

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-240957

(P2014-240957A)

(43) 公開日 平成26年12月25日(2014.12.25)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G02B 26/00 (2006.01)	G02B 26/00	2G059
G02B 6/12 (2006.01)	G02B 6/12 H	2H141
G02B 6/122 (2006.01)	G02B 6/12 A	2H147
G02B 6/13 (2006.01)	G02B 6/12 M	3C081
B81B 3/00 (2006.01)	B81B 3/00	

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 24 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2014-99172 (P2014-99172)
 (22) 出願日 平成26年5月13日 (2014.5.13)
 (31) 優先権主張番号 特願2013-102667 (P2013-102667)
 (32) 優先日 平成25年5月15日 (2013.5.15)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 304028346
 国立大学法人 香川大学
 香川県高松市幸町1番1号
 (74) 代理人 110001704
 特許業務法人山内特許事務所
 (72) 発明者 山口 堅三
 香川県高松市林町2217番地20 国立
 大学法人香川大学工学部内
 Fターム(参考) 2G059 AA05 BB09 BB14 EE01 EE12
 FF03 HH02 HH03 HH06 JJ17
 2H141 MA22 MB52 MC06 MD05 MD38
 MF01 MF22 MF28 MZ16 MZ27
 MZ28

最終頁に続く

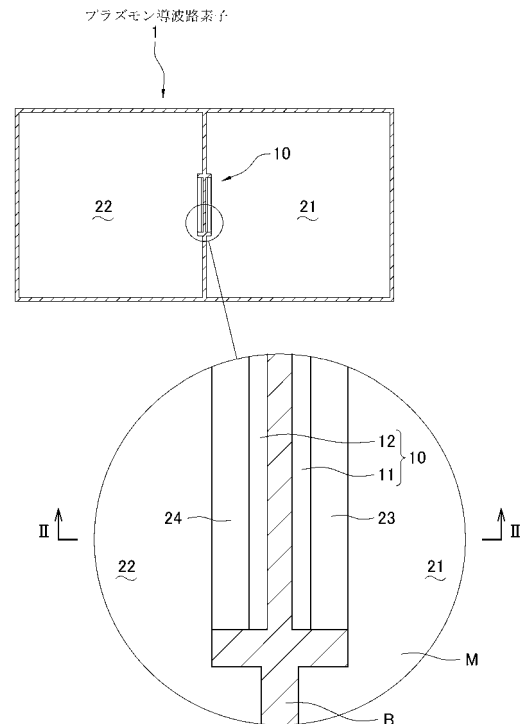
(54) 【発明の名称】 プラズモン導波路素子、およびその作製方法

(57) 【要約】

【課題】 1つの素子で伝搬させる光の波長および伝搬距離を変更できるプラズモン導波路素子、およびその作製方法を提供する。

【解決手段】 一对の金属壁11、12からなる導波路10と、一对の電極21、22とを備えており、金属壁11は電極21に接続されており、金属壁12は電極22に接続されている。一对の電極21、22間に電圧を印加すれば、一对の金属壁11、12にそれぞれ逆符号または同符号の電荷を帯電させることができるので、金属壁11、12の間に働く静電引力または静電斥力により、金属壁11、12同士を接近または離間させることができる。金属壁11、12同士の間隔を変化させて導波路10のプラズモン共鳴波長を変更でき、1つの素子で伝搬させる光の波長および伝搬距離を変更できる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

所定間隔を開けて対向するように配置された一对の金属壁からなる導波路と、前記金属壁同士を接近または離間させるアクチュエータと、を備えることを特徴とするプラズモン導波路素子。

【請求項 2】

前記アクチュエータは、前記一对の金属壁にそれぞれ逆符号または同符号の電荷を帯電させ、該金属壁の間に働く静電引力または静電斥力により、該金属壁同士を接近または離間させるものであることを特徴とする請求項 1 記載のプラズモン導波路素子。

10

【請求項 3】

前記アクチュエータは、一对の電極を備えており、前記一对の金属壁の一方は、前記一对の電極の一方に接続されており、前記一对の金属壁の他方は、前記一对の電極の他方に接続されていることを特徴とする請求項 2 記載のプラズモン導波路素子。

【請求項 4】

前記電極と、該電極に接続された前記金属壁とは、所定間隔を開けて対向するように配置されていることを特徴とする請求項 3 記載のプラズモン導波路素子。

【請求項 5】

前記一对の金属壁は、光の入射側または出射側の一方の端部が固定されており、他方の端部が可動となっていることを特徴とする請求項 1、2、3 または 4 記載のプラズモン導波路素子。

20

【請求項 6】

基板上に金属薄膜を成膜してチップを得る工程と、前記チップの基板側からエッチングして、導波路を構成する一对の金属壁の間の金属薄膜および基板を除去する工程と、前記チップの金属薄膜側からエッチングして、金属壁と電極との間の金属薄膜を、接続部を残すように除去する工程と、を備えることを特徴とするプラズモン導波路素子の作製方法。

30

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、プラズモン導波路素子、およびその作製方法に関する。さらに詳しくは、金属中の自由電子の集団的振動であるプラズモンを利用した光導波路を有するプラズモン導波路素子、およびその作製方法に関する。

【背景技術】**【0002】**

情報の大容量化に伴って光学システムの集積化が進み、ナノスケールの光デバイスの開発が進められている。従来、光の回折限界によりその空間分解能は光の波長程度に制限されるため、ナノスケールの光デバイスの実現は困難とされていた。しかし、近年、ナノオーダーの金属微細構造物に生じる伝搬型表面プラズモンを利用することにより、光の回折限界以下の領域で光の伝搬を可能にしたプラズモン導波路が提案されている。

40

【0003】

特許文献 1 には、光が入射する入射側プラズモン導波路と、光が出射する出射側プラズモン導波路と、入射側プラズモン導波路と出射側プラズモン導波路とを結ぶ接続部と、接続部から入射側プラズモン導波路または出射側プラズモン導波路と交差する方向に延出し、光が反射する終端部を有するプラズモン干渉構造とを備えるプラズモン導波路が開示されている。プラズモン干渉構造を所定の大きさや形状に形成することにより、出射側プラズモン導波路から出射する光の透過率および強度を所望のものとする事ができる。

50

【 0 0 0 4 】

しかし、特許文献 1 に記載のプラズモン導波路をはじめ、従来のプラズモン導波路素子はその金属微細構造が固定されており、1つの素子は特定のプラズモン共鳴波長しか有しないものであった。すなわち、1つの素子が伝搬する光の波長は固定されていた。また、光の伝搬距離はプラズモン導波路の形状や構造に依存することから、従来のプラズモン導波路素子は光の伝搬距離が固定されていた。そのため、プラズモン導波路を伝搬させる光の波長や伝搬距離を変更するためには、素子を交換する必要があった。

【 0 0 0 5 】

なお、非特許文献 1 には以下の記載がある。金属膜のギャップを伝搬するギャッププラズモンが存在する。ギャップの四隅に電界が集中し、対向する隅の電磁界同士が結合して伝搬する基本モードギャッププラズモンとギャップの中を通常の導波モードのように伝搬する第二モードギャッププラズモンが存在する。計算によると、第二モードギャッププラズモンは取り扱いが容易であり、簡単に励起できることから、プラズモン導波路として有望である。また、導波路は表面プラズモンを広範囲で使う際に不可欠なデバイスである。

非特許文献 2 には、ストライプ型や細線型、溝型、楔型、ギャップ型、配列金微粒子型など多くの型の導波路が開発されていることが記載されている。金属材料としては、なるべく光損失の小さいものが有利であり、銀の研究が多いが、安定性の高い金の導波路研究も活発である。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 6 】

【 特許文献 1 】 WO 2 0 1 0 / 0 0 4 8 5 9

【 非特許文献 】

【 0 0 0 7 】

【 非特許文献 1 】 D. F. P. Pile, T. Ogawa, D. K. Gramotnev, Y. Matsuzaki, K. C. Vernon, K. Yamaguchi, T. Okamoto, M. Haraguchi, and M. Fukui, Appl. Phys. Lett., 87 261114 (2005)

【 非特許文献 2 】 D. K. Gramotnev and S. I. Bozhevolnyi, Nat. photonics, 4 84-86 (2010)

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 8 】

本発明は上記事情に鑑み、1つの素子で伝搬させる光の波長および伝搬距離を変更できるプラズモン導波路素子、およびその作製方法を提供することを目的とする。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 9 】

第 1 発明のプラズモン導波路素子は、所定間隔を開けて対向するように配置された一対の金属壁からなる導波路と、前記金属壁同士を接近または離間させるアクチュエータと、を備えることを特徴とする。

第 2 発明のプラズモン導波路素子は、第 1 発明において、前記アクチュエータは、前記一対の金属壁にそれぞれ逆符号または同符号の電荷を帯電させ、該金属壁の間に働く静電引力または静電斥力により、該金属壁同士を接近または離間させるものであることを特徴とする。

第 3 発明のプラズモン導波路素子は、第 2 発明において、前記アクチュエータは、一対の電極を備えており、前記一対の金属壁の一方は、前記一対の電極の一方に接続されており、前記一対の金属壁の他方は、前記一対の電極の他方に接続されていることを特徴とする。

第 4 発明のプラズモン導波路素子は、第 3 発明において、前記電極と、該電極に接続された前記金属壁とは、所定間隔を開けて対向するように配置されていることを特徴とする。

。

10

20

30

40

50

第5発明のプラズモン導波路素子は、第1、第2、第3または第4発明において、前記一对の金属壁は、光の入射側または出射側の一方の端部が固定されており、他方の端部が可動となっていることを特徴とする。

第6発明のプラズモン導波路素子の作製方法は、基板上に金属薄膜を成膜してチップを得る工程と、前記チップの基板側からエッチングして、導波路を構成する一对の金属壁の間の金属薄膜および基板を除去する工程と、前記チップの金属薄膜側からエッチングして、金属壁と電極との間の金属薄膜を、接続部を残すように除去する工程と、を備えることを特徴とする。

【発明の効果】

【0010】

10

第1発明によれば、アクチュエータにより金属壁同士を接近または離間させるので、金属壁同士の間隔を変化させて導波路のプラズモン共鳴波長を変更でき、1つの素子で伝搬させる光の波長を変更できる。また、導波路の構造を変更でき、1つの素子で伝搬させる光の伝搬距離を変更できる。

第2発明によれば、金属壁の間に働く静電引力または静電斥力により、金属壁同士を接近または離間させるので、アクチュエータを簡易な構造とすることができる。

第3発明によれば、一对の電極間に電圧を印加すれば、一对の金属壁にそれぞれ逆符号または同符号の電荷を帯電させることができるので、金属壁の間に働く静電引力または静電斥力により、金属壁同士を接近または離間させることができる。

第4発明によれば、電極に電圧を印加すれば、電極と金属壁とにそれぞれ同符号の電荷を帯電させることができるので、電極と金属壁との間に働く静電斥力により、金属壁を電極から離間させ、金属壁同士を接近させることができる。

20

第5発明によれば、一对の金属壁は、光の入射側または出射側の一方の端部同士の間隔が変化せず、他方の端部同士の間隔が変化する。そのため、導波路を光の伝搬方向に先細りに変形でき、光を集光することで導波路の出射側端部の局所的な電場強度を入射光よりも増強できる。

第6発明によれば、金属壁の間のエッチングを基板側から行うことで、金属薄膜側からのエッチングが1回で済み、金属壁をなめらかな形状に形成することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

30

【図1】本発明の第1実施形態に係るプラズモン導波路素子の平面図である。

【図2】図1におけるII-II線矢視断面図である。

【図3】同プラズモン導波路素子の断面図であって、(a)は各電極を逆符号とした場合、(b)は各電極を同符号とした場合を示す図である。

【図4】本発明の第2実施形態に係るプラズモン導波路素子の平面図である。

【図5】(a)は図4におけるVa-Va線矢視図であり、(b)は図4におけるVb-Vb線矢視断面図である。

【図6】同プラズモン導波路素子の平面図であって、(a)は各電極を逆符号とした場合、(b)は各電極を同符号とした場合を示す図である。

【図7】試料試験1における試料の走査型電子顕微鏡写真であり、(a)は全体写真、(b)は(a)における破線囲み部分の拡大写真、(c)は(a)における破線囲み部分を斜めから見た拡大写真である。

40

【図8】透過型顕微分光光学系の説明図である。

【図9】試料試験1における試料の顕微鏡写真であり、(a)は入射光の偏光方向を金属壁が対向する方向とした場合、(b)は入射光の偏光方向を金属壁に沿う方向とした場合を示す図である。

【図10】試料試験1における試料の各印加電圧における透過光スペクトルを示すグラフである。

【図11】試料試験1における印加電圧に対する透過光共鳴ピーク波長の関係を示すグラフである。

50

【図 1 2】数値計算 1、2 におけるプラズモン導波路素子の構造の説明図である。

【図 1 3】数値計算 1 により算出されたプラズモン導波路素子の透過光スペクトルを示すグラフである。

【図 1 4】数値計算 2 により算出されたプラズモン導波路素子の電場増強度を示すグラフである。

【図 1 5】試料試験 2 における試料の走査型電子顕微鏡写真であり、(a) は全体写真、(b) は導波路部分の拡大写真、(c) は導波路部分のさらなる拡大写真である。

【図 1 6】試料試験 2 における試料の各印加電圧における透過光スペクトルを示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

10

【0012】

つぎに、本発明の実施形態を図面に基づき説明する。

(第 1 実施形態)

本発明の第 1 実施形態に係るプラズモン導波路素子 1 は、厚さ 100nm ~ 1mm の基板 B 上に、厚さ数百 nm ~ 数十 μm の金属薄膜 M を成膜したチップを、集束イオンビームなどにより図 1 および図 2 に示す構造に形成した、いわゆる NEMS (Nano Electro Mechanical System) である。ここで、基板 B としては、絶縁体であり透光性を有する素材、例えば石英ガラス (SiO_2)、窒化珪素 (Si_3N_4)、炭化珪素 (SiC)、酸化アルミニウム (Al_2O_3) などが用いられる。金属薄膜 M としては、金、銀、アルミニウム、白金、銅、ナトリウム、酸化インジウムスズなどが用いられる。

20

【0013】

図 1 および図 2 に示すように、プラズモン導波路素子 1 は、所定間隔を開けて平行に対向するように配置された一对の金属壁 1 1、1 2 からなる導波路 1 0 と、一对の電極 2 1、2 2 と、一方の金属壁 1 1 と一方の電極 2 1 とを電気的に接続する接続部 2 3 と、他方の金属壁 1 2 と他方の電極 2 2 とを電気的に接続する接続部 2 4 とから構成されている。なお、金属壁 1 1、1 2、電極 2 1、2 2、および接続部 2 3、2 4 が特許請求の範囲に記載のアクチュエータに相当する。

【0014】

金属壁 1 1、1 2 は、金属薄膜 M で基板 B に立設する壁状に形成された微細金属壁である。金属壁 1 1、1 2 の厚さ (図 2 における左右方向の寸法) は数百 nm であり、後述のごとく金属壁 1 1、1 2 は撓むことができる。金属壁 1 1、1 2 の高さ寸法 (図 2 における上下方向の寸法) は金属薄膜 M の厚さと同じ数百 nm ~ 数十 μm であり、長さ寸法 (図 2 における紙面に対して垂直な方向の寸法) は数百 nm ~ 数十 μm である。また、金属壁 1 1 と金属壁 1 2 との間は金属薄膜 M が削られており絶縁されている。なお、金属壁 1 1 と金属壁 1 2 との間の金属薄膜 M に加えて、その下部の基板 B を削ってもよい。金属壁 1 1、1 2 同士の間隔は数百 nm であり、光の波長程度またはそれ以下 (以下、サブ波長という。) である。金属壁 1 1 と金属壁 1 2 との間の空間が、光を伝搬する導波路 1 0 となっている。

30

【0015】

電極 2 1、2 2 は、金属壁 1 1、1 2 を挟んで対向した位置に配置されており、それぞれ数十 μm ~ 数百 μm 四方の矩形である。もちろん、電極 2 1 と電極 2 2 との間は金属薄膜 M が削られており絶縁されている。この電極 2 1、2 2 には、図示しない電源が接続され、電極 2 1、2 2 間に電圧を印加できるようになっている。

40

【0016】

電極 2 1 の金属壁 1 1 側の側壁と金属壁 1 1 とは所定間隔を開けて平行に対向するように配置されており、電極 2 2 の金属壁 1 2 側の側壁と金属壁 1 2 とは所定間隔を開けて平行に対向するように配置されている。電極 2 1 と金属壁 1 1 との間には接続部 2 3 が設けられており、電極 2 2 と金属壁 1 2 との間には接続部 2 4 が設けられている。

【0017】

接続部 2 3、2 4 の厚さ (図 2 における上下方向の寸法) は、電極 2 1、2 2 の厚さ、

50

および金属壁 1 1、1 2 の高さ寸法よりも薄く形成されている。また、接続部 2 3、2 4 の幅寸法（図 2 における左右方向の寸法）は数百 nm ~ 数 μm である。すなわち、電極 2 1 と金属壁 1 1 との間隔、および電極 2 2 と金属壁 1 2 との間隔はそれぞれ数百 nm ~ 数 μm である。

【0018】

金属壁 1 1、1 2 は、下端部（基板 B 側の端部）が基板 B に固定されており接続部 2 3、2 4 とともに固定されている。一方、金属壁 1 1、1 2 の上端部（金属薄膜 M 側の端部）は、金属壁 1 1、1 2 自体が撓むことで可動となっている。

【0019】

以上のような構成のプラズモン導波路素子 1 は以下の手順で作製できる。

まず、基板 B 上に金属薄膜 M を成膜してチップを得る。つぎに、集束イオンビームなどを用いて、金属壁 1 1 と金属壁 1 2 との間の金属薄膜 M をエッチングにより除去するとともに、金属壁 1 1 と電極 2 1 との間、および金属壁 1 2 と電極 2 2 との間の金属薄膜 M を、接続部 2 3、2 4 を残すようにエッチングにより除去する。

【0020】

また、以下の手順で作製してもよい。

まず、基板 B 上に金属薄膜 M を成膜してチップを得る。つぎに、集束イオンビームなどを用いて、チップの基板側からエッチングして、金属壁 1 1 と金属壁 1 2 との間の金属薄膜 M および基板 B を除去する。つぎに、チップの金属薄膜側からエッチングして、金属壁 1 1 と電極 2 1 との間、および金属壁 1 2 と電極 2 2 との間の金属薄膜 M を、接続部 2 3、2 4 を残すように除去する。このような手順とすれば、金属壁 1 1、1 2 の間のエッチングを基板側から行うことで、金属薄膜側からのエッチングが 1 回で済み、金属壁 1 1、1 2 をなめらかな形状に形成することができる。

【0021】

図 2 に示すように、導波路 1 0 には、プラズモン導波路素子 1 の裏面側（基板 B 側）から光 L_i が入射され、プラズモン導波路素子 1 の表面側（金属薄膜 M 側）から光 L_o が出射する。逆に、プラズモン導波路素子 1 の表面側（金属薄膜 M 側）から光が入射され、プラズモン導波路素子 1 の裏面側（基板 B 側）から光が出射するようにしてもよい。すなわち、本実施形態のプラズモン導波路素子 1 の導波路 1 0 は、光の伝搬方向が基板 B に対して垂直方向である。

【0022】

図 3 (a) に示すように、各電極 2 1、2 2 を逆符号（電極 2 1 を正極、電極 2 2 を負極）として、電極 2 1、2 2 間に電圧を印加すると、正極 2 1 に接続された金属壁 1 1 には正電荷が帯電し、負極 2 2 に接続された金属壁 1 2 には負電荷が帯電する。そうすると、一对の金属壁 1 1、1 2 にそれぞれ逆符号の電荷を帯電させることができ、金属壁 1 1、1 2 の間に働く静電引力により金属壁 1 1、1 2 が撓み、金属壁 1 1、1 2 同士を接近させることができる。

【0023】

また、電極 2 1 と金属壁 1 1 には正電荷が帯電し、電極 2 2 と金属壁 1 2 には負電荷が帯電する。そうすると、電極 2 1 と金属壁 1 1、および電極 2 2 と金属壁 1 2 にそれぞれ同符号の電荷を帯電させることができ、電極 2 1、2 2 と金属壁 1 1、1 2 との間に働く静電斥力によっても金属壁 1 1、1 2 が撓み、金属壁 1 1、1 2 を電極 2 1、2 2 から離間させ、金属壁 1 1、1 2 同士を接近させることができる。電極 2 1、2 2 と金属壁 1 1、1 2 との間隔を狭くすれば、それらの間に働く静電斥力が強くなり、より低い印加電圧で金属壁 1 1、1 2 同士を接近させることができる。

【0024】

一方、図 3 (b) に示すように、各電極 2 1、2 2 を同符号（電極 2 1 および電極 2 2 を正極または負極）として電圧を印加すると、一对の金属壁 1 1、1 2 にそれぞれ同符号の電荷を帯電させることができる。そうすると、金属壁 1 1、1 2 の間に働く静電斥力により金属壁 1 1、1 2 が撓み、金属壁 1 1、1 2 同士を離間させることができる。

10

20

30

40

50

【0025】

なお、電極21、22と金属壁11、12の間には静電斥力が働くため、金属壁11、12同士を接近させる力も働く。しかし、金属壁11、12同士の間隔に比べて電極21、22と金属壁11、12との間隔を広くするなどして、金属壁11、12の間に働く静電斥力に比べて電極21、22と金属壁11、12の間に働く静電斥力を弱くすることで、金属壁11、12同士を離間させることができる。

【0026】

金属壁11、12は弾性を有するので、金属壁11、12の間に働く静電引力や静電斥力、および電極21、22と金属壁11、12の間に働く静電斥力の大きさを変化させることで金属壁11、12同士の間隔を調整できる。すなわち、印加する電圧を調整することにより、金属壁11、12同士の間隔を調整できる。そして、印加電圧を0にすれば、金属壁11、12同士の間隔を元に戻すことができる。

10

【0027】

以上のように、プラズモン導波路素子1は、金属壁11、12同士の間隔を自在に変化させて導波路10の構造を変化させることができるので、導波路10のプラズモン共鳴波長を変更でき、1つの素子で伝搬させる光の波長を自在に変更できる。また、金属壁11、12同士の間隔と導波路10のプラズモン共鳴波長が変化することにより、導波路10を構成する金属への光の吸収量が変化するので、1つの素子で光の伝搬距離を自在に変更できる。

【0028】

金属壁11、12は下端部が固定されており上端部が可動となっている。そのため、一对の金属壁11、12は、下端部同士の間隔が変化せず、上端部同士の間隔が変化する。

20

【0029】

図3(a)に示すように、各電極21、22を逆符号として電極21、22間に電圧を印加すると、一对の金属壁11、12は、下端部同士の間隔が変化せず、上端部同士が接近する。この場合、プラズモン導波路素子1の裏面側(基板B側)から光を入射すると、一对の金属壁11、12は、光の入射側端部(下端部)同士の間隔が変化せず、出射側端部(上端部)同士が接近しているので、導波路10が光の伝搬方向に先細りとなる。そうすると、入射された光が集光されるので、導波路10の出射側端部の局所的な電場強度を入射光よりも増強できる。

30

【0030】

図3(b)に示すように、各電極21、22を同符号として電圧を印加すると、一对の金属壁11、12は、下端部同士の間隔が変化せず、上端部同士が離間する。この場合、プラズモン導波路素子1の表面側(金属薄膜M側)から光を入射すると、一对の金属壁11、12は、光の出射側端部(下端部)同士の間隔が変化せず、入射側端部(上端部)同士が離間しているので、導波路10が光の伝搬方向に先細りとなる。そうすると、入射された光が集光されるので、導波路10の出射側端部の局所的な電場強度を入射光よりも増強できる。

【0031】

以上のように、一对の金属壁11、12は、光の入射側または出射側の一方の端部が固定されており、他方の端部が可動となっているので、導波路10を光の伝搬方向に先細りに変形でき、光を集光することで導波路10の出射側端部の局所的な電場強度を入射光よりも増強できる。

40

【0032】

プラズモン導波路素子1は、金属壁11、12の間に働く静電引力または静電斥力により、金属壁11、12同士を接近または離間させるので、アクチュエータを簡易な構造とすることができる。

しかも、アクチュエータを含めたチップ全体をNEMSとして形成しているので、スケーリングメリットを活かした低電圧駆動や高速応答、高いフィルファクタが実現可能である。

【0033】

50

(第2実施形態)

上記第1実施形態に係るプラズモン導波路素子1は、導波路10の光の伝搬方向が基板Bに対して垂直方向であるが、これを基板Bに対して水平方向となる構造としてもよい。

図4および図5に示すように、本発明の第2実施形態に係るプラズモン導波路素子2は、所定間隔を開けて平行に対向するように配置された一対の金属壁11、12からなる導波路10と、一対の電極21、22と、一方の金属壁11と一方の電極21とを接続する接続部23と、他方の金属壁12と他方の電極22とを接続する接続部24とから構成されている。金属壁11、12は、その周囲の金属薄膜Mおよび基板Bが除去されており、接続部23、24で電極21、22と接続されることにより、片持ち状態で空中に支持されている。

10

【0034】

図4に示すように、導波路10には、プラズモン導波路素子1の一方の側面(図4における下側の側面)から光 L_i が入射され、プラズモン導波路素子1の他方の側面(図4における上側の側面)から光 L_o が出射する。すなわち、本実施形態のプラズモン導波路素子2の導波路10は、光の伝搬方向が基板Bに対して水平方向である。なお、本実施形態のプラズモン導波路素子2を、導波路10の光の伝搬方向を基板Bに対して垂直方向となるように用いてもよい。

【0035】

図6(a)に示すように、各電極21、22を逆符号(電極21を正極、電極22を負極)として、電極21、22間に電圧を印加すると、正極21に接続された金属壁11には正電荷が帯電し、負極22に接続された金属壁12には負電荷が帯電する。そうすると、一対の金属壁11、12にそれぞれ逆符号の電荷を帯電させることができ、金属壁11、12の間に働く静電引力により金属壁11、12が撓み、金属壁11、12同士を接近させることができる。

20

【0036】

また、図6(b)に示すように、各電極21、22を同符号(電極21および電極22を正極または負極)として電圧を印加すると、一対の金属壁11、12にそれぞれ同符号の電荷を帯電させることができる。そうすると、金属壁11、12の間に働く静電斥力により金属壁11、12が撓み、金属壁11、12同士を離間させることができる。

【0037】

このように、本実施形態のプラズモン導波路素子2においても、金属壁11、12同士の間隔を自在に変化させて導波路10の構造を変化させることができるので、導波路10のプラズモン共鳴波長を変更でき、1つの素子で伝搬させる光の波長を自在に変更できる。また、金属壁11、12同士の間隔と導波路10のプラズモン共鳴波長が変化することにより、導波路10を構成する金属への光の吸収量が変化するので、1つの素子で光の伝搬距離を自在に変更できる。さらに、一対の金属壁11、12は、光の入射側または出射側の一方の端部が固定されており、他方の端部が可動となっているので、導波路10を光の伝搬方向に先細りに変形でき、光を集光することで導波路10の出射側端部の局所的な電場強度を入射光よりも増強できる。

30

【0038】

(その他の実施形態)

金属壁11、12同士を接近または離間させるアクチュエータとしては、金属壁11、12の間に働く静電引力または静電斥力を利用したもの以外にも、金属壁11、12に外力を働かせ、金属壁11、12同士を接近または離間させるアクチュエータを採用してもよい。

40

【実施例】

【0039】

つぎに、実施例について説明する。

(試料試験1)

まず、上記第1実施形態に係るプラズモン導波路素子1に相当する試料を作製した。

50

はじめに、真空蒸着装置を用いて、 10^{-5} Paの真空条件下で、厚さ1mmの石英ガラス基板 (SiO_2) 上に厚さ $3\mu\text{m}$ の金薄膜を成膜した。つぎに、集束イオンビームを用いて、表面側 (金属薄膜側) からのみエッチングして、金属壁11と金属壁12との間の金属薄膜Mを除去するとともに、金属壁11と電極21との間、および金属壁12と電極22との間の金属薄膜Mを、接続部23、24を残すように除去することで、図1および図2に示すプラズモン導波路素子1の構造を作製した。ここで、金属壁11、12の厚さを200nm、高さ寸法を $3\mu\text{m}$ 、長さ寸法を $10\mu\text{m}$ 、金属壁11と金属壁12の間隔を300nmとした。接続部23、24の厚さを $1.43\mu\text{m}$ 、幅寸法を $1\mu\text{m}$ 、長さ寸法を $10\mu\text{m}$ とした。また、電極21、22を $100\mu\text{m}$ 四方の矩形に形成した。

【0040】

図7に、作製した試料を走査型電子顕微鏡で確認した結果を示す。

図7に示すように、所望の構造、寸法を有するプラズモン導波路素子を得ることができた。

【0041】

つぎに、図8に示す透過型顕微分光光学系を用いて、作製した試料に基板側から光を入射し、金属薄膜側から透過光を観測した。

より詳細には、顕微鏡下に試料を配置し、TM偏光保持した白色光を明視野系において照射した。

【0042】

図9(a)に示すように、入射光の偏光方向を金属壁11、12が対向する方向とした場合、導波路10から透過光が観測された。一方、図9(b)に示すように、入射光の偏光方向を金属壁11、12に沿う方向とした場合、導波路10から透過光が観測されなかった。以上にみられる偏光特性より、導波路10において表面プラズモンが励起されることを確認した。

【0043】

つぎに、導波路10からの透過光を紫外可視マルチチャンネル分光器により観測した。ここで、試料の電極21、22間には、ファンクションジェネレータを用いて1V刻みで0V~10Vの電圧 V_b を印加した。

【0044】

図10に、上記透過型顕微分光光学系を用いて観測した印加電圧 V_b を0、3、5、6、10Vとした場合における透過光スペクトルを示す。また、図11に、印加電圧 V_b に対する透過光共鳴ピーク波長の関係を示す。

図10および図11に示すように、透過光共鳴ピーク波長は、印加電圧 V_b が大きくなる(金属壁11、12同士の隙間が小さくなる)に従い長波長側へシフトすることが分かった。また、印加電圧が0Vの場合の短波長側に現れた第1ピークの波長は659.7nmであり、印加電圧が5Vの場合の第1ピークの波長は688.74nmであることから、5Vの電圧を印加すると透過光共鳴ピーク波長は約29nm(図10における第1ピークの矢印に相当する。)シフトすることが分かった。また、その他のピーク波長も同様なレッドシフトの特性を示すとともに、第2、第3および第4ピークの波長はおおよそ周期的に表れていることが分かった。

【0045】

(数値計算1)

つぎに、2次元有限差分時間領域法を用いた数値計算によりプラズモン導波路素子の光学特性を評価した。

図12に示すように、数値計算におけるプラズモン導波路素子の構造を、 SiO_2 基板上に金薄膜が形成された構造とした。ここで、金属壁11、12の厚さ M_w を300nm、高さ寸法 T_a を $3.0\mu\text{m}$ 、接続部23、24の厚さ T_b を $1.0\mu\text{m}$ とした。また、作製した試料の金属壁11、12の先端形状は作製過程の影響から曲率を帯びていたことから(図7参照)、本数値計算においても金属壁11、12の角部の曲率半径 C_r を100nmとした。金属壁11、12の固定された端部(下端部)同士の間隔を固定端部間隔 G_b 、可動である端部(上端部)

10

20

30

40

50

同士の間隔を可動端部間隔 G_t とした。また、 SiO_2 基板の屈折率を1.45とした。金の誘電率として、A.D.Rakicらの実験データ(Rakic, A. D., Djurisic, A. B., Elazar, J. M. & Majewski, M. L. Optical Properties of Metallic Films for Vertical-Cavity Optoelectronic Devices. Appl. Opt. 37, 5271-5283 (1998))をドルーデ・ローレンツモデルで表現したものを用いた。

【0046】

プラズモン導波路素子の基板側からTM偏光させた光を入射した。入射光の偏光方向は金属壁11、12が対向する方向(x方向)とした。この入射光のスポット径(半値半幅)は、金属壁11、12が対向する方向(x方向)に1160nm、金属壁11、12に沿う方向(y方向)に無限とした。

10

そして、固定端部間隔 G_b を300nmとし、可動端部間隔 G_t を300nm~2nmの間で変化させ、それぞれの条件における導波路からの透過光スペクトルを遠方解により算出した。

なお、2次元有限差分時間領域法におけるメッシュ間隔は、 G_t が300、200、100、50nmのときは金属壁11、12が対向する方向(x方向)および金属壁11、12の高さ方向(z方向)にそれぞれ5nmとした。 G_t が10、2nmのときは金属壁11、12間におけるメッシュ間隔を、x方向に1.0~5.0nm、z方向に0.2~5.0nmの不均一メッシュとした。

【0047】

図13に、数値計算により算出したプラズモン導波路素子の透過光スペクトルを示す。

図13に示すように、短波長側に現れた第1ピークの波長は628.35nmであり、続いて第2、第3および第4ピークの波長がそれぞれ705.41nm、814.70nm、991.25nmであった。可動端部間隔 G_t を300nm、10nm、2nmと変化させる(印加電圧が大きくなることに相当する)に従い、 $G_t=10\text{nm}$ および 2nm の場合の第1ピークの波長は、それぞれ650.36nm、703.18nmと長波長側へシフトすることが分かった。また、その他のピーク波長も同様な特性を示した。さらに、第2、第3および第4ピークの波長はおおよそ周期的に表れており、また、電界強度分布からも反射部(固定及び可動端部)によるファブリー・ペロー共振であることを確認した。

20

以上のように、試料試験と数値計算の双方において、共鳴ピーク波長のレッドシフトとファブリー・ペロー共振が確認された。

【0048】

以上より、本発明に係るプラズモン導波路素子が導波路のプラズモン共鳴波長を変更でき、1つの素子で伝搬させる光の波長を変更できることが明らかとなった。

30

なお、試料試験と数値計算において、透過光スペクトルに若干の違いが見られるが、これは、試料における金属壁の角の削れや、金属壁の厚み、高さ、ギャップなどの若干のばらつきに起因すると考えられる。

【0049】

(数値計算2)

上記2次元有限差分時間領域法を用いた数値計算1において、固定端部間隔 G_b を300nmとし、可動端部間隔 G_t を300nm~2nmの間で変化させ、電場強度の観測点における入射光の電場強度 $|E_i|$ に対する出射光の電場強度 $|E_o|$ を算出した。その余の条件は、数値計算1と同様である。

40

【0050】

その結果、図14に示すように、特に可動端部間隔 G_t が2nmの場合において、波長692.72nmにおける電場増強度(= $|E_o|/|E_i|$)は33となり、大きいことが確認された。光強度は電場強度の2乗に比例することから、入射光に対して出射光の強度が増強されることが確認された。なお、 C_r を0nm(金属壁11、12の先端形状に曲率を持たない)とした場合、電場増強度(= $|E_o|/|E_i|$)は~60となり、非常に大きいことが確認された。

以上より、本発明に係るプラズモン導波路素子は、導波路10の出射側端部の局所的な電場強度を入射光よりも増強できることを明らかにした。

【0051】

(試料試験2)

50

つぎに、上記試料試験1におけるプラズモン導波路素子の作製方法を改良して、試料を作製した。

はじめに、真空蒸着装置を用いて、 10^{-5} Paの真空条件下で、厚さ100nmの窒化珪素基板(Si_3N_4)上に厚さ1.46 μm の金薄膜を成膜した。つぎに、集束イオンビームを用いて、裏面側(基板側)からエッチングして、金属壁11と金属壁12との間の金属薄膜Mおよび基板Bを除去した後、表面側(金属薄膜側)からエッチングして、金属壁11と電極21との間、および金属壁12と電極22との間の金属薄膜Mを、接続部23、24を残すように除去することで、プラズモン導波路素子の構造を作製した。ここで、金属壁11、12の厚さを200nm、高さ寸法を1.46 μm 、長さ寸法を10 μm 、金属壁11と金属壁12の間隔を300nmとした。接続部23、24の厚さを400nm、幅寸法を200nm、長さ寸法を10 μm とした。また、電極21、22を100 μm 四方の矩形に形成した。

10

【0052】

図15に、作製した試料を走査型電子顕微鏡で確認した結果を示す。

図15に示すように、所望の構造、寸法を有するプラズモン導波路素子を得ることができた。また、試料試験1の場合(図7参照)に比べて、金属壁11、12をなめらかな形状に形成することができた。具体的には、試料試験1の場合には金属壁11、12の頂部に凹凸が確認されたが、試料試験2の場合には金属壁11、12の頂部が真っ直ぐになっている。これは、金属壁11、12の間のエッチングを裏面側(基板側)から行うことで、表面側(金属薄膜側)からのエッチングが1回で済み、金属壁11、12の頂部へのビームの影響を少なくできたためと考えられる。

20

【0053】

つぎに、図8に示す透過型顕微分光光学系を用いて、作製した試料に基板側から光を入射し、導波路10からの透過光を紫外可視マルチチャンネル分光器により観測した。

ここで、試料の電極21、22間には、ファンクションジェネレータを用いて1V刻みで0V~10Vの電圧 V_b を印加した。

【0054】

図16に、上記透過型顕微分光光学系を用いて観測した印加電圧 V_b を0、2、4、6、8、10Vとした場合における透過光スペクトルを示す。

図16に示すように、透過光共鳴ピーク波長は、試料試験1の場合と同様に、印加電圧 V_b が大きくなる(金属壁11、12同士の隙間が小さくなる)に従い長波長側へシフトすることが分かった。また、試料試験1の場合(図10参照)に比べて、ピークの半値幅が狭くなり、ピークの数が少なくなる(波長400~1,000nmの範囲で1つまたは2つのピーク)ことが分かった。ピークの波長は、金属壁11、12の高さにも依存する。試料試験2では金属壁11、12の頂部が滑らかであるため、高さ寸法が均一となっている。そのため、複数のピークが混在することなく、ピークの半値幅が狭くなり、ピークの数が少なくなると考えられる。このようにピークが鋭くなることで、透過光の波長の選択性が向上し、素子として扱いやすくなる。

30

【産業上の利用可能性】

【0055】

本発明に係るプラズモン導波路素子は、例えば、ナノ光集積回路を構成する素子として利用できる。ナノ光集積回路に用いた場合、エレクトロニクスと同等またはそれ以上の高速周波数応答が予想される。なお、表面プラズモンは、光の回折限界以下の領域に光エネルギーを閉じ込めることから、光デバイスをCMOS回路と同サイズに小型化する要素技術として利用でき、また単一試料での共鳴ピーク波長および伝搬距離の可変が可能であることから更なる高集積・高性能化が可能となる。具体的な応用としては、導波路、フィルタ、検出器、集光器などが挙げられる。さらに、入射光に対する出射側端部の局所的な電場増強を利用した局所センサとしても利用が可能である。また、一对の金属壁からなる導波路を電圧駆動のピンセットとして利用することで、任意の領域にある細胞や粒子、分子を高感度に検出など、次世代材料とデバイスへのアプローチすることが可能となる。

40

【符号の説明】

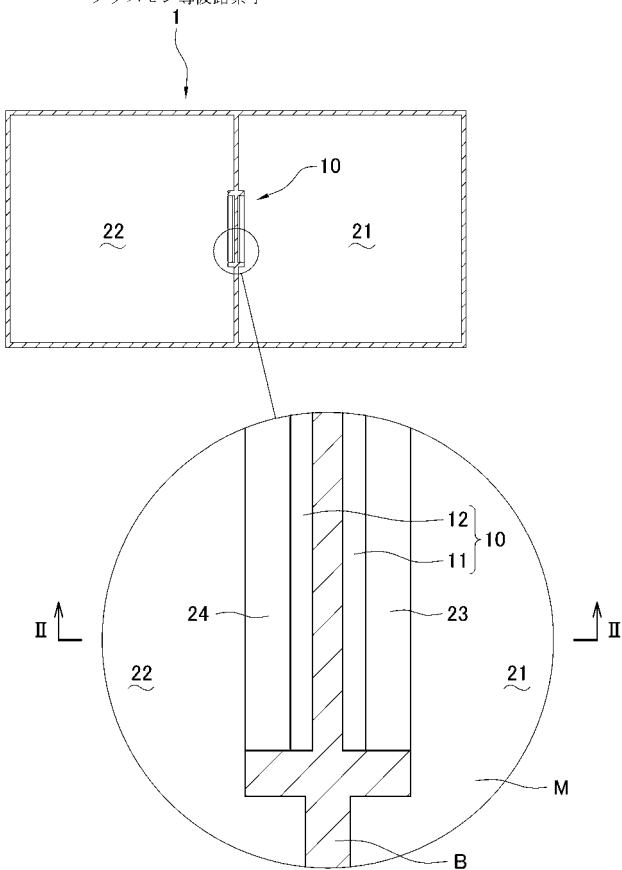
50

【 0 0 5 6 】

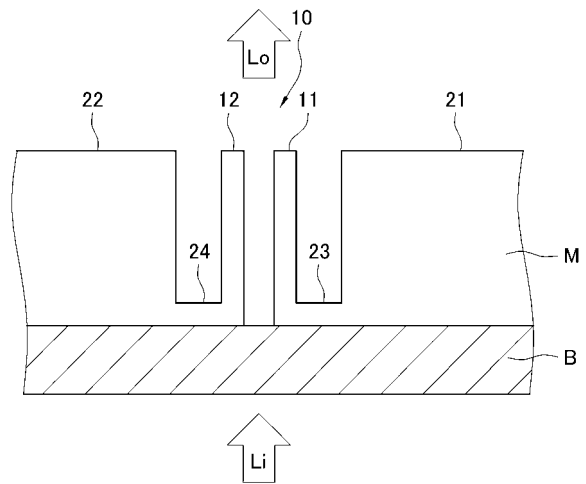
- 1、2 プラズモン導波路素子
- 10 導波路
- 11、12 金属壁
- 21、22 電極
- 23、24 接続部

【 図 1 】

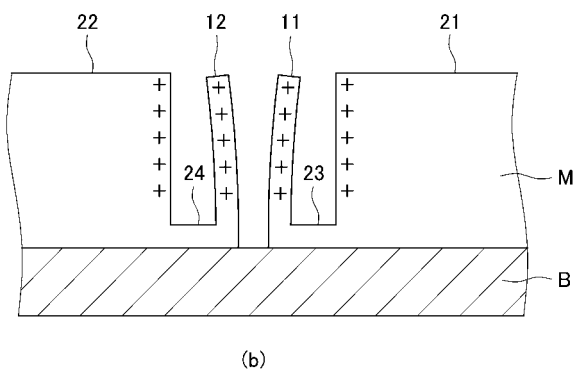
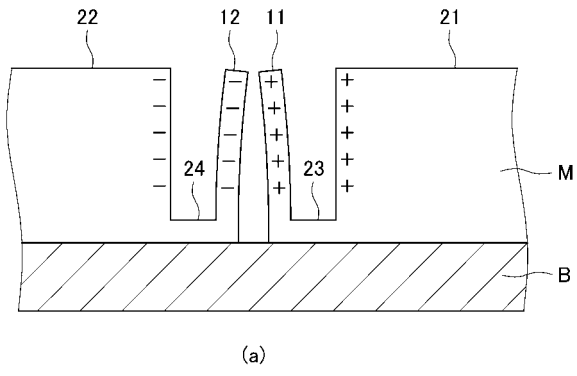
プラズモン導波路素子



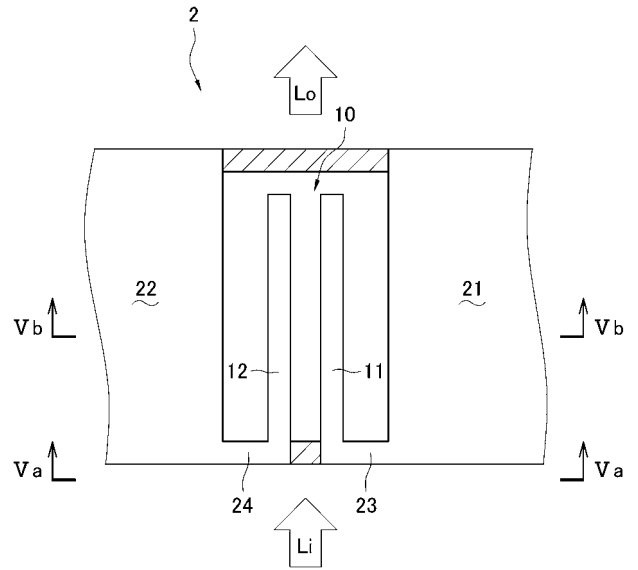
【 図 2 】



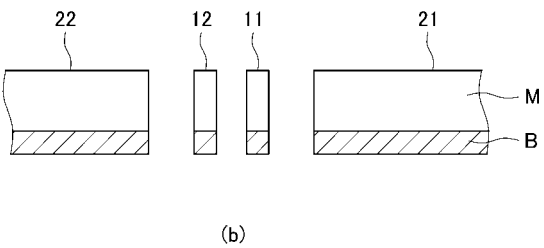
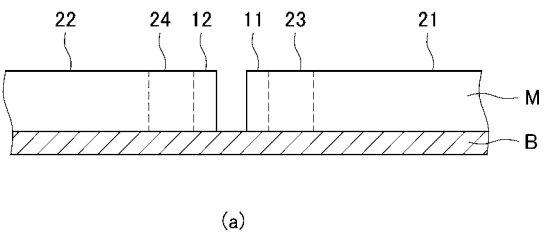
【 図 3 】



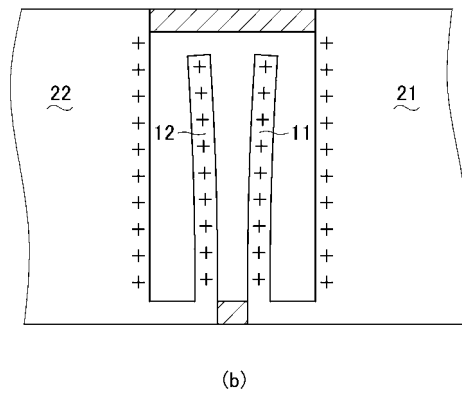
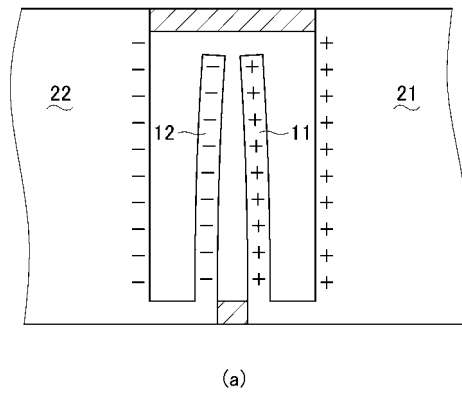
【 図 4 】



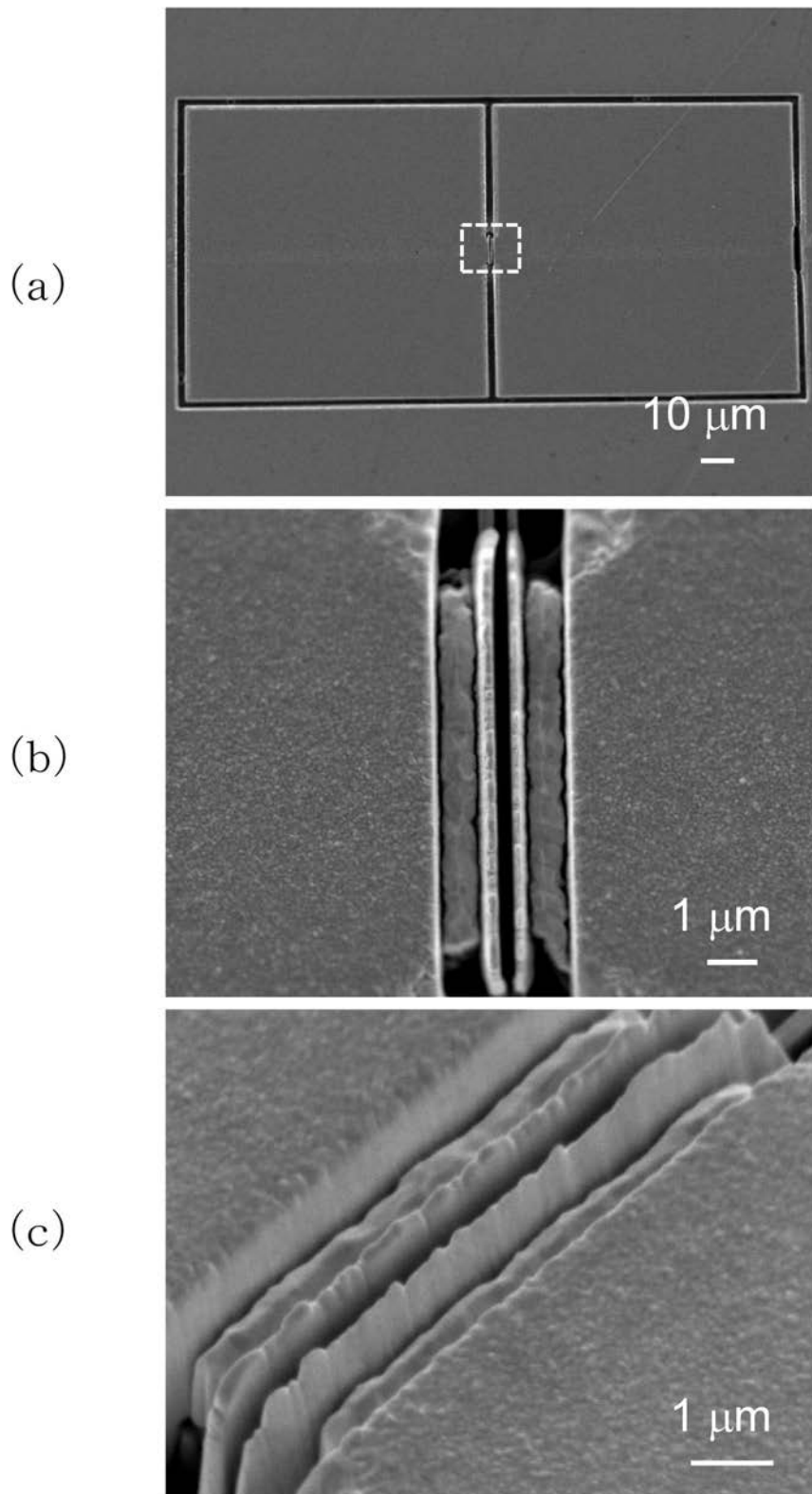
【 図 5 】



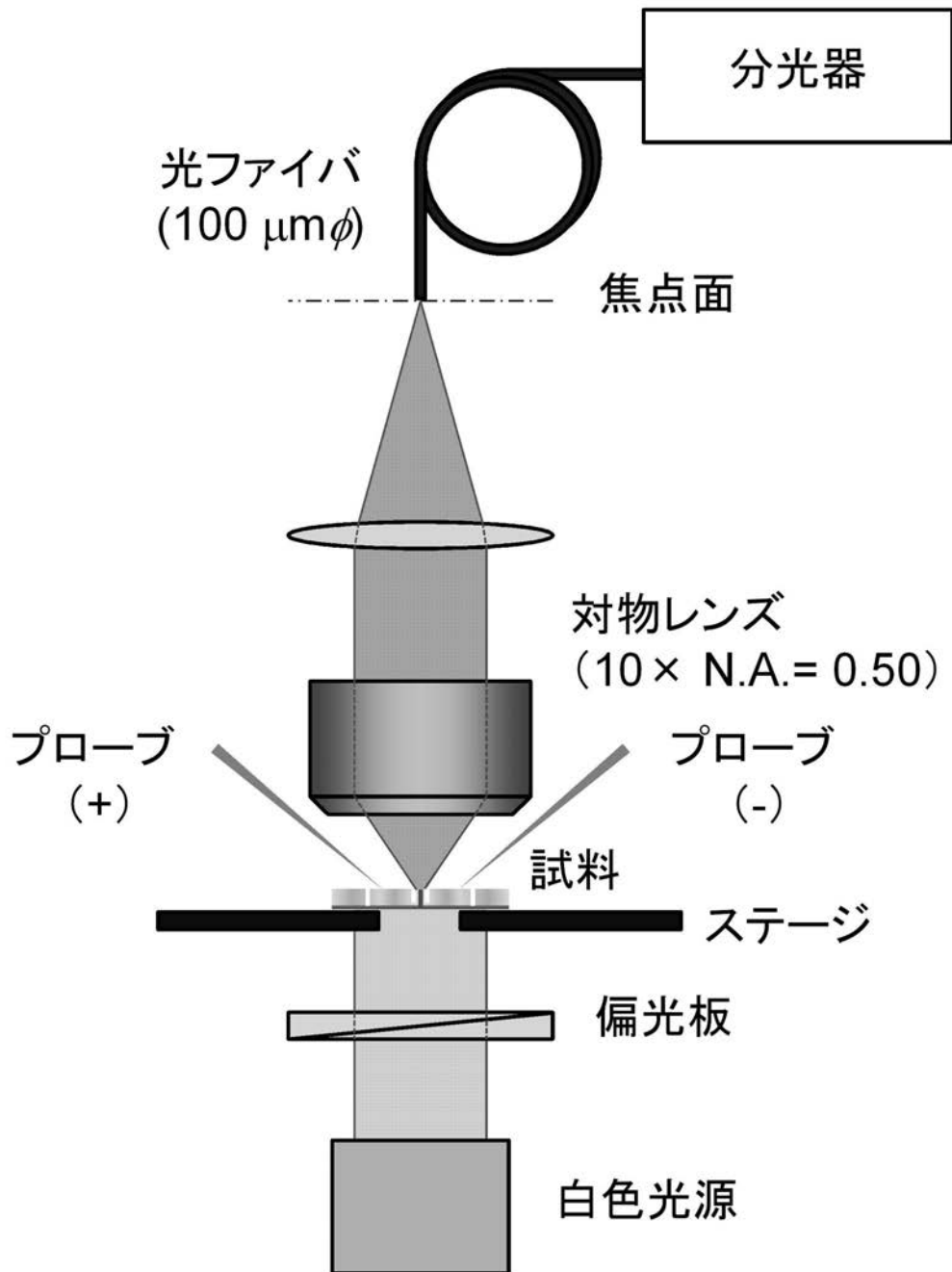
【 図 6 】



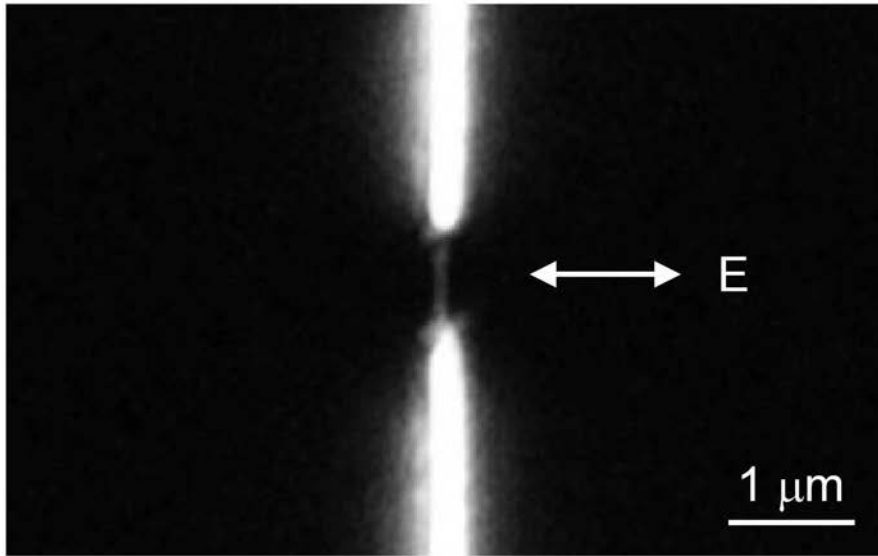
【 図 7 】



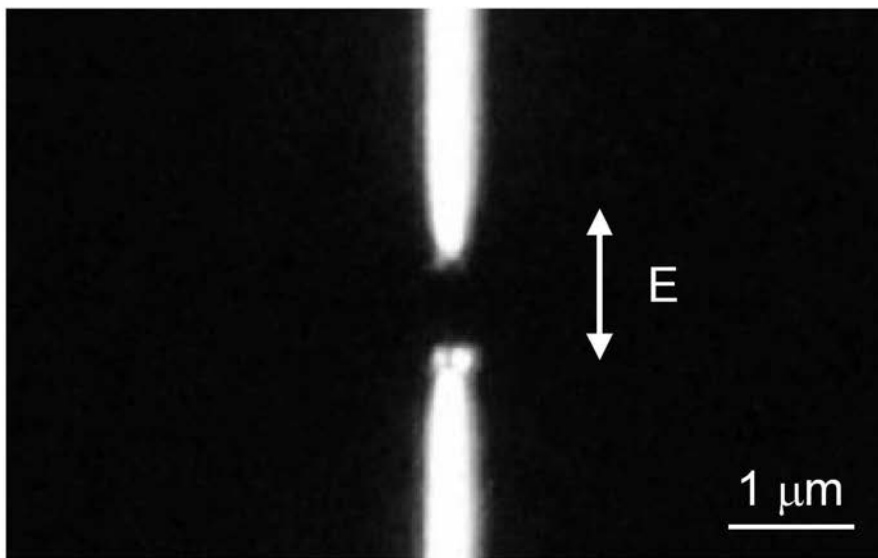
【 図 8 】



【 図 9 】

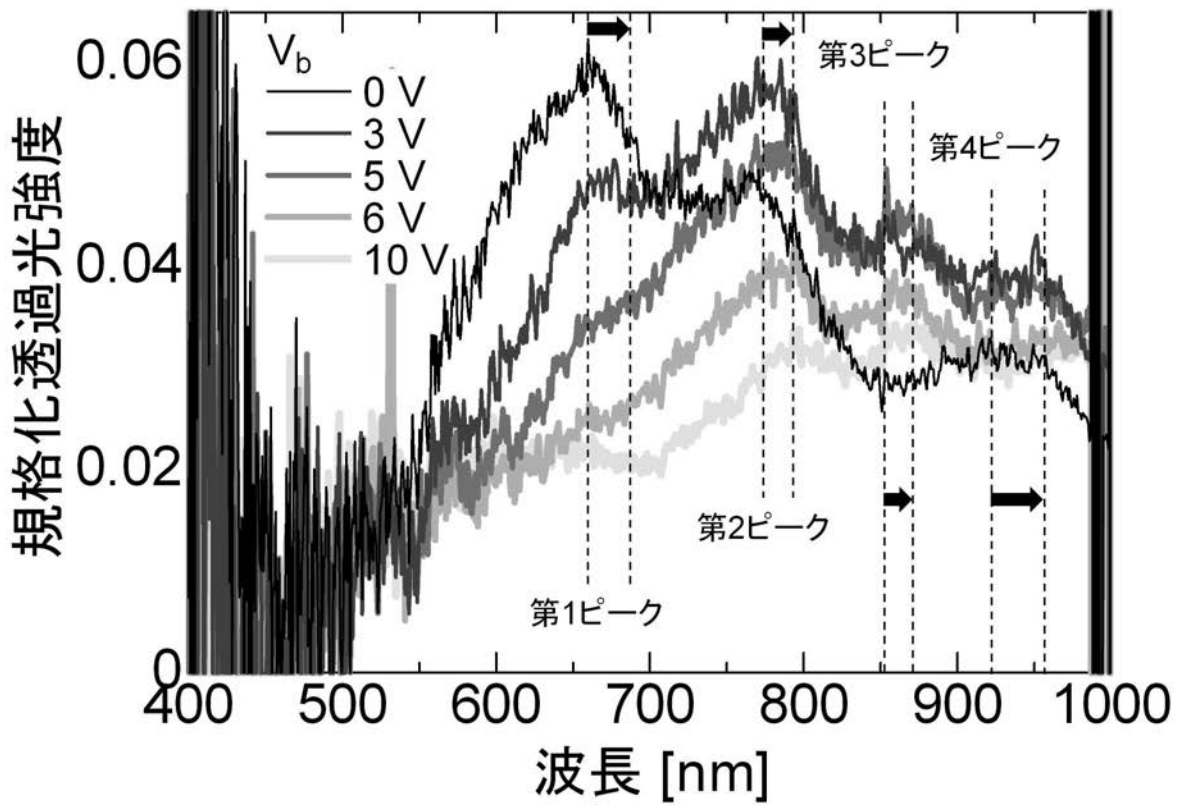


(a)

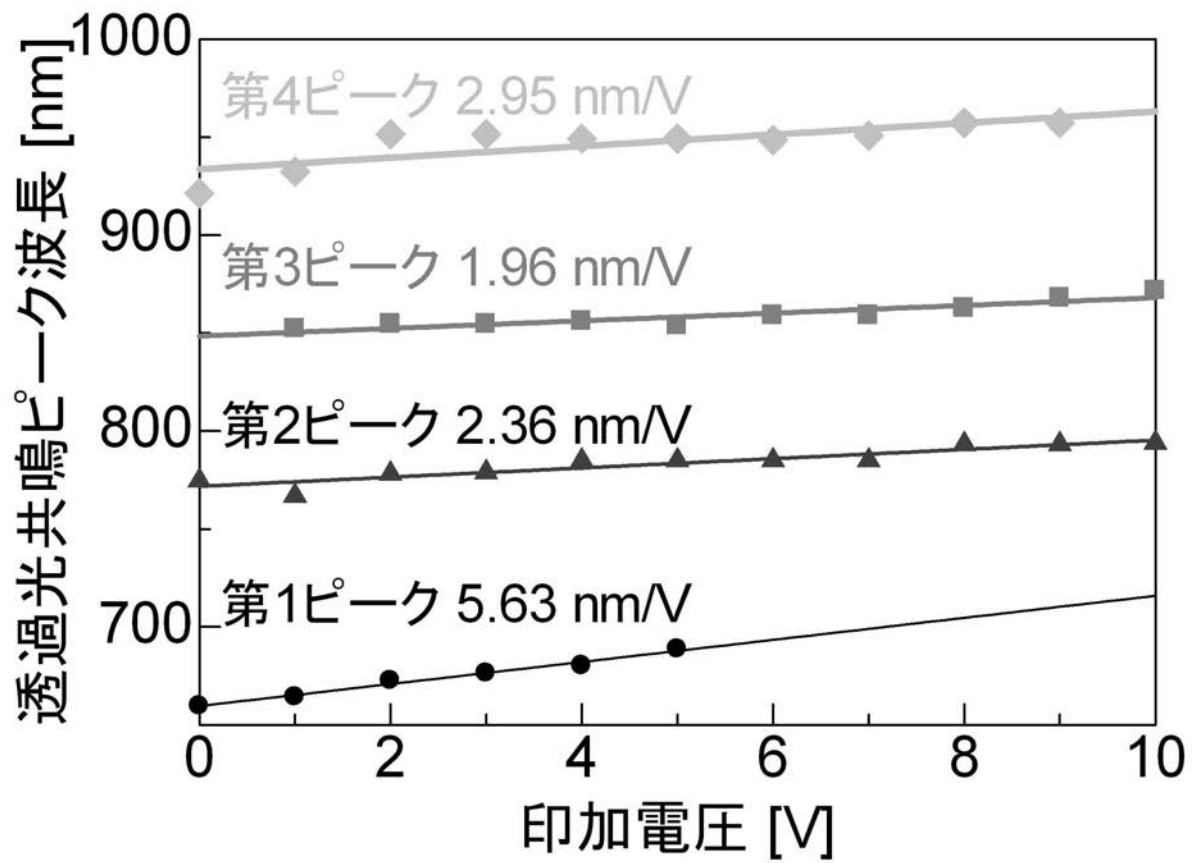


(b)

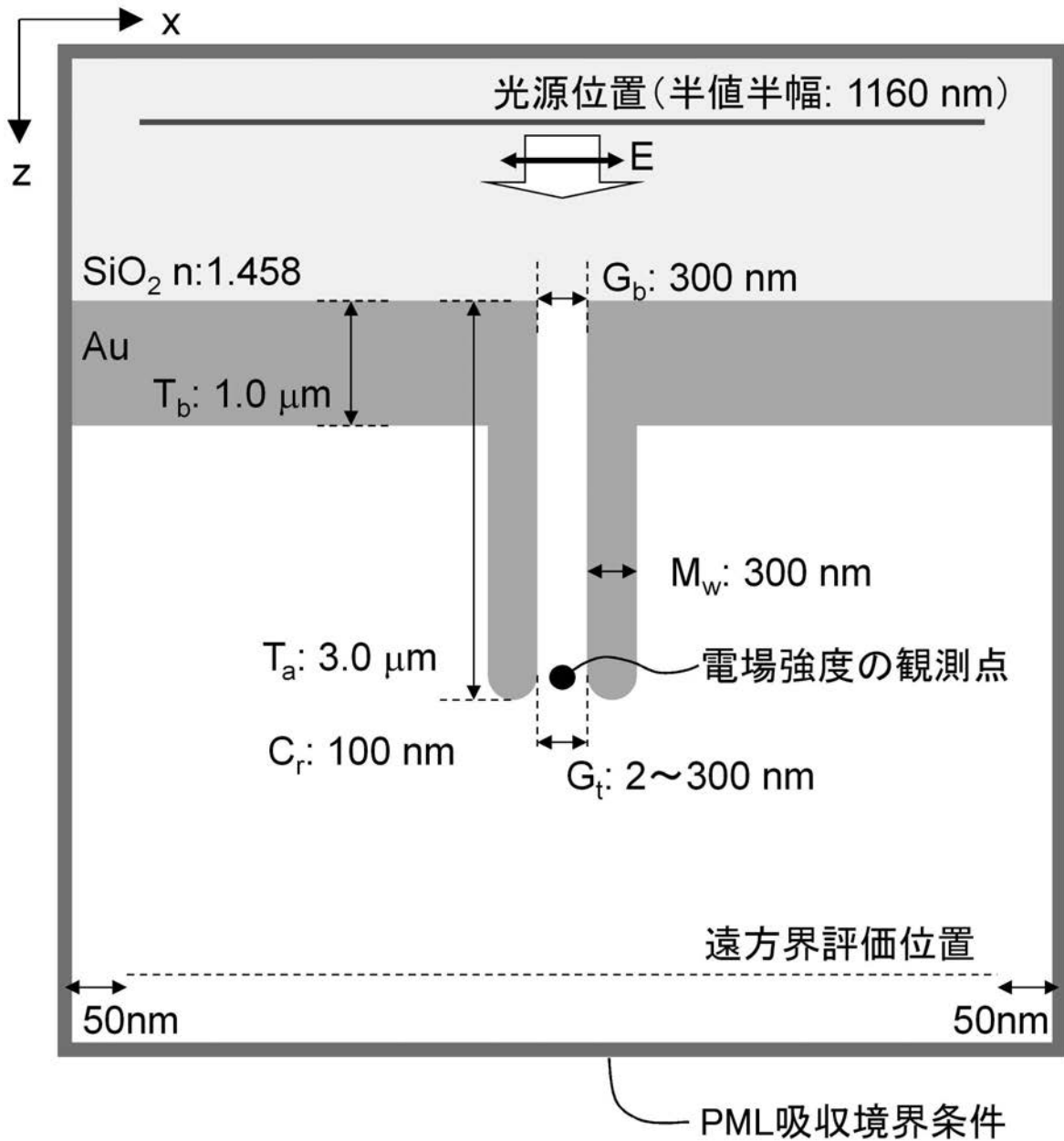
【図10】



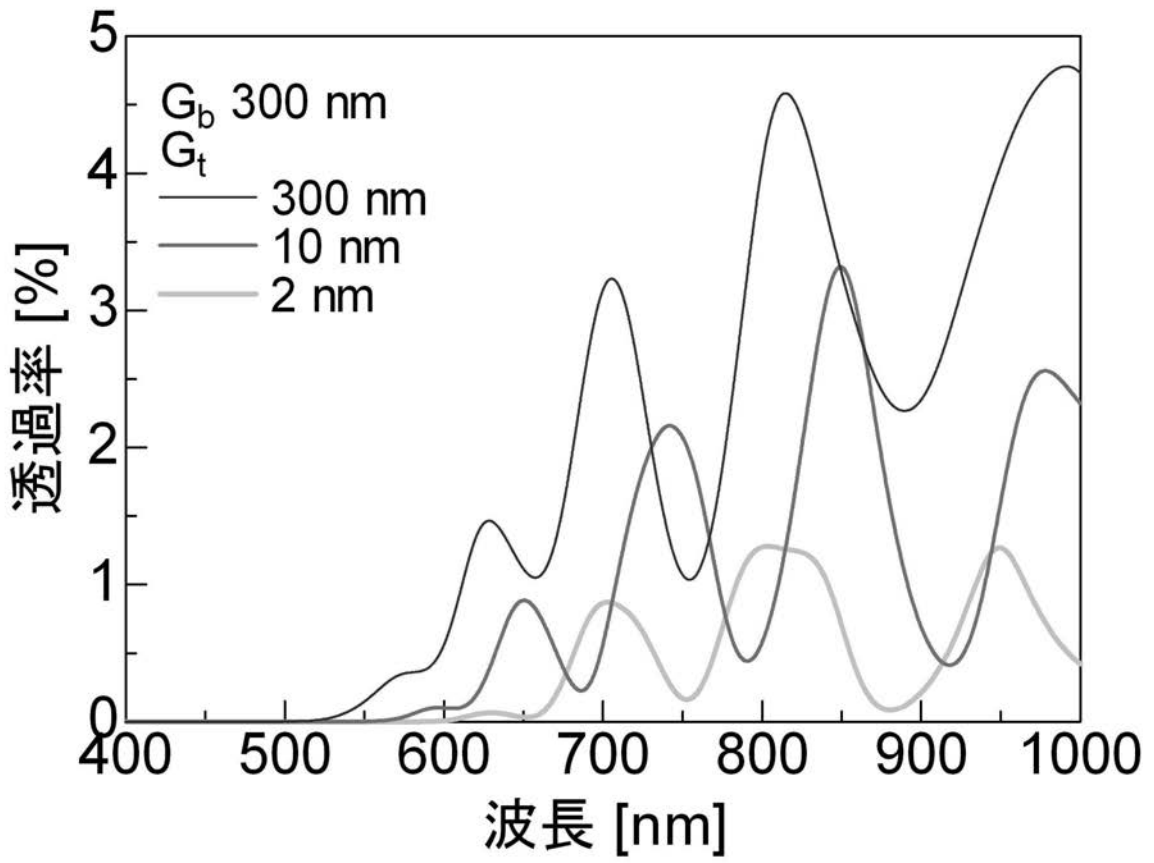
【図 1 1】



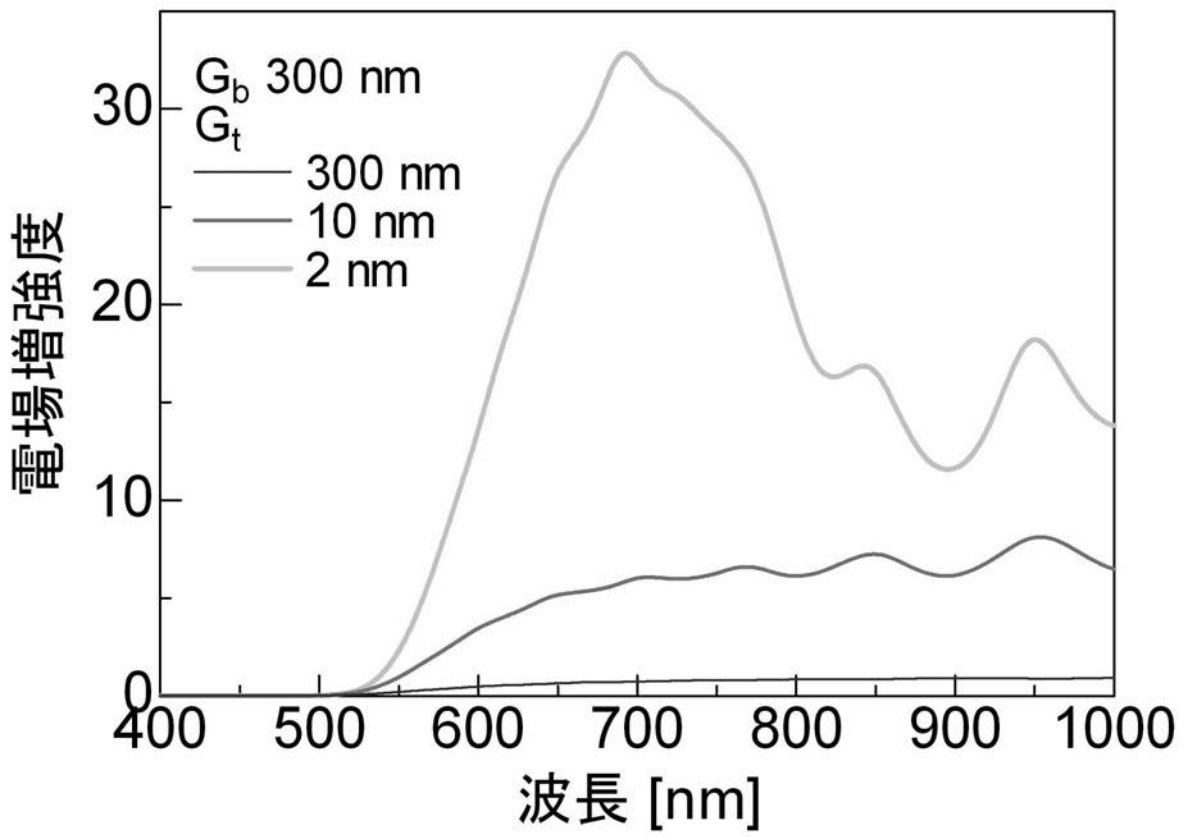
【 図 1 2 】



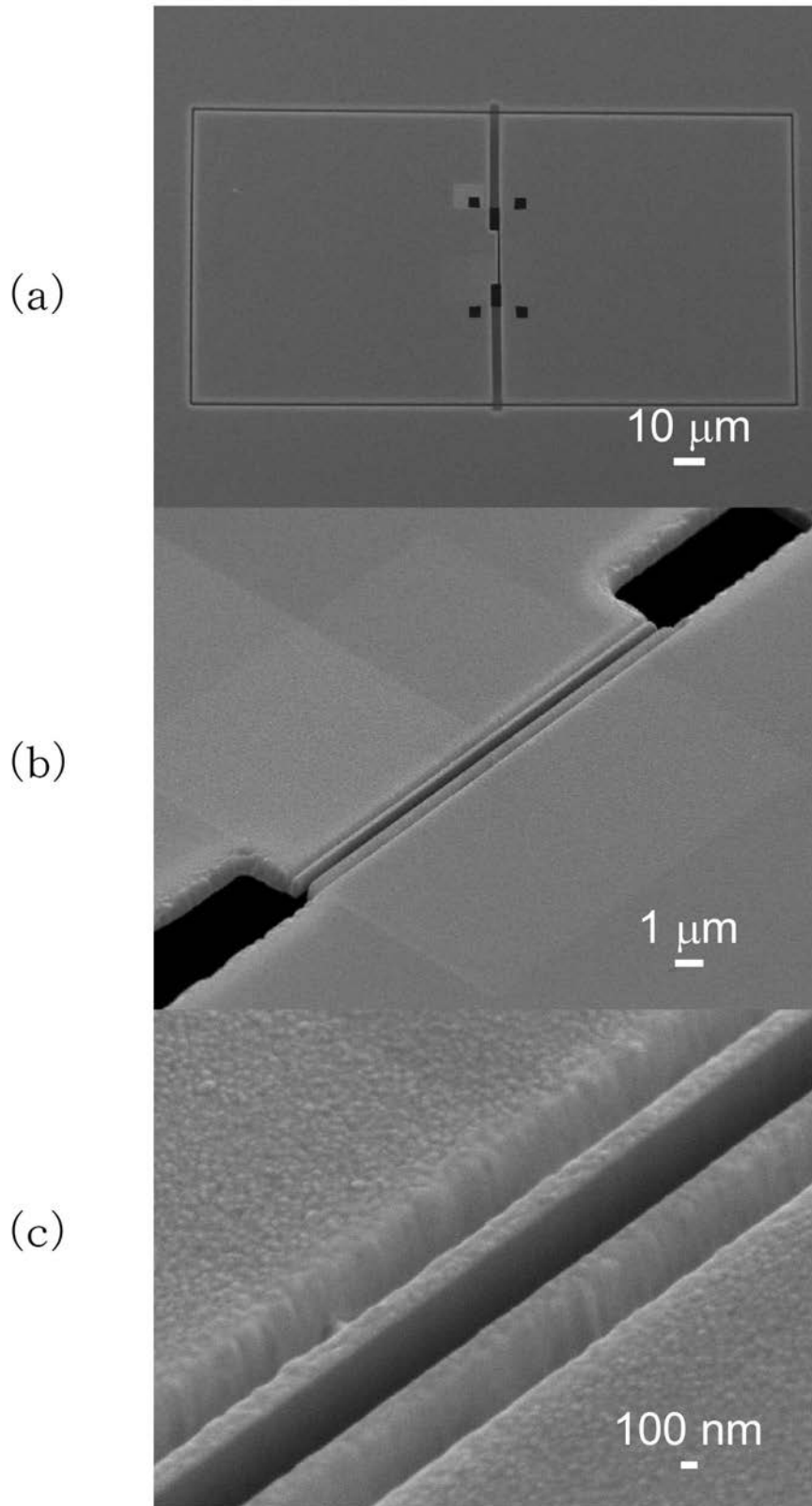
【図 13】



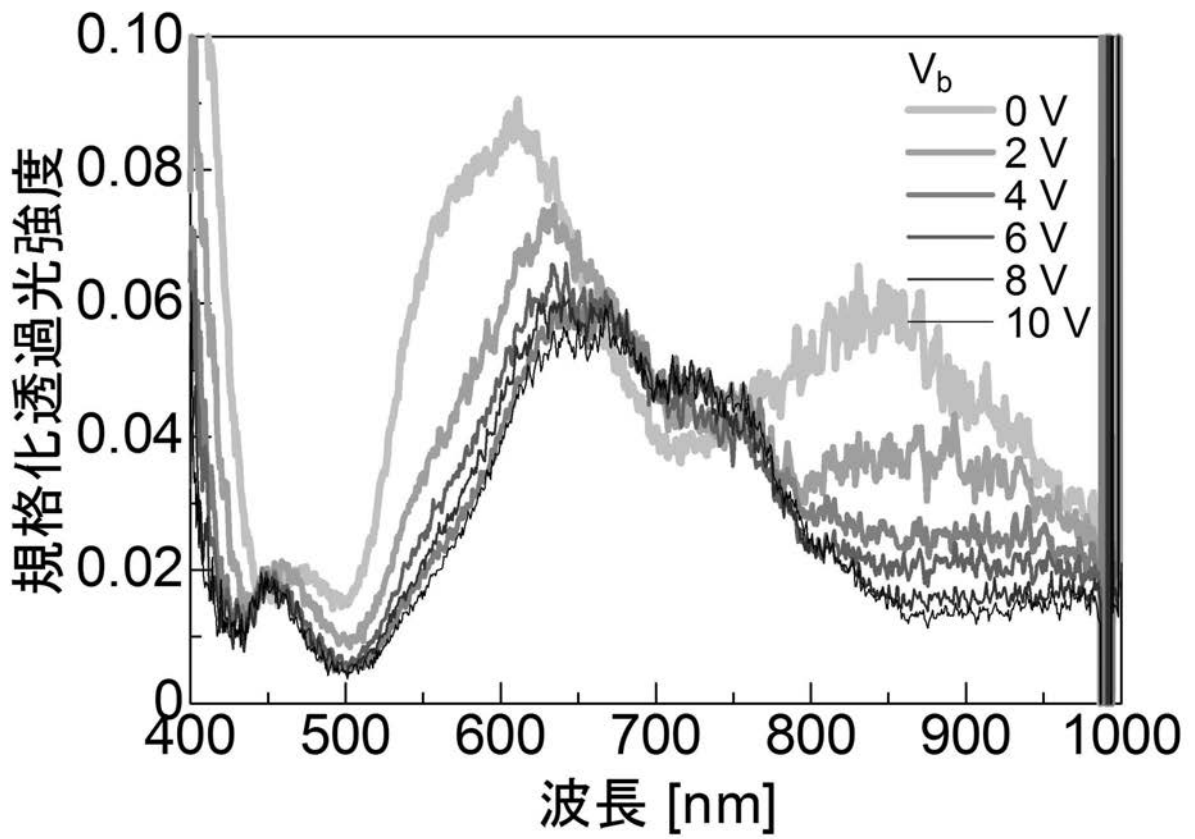
【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



【 図 1 6 】



フロントページの続き

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)
B 8 1 C	1/00	(2006.01)	B 8 1 C	1/00		
G 0 1 N	21/41	(2006.01)	G 0 1 N	21/41	1 0 2	

Fターム(参考) 2H147 AA02 AB01 AB20 AB21 AC12 AC15 BA10 BA11 BB02 CD13
DA11 EA02C EA10B EA14C EA15C EA25A FC03 FD19 FD20 GA10
GA16
3C081 AA13 BA04 BA06 BA27 BA43 BA48 BA53 CA17 EA07