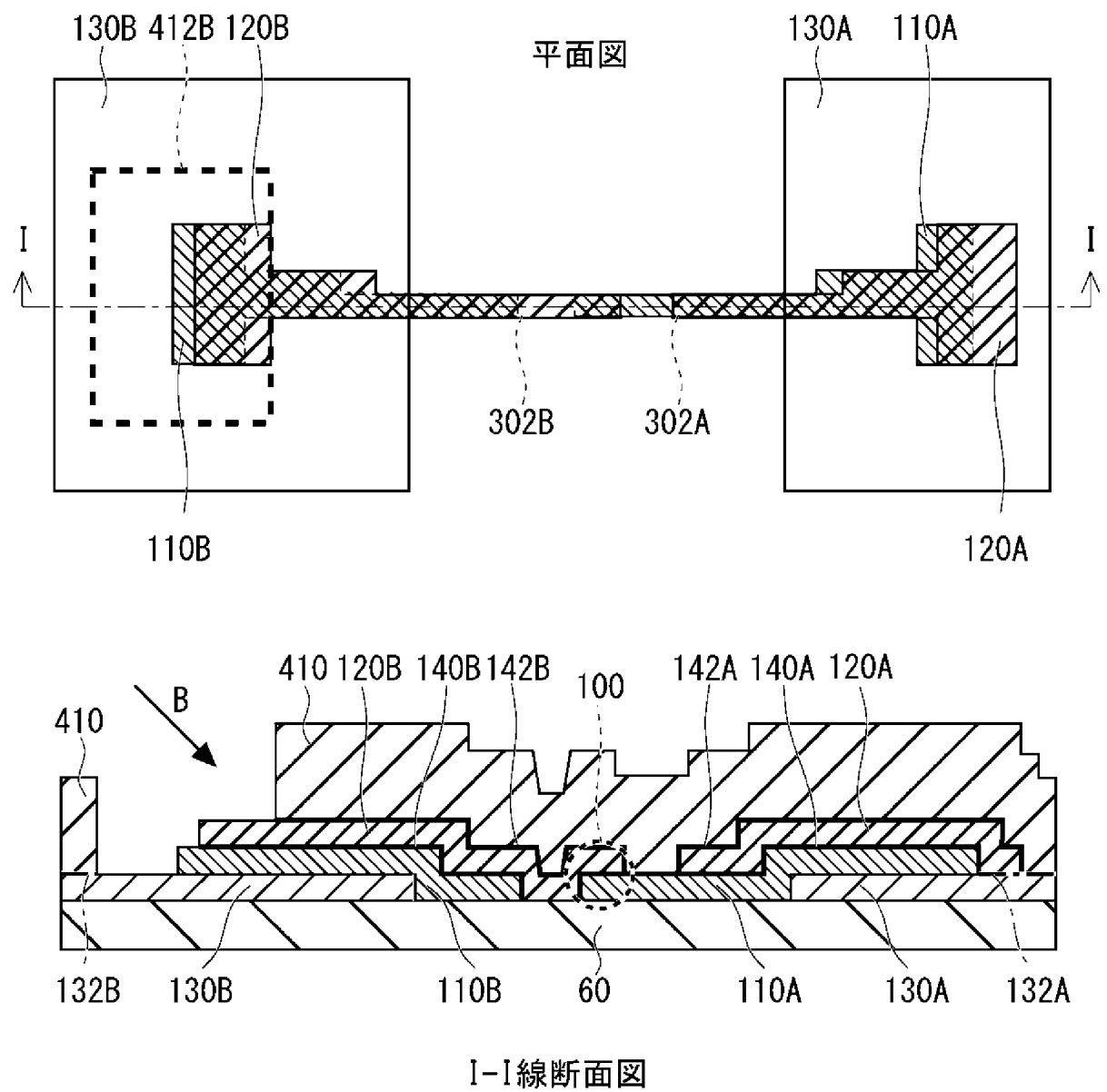


Fig. 43

[図44]

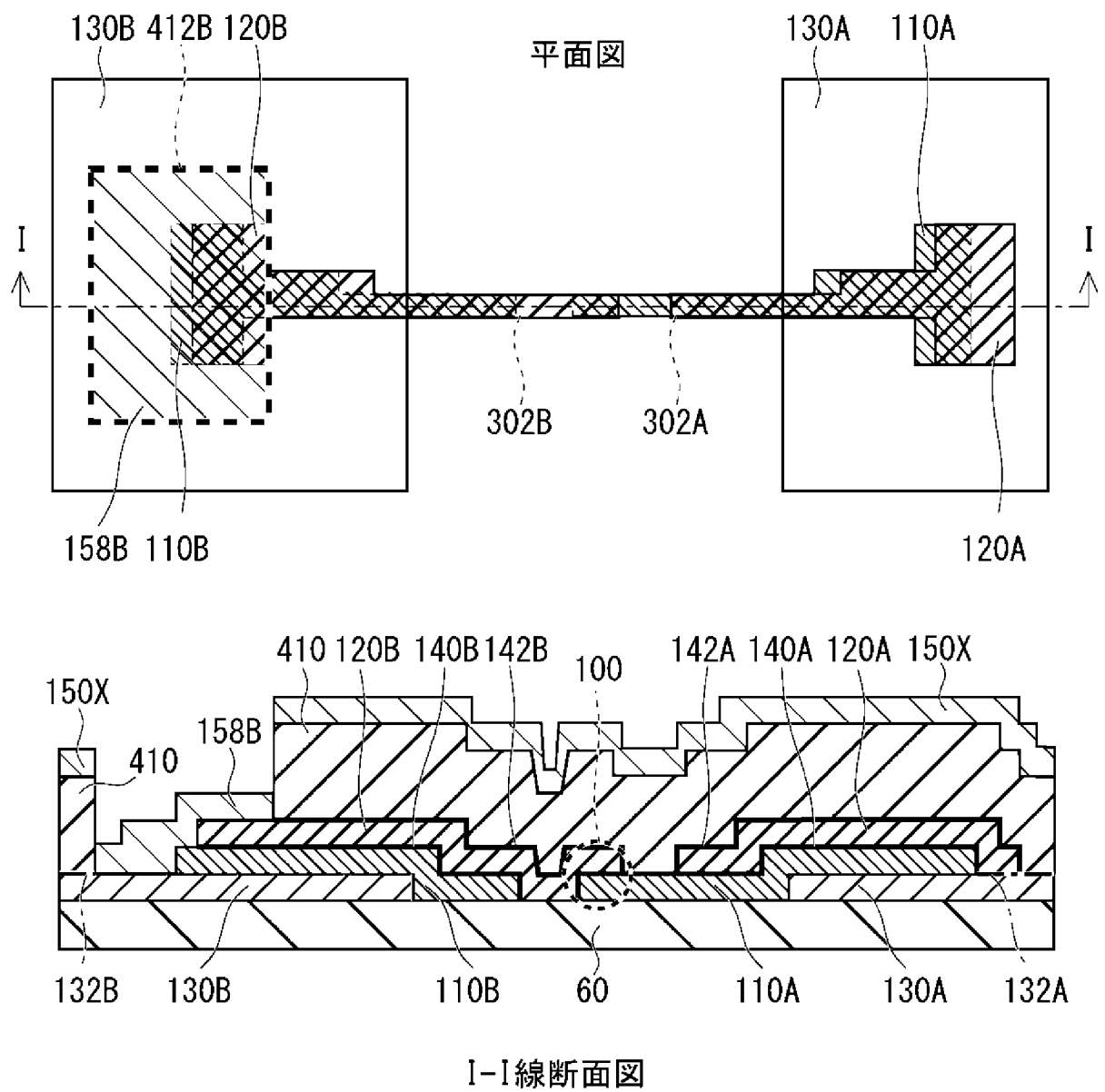


Fig. 44

[図45]

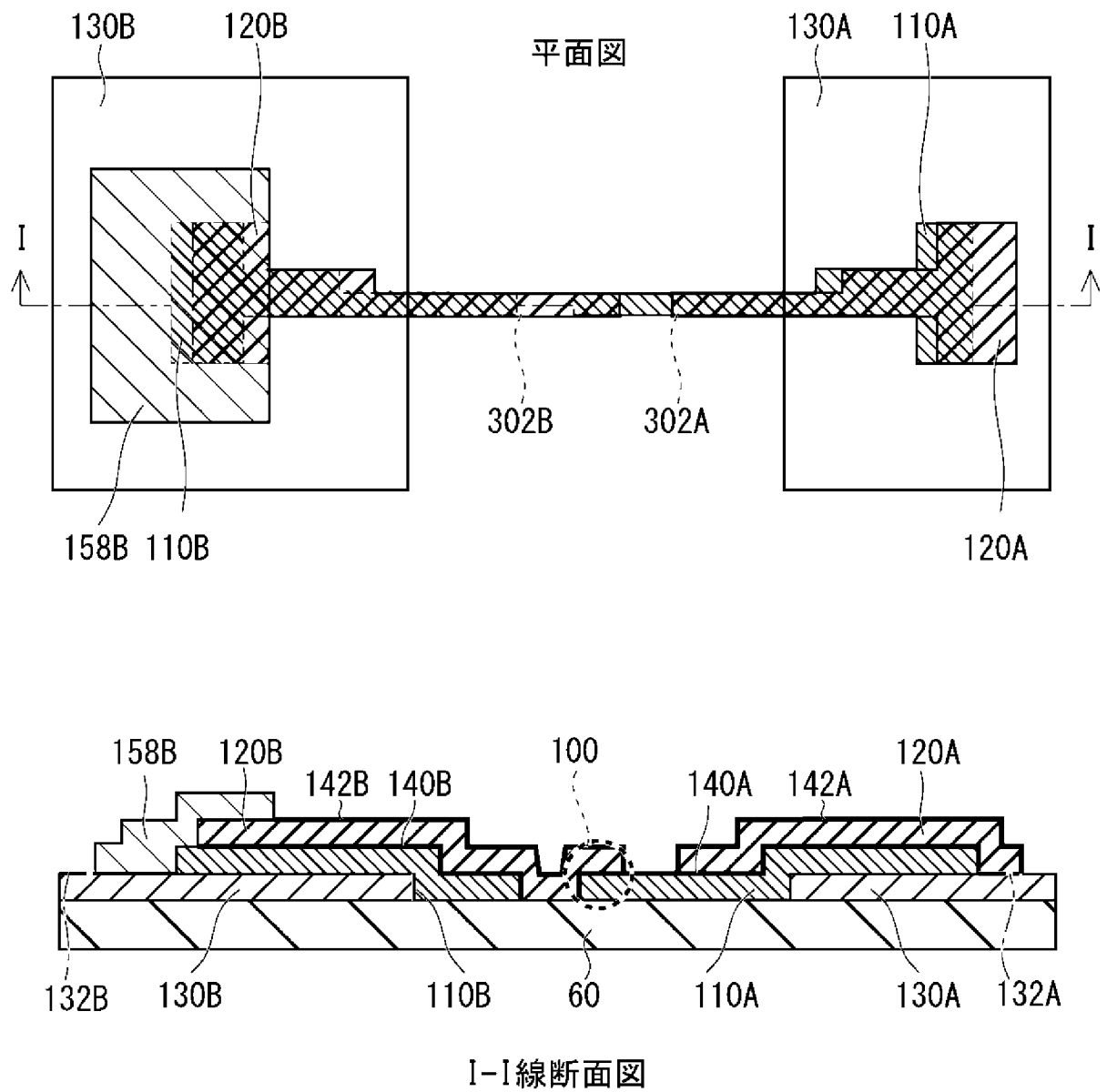


Fig. 45

[図46]

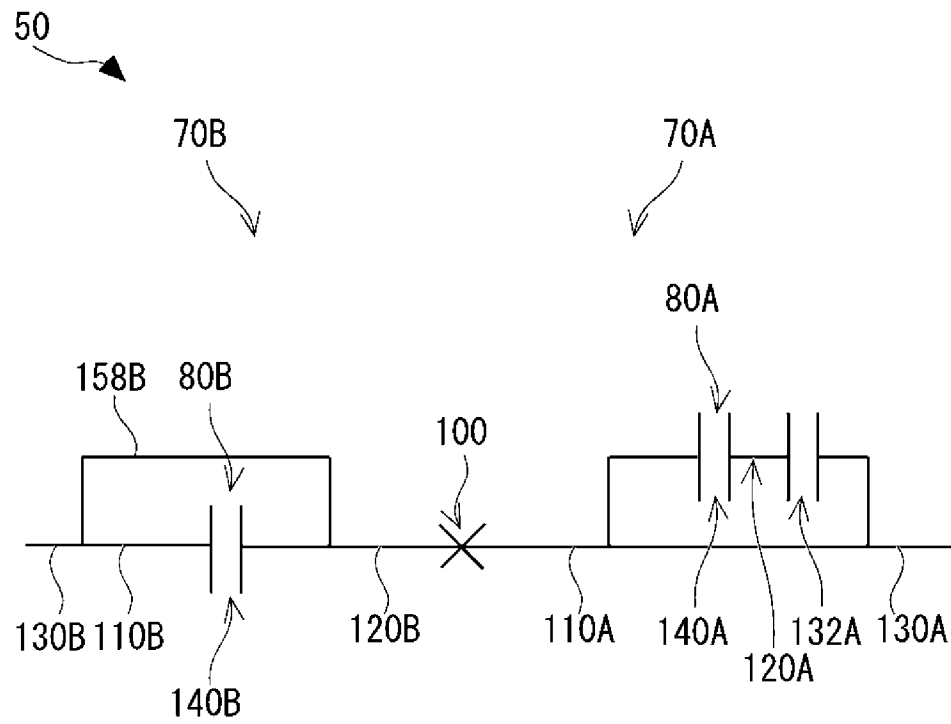


Fig. 46

[図47]

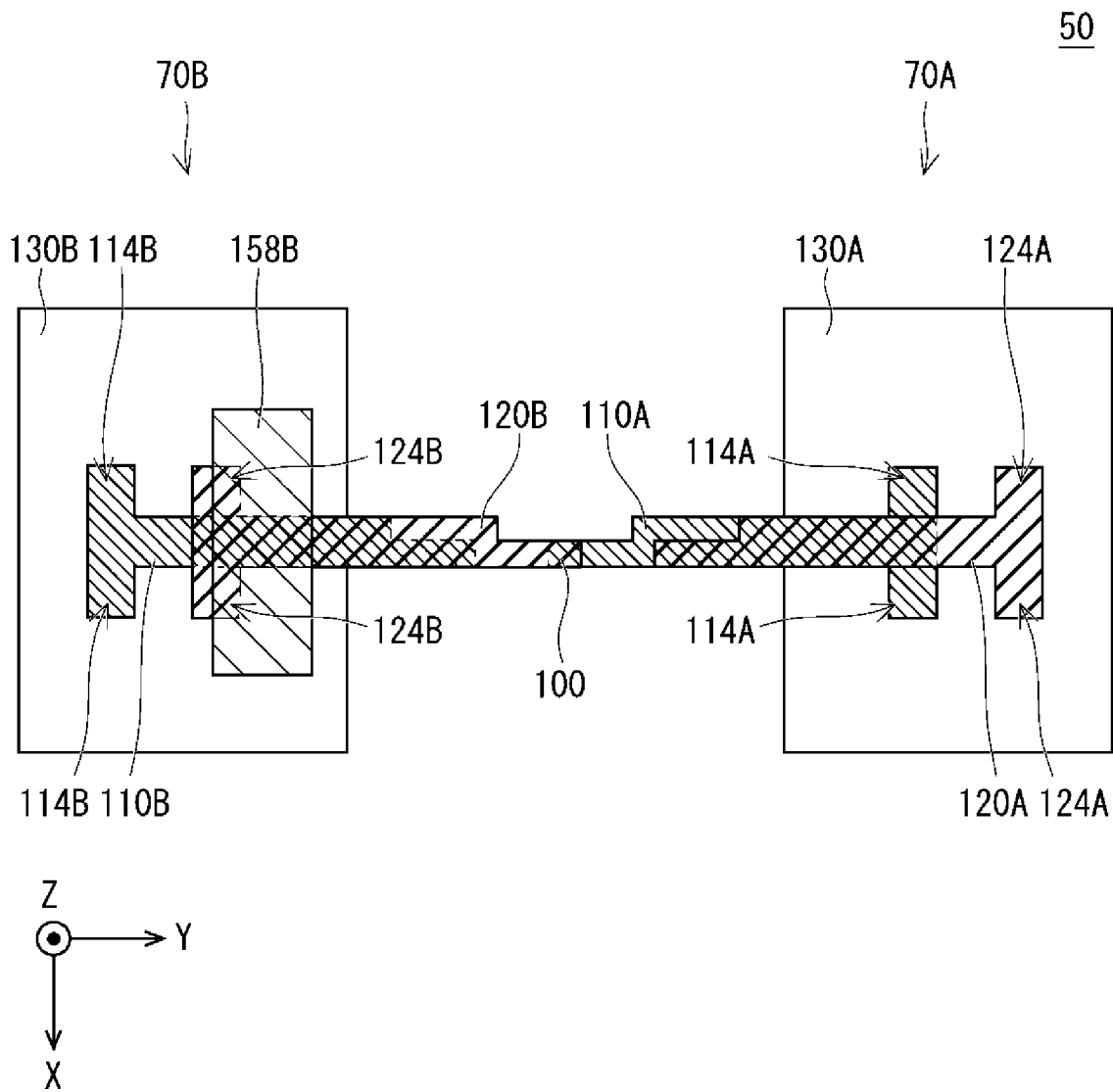


Fig. 47

[図48]

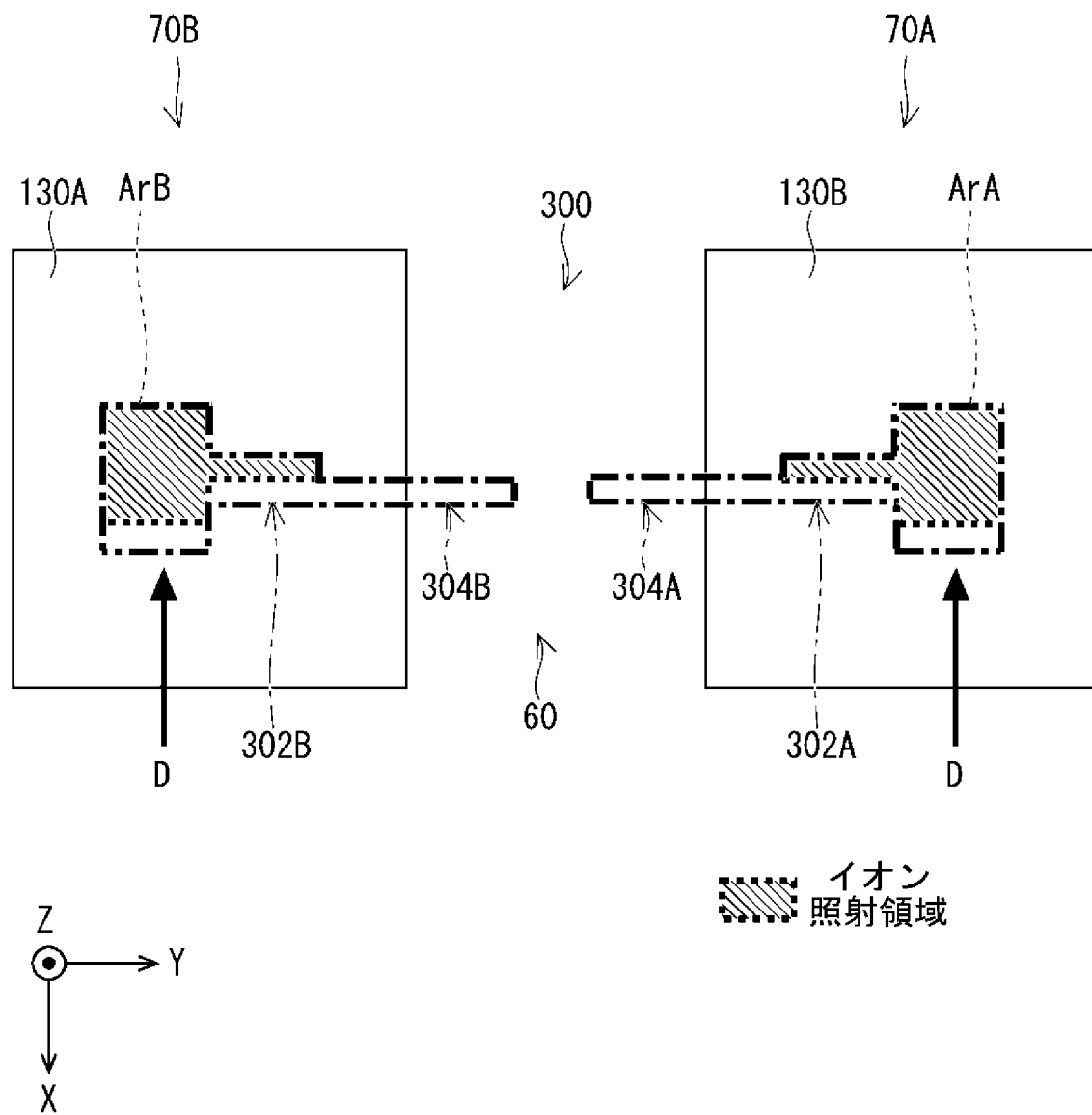


Fig. 48

[図49]

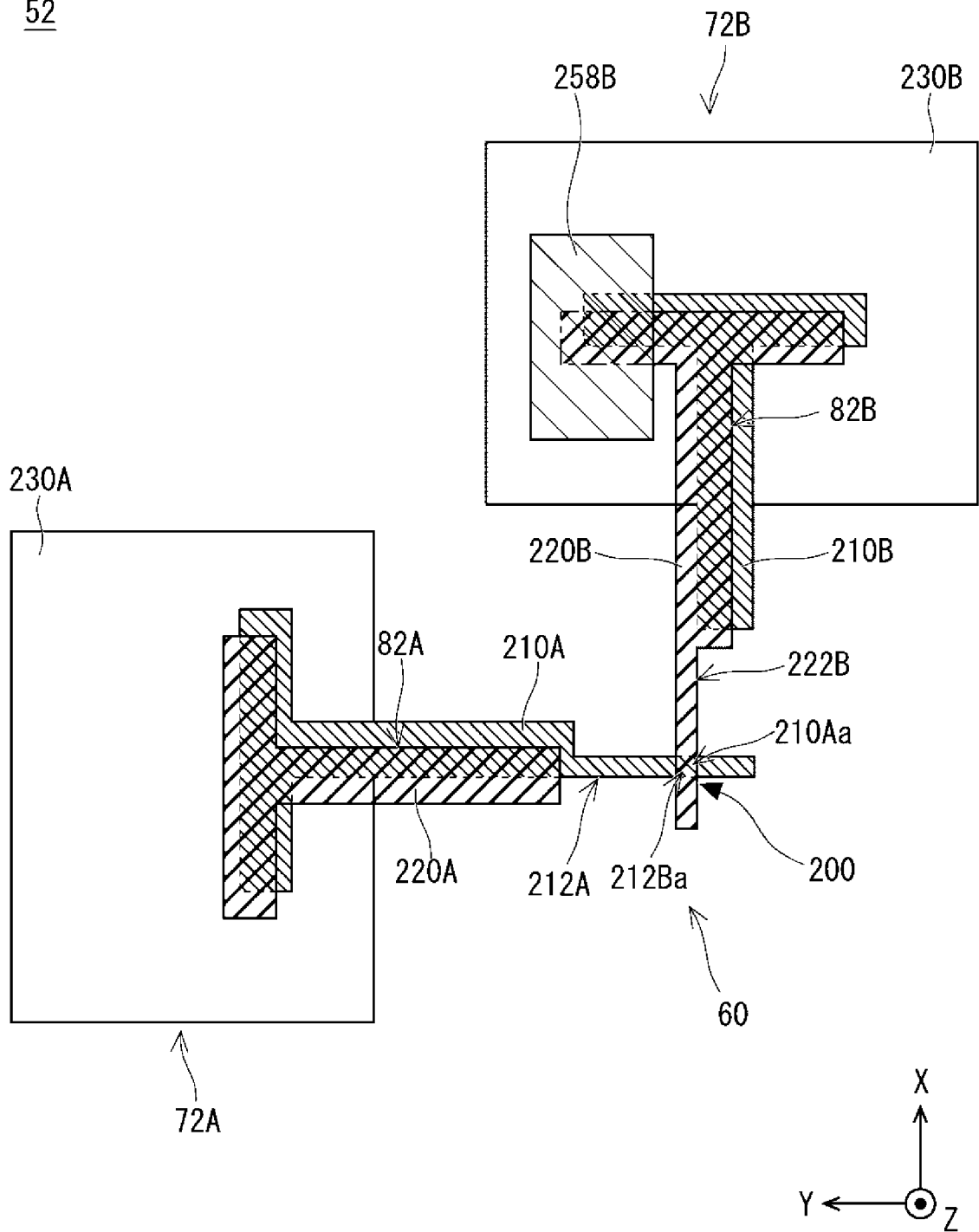
52

Fig. 49

[図51]

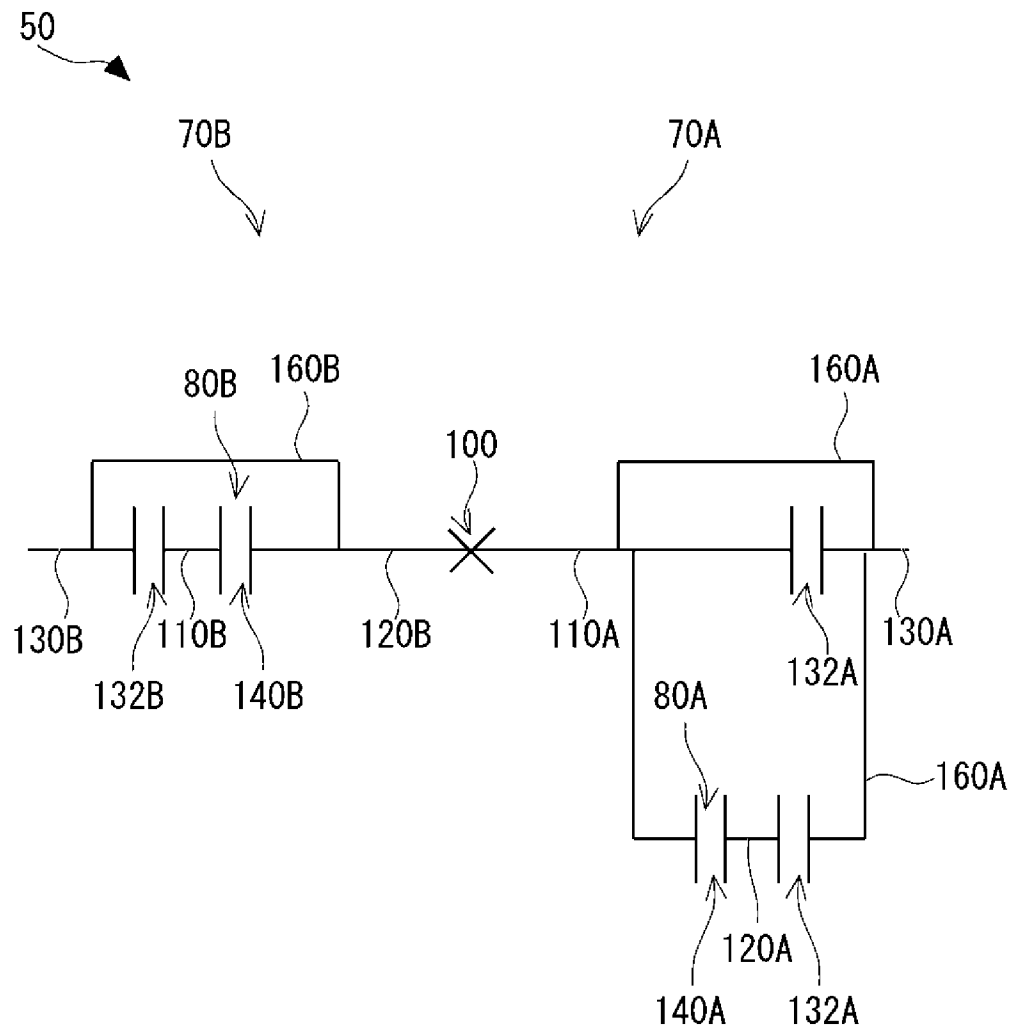


Fig. 51

[図52]

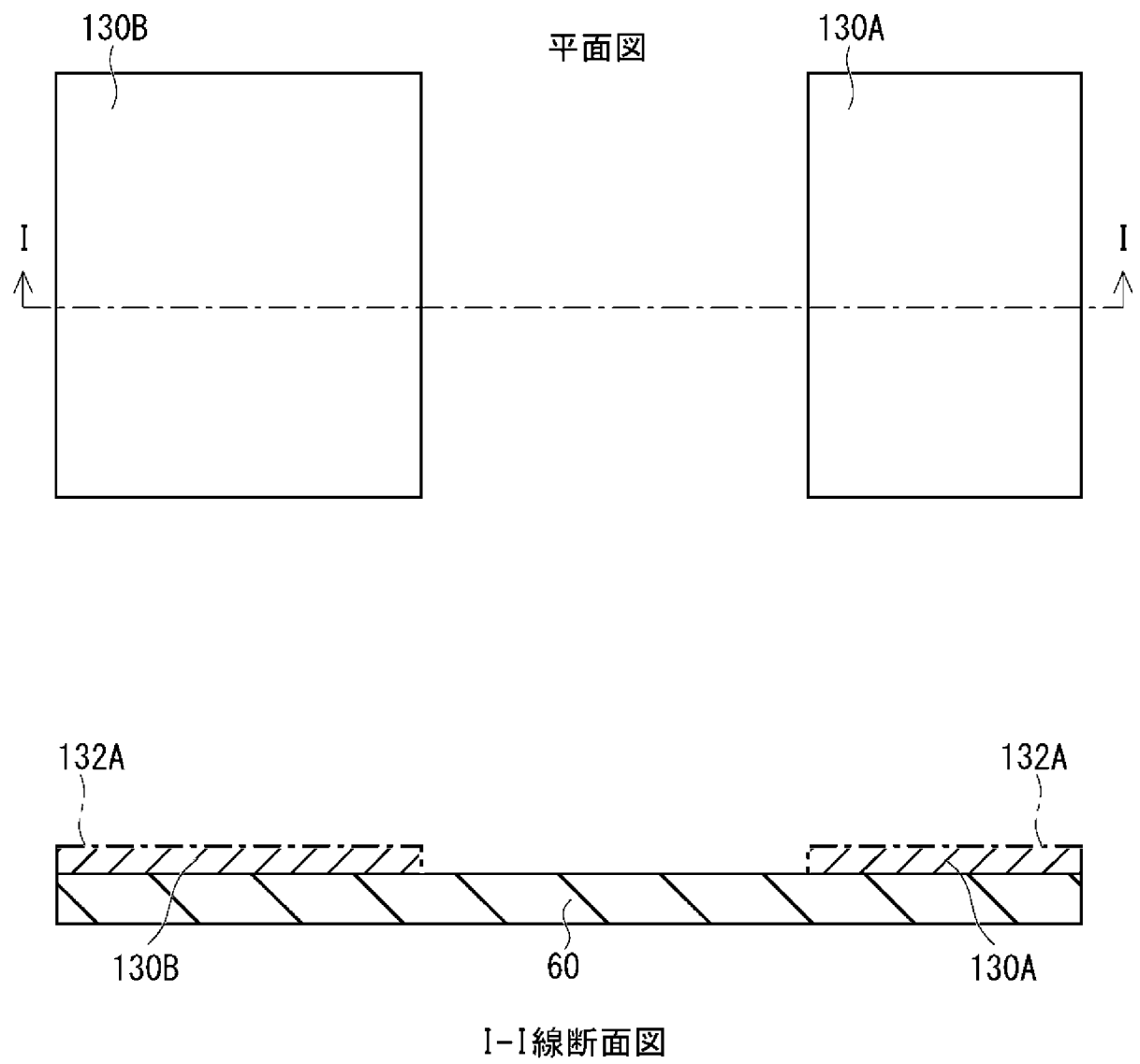


Fig. 52

[図53]

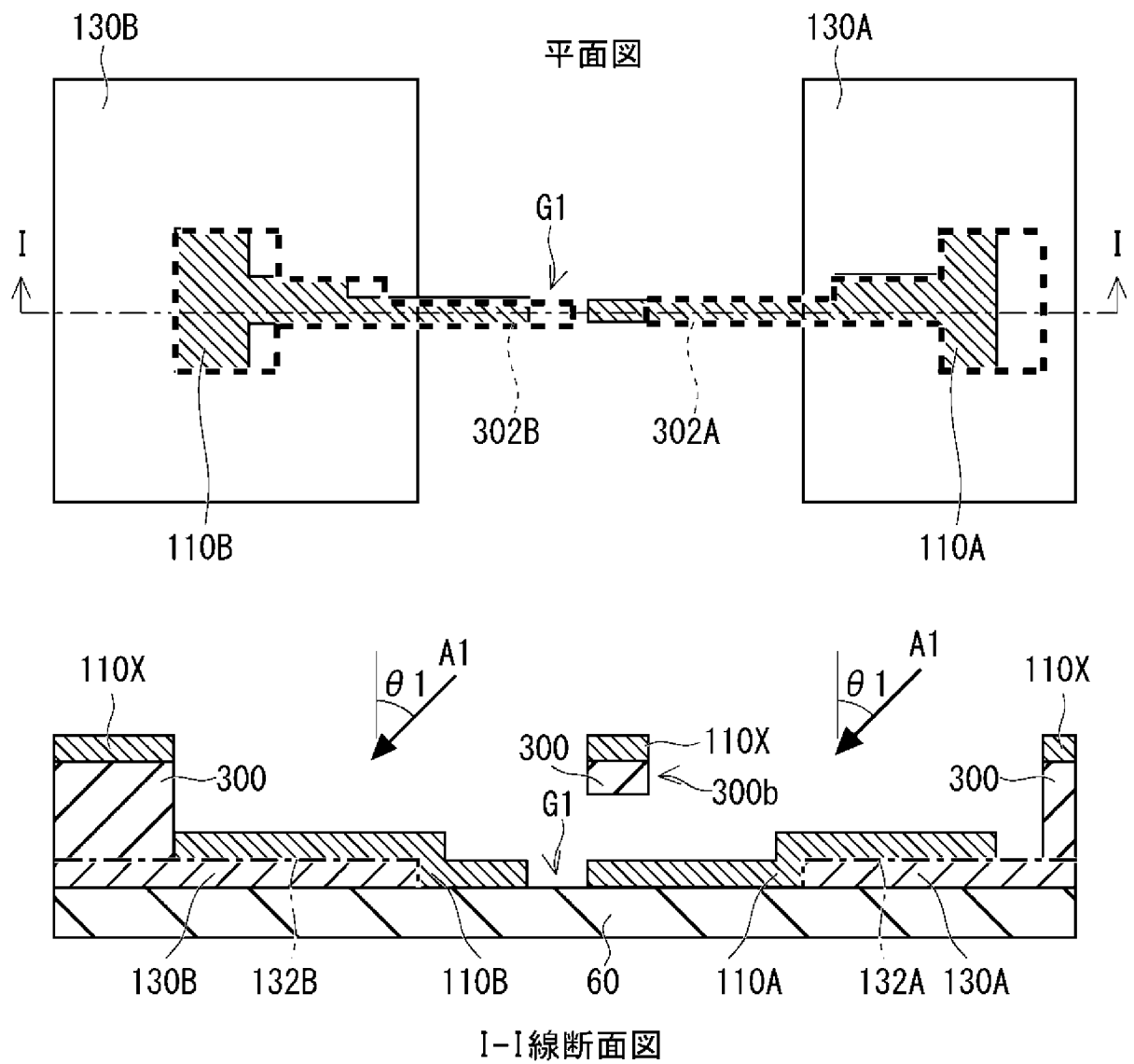


Fig. 53

[図54]

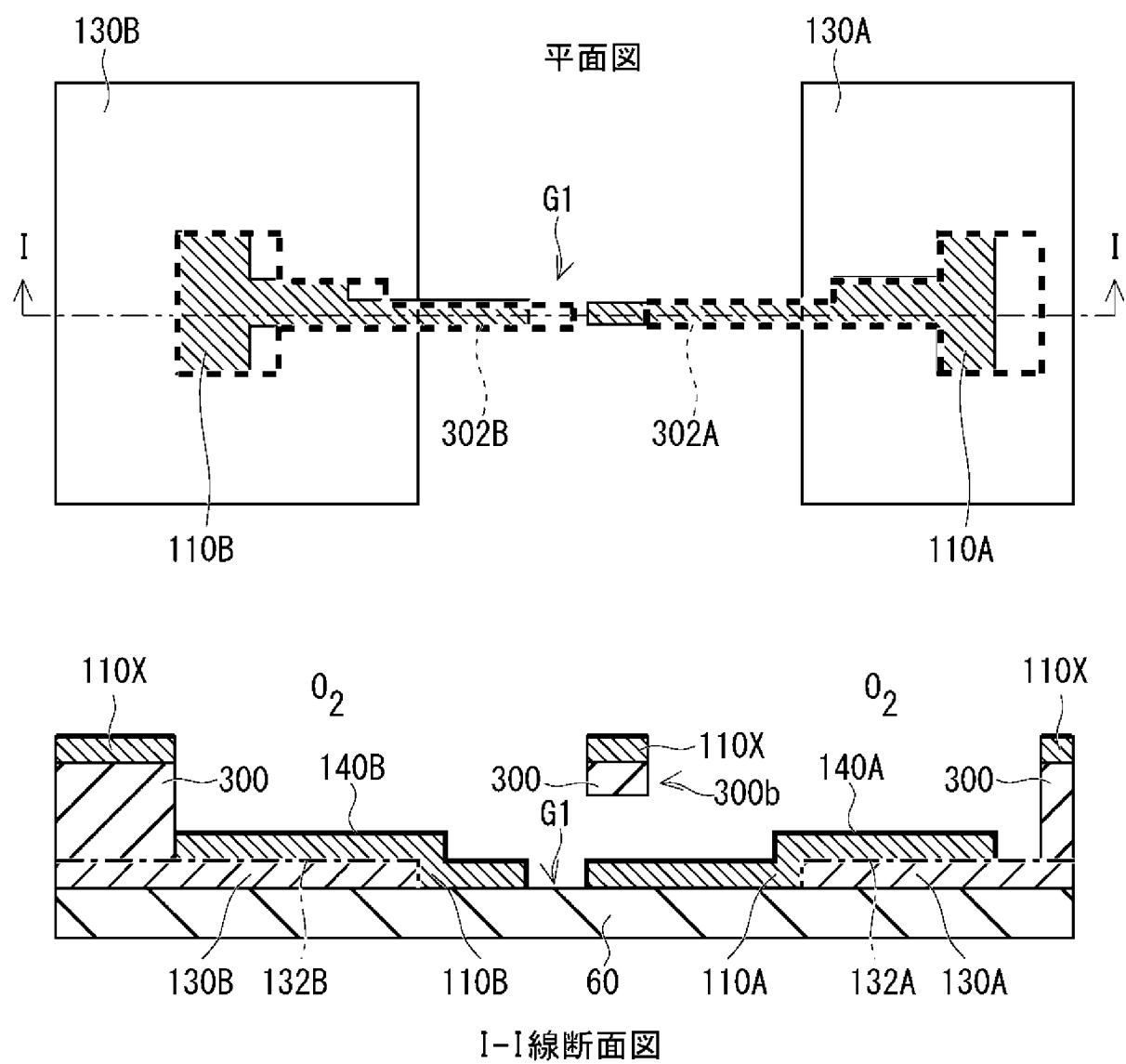


Fig. 54

[図56]

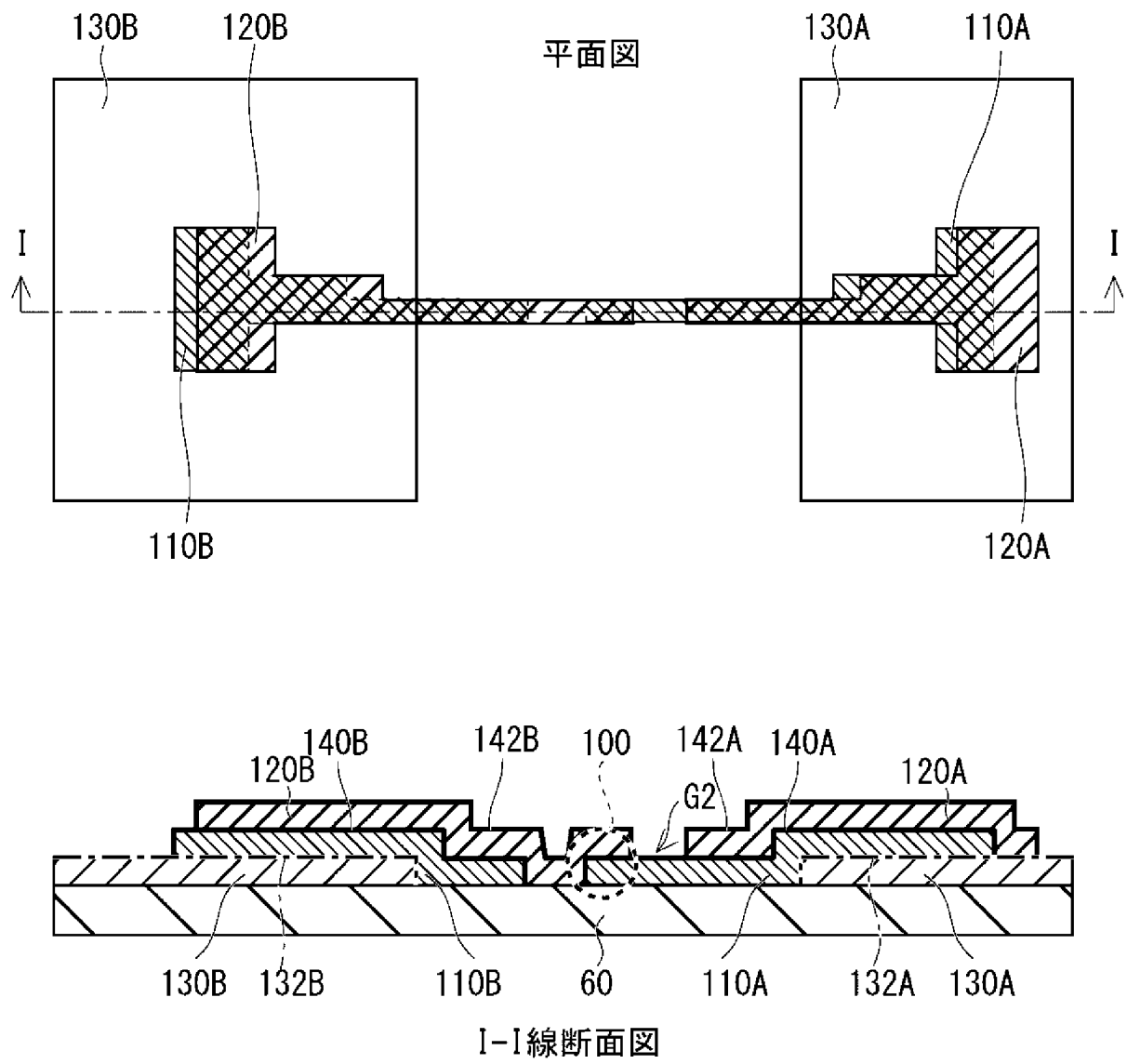


Fig. 56

[図57]

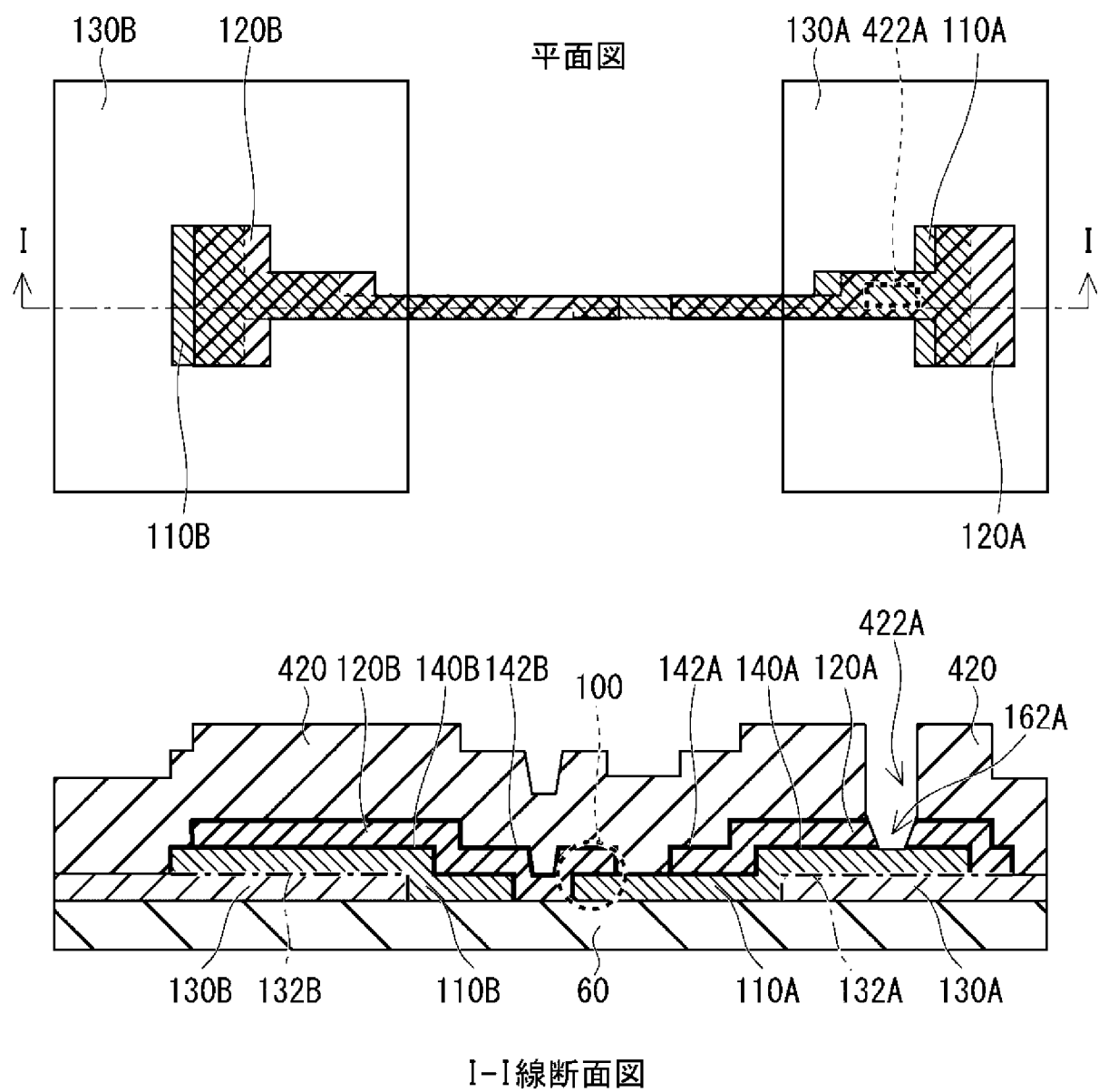


Fig. 57

[図58]

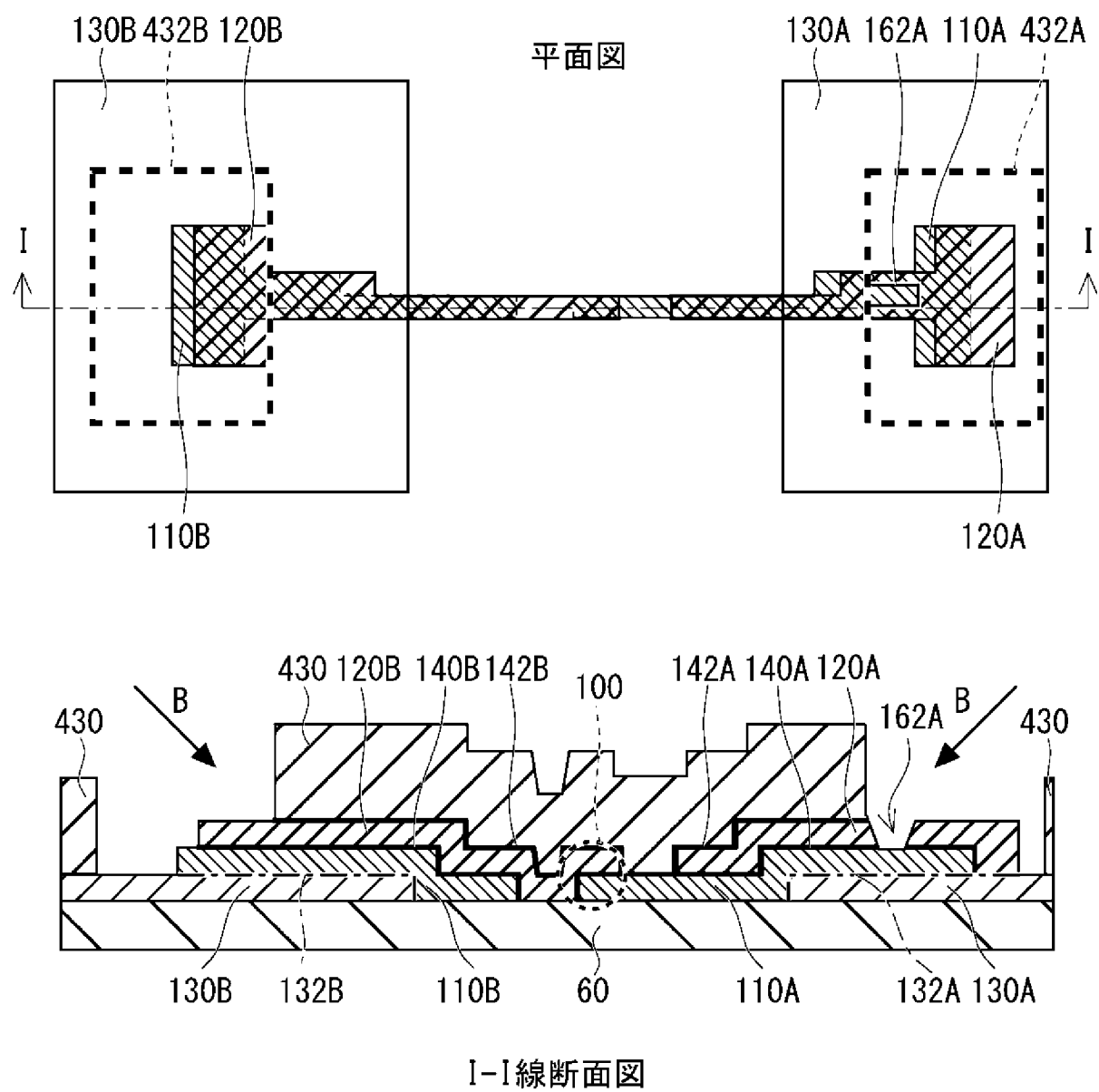


Fig. 58

[図59]

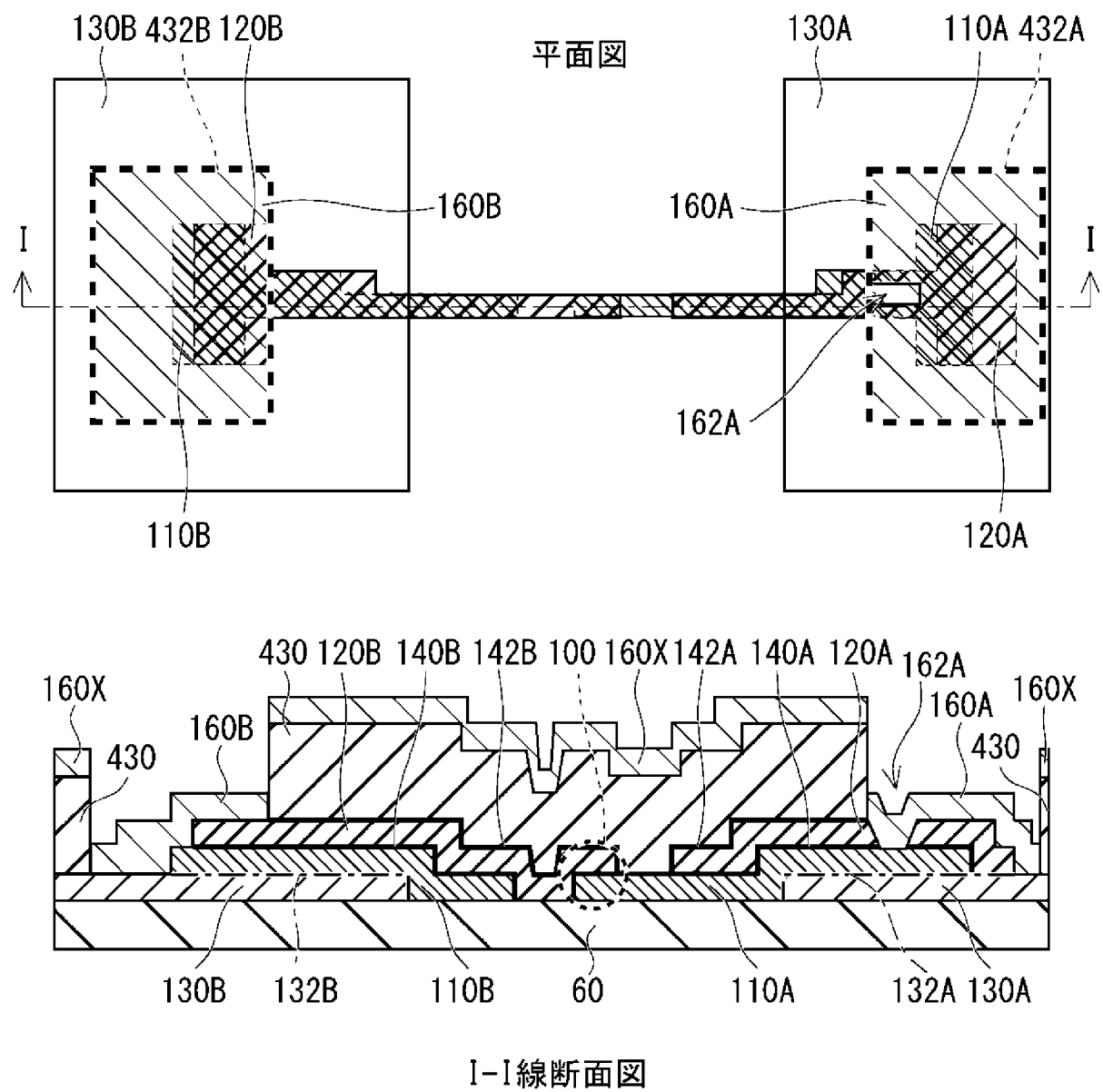


Fig. 59

[図60]

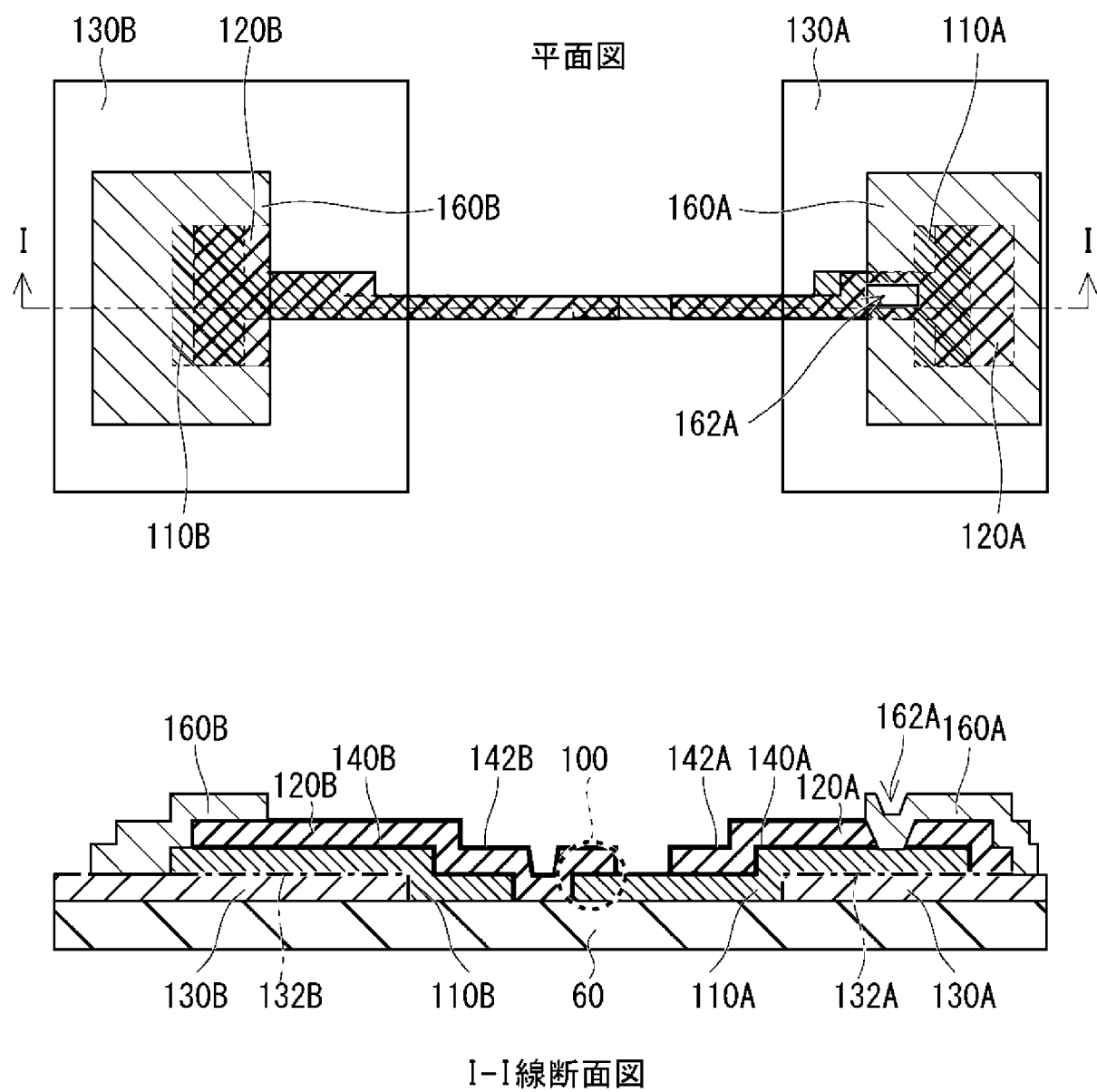
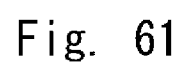


Fig. 60

52



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/045247

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. H01L39/22 (2006.01) i

FI: H01L39/22 A

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. H01L39/22

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 1971-2021

Registered utility model specifications of Japan 1996-2021

Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

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.
X	WO 2019/032115 A1 (INTEL CORPORATION) 14 February 2019 (2019-02-14), paragraphs [0073]-[0109], fig. 5H, 6B	1-4, 7, 9-12, 15
A		5, 6, 8, 13, 14, 16
A	JP 64-074777 A (SANYO ELECTRIC CO., LTD.) 20 March 1989 (1989-03-20)	1-16
A	JP 04-268758 A (NEC CORP.) 24 September 1992 (1992-09-24)	1-16
A	JP 59-135783 A (DIRECTOR GENERAL, AGENCY OF INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) 04 August 1984 (1984-08-04)	1-16



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
24.02.2021Date of mailing of the international search report
09.03.2021Name 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

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2020/045247

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
WO 2019/032115 A1	14.02.2019	(Family: none)	
JP 64-074777 A	20.03.1989	(Family: none)	
JP 04-268758 A	24.09.1992	(Family: none)	
JP 59-135783 A	04.08.1984	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01L 39/22(2006.01)i FI: H01L39/22 A														
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）） H01L39/22 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2021年</td> </tr> </table> 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）			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年				
日本国実用新案公報	1922 - 1996年													
日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年													
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	WO 2019/032115 A1 (INTEL CORPORATION) 14.02.2019 (2019 - 02 - 14) 段落[0073]-[0109], 図5H, 図6B	1-4, 7, 9-12, 15												
A		5, 6, 8, 13, 14, 16												
A	JP 64-074777 A (三洋電機株式会社) 20.03.1989 (1989 - 03 - 20)	1-16												
A	JP 04-268758 A (日本電気株式会社) 24.09.1992 (1992 - 09 - 24)	1-16												
A	JP 59-135783 A (工業技術院長) 04.08.1984 (1984 - 08 - 04)	1-16												
☐ 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。														
<table border="0"> <tr> <td>* 参考文献のカテゴリー</td> <td>"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</td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td>"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</td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td>"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</td> </tr> <tr> <td>"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）</td> <td>"&" 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td></td> </tr> </table>			* 参考文献のカテゴリー	"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	"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	"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	"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	"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	"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）	"&" 同一パテントファミリー文献	"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	
* 参考文献のカテゴリー	"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													
"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	"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													
"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	"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													
"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）	"&" 同一パテントファミリー文献													
"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														
国際調査を完了した日 24.02.2021	国際調査報告の発送日 09.03.2021													
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） 棚田 一也 5F 9361 電話番号 03-3581-1101 内線 3516													

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/045247

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2019/032115	A1	14.02.2019	(ファミリーなし)	
JP	64-074777	A	20.03.1989	(ファミリーなし)	
JP	04-268758	A	24.09.1992	(ファミリーなし)	
JP	59-135783	A	04.08.1984	(ファミリーなし)	