(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
2023年5月25日(25.05.2023)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2023/089684 A1

(51) 国際特許分類:
G02F 3/00 (2006.01) *G02B 6/12* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2021/042187

(22) 国際出願日： 2021年11月17日(17.11.2021)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(71) 出願人: 富士通株式会社(**FUJITSU LIMITED**) [JP/JP]; 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中４丁目１番１号 Kanagawa (JP).

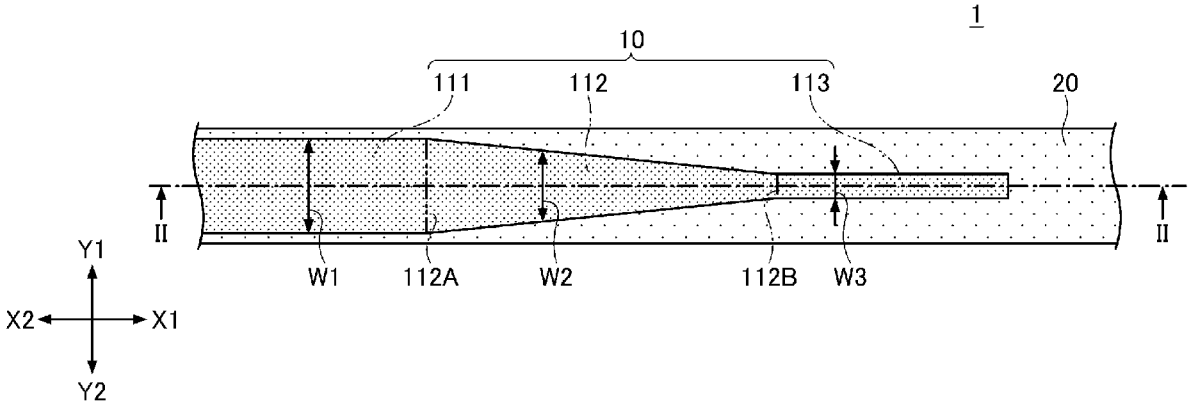
(72) 発明者: 岩井 俊樹(**IWAI, Toshiki**); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中４丁目１番１号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP). 土肥 義康(**DOI, Yoshiyasu**); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中４丁目１番１号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP). 河口 研一(**KAWAGUCHI, Kenichi**); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中４丁目１番１号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP). 石黒 哲郎(**ISHIGURO, Tetsuro**); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中４丁目１番１号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP). 宮武 哲也(**MIYATAKE, Tetsuya**); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中４丁目１番１号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP). 佐藤 信太郎(**SATO, Shintaro**); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中４丁目１番１号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP).

(74) 代理人: 伊東 忠重, 外(**ITOH, Tadashige** et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目１番１号 丸の内ＭＹ ＰＬＡＺＡ （明治安田生命ビル） １６階 Tokyo (JP).

(54) **Title:** QUANTUM DEVICE AND QUANTUM OPERATION APPARATUS

(54) 発明の名称： 量子デバイス及び量子演算装置

［図1］



(57) **Abstract:** This quantum device comprises: a first optical waveguide comprising diamond; and a second optical waveguide optically coupled to the first optical waveguide and comprising a material having a lower refractive index than diamond. The first optical waveguide has a first region including a color center, a second region through which light propagating through the first region is propagated to the second optical waveguide, and a third region connected to the opposite side of the second region from the first region, and joined to the second optical waveguide.

(57) 要約：量子デバイスは、ダイヤモンドからなる第１光導波路と、前記第１光導波路に光学的に結合され、ダイヤモンドよりも屈折率が低い材料からなる第２光導波路と、を有し、前記第１光導波路は、カラーセンターを含む第１領域と、前記第１領域中を伝搬する光を前記第２光導波路に伝搬させる第２領域と、前記第２領域の前記第１領域とは反対側につながり、前記第２光導波路に接合された第３領域と、を有する。

WO 2023/089684 A1

［続葉有］

(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, 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:

一　国際調査報告（条約第21条(3)）

明　細　書

発明の名称 ： 量子デバイス及び量子演算装置

技術分野

[0001]　本開示は、量子デバイス及び量子演算装置に関する。

背景技術

[0002]　次世代のコンピューティングの一つとして量子コンピュータの研究開発が行われている。量子素子であるダイヤモンドカラーセンターのスピンとフォトンを量子ビットとして量子演算する方法がある。この量子演算は－２７０℃程度の極低温でダイヤモンドから発光するフォトンのエンタングルを行うことで行われる。フォトンのエンタングルは、カラーセンターを含むダイヤモンド光導波路に光学的に結合されたサファイア等の光導波路を介して行われる。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開２００５－１７３１６２号公報

特許文献2：特開２０００－２０８８６２号公報

特許文献3：米国特許第１００３１２９３号明細書

特許文献4：米国特許第６５３９１５７号明細書

非特許文献

[0004] 非特許文献1：H. Bernien, et al., ”Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres”, Nature 497, 86 (2013)

非特許文献2：Michael J. Burek, et al., ”Fiber-Coupled Diamond Quantum Nanophotonic Interface”, Phys. Rev. Applied 8, 024026 (2017)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005]　ダイヤモンド光導波路と、ダイヤモンド光導波路に接続された光導波路との間では、熱膨張係数が大きく相違する。このため、常温において高精度で

接合されていたとしても、－２７０℃程度の極低温に冷却されると、熱変形の量が大きく相違するため、歪みに伴って光伝搬損失が増加することがある。また、これら２つの光導波路の間で剥離が生じ、剥離に伴って光伝搬損失が増加することもある。

[0006] 本開示の目的は、熱変形に伴う光伝搬損失の増加を抑制することができる量子デバイス及び量子演算装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0007] 本開示の一形態によれば、ダイヤモンドからなる第１光導波路と、前記第１光導波路に光学的に結合され、ダイヤモンドよりも屈折率が低い材料からなる第２光導波路と、を有し、前記第１光導波路は、カラーセンターを含む第１領域と、前記第１領域中を伝搬する光を前記第２光導波路に伝搬させる第２領域と、前記第２領域の前記第１領域とは反対側につながり、前記第２光導波路に接合された第３領域と、を有する量子デバイスが提供される。

発明の効果

[0008] 本開示によれば、熱変形に伴う光伝搬損失の増加を抑制することができる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]図１は、第１実施形態に係る量子デバイスを示す上面図である。

[図2]図２は、第１実施形態に係る量子デバイスを示す断面図である。

[図3]図３は、第２実施形態に係る量子デバイスを示す上面図である。

[図4]図４は、第３実施形態に係る量子デバイスを示す断面図である。

[図5]図５は、第４実施形態に係る量子デバイスを示す断面図である。

[図6]図６は、第５実施形態に係る量子デバイスを示す上面図である。

[図7]図７は、第５実施形態に係る量子デバイスを示す断面図（その１）である。

[図8]図８は、第５実施形態に係る量子デバイスを示す断面図（その２）である。

[図9]図９は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図（そ

の１）である。

[図10]図１０は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図（その２）である。

[図11]図１１は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図（その３）である。

[図12]図１２は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図（その４）である。

[図13]図１３は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図（その５）である。

[図14]図１４は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図（その６）である。

[図15]図１５は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図（その７）である。

[図16]図１６は、第６実施形態に係る量子コンピュータを示す図である。

[図17]図１７は、シミュレーションの結果を示す図（その１）である。

[図18]図１８は、図１７の一部の拡大図である。

[図19]図１９は、シミュレーションの結果を示す図（その２）である。

[図20]図２０は、図１９の一部の拡大図である。

[図21]図２１は、シミュレーションの結果を示す図（その３）である。

[図22]図２２は、図２１の一部の拡大図である。

[図23]図２３は、図２１の他の一部の拡大図である。

[図24]図２４は、シミュレーションの結果を示す図（その４）である。

[図25]図２５は、図２４の一部の拡大図である。

[図26]図２６は、図２４の他の一部の拡大図である。

[図27]図２７は、シミュレーションの結果を示す図（その５）である。

[図28]図２８は、図２７の一部の拡大図である。

[図29]図２９は、図２７の他の一部の拡大図である。

[図30]図３０は、シミュレーションの結果を示す図（その６）である。

[図31]図３１は、図３０の一部の拡大図である。

[図32]図３２は、図３０の他の一部の拡大図である。

[図33]図３３は、シミュレーションの結果を示す図（その７）である。

[図34]図３４は、図３１の一部の拡大図である。

[図35]図３５は、図３１の他の一部の拡大図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、本開示の実施形態について添付の図面を参照しながら具体的に説明する。なお、本明細書及び図面において、実質的に同一の機能構成を有する構成要素については、同一の符号を付することにより重複した説明を省くことがある。本開示においては、Ｘ１－Ｘ２方向、Ｙ１－Ｙ２方向、Ｚ１－Ｚ２方向を相互に直交する方向とする。Ｘ１－Ｘ２方向及びＹ１－Ｙ２方向を含む面をＸＹ面と記載し、Ｙ１－Ｙ２方向及びＺ１－Ｚ２方向を含む面をＹＺ面と記載し、Ｚ１－Ｚ２方向及びＸ１－Ｘ２方向を含む面をＺＸ面と記載する。なお、便宜上、Ｚ１－Ｚ２方向を上下方向とし、Ｚ１側を上側、Ｚ２側を下側とする。また、平面視とは、Ｚ１側から対象物を視ることをいい、平面形状とは、対象物をＺ１側から視た形状のことをいう。

[0011] （第１実施形態）

まず、第１実施形態について説明する。第１実施形態は量子デバイスに関する。第１実施形態に係る量子デバイスは、例えば量子コンピュータ等の量子演算装置に用いられる。図１は、第１実施形態に係る量子デバイスを示す上面図である。図２は、第１実施形態に係る量子デバイスを示す断面図である。図２は、図１中のII-II線に沿った断面図に相当する。

[0012] 図１及び図２に示すように、第１実施形態に係る量子デバイス１は、第１光導波路１０と、第２光導波路２０とを有する。第１光導波路１０はダイヤモンドからなり、第２光導波路２０は、ダイヤモンドよりも屈折率が低い材料からなる。第２光導波路２０の材料は、例えば、サファイア、シリコン、炭化シリコン、窒化シリコン若しくは酸化シリコン又はこれらの任意の組み合わせである。第１光導波路１０は第２光導波路２０の上に積層されている

。第２光導波路２０は光学的に第１光導波路１０に結合されている。

[0013] 第１光導波路１０は、第１領域１１１と、第２領域１１２と、第３領域１１３とを有する。第１領域１１１はカラーセンターを含む。第２領域１１２は、第１領域１１１中を伝搬する光を第２光導波路２０に伝搬させる。第３領域１１３は、第２領域１１２の第１領域１１１とは反対側につながっている。第３領域１１３は第２光導波路２０に接合されている。

[0014] 第１領域１１１の高さＨ１及び幅Ｗ１は、第１領域１１１中を伝搬する光３０に対して単一モード導波条件を満たす。例えば、高さＨ１は光３０の波長λの０．２５倍～０．５０倍であり、幅Ｗ１は波長λの０．２５倍～０．６０倍である。波長λが６００ｎｍ～８００ｎｍである場合、高さＨ１は１５０ｎｍ～３００ｎｍであり、幅Ｗ１は１５０ｎｍ～３００ｎｍであってもよい。具体的な一例としては、波長λが６３７ｎｍである場合、高さＨ１は２４５ｎｍであり、幅Ｗ１は２８４ｎｍである。なお、高さＨ１は、積層方向（Ｚ１－Ｚ２方向）における第１領域１１１の寸法であり、幅Ｗ１は、第１領域１１１中の光３０の伝搬方向（Ｘ１－Ｘ２方向）及びＺ１－Ｚ２方向に垂直な方向（Ｙ１－Ｙ２方向）における第１領域１１１の寸法である。

[0015] 第２領域１１２の高さＨ２は第１領域１１１の高さＨ１と等しく、第２領域１１２の幅Ｗ２は第１領域１１１との境界１１２Ａから第３領域１１３との境界１１２Ｂに向かって減少している。第２領域１１２のＸ１－Ｘ２方向に垂直な断面の断面積は、境界１１２Ａから境界１１２Ｂに向かって減少している。例えば、幅Ｗ２及び断面積は直線的に減少している。第２領域１１２は、台形状の平面形状を有する。第２領域１１２の幅Ｗ２は、境界１１２Ｂにおいて単一モードが光伝搬できない幅である。例えば、境界１１２Ｂにおいて、高さＨ２は光３０の波長λの０．２５倍～０．５０倍であり、幅Ｗ２は波長λの０．２０倍～０．６０倍である。波長λが６００ｎｍ～８００ｎｍである場合、境界１１２Ｂにおいて、高さＨ２は１５０ｎｍ～３００ｎｍであり、幅Ｗ２は５０ｎｍ～１５０ｎｍであってもよい。なお、高さＨ２は、Ｚ１－Ｚ２方向における第２領域１１２の寸法であり、幅Ｗ２は、Ｙ１

－Ｙ２方向における第２領域１１２の寸法である。第１領域１１１を伝搬してきた光３０は第２領域１１２において外部に漏れ出す際、周囲の領域のうち第２領域１１２の材料であるダイヤモンドの屈折率と最も近い屈折率を有する領域に漏れ出すため、光３０はサファイアなどの第２光導波路２０に伝搬される。

[0016] 第３領域１１３の高さＨ３及び幅Ｗ３は、それぞれ境界１１２Ｂにおける第２領域１１２の高さＨ２及び幅Ｗ２と等しい。第３領域１１３は、長方形状の平面形状を有する。光３０は第３領域１１３を伝搬しにくい。第３領域１１３の長さＬ３は、例えば１００ｎｍ以上であり、好ましくは５００ｎｍ以上である。なお、高さＨ３は、Ｚ１－Ｚ２方向における第３領域１１３の寸法であり、幅Ｗ３は、Ｙ１－Ｙ２方向における第３領域１１３の寸法であり、長さＬ３は、Ｘ１－Ｘ２方向における第３領域１１３の寸法である。

[0017] このように構成された量子デバイス１においては、カラーセンターで発せられた光３０は第１領域１１１中を伝搬し、第２領域１１２により第２光導波路２０に伝搬する。第２光導波路２０に伝搬した光３０は量子演算に用いられる。

[0018] また、量子演算に際して量子デバイス１が－２７０℃程度の極低温に冷却されると、第１光導波路１０及び第２光導波路２０がそれぞれの材料の熱膨張率に依存し熱収縮する。このとき、第１光導波路１０と第２光導波路２０との間で熱膨張率が異なるため、第１光導波路１０と第２光導波路２０との界面に応力が作用する。この応力は、第１光導波路１０のＸ１側の先端に集中し、この先端から離れるほど、Ｘ１－Ｘ２方向で低くなる。従って、第２領域１１２及びその近傍に作用する応力は、第３領域１１３が設けられていない場合と比較して低減される。このため、熱変形に伴う光伝搬損失の増加を抑制することができる。

[0019] （第２実施形態）

次に、第２実施形態について説明する。第２実施形態は、主として、第１光導波路の構成の点で第１実施形態と相違する。図３は、第２実施形態に係

る量子デバイスを示す上面図である。

[0020] 図３に示すように、第２実施形態に係る量子デバイス２では、第３領域１１３に代えて第３領域２１３が設けられている。第３領域２１３の第２領域１１２とは反対側の端部、すなわちＸ１側の端部の側面は曲面である。第３領域２１３の他の構成は第３領域１１３と同様である。

[0021] 他の構成は第１実施形態と同様である。

[0022] 第２実施形態においても、第１実施形態と同様の効果が得られる。また、第２実施形態では、第３領域２１３のＸ１側の端部の側面が曲面となっているため、第３領域２１３のＸ１側の端部に作用する応力が分散されやすい。従って、第３領域２１３の剥離及び歪みが抑制され、第３領域２１３に生じた剥離及び歪みの第２領域１１２への伝播を抑制することができ、光伝搬損失の増加を更に抑制することができる。

[0023] （第３実施形態）

次に、第３実施形態について説明する。第３実施形態は、主として、第１光導波路の構成の点で第２実施形態と相違する。図４は、第３実施形態に係る量子デバイスを示す断面図である。

[0024] 図４に示すように、第３実施形態に係る量子デバイス３では、第３領域１１３に代えて第３領域３１３が設けられている。第３領域３１３の高さＨ３は第２領域１１２の高さＨ２よりも小さい。第３領域３１３の他の構成は第３領域１１３と同様である。

[0025] 他の構成は第１実施形態と同様である。

[0026] 第３実施形態においても、第２実施形態と同様の効果が得られる。また、第３実施形態では、第３領域３１３の高さＨ３が第２領域１１２の高さＨ２よりも小さいため、第２領域１１２まで伝搬してきた光の第３領域３１３への光伝搬を抑制できる。

[0027] なお、第３領域３１３の平面形状は、第３領域１１３と同様に長方形状であってもよい。つまり、第３領域３１３の端面が平面であってもよい。

[0028] （第４実施形態）

次に、第４実施形態について説明する。第４実施形態は、主として、第１光導波路の構成の点で第３実施形態と相違する。図５は、第４実施形態に係る量子デバイスを示す断面図である。

[0029] 図５に示すように、第４実施形態に係る量子デバイス４では、第２領域１１２に代えて第２領域４１２が設けられている。第２領域４１２の高さＨ２は、第１領域１１１との境界４１２Ａから第３領域３１３との境界４１２Ｂに向かって減少している。従って、第２領域４１２のＸ１－Ｘ２方向に垂直な断面の断面積は、境界４１２Ａから境界４１２Ｂに向かって減少している。例えば、高さＨ２、幅Ｗ２及び断面積は直線的に減少している。第２領域４１２の高さＨ２は、境界４１２Ｂにおいて単一モードが伝搬できない高さである。例えば、境界４１２Ｂにおいて、高さＨ２は光３０の波長λの０．２０倍～０．５０倍であり、幅Ｗ２は波長λの０．２０倍～０．６０倍である。光３０の波長λが６００ｎｍ～８００ｎｍである場合、境界４１２Ｂにおいて、第２領域４１２の高さＨ２は第３領域３１３の高さＨ３と等しい。例えば、高さＨ３は５０ｎｍ～１５０ｎｍであってもよい。第２領域４１２の他の構成は第２領域１１２と同様である。

[0030] 他の構成は第３実施形態と同様である。

[0031] 第４実施形態においても、第３実施形態と同様の効果が得られる。また、第４実施形態では、第２領域４１２の高さＨ２が境界４１２Ａから境界４１２Ｂに向かって減少しているため、第２領域１１２により光３０を第２光導波路２０に伝搬させやすい。

[0032] （第５実施形態）

次に、第５実施形態について説明する。第５実施形態は、主として、第２光導波路の下方の構成の点で第４実施形態と相違する。図６は、第５実施形態に係る量子デバイスを示す上面図である。図７及び図８は、第５実施形態に係る量子デバイスを示す断面図である。図７は、図６中のVII-VII線に沿った断面図に相当する。図８は、図６中のVIII-VIII線に沿った断面図に相当する。

[0033] 図６～図８に示すように、第５実施形態に係る量子デバイス５は、第４実施形態の構造に加えて、基板５１と、クラッド層５２とを有する。クラッド層５２は基板５１の上に設けられている。第２光導波路２０はクラッド層５２の上に設けられている。例えば、基板５１の材料はサファイア基板であり、クラッド層５２の材料は酸化シリコン（SiO_2）である。

[0034] クラッド層５２に中空部５３が形成されている。中空部５３は、第２領域４１２のＺ２側（下方）に形成されている。中空部５３が、クラッド層５２の、第２領域４１２のＺ２側の部分から第３領域３１３のＺ２側の部分にわたって形成されていてもよい。

[0035] クラッド層５２の上に光導波路層２０Ｂが設けられており、光導波路層２０Ｂと第２光導波路２０との間に溝２０Ａが形成されている。光導波路層２０Ｂの材料は第２光導波路２０の材料と同じである。

[0036] 第５実施形態においても、第４実施形態と同様の効果が得られる。また、第５実施形態では、基板５１の上にクラッド層５２を介して第２光導波路２０が設けられ、クラッド層５２に中空部５３が形成されている。このため、熱変形により第２領域４１２及びその近傍に作用する応力が緩和される。従って、熱変形に伴う光伝搬損失の増加を更に抑制することができる。

[0037] 次に、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法について説明する。図９～図１５は、第５実施形態に係る量子デバイスの製造方法を示す断面図である。図９～図１３は、図６中のVIII-VIII線に沿った断面の変化を示す。図１４～図１５は、図６中のVII-VII線に沿った断面の変化を示す。

[0038] まず、図９に示すように、基板５１、クラッド層５２Ｘ及び光導波路層２０Ｘを備えた基板を準備する。クラッド層５２Ｘの材料はクラッド層５２の材料と同じく、例えば酸化シリコンである。光導波路層２０Ｘの材料は第２光導波路２０の材料と同じく、例えばサファイアである。次いで、光導波路層２０Ｘの上にダイヤモンド層１０Ｘを設ける。例えば、形成しようとする第１領域１１１の高さＨ３よりも厚いダイヤモンド層を形成し、このダイヤモンド層の厚さが高さＨ３と等しくなるまで、ダイヤモンド層を薄膜化する

。

[0039] その後、図１０に示すように、ダイヤモンド層１０Ｘを第１光導波路１０の平面形状に加工する。ダイヤモンド層１０Ｘの加工では、例えば、電子ビーム（electron beam：ＥＢ）レジストの形成と、ＥＢ露光機を用いた露光と、ＥＢレジストの現像と、酸素ガスを用いたプラズマエッチングとをこの順で行う。ＥＢレジストに代えてフォトレジストを用いてもよい。また、エッチングとしてウェットエッチングを行ってもよい。集束イオンビーム（focused ion beam：ＦＩＢ）を用いてダイヤモンド層１０Ｘを加工してもよい。

[0040] 続いて、図１１及び図１４に示すように、ダイヤモンド層１０Ｘを立体的に加工し、第１領域１１１、第２領域４１２及び第３領域３１３を有する第１光導波路１０を形成する。ダイヤモンド層１０Ｘは、例えばＦＩＢを用いて加工する。複数回のフォトリソグラフィを経てダイヤモンド層１０Ｘを加工してもよく、複数回のＥＢ露光を経てダイヤモンド層１０Ｘを加工してもよい。

[0041] 次いで、図１２に示すように、光導波路層２０Ｘを加工し、第２光導波路２０を形成する。光導波路層２０Ｘの加工では、例えば、第２光導波路２０の周囲に溝２０Ａを形成し、その周囲に光導波路層２０Ｂを残す。光導波路層２０Ｘの加工では、例えば、ＥＢレジストの形成と、ＥＢ露光機を用いた露光と、ＥＢレジストの現像と、塩素系ガスを用いたプラズマエッチングとをこの順で行う。ＥＢレジストに代えてフォトレジストを用いてもよい。また、エッチングとしてウェットエッチングを行ってもよい。

[0042] その後、図１３及び図１５に示すように、クラッド層５２Ｘを加工することで、中空部５３が形成されたクラッド層５２を得る。クラッド層５２Ｘの加工では、例えば、気化フッ酸を用い、溝２０Ａを通じてエッチングを行う。

[0043] このようにして、第５実施形態に係る量子デバイス５を製造することができる。

[0044] なお、第１～第５実施形態において、第３領域のＸ１－Ｘ２方向に垂直な

断面の断面積は、第２領域の第３領域との境界での断面積Ｓ０と等しい必要はなく、断面積Ｓ０未満であってもよい。また、第３領域の高さＨ３は、第２領域の第３領域との境界での高さＨ２と等しい必要はなく、高さＨ２未満であってもよく、第３領域の幅Ｗ３は、第２領域の第３領域との境界での幅Ｗ２と等しい必要はなく、幅Ｗ２未満であってもよい。

[0045] （第６実施形態）

次に、第６実施形態について説明する。第６実施形態は、量子コンピュータに関する。図１６は、第６実施形態に係る量子コンピュータを示す図である。

[0046] 第６実施形態に係る量子コンピュータ６は、汎用コンピュータ６０１と、制御部６０２と、量子デバイス６０３とを有する。制御部６０２は、汎用コンピュータ６０１からの制御信号に基づいて量子デバイス６０３を制御する。量子デバイス６０３としては、第１～第５実施形態のいずれかに係る量子デバイスが用いられる。制御部６０２及び量子デバイス６０３はクリオスタット６０４に収納される。

[0047] 量子コンピュータ６により、安定した量子演算を行うことが可能である。

[0048] （シミュレーション）

次に、本願発明者が行ったシミュレーションの結果について説明する。このシミュレーションでは、７種類の構造Ｓ１～Ｓ７について、３００Ｋで応力フリーである場合に、４Ｋまで冷却したときの内部応力の分布を計算した。図１７～図２３は、シミュレーションの結果を示す図である。

[0049] 図１７に示すように、構造Ｓ１では、サファイア基板９１の上に酸化シリコンのクラッド層９２が設けられ、クラッド層９２の上にサファイアの第２光導波路９３が設けられ、第２光導波路９３の上にダイヤモンドの第１光導波路９４が設けられている。第１光導波路９４は、第１領域９４Ａと、第２領域９４Ｂとを有する。第１領域９４Ａ及び第２領域９４Ｂの高さは２００ｎｍである。第１領域９４Ａの幅は２００ｎｍである。第２領域９４Ｂの幅は、第１領域９４Ａとの境界から先端部にかけて直線的に減少している。第

２領域９４Ｂの長さは１５００ｎｍである。

[0050] 図１８は、図１７中の二点鎖線XVIIIで囲まれた領域の拡大図である。構造Ｓ１についてのシミュレーションの結果では、第２領域９４Ｂの先端部での内部応力は最大で５５．５ＧＰａであった。

[0051] 図１９に示すように、構造Ｓ２では、第２領域９４Ｂの高さが、第１領域９４Ａとの境界から先端部にかけて直線的に減少している。他の条件は構造Ｓ１と同様である。

[0052] 図２０は、図１９中の二点鎖線XXで囲まれた領域の拡大図である。構造Ｓ２についてのシミュレーションの結果では、第２領域９４Ｂの先端部での内部応力は最大で２５．０ＧＰａであった。

[0053] 図２１に示すように、構造Ｓ３では、第１光導波路９４が、第１領域９４Ａ及び第２領域９４Ｂに加えて、第３領域９４Ｃを有する。第３領域９４Ｃの高さは２００ｎｍであり、第３領域９４Ｃの幅は１００ｎｍである。第２領域９４Ｂの幅は、第１領域９４Ａとの境界から第３領域９４Ｃとの境界にかけて２００ｎｍから１００ｎｍまで直線的に減少している。第２領域９４Ｂの長さは５００ｎｍであり、第３領域の長さは１０００ｎｍである。他の条件は構造Ｓ１と同様である。構造Ｓ３は、第１実施形態の構造に倣っている。

[0054] 図２２は、図２１中の二点鎖線XXIIで囲まれた領域の拡大図である。図２３は、図２１中の二点鎖線XXIIIで囲まれた領域の拡大図である。構造Ｓ３についてのシミュレーションの結果では、第３領域９４Ｃの先端部での内部応力は最大で８．０ＧＰａであり、第２領域９４Ｂでの内部応力は最大で５．０ＧＰａであった。

[0055] 図２４に示すように、構造Ｓ４では、第３領域９４Ｃの高さが１００ｎｍである。また、第２領域９４Ｂの高さが、第１領域９４Ａとの境界から第３領域９４Ｃとの境界にかけて２００ｎｍから１００ｎｍまで直線的に減少している。他の条件は構造Ｓ３と同様である。構造Ｓ４は、第４実施形態において第３領域３１３の先端部を平面とした構造に倣っている。

[0056] 図２５は、図２４中の二点鎖線XXVで囲まれた領域の拡大図である。図２６は、図２４中の二点鎖線XXVIで囲まれた領域の拡大図である。構造Ｓ４についてのシミュレーションの結果では、第３領域９４Ｃの先端部での内部応力は最大で６．２ＧＰａであり、第２領域９４Ｂでの内部応力は最大で５．０ＧＰａであった。

[0057] 図２７に示すように、構造Ｓ５では、第３領域９４Ｃの高さが１００ｎｍである。他の条件は構造Ｓ３と同様である。構造Ｓ５は、第３実施形態において第３領域３１３の先端部を平面とした構造に倣っている。

[0058] 図２８は、図２７中の二点鎖線XXVIIIで囲まれた領域の拡大図である。図２９は、図２７中の二点鎖線XXIXで囲まれた領域の拡大図である。構造Ｓ５についてのシミュレーションの結果では、第３領域９４Ｃの先端部での内部応力は最大で６．０ＧＰａであり、第２領域９４Ｂでの内部応力は最大で８．６ＧＰａであった。

[0059] 図３０に示すように、構造Ｓ６では、第３領域３１３の先端部が曲面となっている。他の条件は構造Ｓ４と同様である。構造Ｓ６は、第４実施形態の構造に倣っている。

[0060] 図３１は、図３０中の二点鎖線XXXIで囲まれた領域の拡大図である。図３２は、図３０中の二点鎖線XXXIIで囲まれた領域の拡大図である。構造Ｓ６についてのシミュレーションの結果では、第３領域９４Ｃの先端部での内部応力は最大で９．０ＧＰａであり、第２領域９４Ｂでの内部応力は最大で４．０ＧＰａであった。

[0061] 図３３に示すように、構造Ｓ７では、クラッド層９２に中空部９５が形成されている。他の条件は構造Ｓ６と同様である。構造Ｓ７は、第５実施形態の構造に倣っている。

[0062] 図３４は、図３３中の二点鎖線XXXIVで囲まれた領域の拡大図である。図３５は、図３３中の二点鎖線XXXVで囲まれた領域の拡大図である。構造Ｓ７についてのシミュレーションの結果では、第３領域９４Ｃの先端部での内部応力は最大で６．０ＧＰａであり、第２領域９４Ｂでの内部応力は最大で３．

０ＧＰａであった。

[0063] このように、シミュレーションでは、構造Ｓ３～Ｓ７では、構造Ｓ１及びＳ２と比較して、第２領域９４Ｂでの内部応力が著しく低いという結果が得られた。

[0064] 以上、好ましい実施の形態等について詳説したが、上述した実施の形態等に制限されることはなく、請求の範囲に記載された範囲を逸脱することなく、上述した実施の形態等に種々の変形及び置換を加えることができる。

符号の説明

[0065] １、２、３、４、５、６０３：量子デバイス

６：量子コンピュータ

１０：第１光導波路

２０：第２光導波路

５１：基板

５２：クラッド層

５３：中空部

１１１：第１領域

１１２、４１２：第２領域

１１２Ａ、１１２Ｂ、４１２Ａ、４１２Ｂ：境界

１１３、２１３、３１３：第３領域

請求の範囲

[請求項1] ダイヤモンドからなる第１光導波路と、

前記第１光導波路に光学的に結合され、ダイヤモンドよりも屈折率が低い材料からなる第２光導波路と、

を有し、

前記第１光導波路は、

カラーセンターを含む第１領域と、

前記第１領域中を伝搬する光を前記第２光導波路に伝搬させる第２領域と、

前記第２領域の前記第１領域とは反対側につながり、前記第２光導波路に接合された第３領域と、

を有することを特徴とする量子デバイス。

[請求項2] 前記第２領域の前記光の伝搬方向に垂直な断面の断面積は、前記第１領域との境界から前記第３領域との境界に向かって減少していることを特徴とする請求項１に記載の量子デバイス。

[請求項3] 前記第３領域の前記光の伝搬方向に垂直な断面の断面積は、前記第２領域の前記第３領域との境界での断面積以下であることを特徴とする請求項２に記載の量子デバイス。

[請求項4] 前記第２領域の幅は、前記第１領域との境界から前記第３領域との境界に向かって減少していることを特徴とする請求項１乃至３のいずれか１項に記載の量子デバイス。

[請求項5] 前記第３領域の幅は、前記第２領域の前記第３領域との境界での幅以下であることを特徴とする請求項４に記載の量子デバイス。

[請求項6] 前記第２領域の高さは、前記第１領域との境界から前記第３領域との境界に向かって減少していることを特徴とする請求項１乃至５のいずれか１項に記載の量子デバイス。

[請求項7] 前記第３領域の高さは、前記第２領域の前記第３領域との境界での高さ以下であることを特徴とする請求項６に記載の量子デバイス。

[請求項8] 前記第３領域の前記第２領域とは反対側の端部の側面は、曲面となっていることを特徴とする請求項１乃至７のいずれか１項に記載の量子デバイス。

[請求項9] 基板と、

前記基板の上に設けられたクラッド層と、

を有し、

前記第２光導波路は、前記クラッド層の上に設けられており、

前記クラッド層の前記第２領域の下方の部分に中空部が形成されていることを特徴とする請求項１乃至８のいずれか１項に記載の量子デバイス。

[請求項10] 前記中空部は、前記クラッド層の前記第２領域の下方の部分から前記第３領域の下方の部分にわたって形成されていることを特徴とする請求項９に記載の量子デバイス。

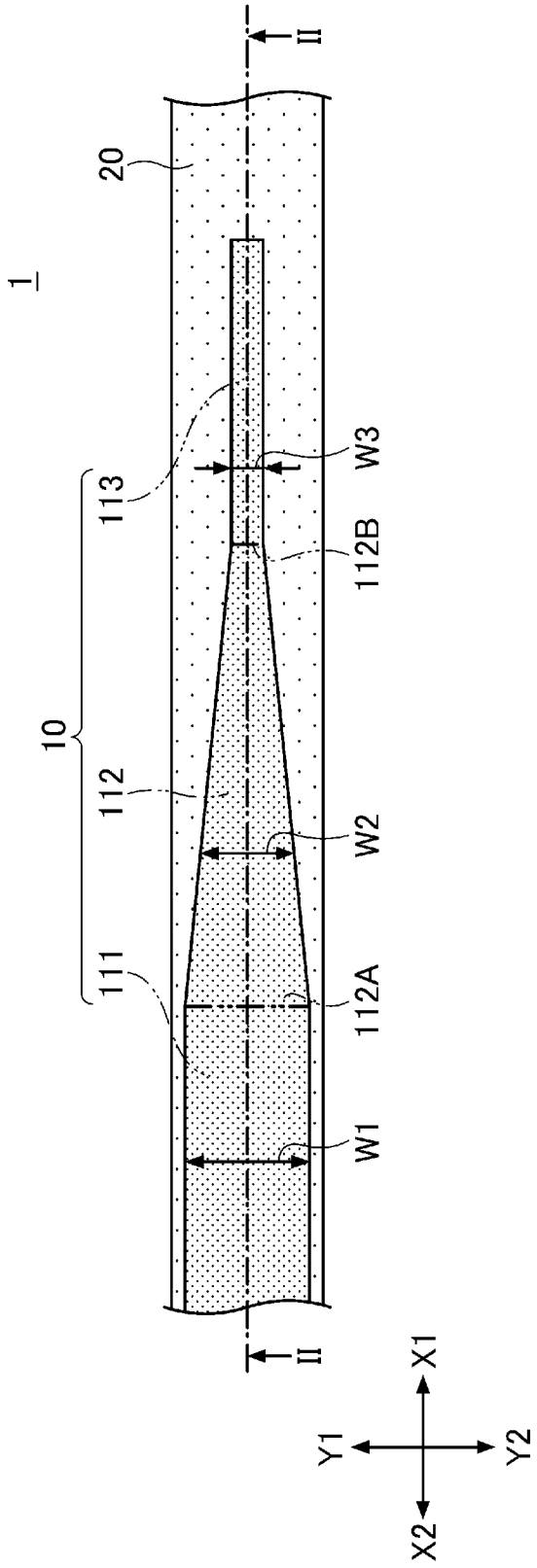
[請求項11] 前記第２光導波路は、サファイア、シリコン、炭化シリコン、窒化シリコン若しくは酸化シリコン又はこれらの任意の組み合わせを含むことを特徴とする請求項１乃至１０のいずれか１項に記載の量子デバイス。

[請求項12] 前記第１領域の高さは１５０ｎｍ～３００ｎｍであり、

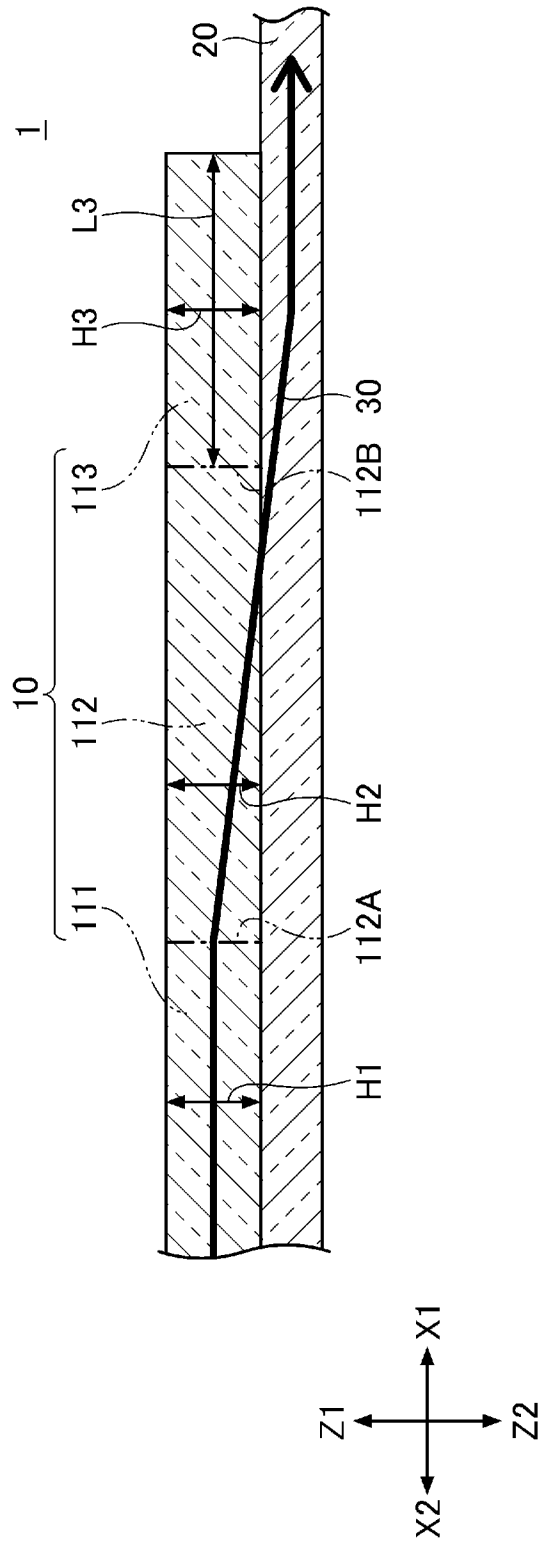
前記第１領域の幅は１５０ｎｍ～３００ｎｍであることを特徴とする請求項１乃至１１のいずれか１項に記載の量子デバイス。

[請求項13] 請求項１乃至１２のいずれか１項に記載の量子デバイスを含むことを特徴とする量子演算装置。

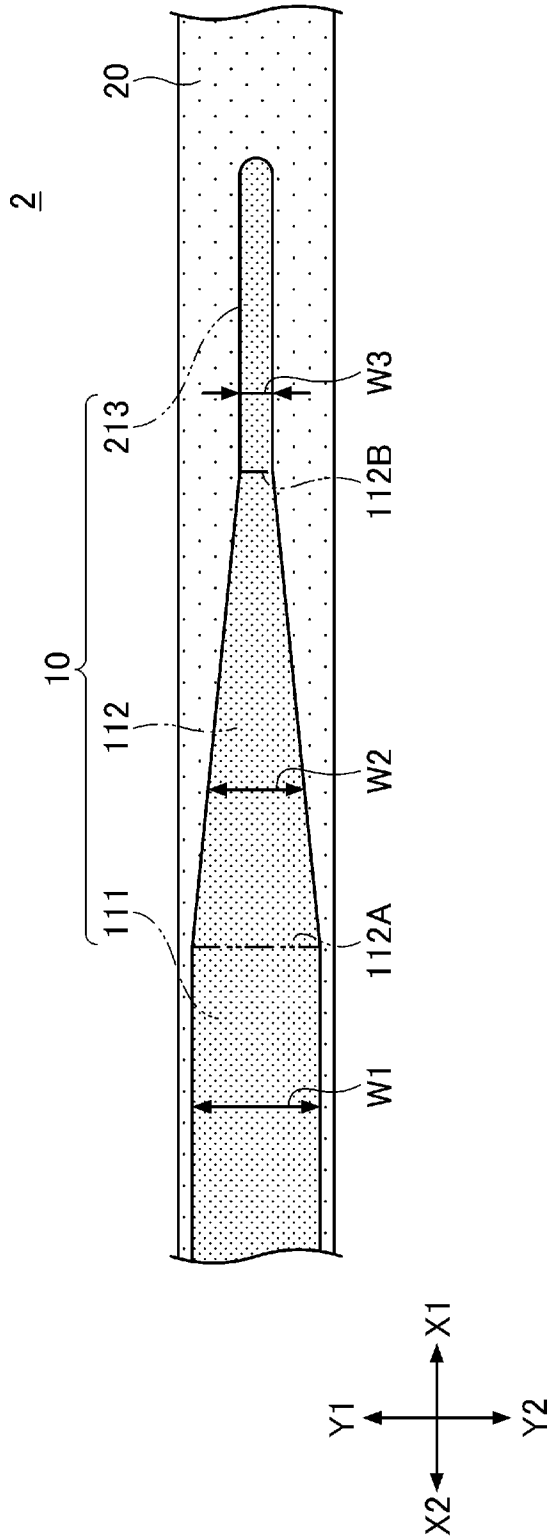
[図1]



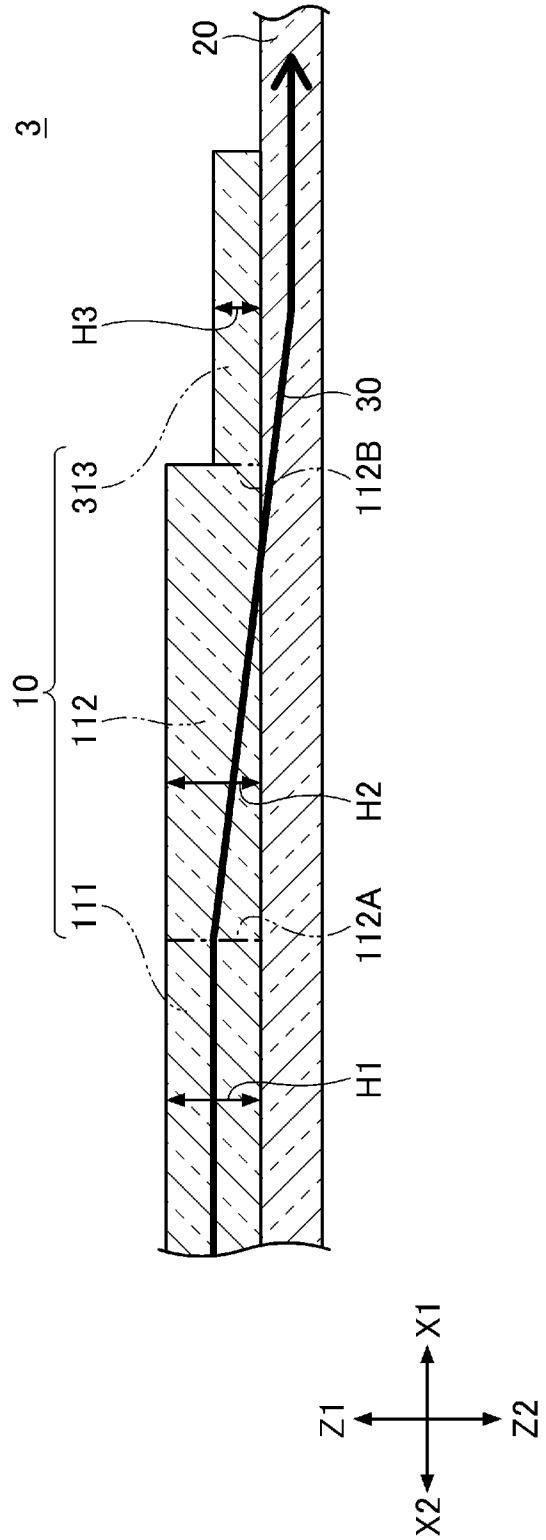
[図2]



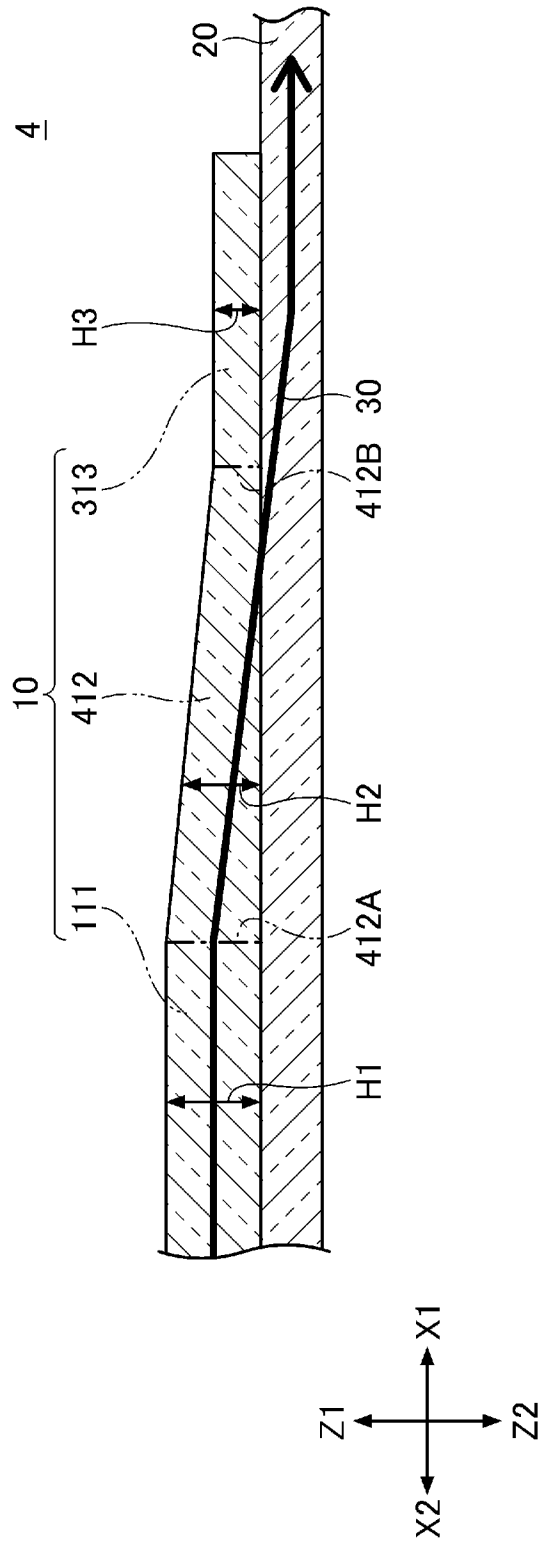
[図3]



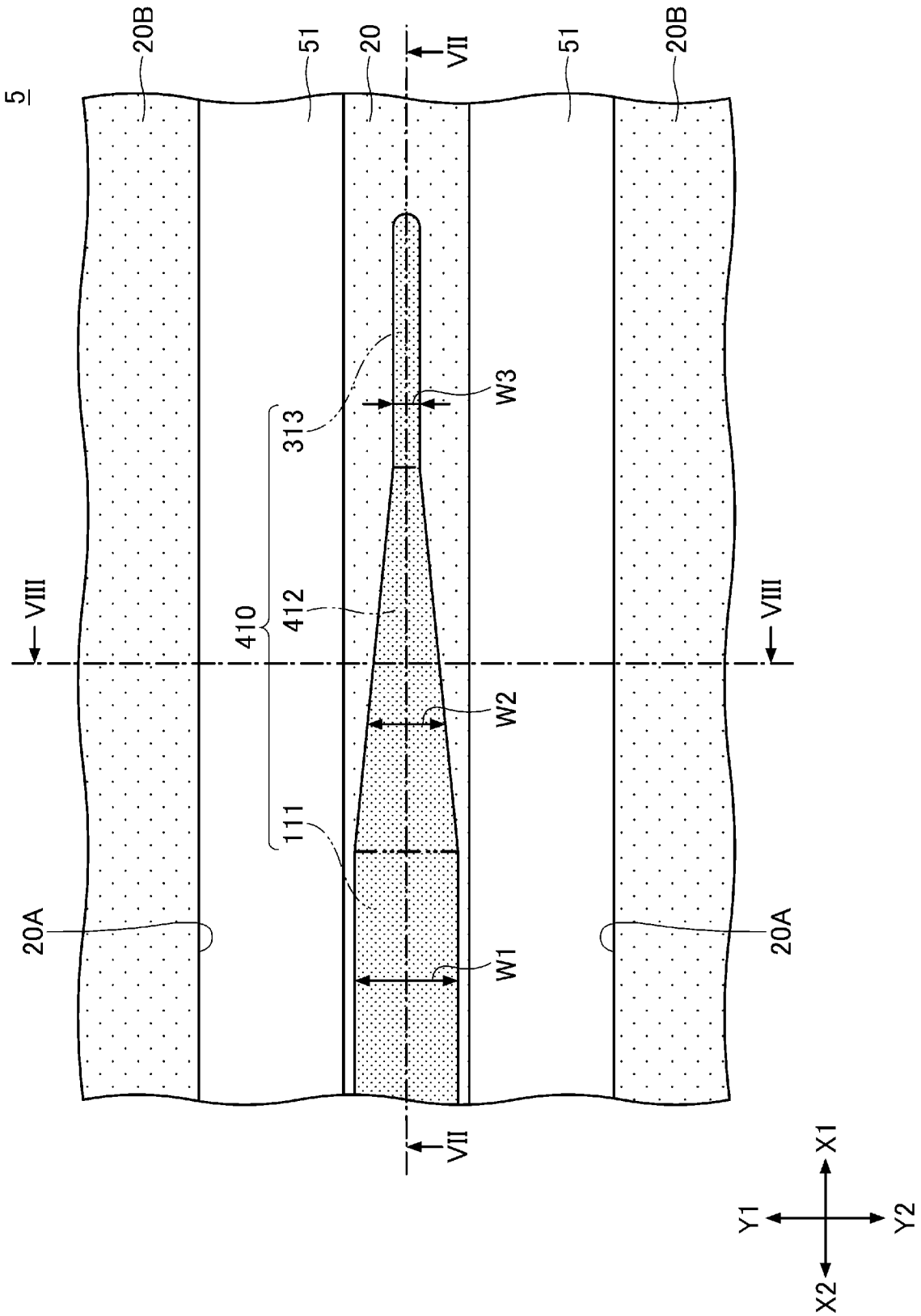
[図4]



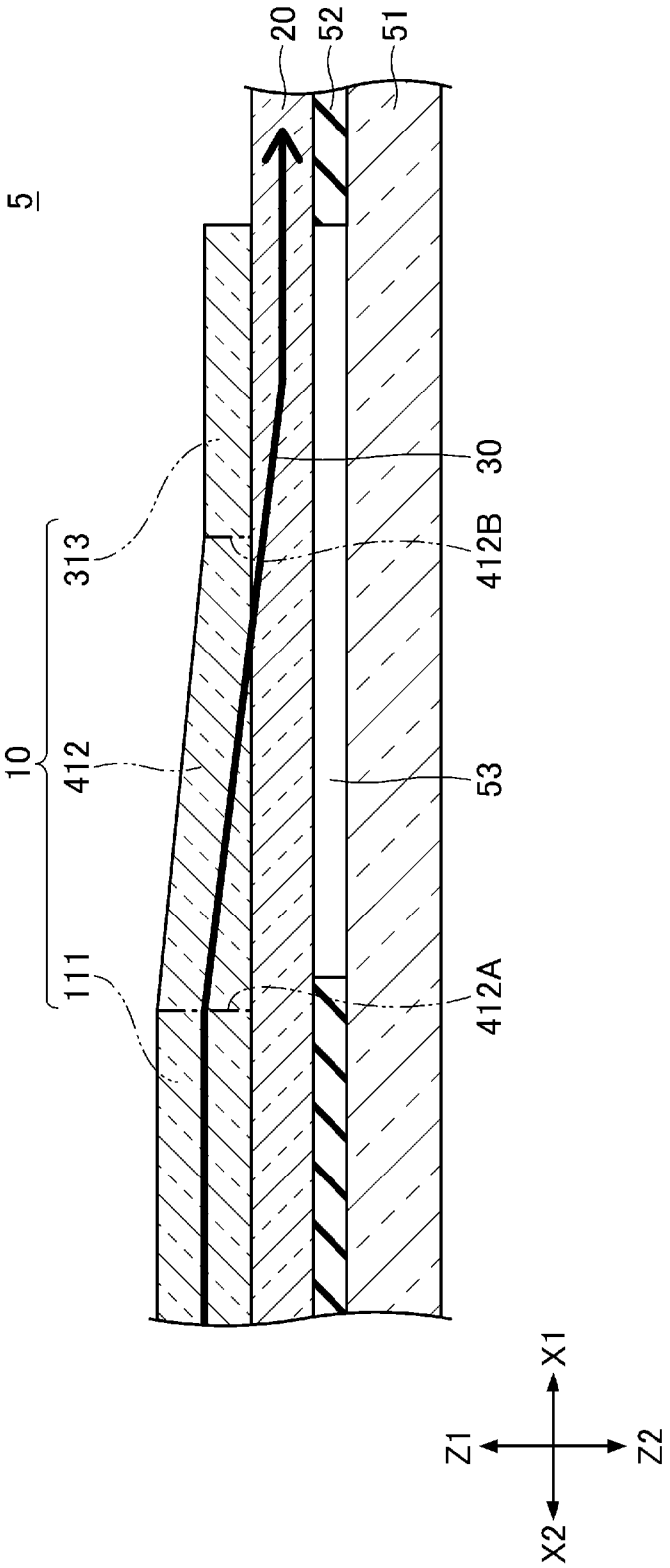
[図5]



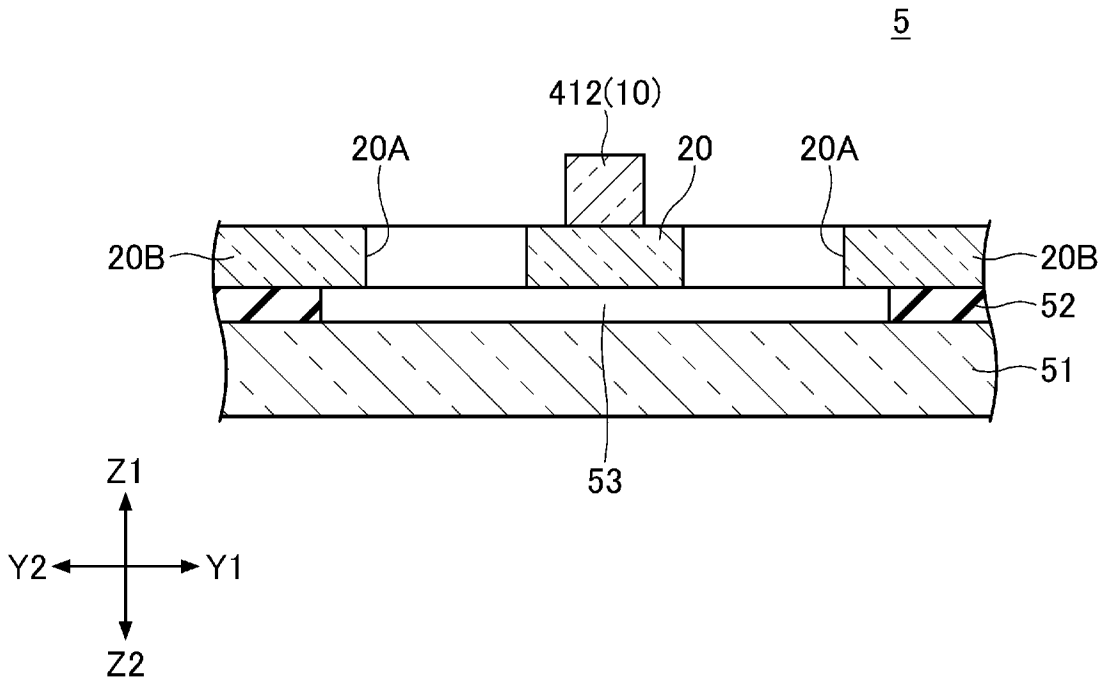
[図6]


5
20B
51
20
VII
51
20B
313
W3
VIII
410
412
VIII
W2
111
20A
20A
W1
VII
X1
Y1
Y2
X2

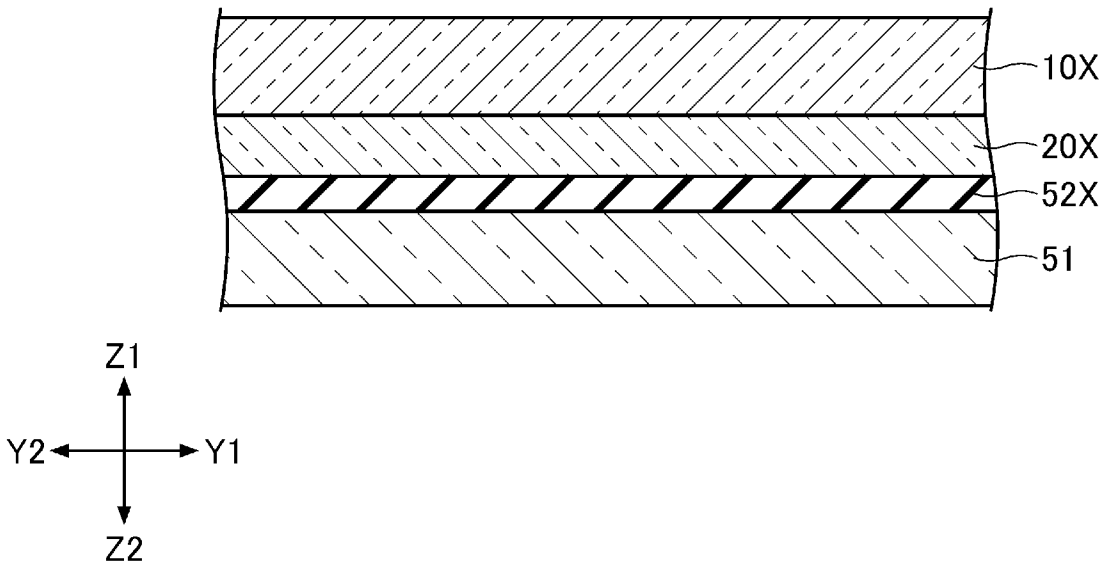
[図7]



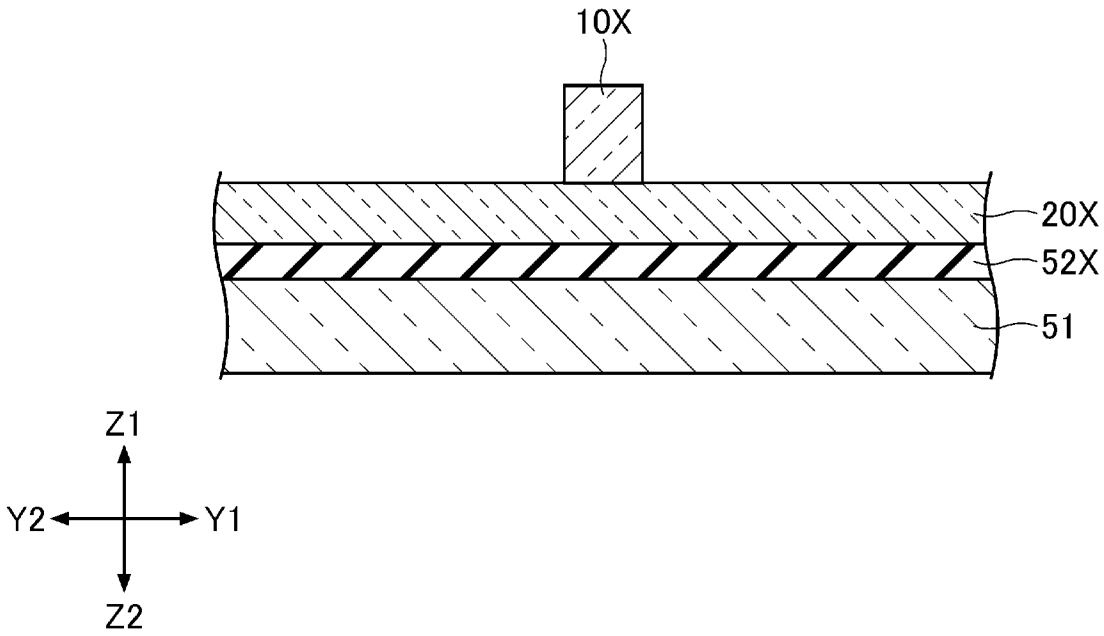
[図8]


5
412(10)
20A
20
20A
20B
20B
52
51
53
Z1
Y2
Y1
Z2

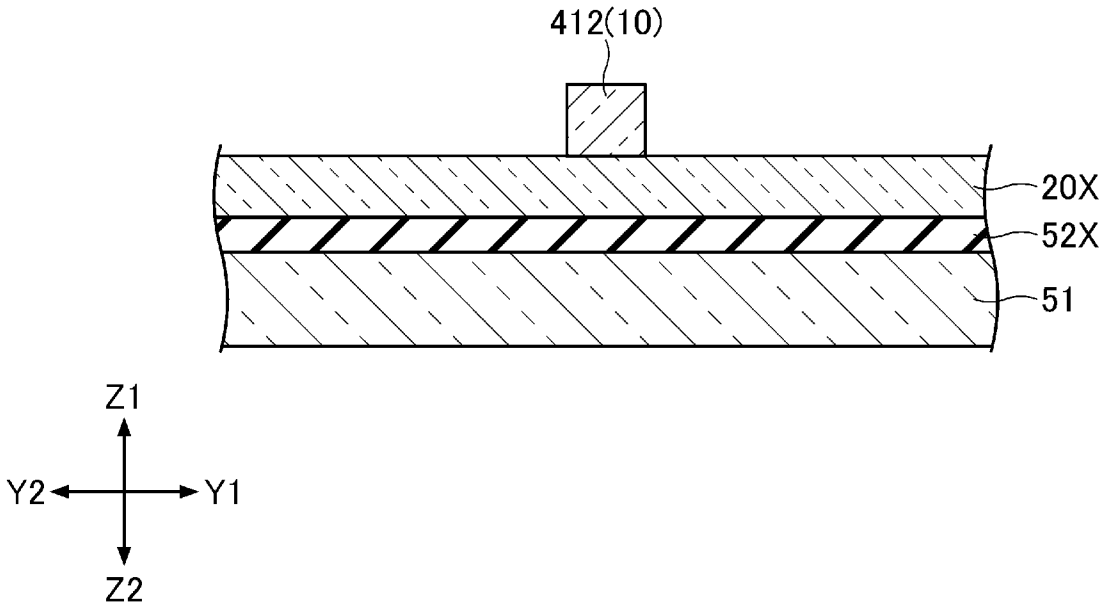
[図9]


10X
20X
52X
51
Z1
Y2
Y1
Z2

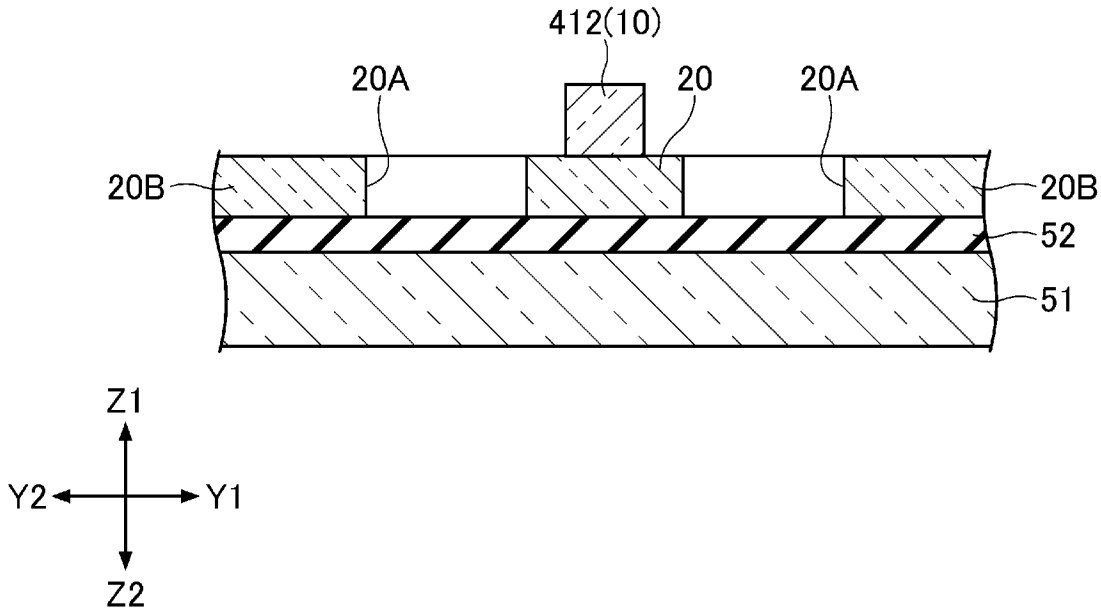
[図10]



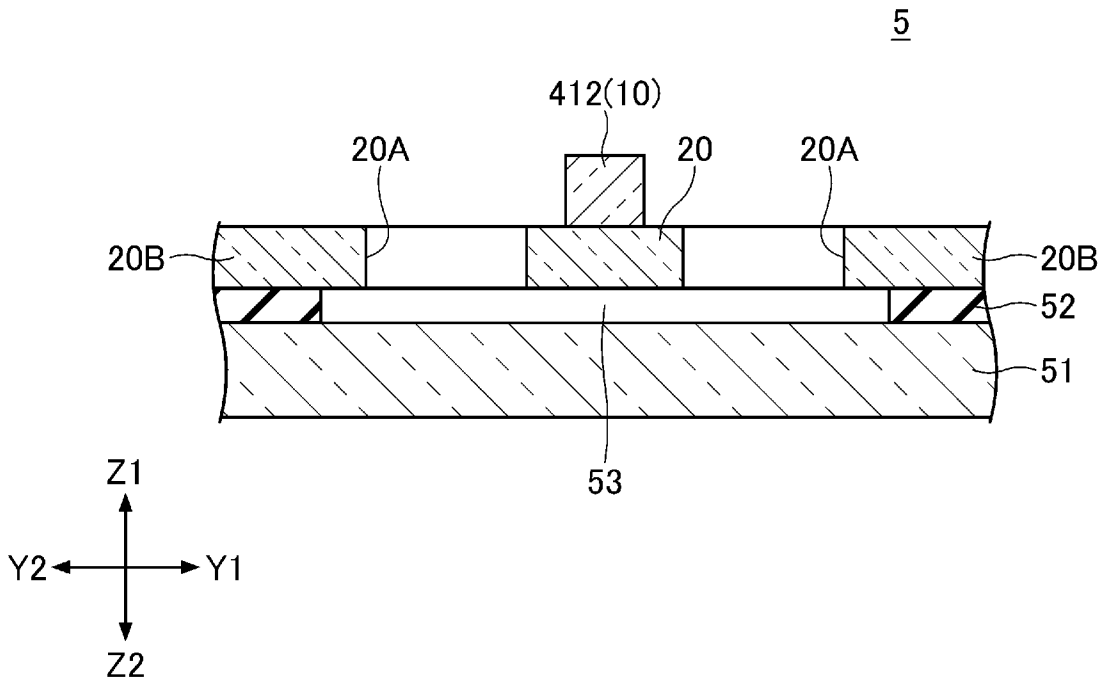
[図11]



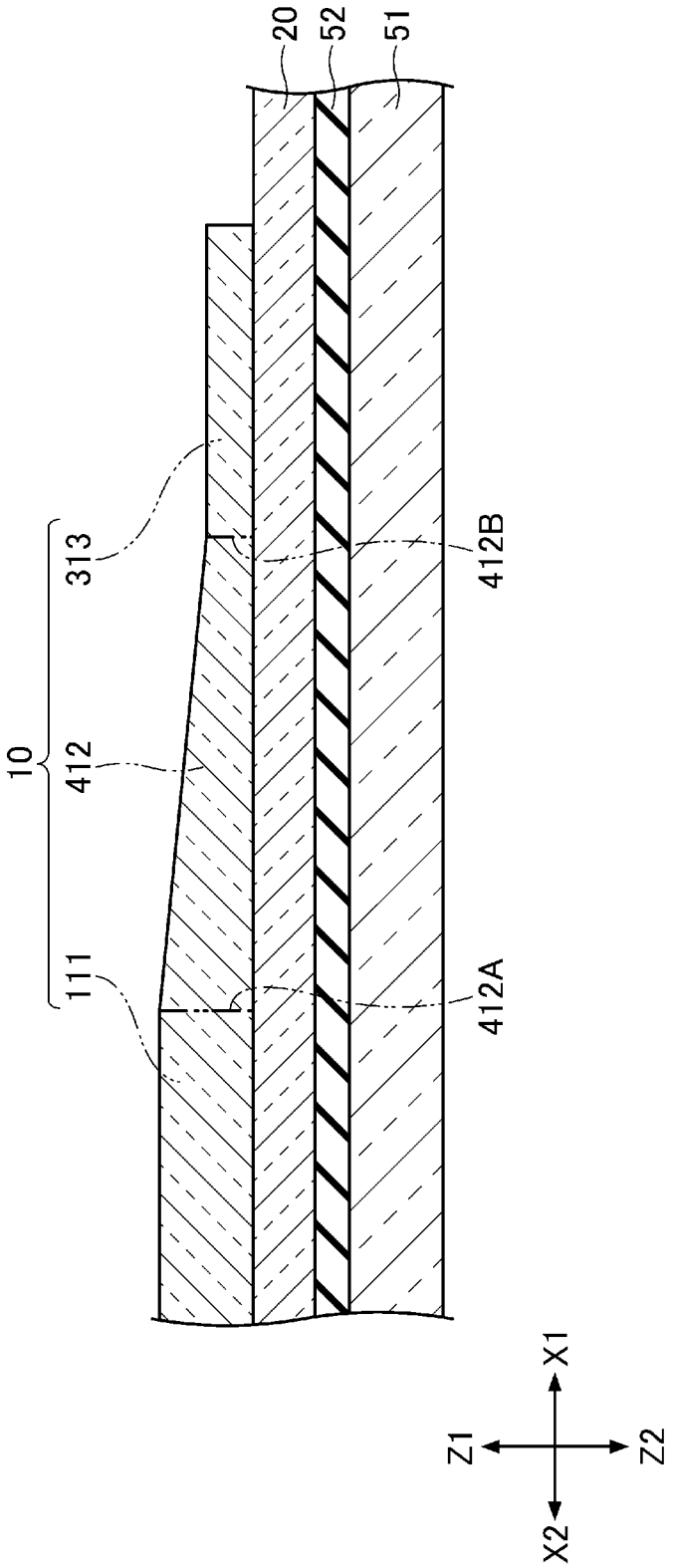
[図12]


412(10)
20A
20
20A
20B
20B
52
51
Z1
Y2
Y1
Z2

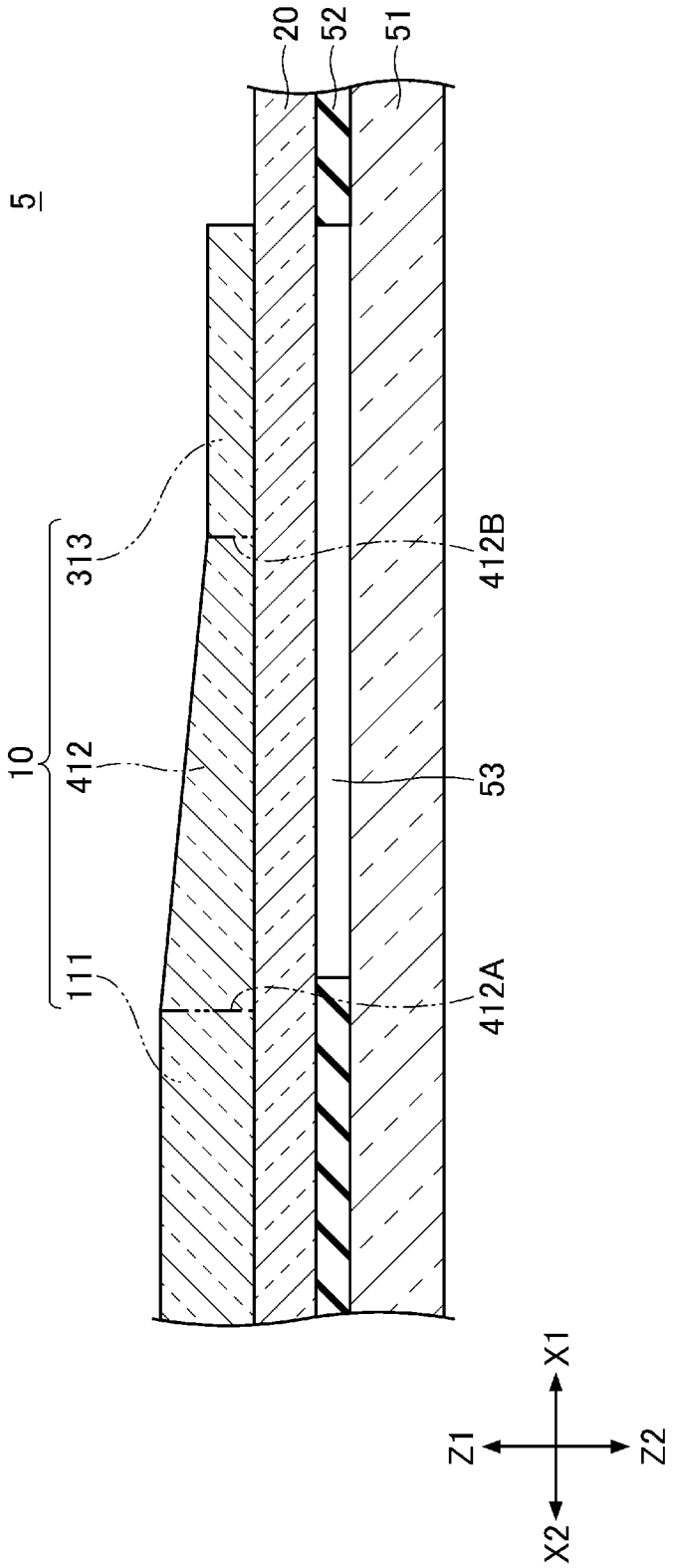
[図13]


5
412(10)
20A
20
20A
20B
20B
52
51
53
Z1
Y2
Y1
Z2

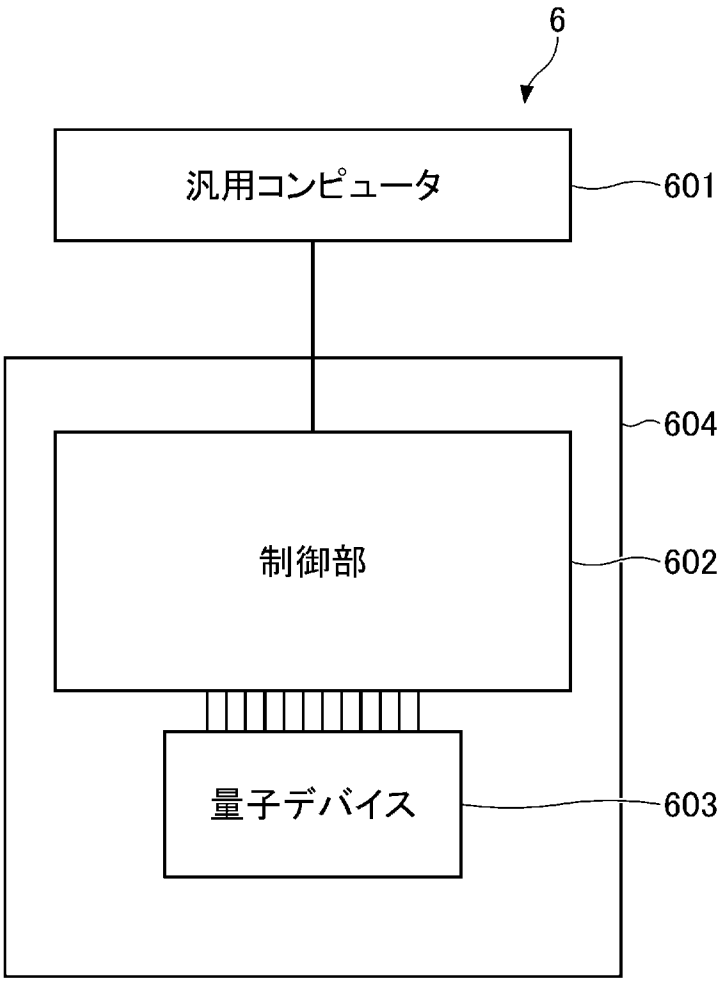
[図14]



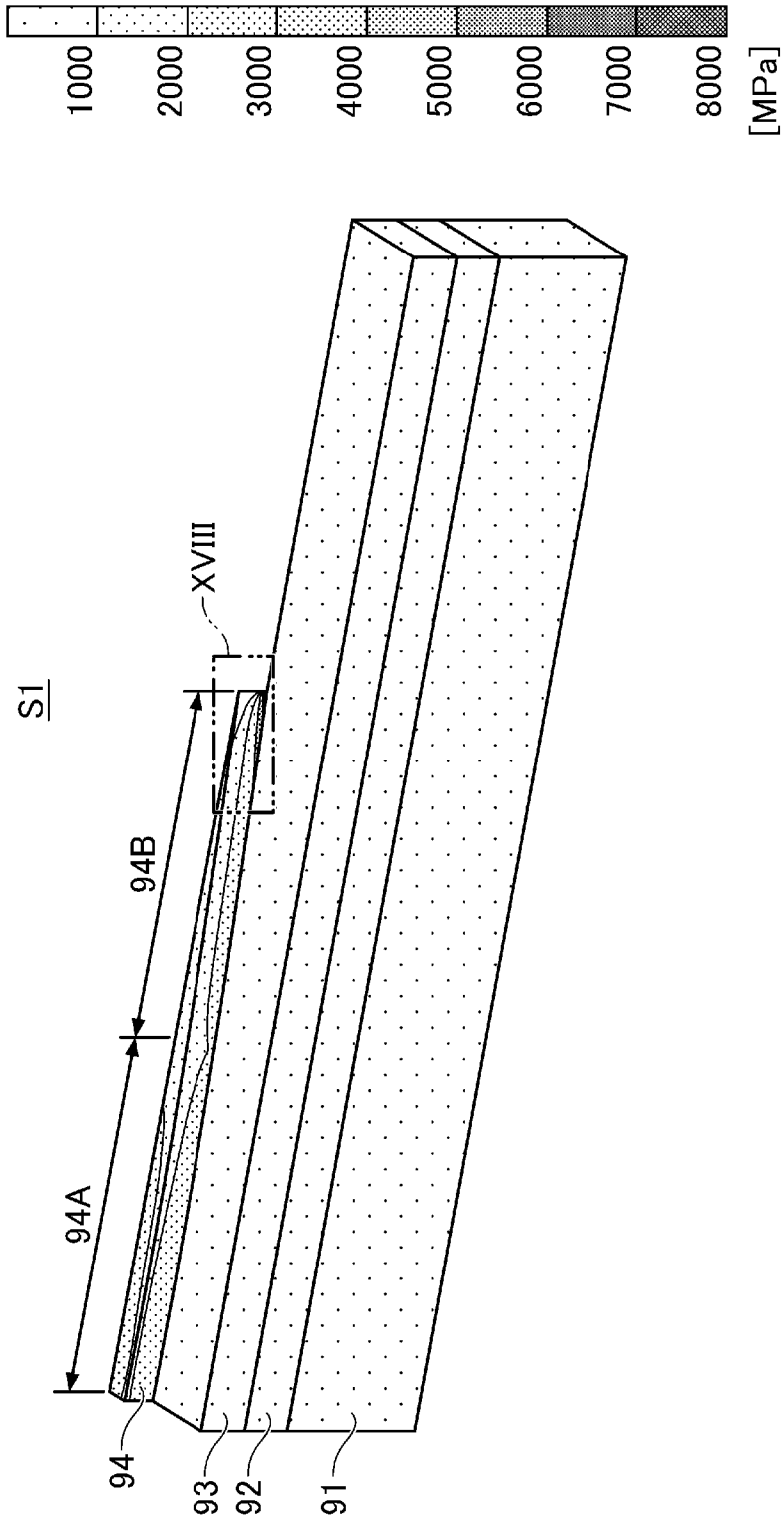
[図15]



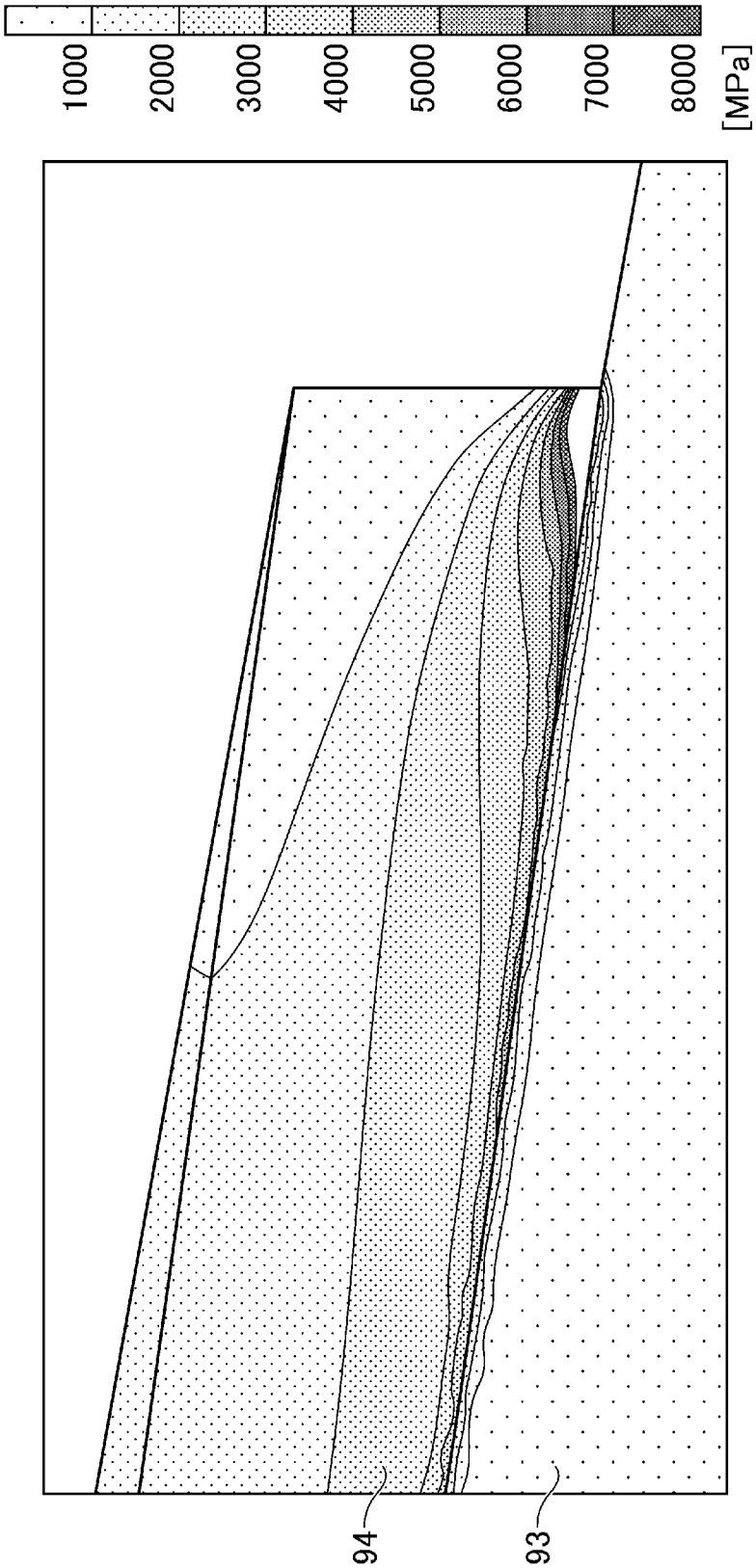
[図16]



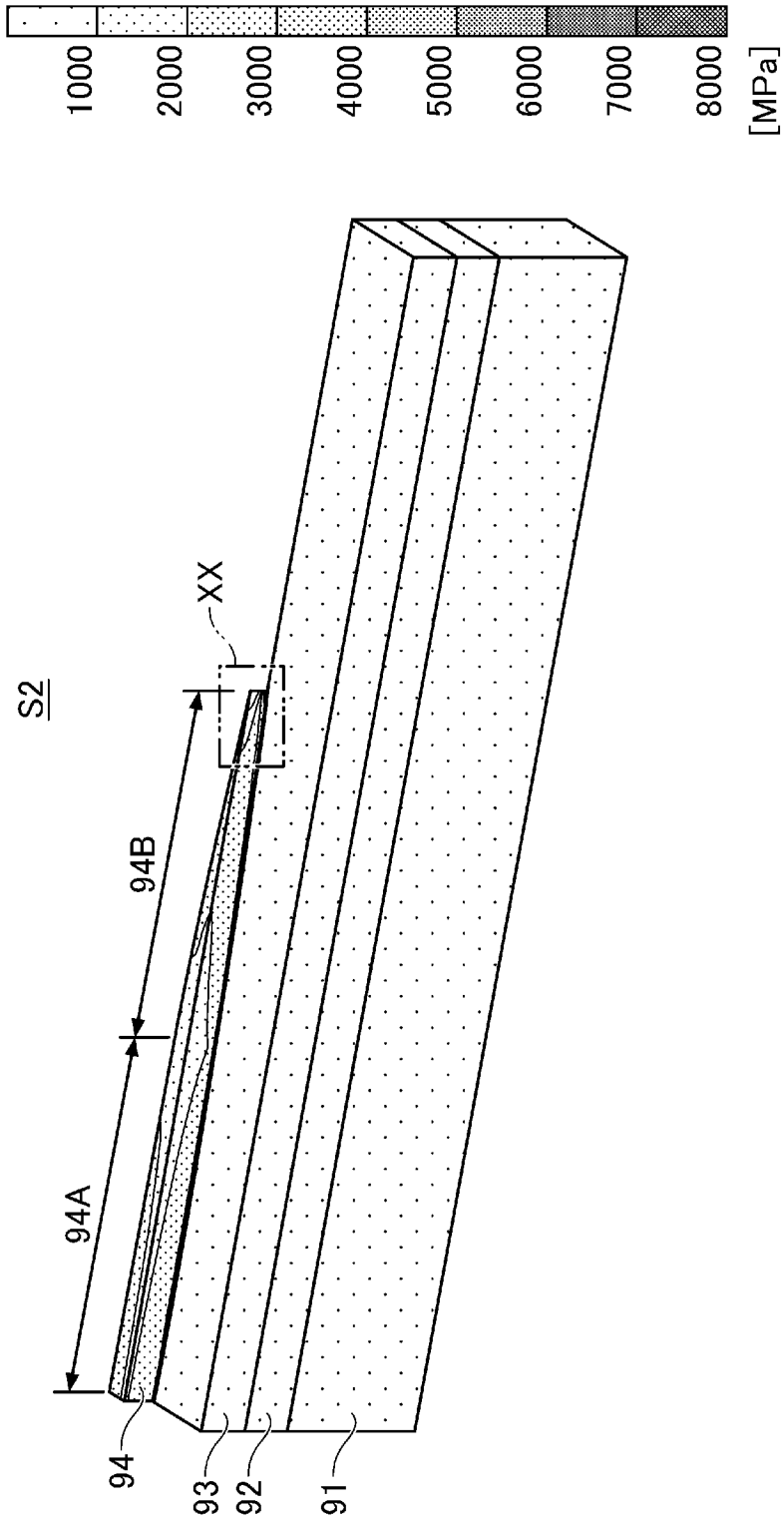
[図17]


1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
[MPa]
XVIII
S1
94B
94A
94
93
92
91

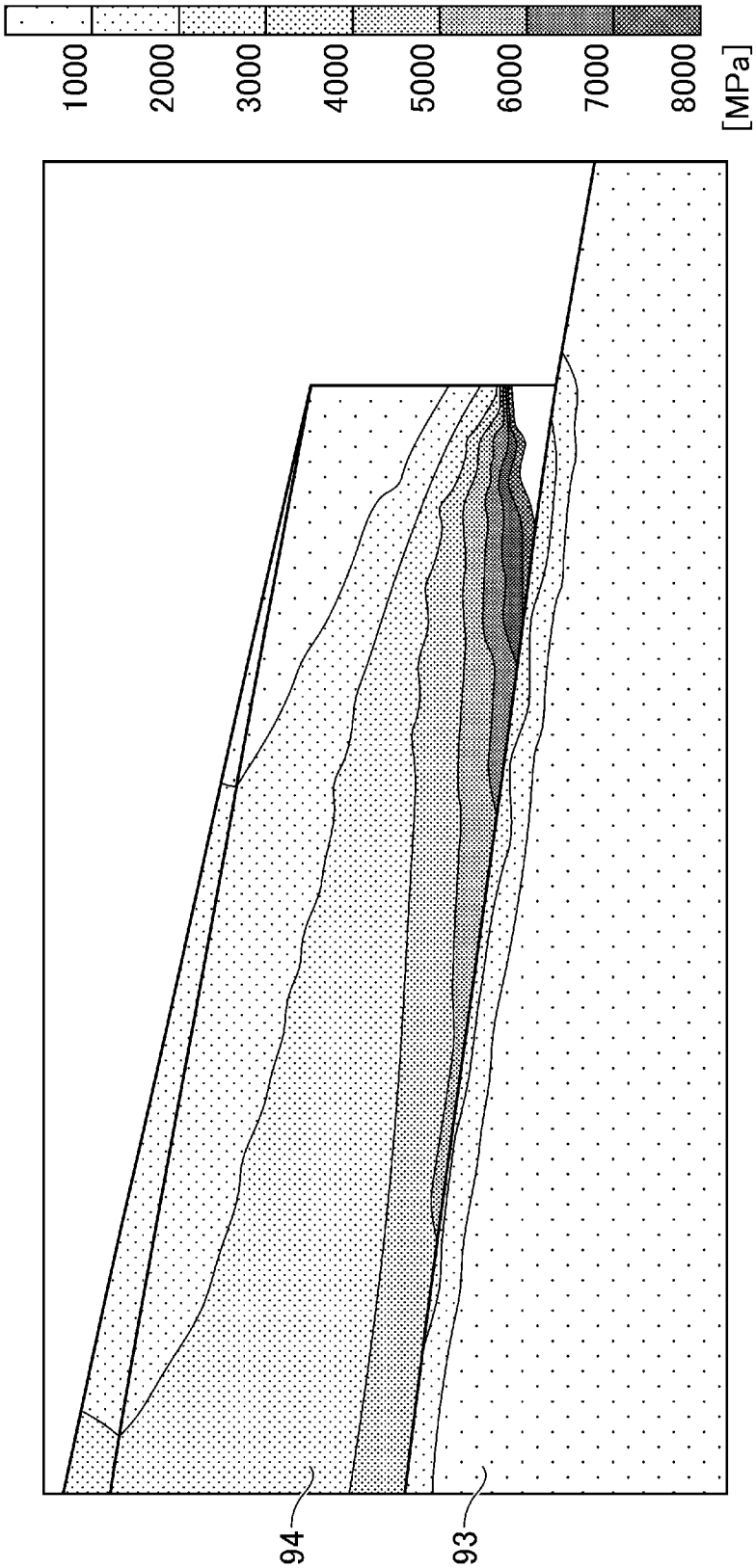
[図18]



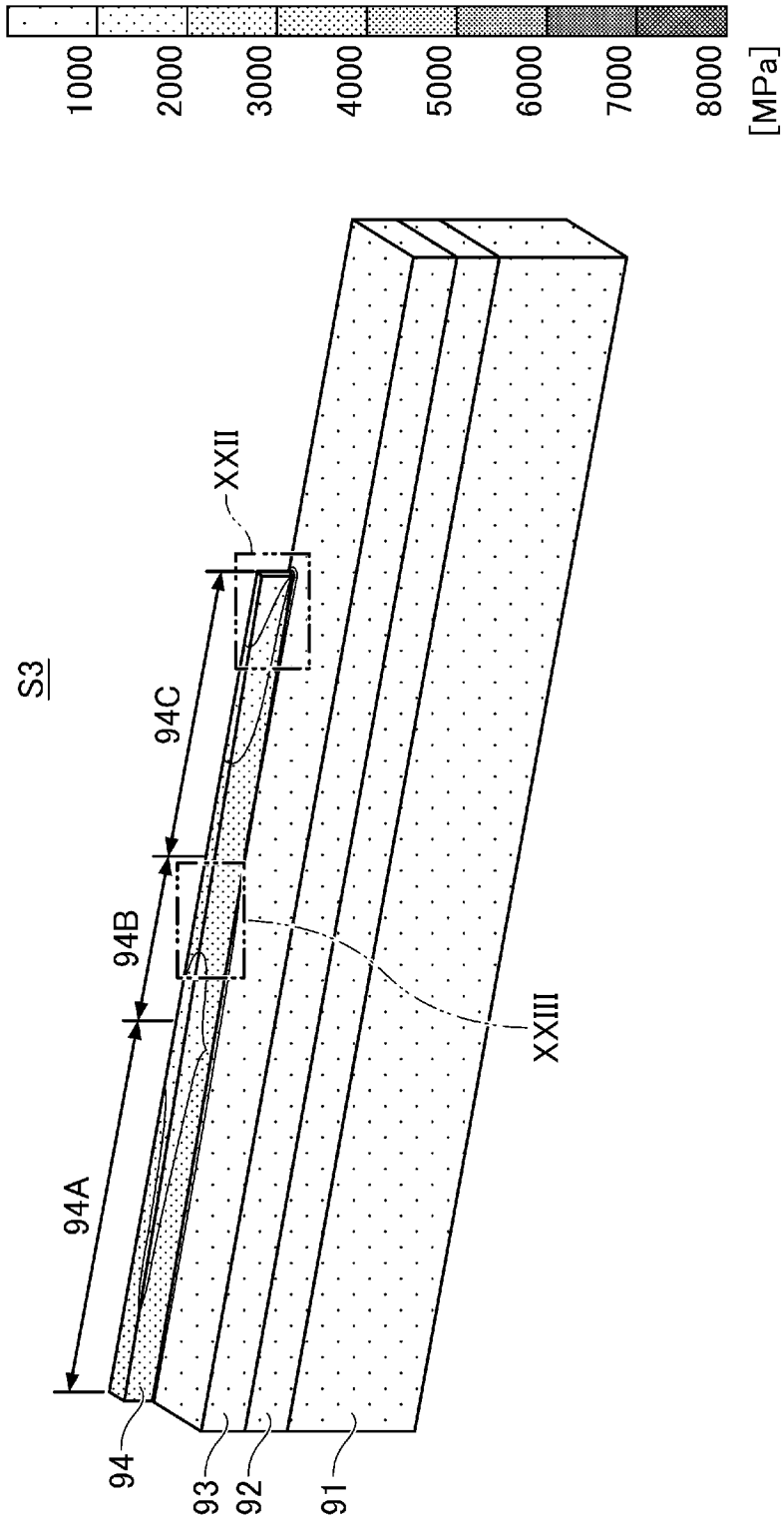
[図19]


1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
[MPa]
XX
S2
94B
94A
94
93
92
91

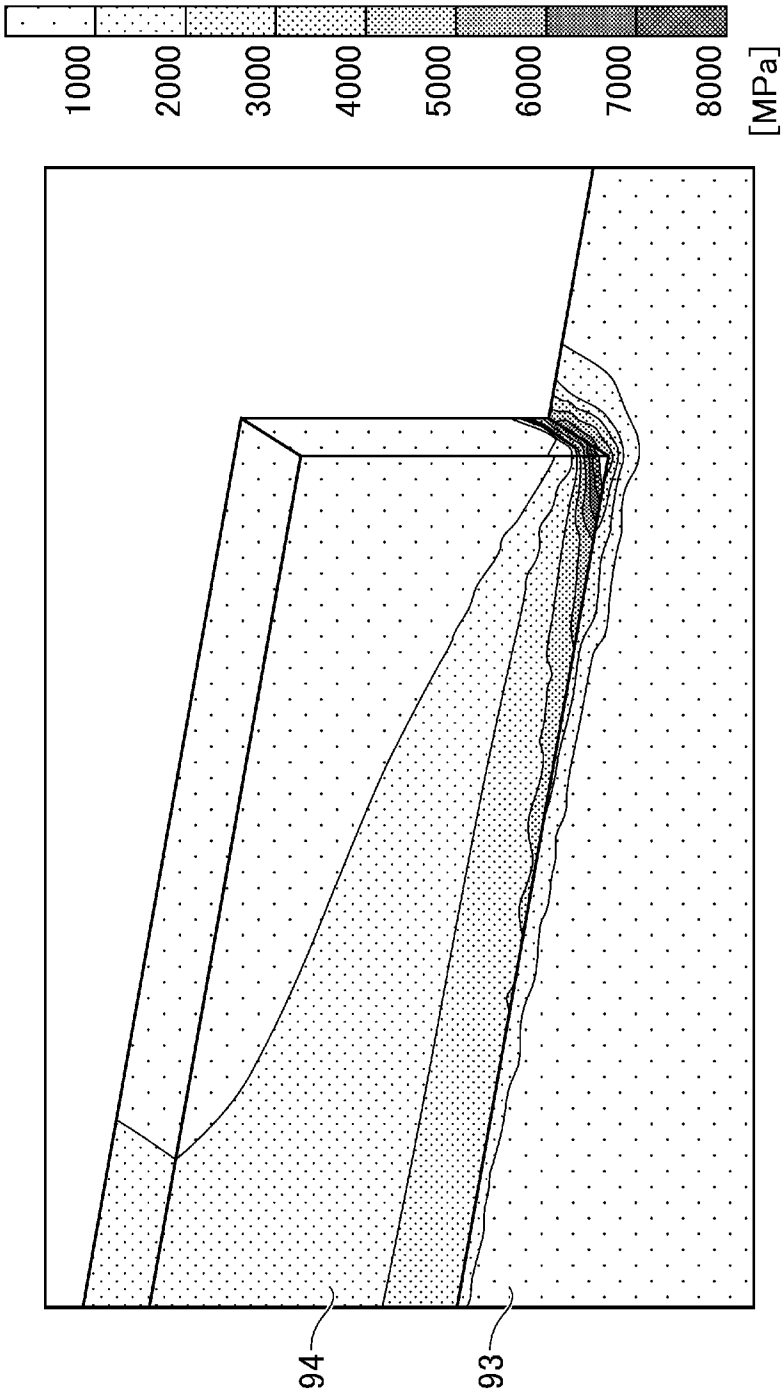
[図20]



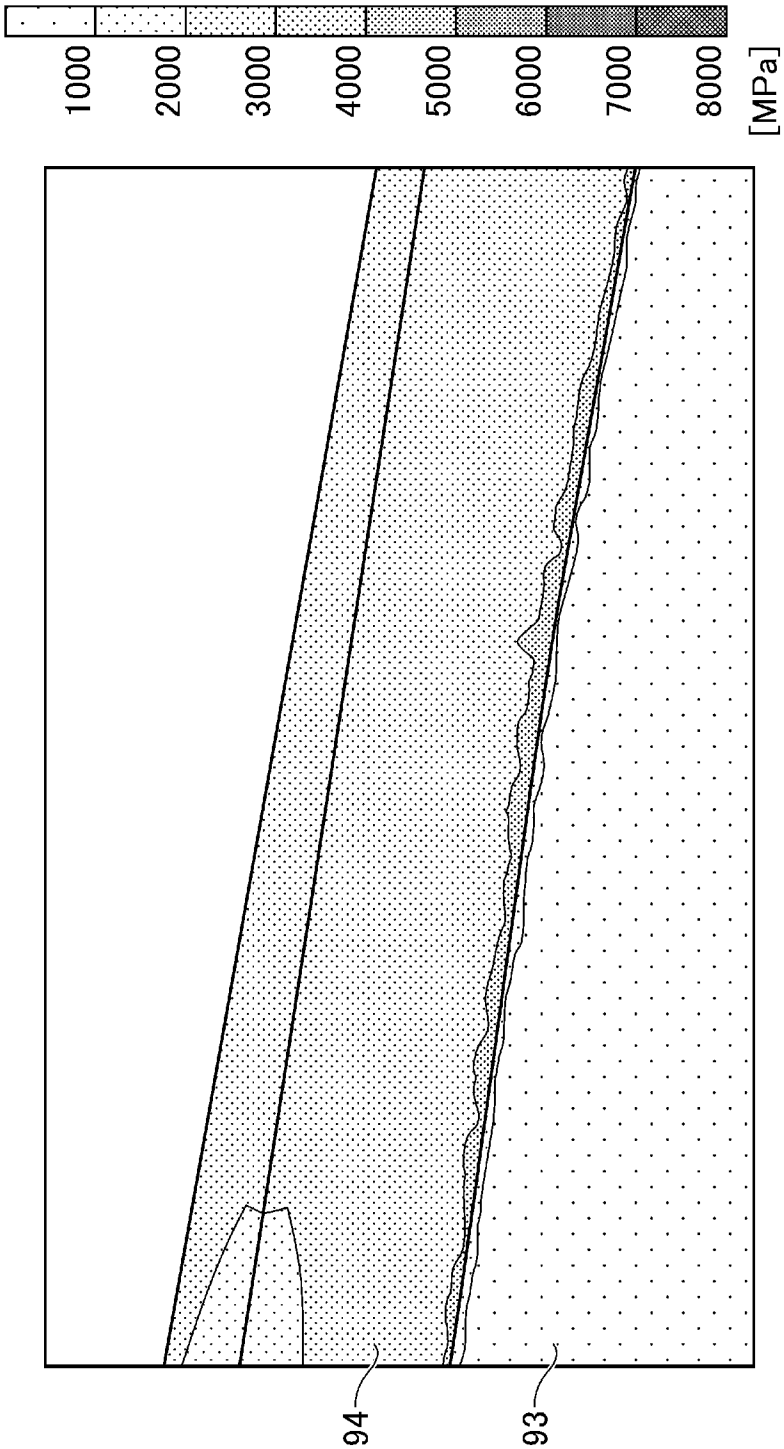
[図21]


1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
[MPa]
S3
XXII
94C
94B
94A
XXIII
94
93
92
91

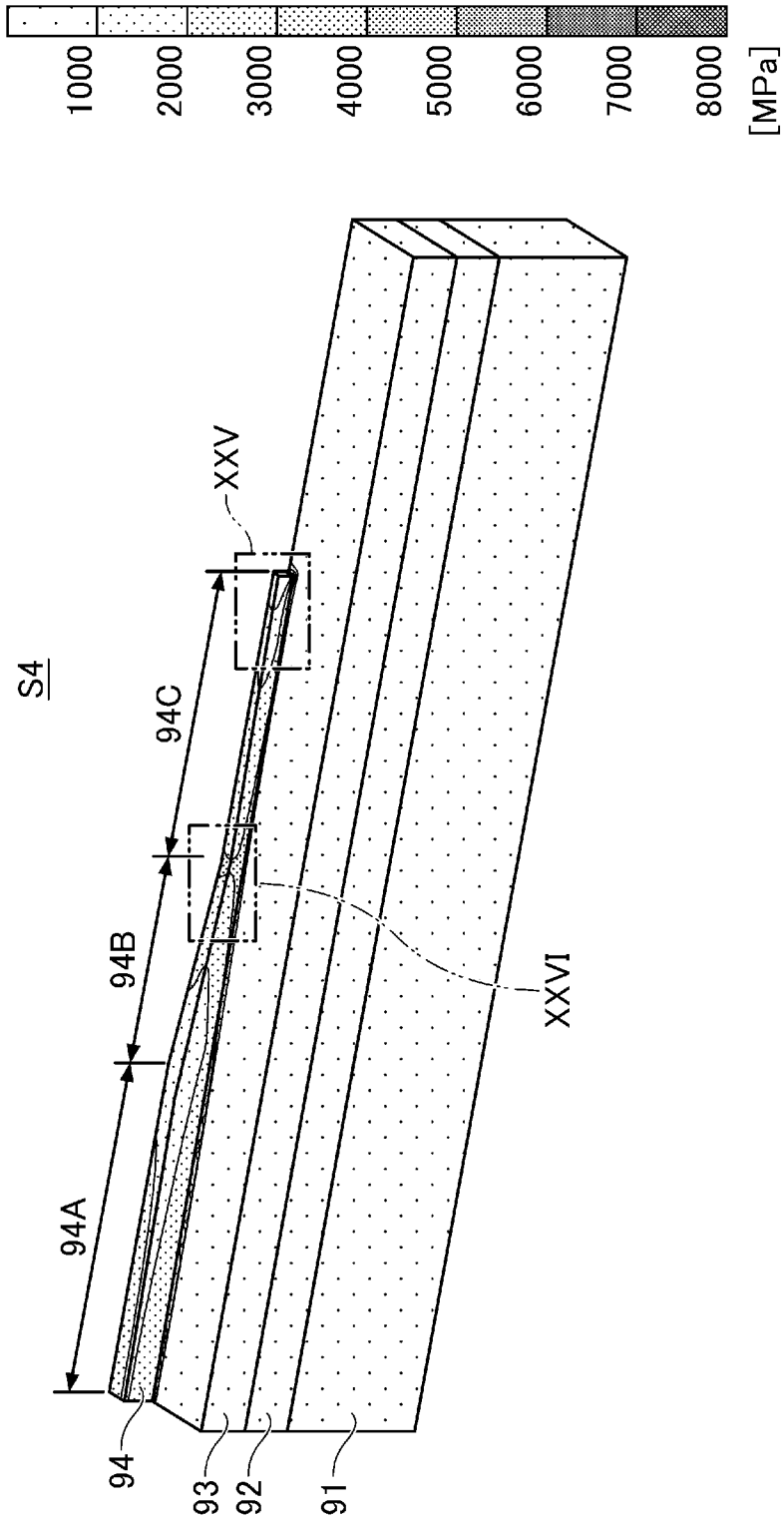
[図22]



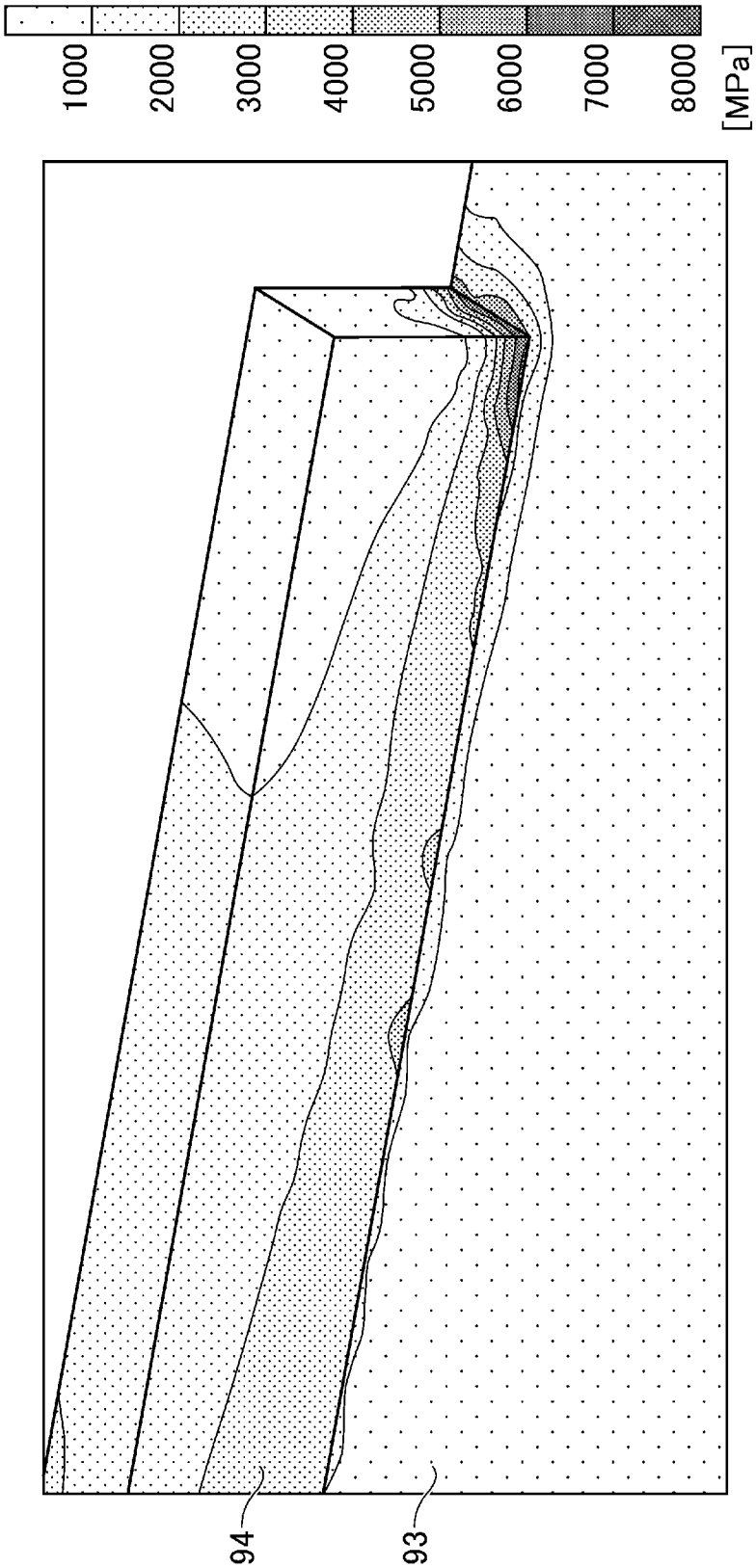
[図23]



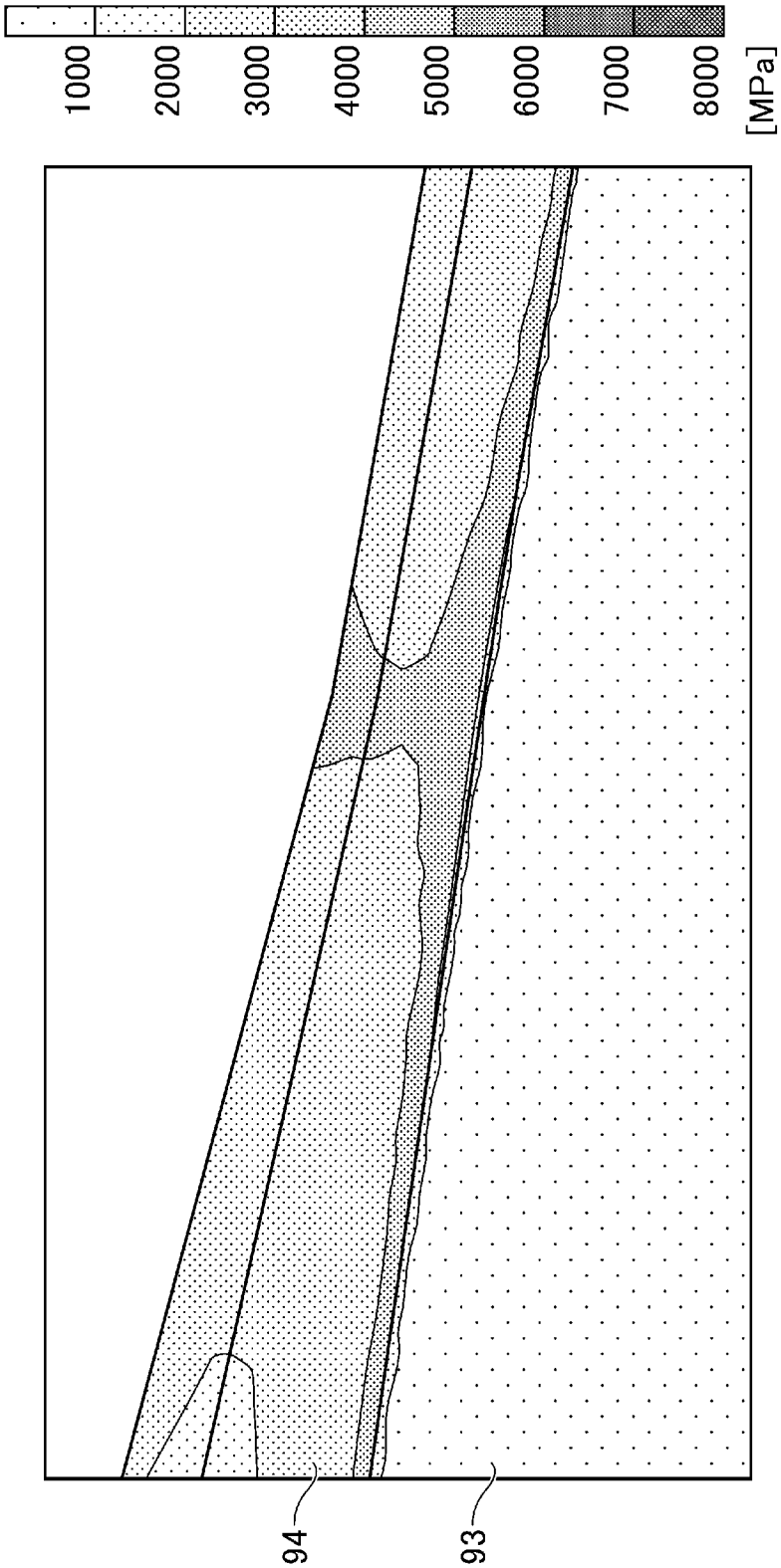
[図24]


1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
[MPa]
S4
XXV
94C
94B
94A
XXVI
94
93
92
91

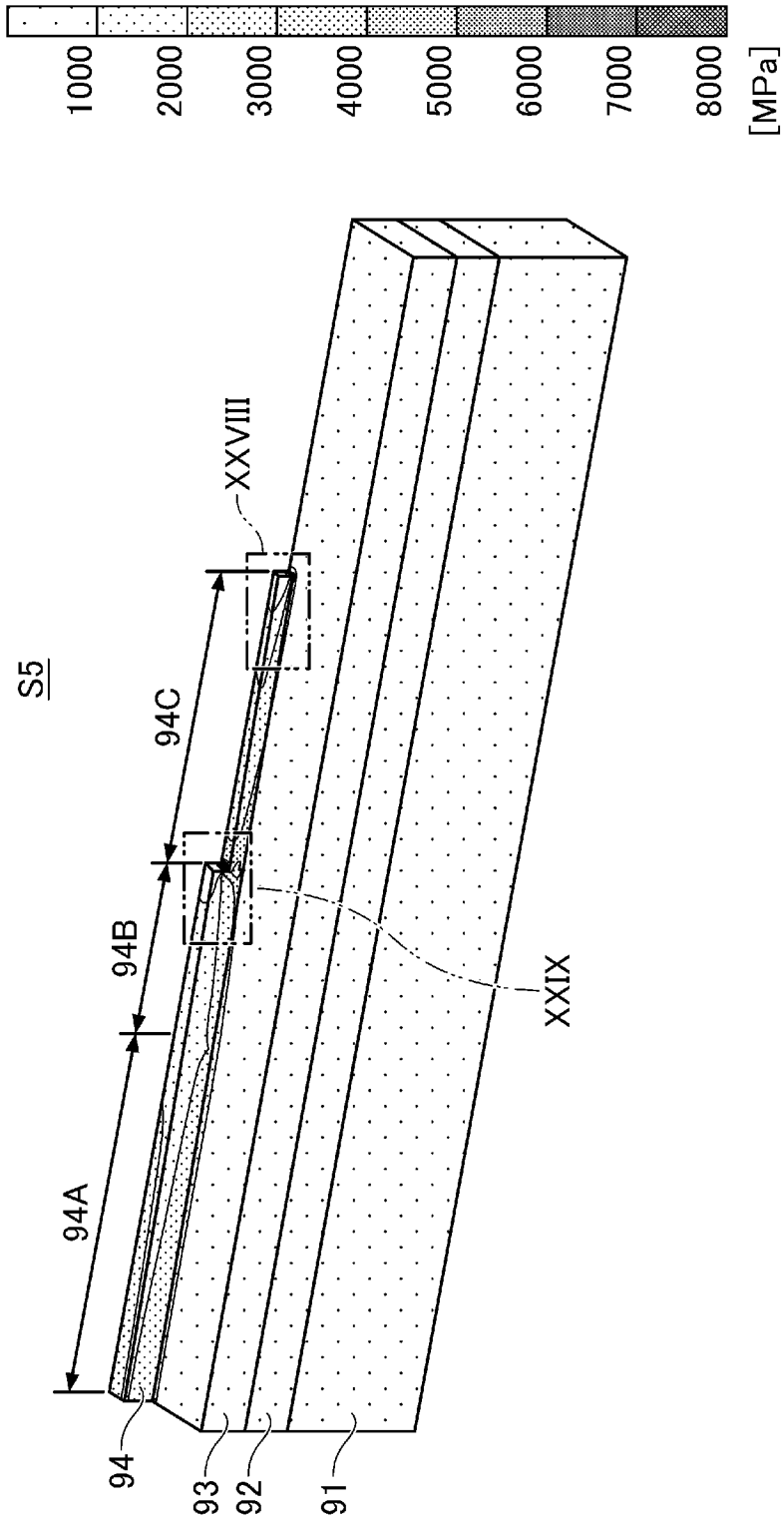
[図25]



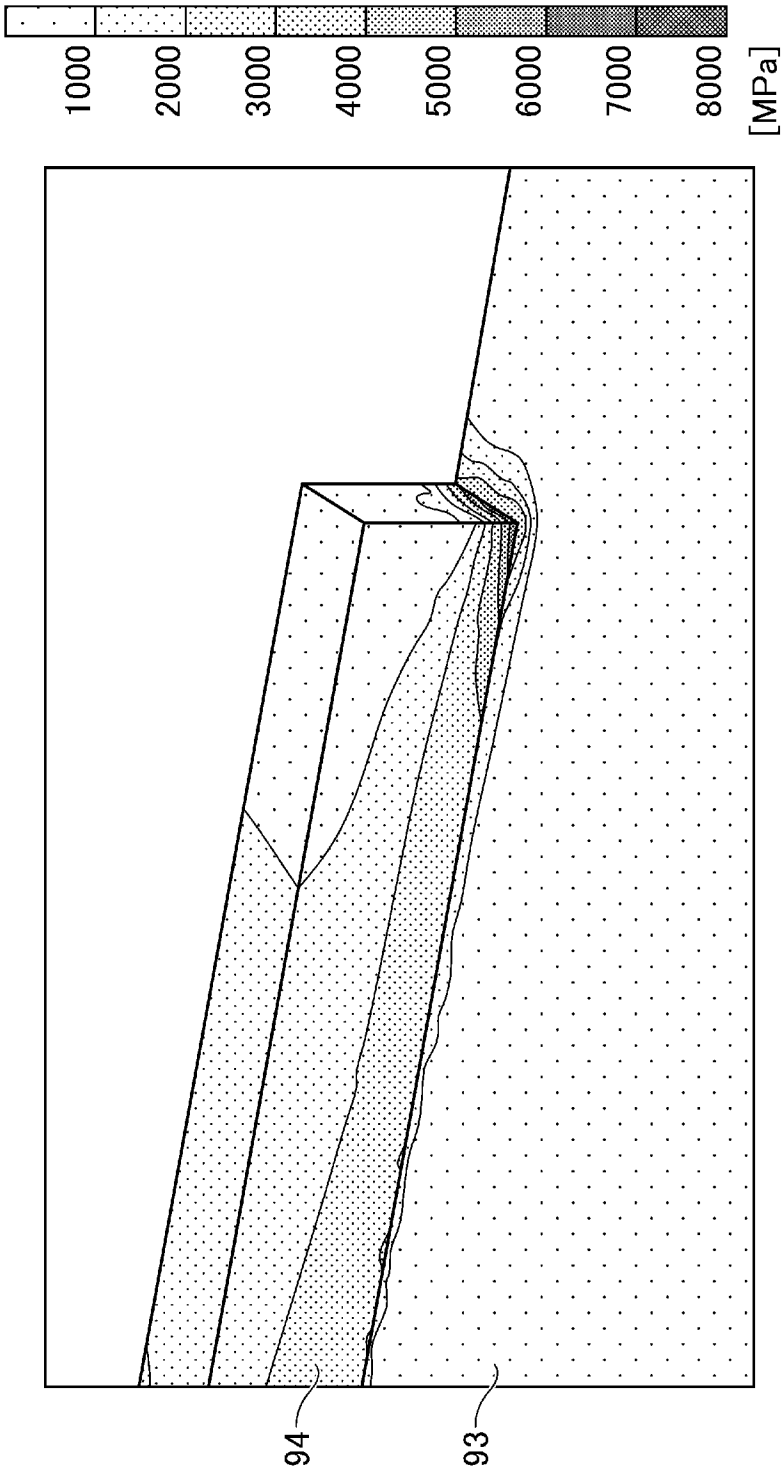
[図26]



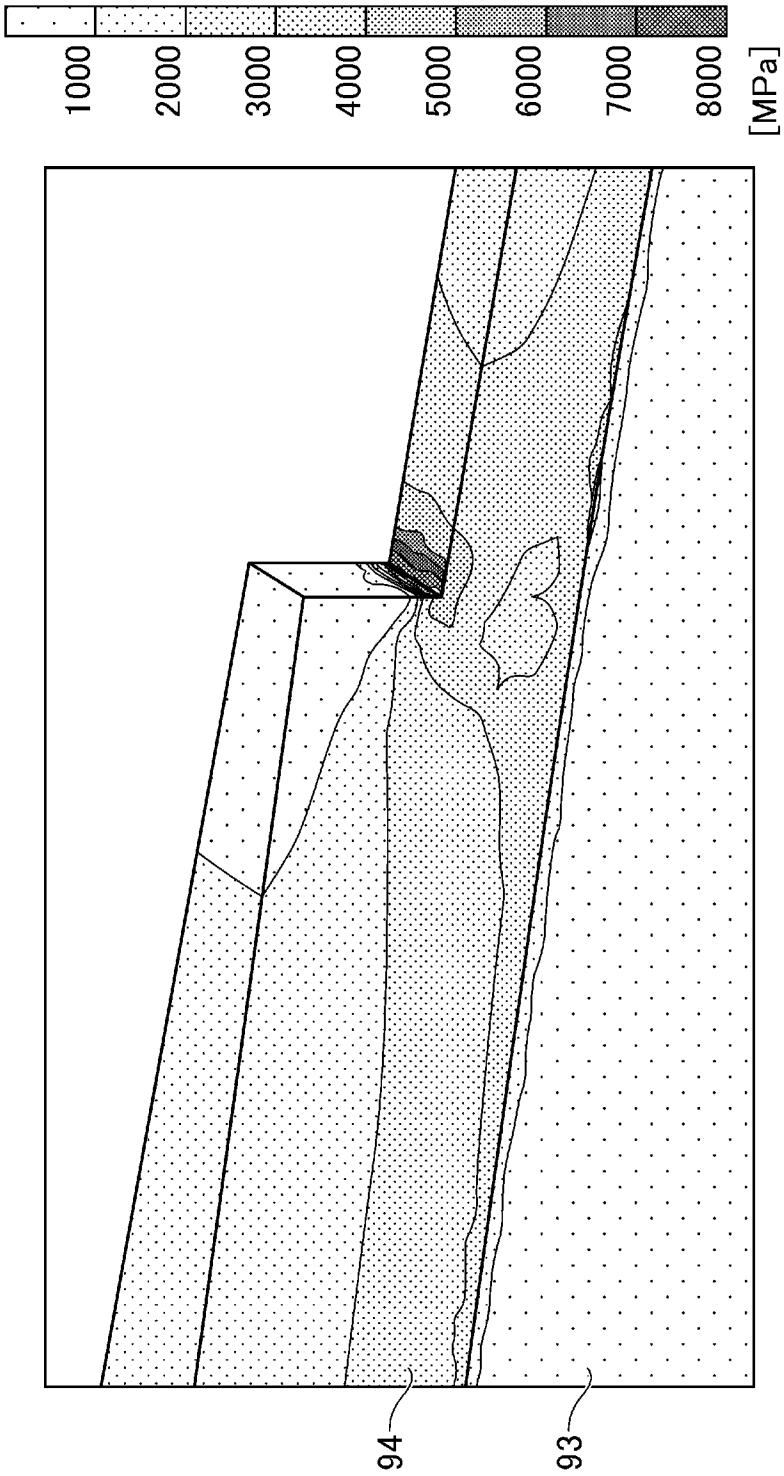
[図27]


1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
[MPa]
XXVIII
S5
94C
94B
94A
XXIX
94
93
92
91

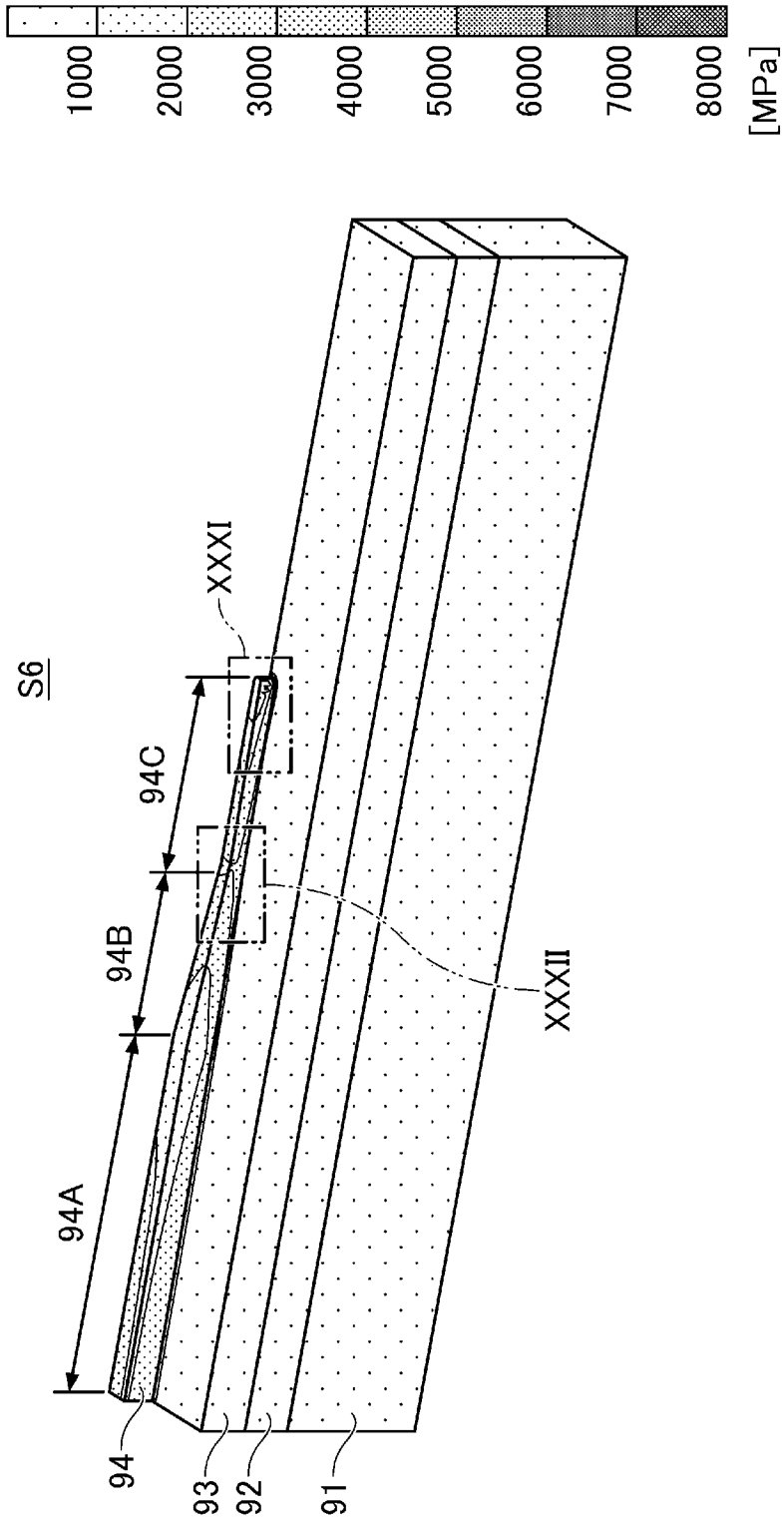
[図28]



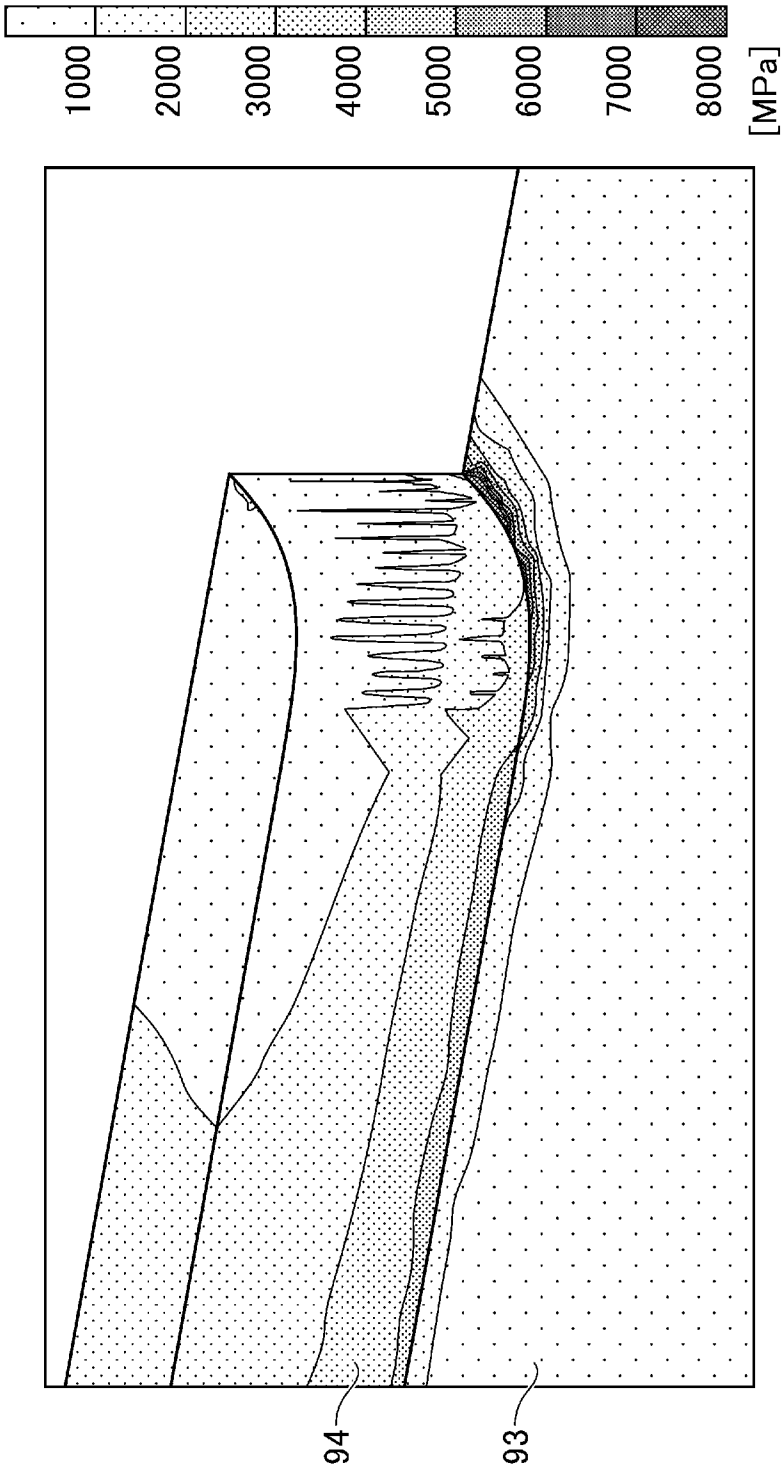
[図29]



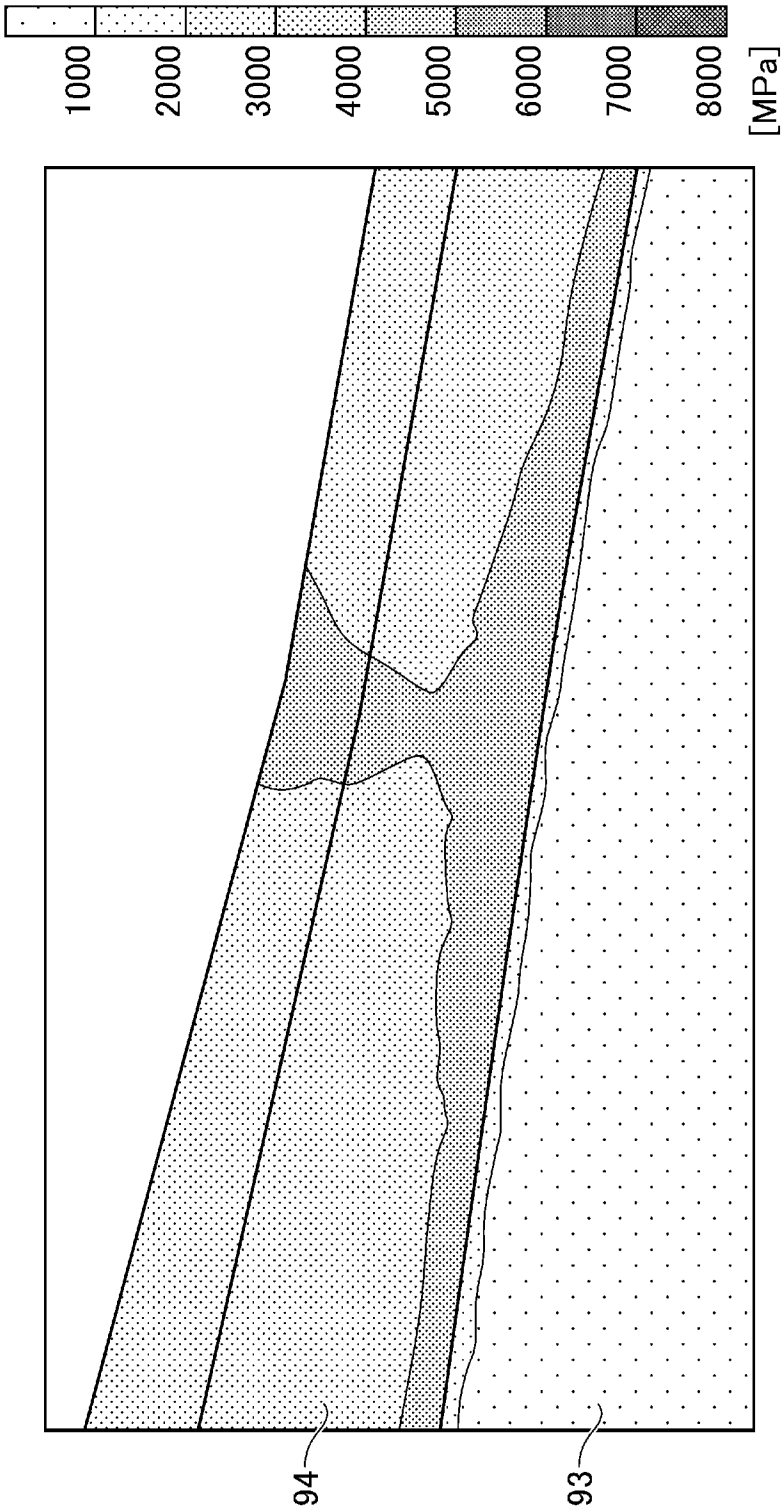
[図30]


1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
[MPa]
S6
XXXI
94C
94B
94A
XXXII
94
93
92
91

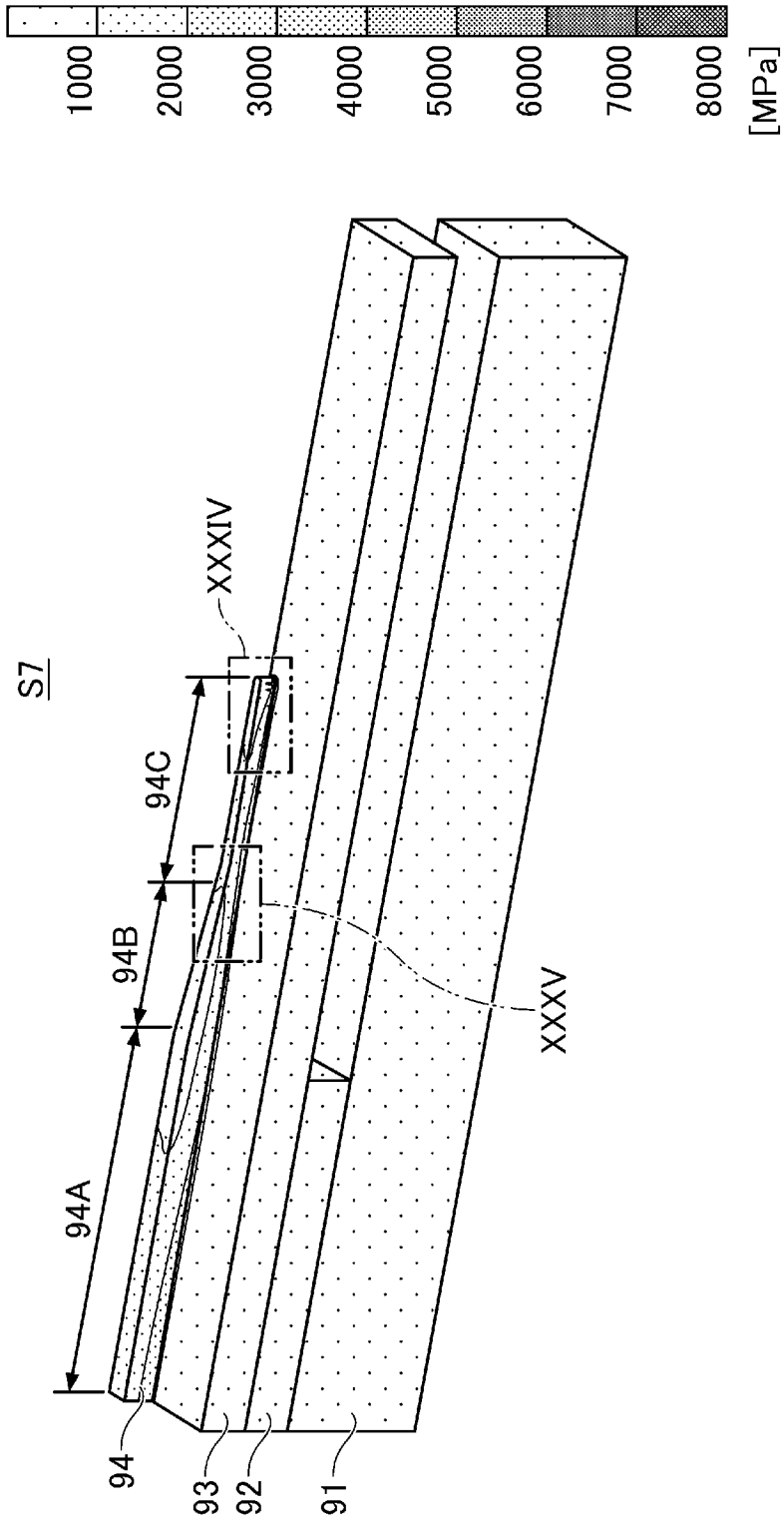
[図31]



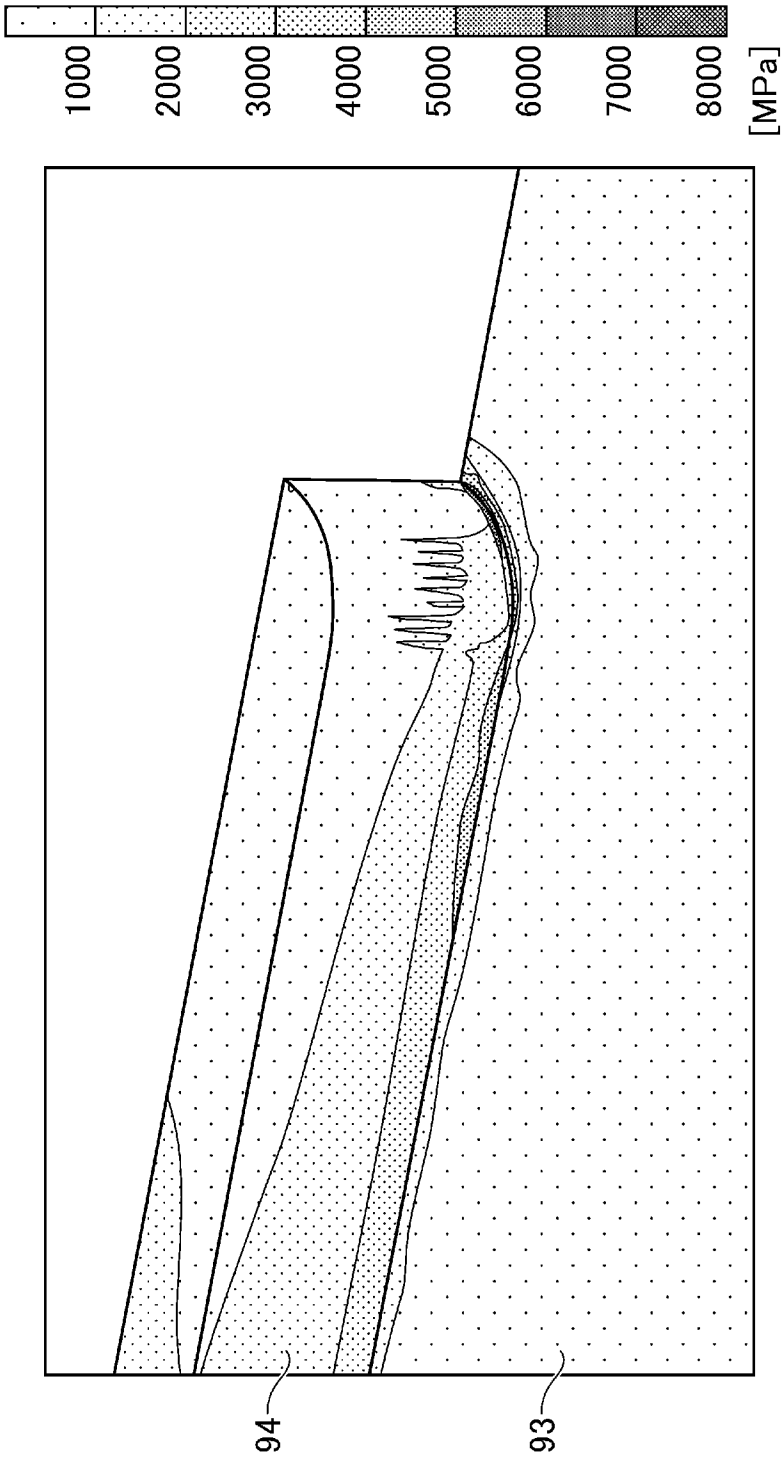
[図32]



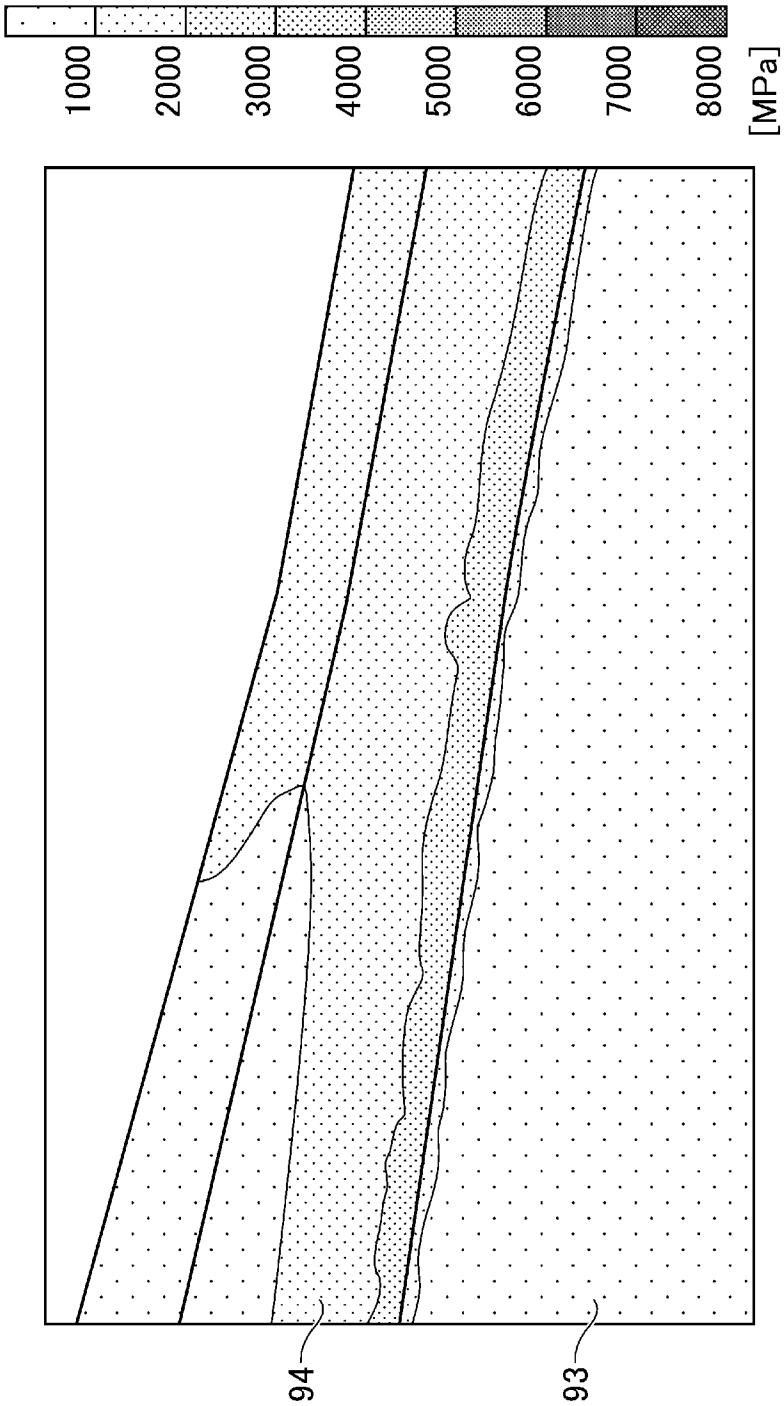
[図33]


1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
[MPa]
S7
XXXIV
94C
94B
94A
XXXV
94
93
92
91

[図34]



[図35]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2021/042187

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F 3/00(2006.01)i; ***G02B 6/12***(2006.01)i
FI: G02B6/12 371; G02F3/00

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)

G02F3/00; G02B6/12-6/14

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 1971-2022
Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII); IEEE Xplore

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2021/0224678 A1 (WAN, N. et al.) 22 July 2021 (2021-07-22) paragraphs [0003], [0065]-[0070], [0075], [0109], claims 1, 5, fig. 1, 2G, 3A, 9A-9B	1-5, 13
Y		6-10, 13
X	MOURADIAN, S. et al. NV-based quantum memories coupled to photonic integrated circuits. Proceedings of Spie. 16 September 2016, vol. 9920, pages 992014-1 to 992014-6 columns of 1. Introduction to 2. Hybrid Photonic Circuits, fig. 2(a)	1-5, 11-13
Y		6-13
Y	US 2014/0105556 A1 (OCTROLIX BV) 17 April 2014 (2014-04-17) paragraphs [0046]-[0049], fig. 2A-2B	6-13
Y	JP 2006-133798 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 25 May 2006 (2006-05-25) paragraph [0065], fig. 5	9-13
A	BUREK, M. J. et al. Fiber-Coupled Diamond Quantum Nanophotonic Interface. Physical Review Applied. 25 August 2017, vol. 8, pages 024026-1 to 024026-10 entire text, all drawings	1-13

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
11 January 2022	**08 February 2022**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LU, T. -J. et al. Design and fabrication of a 128-channel array of quantum memories in hybrid photonic circuits. 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. 02 August 2020, pages FF2D.2-1 to FF2D.2-2 entire text, all drawings	1-13
A	BERNIEN, H. et al. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres. Nature. 02 May 2013, vol. 497, pages 86-90 entire text, all drawings	1-13
A	JP 2019-28372 A (NATIONAL INST. OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) 21 February 2019 (2019-02-21) paragraphs [0021]-[0022], [0027]-[0030], fig. 1-2, 5-6	6-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2021/042187

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 2021/0224678 A1	22 July 2021	US 11054590 B1	
		WO 2020/180391 A1	
US 2014/0105556 A1	17 April 2014	EP 2720073 A2	
		KR 10-2015-0042687 A	
JP 2006-133798 A	25 May 2006	(Family: none)	
JP 2019-28372 A	21 February 2019	(Family: none)	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2021/042187

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G02F 3/00(2006.01)i; G02B 6/12(2006.01)i
FI: G02B6/12 371; G02F3/00

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））

G02F3/00; G02B6/12-6/14

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２２年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２２年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２２年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII); IEEE Xplore

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X	US 2021/0224678 A1 (WAN, N. et al.) 22.07.2021 (2021-07-22) 段落[0003], [0065]-[0070], [0075], [0109], 請求項1, 5, FIGs. 1, 2G, 3A, 9A-9B	1-5, 13
Y		6-10, 13
X	MOURADIAN, S. et al., "NV-based quantum memories coupled to photonic integrated circuits", PROCEEDINGS OF SPIE, 2016.09.16, Vol. 9920, pp.992014-1 -992014-6 「1. INTRODUCTION」欄－「2. HYBRID PHOTONIC CIRCUITS」欄, Figure 2(a)	1-5, 11-13
Y		6-13
Y	US 2014/0105556 A1 (OCTROLIX BV) 17.04.2014 (2014-04-17) 段落[0046]-[0049], FIGs. 2A-2B	6-13
Y	JP 2006-133798 A (三菱電機株式会社) 25.05.2006 (2006-05-25) 段落[0065], 図5	9-13
A	BUREK, M. J. et al., "Fiber-coupled diamond quantum nanophotonic interface", PHYSICAL REVIEW APPLIED, 2017.08.25, Vol. 8, pp.024026-1 -024026-10 全文、全図	1-13

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
"E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
"L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
"P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
"T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
"X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
"Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
"&" 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
11.01.2022	08.02.2022

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）

林　祥恵 2L 4085

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C.　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	LU, T-J. et al., "Design and fabrication of a 128-channel array of quantum memories in hybrid photonic circuits", 2020 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS PACIFIC RIM, 2020.08.02, pp. FF2D.2-1 - FF2D.2-2 全文、全図	1-13
A	BERNIEN, H. et al., "Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres", NATURE, 2013.05.02, Vol. 497, pp. 86-90 全文、全図	1-13
A	JP 2019-28372 A (国立研究開発法人産業技術総合研究所) 21.02.2019 (2019-02-21) 段落[0021]-[0022], [0027]-[0030], 図1-2, 5-6	6-7

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/JP2021/042187

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
US 2021/0224678 A1	22.07.2021	US 11054590 B1	
		WO 2020/180391 A1	
US 2014/0105556 A1	17.04.2014	EP 2720073 A2	
		KR 10-2015-0042687 A	
JP 2006-133798 A	25.05.2006	（ファミリーなし）	
JP 2019-28372 A	21.02.2019	（ファミリーなし）	