

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7485091号  
(P7485091)

(45)発行日 令和6年5月16日(2024.5.16)

(24)登録日 令和6年5月8日(2024.5.8)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 2 B 5/28 (2006.01) G 0 2 B 5/28

請求項の数 8 (全16頁)

(21)出願番号	特願2022-574906(P2022-574906)	(73)特許権者	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(86)(22)出願日	令和3年1月13日(2021.1.13)	(74)代理人	100098394 弁理士 山川 茂樹
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/000807	(74)代理人	100153006 弁理士 小池 勇三
(87)国際公開番号	WO2022/153389	(74)代理人	100064621 弁理士 山川 政樹
(87)国際公開日	令和4年7月21日(2022.7.21)	(74)代理人	100121669 弁理士 本山 泰
審査請求日	令和5年4月27日(2023.4.27)	(72)発明者	田中 優理奈 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
		(72)発明者	坂本 尊

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 波長可変光フィルタ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1入射面と前記第1入射面と反対側に配置された第1出射面とを備え、電歪効果を有して光が透過する材料から構成され、前記第1入射面と前記第1出射面とが光軸上に配置された板状の第1部品と、

第2入射面と前記第2入射面と反対側に配置された第2出射面とを備え、前記光が透過する材料から構成され、前記第2入射面と前記第2出射面とが前記光軸上に配置され、前記光軸上で前記第1入射面と前記第2入射面との距離が一定とされた板状の第2部品と、

前記第1出射面に形成された部分的に前記光を反射する第1反射膜と、

前記第2入射面に形成され、部分的に前記光を反射する第2反射膜と、

前記第1部品の板厚方向に電圧を印加する電圧印加部と、

前記第1部品に電荷を注入する電荷注入部と

を備え、

前記第1反射膜と前記第2反射膜とによりファブリペロー干渉計が構成され、

前記第1入射面に形成された、前記第1部品にオーミック接続する第1透明電極と、

前記第1出射面と前記第1反射膜との間に形成された、前記第1部品にオーミック接続する第2透明電極と

を備え、

前記第1透明電極および前記第2透明電極により、前記電圧印加部および前記電荷注入部が構成されていることを特徴とする波長可変光フィルタ。

## 【請求項 2】

請求項 1 記載の波長可変光フィルタにおいて、  
前記第 1 出射面と前記第 2 入射面とは、互いに向かい合って配置され、  
前記第 1 入射面と前記第 1 出射面とは、互いに平行である  
ことを特徴とする波長可変光フィルタ。

## 【請求項 3】

請求項 1 または 2 記載の波長可変光フィルタにおいて、  
前記第 1 部品は、 $KTN [KTa_{1-x}NbO_3 (0 < x < 1)]$  結晶、またはリチウムを添加した  $KLTN [K_{1-x}LiTa_{1-x}NbO_3 (0 < x < 1, 0 < x < 1)]$  結晶のいずれかから構成され、  
前記第 1 透明電極および前記第 2 透明電極は、酸化インジウムスズから構成されている  
ことを特徴とする波長可変光フィルタ。

10

## 【請求項 4】

請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の波長可変光フィルタにおいて、  
前記第 1 透明電極、前記第 1 部品、前記第 2 透明電極、および前記第 1 反射膜による積層体を挟んで保持する保持具  
をさらに備えることを特徴とする波長可変光フィルタ。

## 【請求項 5】

請求項 4 記載の波長可変光フィルタにおいて、  
前記第 1 反射膜と前記保持具との間に配置された弾性シートをさらに備えることを特徴  
とする波長可変光フィルタ。

20

## 【請求項 6】

請求項 5 記載の波長可変光フィルタにおいて、  
前記弾性シートは、グラファイトまたはカーボンから構成されている  
ことを特徴とする波長可変光フィルタ。

## 【請求項 7】

請求項 5 または 6 記載の波長可変光フィルタにおいて、  
前記第 1 透明電極と前記保持具との間に配置された、前記弾性シートより弾性率または  
硬度が大きい他の弾性シートをさらに備えることを特徴とする波長可変光フィルタ。

## 【請求項 8】

請求項 4 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の波長可変光フィルタにおいて、  
前記保持具は、  
前記第 1 透明電極の側に配置される第 1 保持具と、前記第 1 反射膜の側に配置される第  
2 保持具とを有し、  
前記第 2 保持具は、光軸方向に貫通する保持部を有し、  
前記第 2 部品は、前記第 2 保持具の前記保持部に保持される  
ことを特徴とする波長可変光フィルタ。

30

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、ファブリペロー干渉計型の波長可変光フィルタに関する。

40

## 【背景技術】

## 【0002】

任意の透過波長を選択することができる波長可変光フィルタは、レーザの発振波長の制御など、レーザ応用の基盤技術として用いられている。波長可変光フィルタを使ったレーザ応用技術に、光イメージングがある。光コヒーレンストモグラフィ (Optical Coherence Tomography; OCT) は、光干渉を用いて生体内部などを非破壊・非接触に可視化することが可能であるため、幅広く利用されている。OCT で使われる光源には、光源内にある波長可変光フィルタの掃引によって波長掃引光源を実現しているものがあり、波長可変光フィルタの掃引速度によって、イメージングの速度が決まる。また、波長掃引幅が

50

測定分解能を決定するため、より高速で掃引幅の広い波長可変光フィルタが求められている。

【0003】

例えば、MEMSミラーと回折素子を用いた波長可変光フィルタがある（特許文献1）。この技術では、MEMSミラーによって回折格子への光の入射角度を変えることで、反射光の波長を変化させている。この技術では、MEMSミラーの角度を大きく変えることができるため、フィルタ可能な波長帯域が大きく取れるが、駆動速度が数10kHz程度であり、また構成が数10cmと大きくなる。

【0004】

また、MEMSの静電力を用いた波長フィルタがある（非特許文献1）。この技術では、たわむ梁にミラーを固定することで、共振器長を変えており、波長フィルタとして機能している。静電力を用いたMEMS機構のため、前述の波長可変光フィルタと比較すると小型で、高速に広い波長帯域の掃引が可能ではあるが、構成が複雑で、梁の製作精度などが課題となっている。

10

【0005】

また、電歪結晶を用いた波長可変光フィルタも提案されている（特許文献2）。この技術では、簡易な構成でフィルタを実現でき、高速な動作が数百kHzの高速動作が可能である。

【先行技術文献】

【特許文献】

20

【0006】

【文献】特開2011-091209号公報

【文献】特開2017-126037号公報

【非特許文献】

【0007】

【文献】J. S. Milne et al., "Widely Tunable MEMS-Based Fabry-Perot Filter", Journal of MicroElectroMechanical Systems, vol. 18, no. 4, pp. 905-923, 2009.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

30

しかしながら、電歪結晶を用いた波長可変光フィルタは、波長掃引幅を100nmとする場合は、駆動電圧が400Vと大きい（特許文献2）。商用の数百kHz~MHzの高速駆動が可能な電圧源は、100Vpp程度の出力しか得られないため実用化が困難になる。また、一般に、高電圧源のサイズは大型なため、適用できる応用が限られてしまうことが考えられる。また、デバイスの発熱量は電圧の2乗に比例するため、駆動電圧が大きい場合はデバイスの発熱も大きくなり、より高性能な冷却機構が必要になることや、冷却が十分でない場合は正常動作しないことが考えられる。このように、従来の電歪結晶を用いた波長可変光フィルタは、高速な駆動を実現するためには、実用化が難しく、正常な動作をさせ難くする高い駆動電圧が必要となっていた。

【0009】

40

本発明は、以上のような問題点を解消するためになされたものであり、電歪結晶を用いた波長可変光フィルタの駆動電圧を低下させることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明に係る波長可変光フィルタは、第1入射面と第1入射面と反対側に配置された第1出射面とを備え、電歪効果を有して光が透過する材料から構成され、第1入射面と第1出射面とが光軸上に配置された板状の第1部品と、第2入射面と第2入射面と反対側に配置された第2出射面とを備え、光が透過する材料から構成され、第2入射面と第2出射面とが光軸上に配置され、光軸上で第1入射面と第2入射面との距離が一定とされた板状の第2部品と、第1出射面に形成された部分的に光を反射する第1反射膜と、第2入射面に

50

形成され、部分的に光を反射する第 2 反射膜と、第 1 部品の板厚方向に電圧を印加する電圧印加部と、第 1 部品に電荷を注入する電荷注入部とを備え、第 1 反射膜と第 2 反射膜とによりファブリペロー干渉計が構成されている。

【発明の効果】

【0011】

以上説明したように、本発明によれば、電歪効果を有して光が透過する材料から構成された第 1 部品に電荷を注入するので、電歪結晶を用いた波長可変光フィルタの駆動電圧を低下させることができる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図 1】図 1 は、本発明の実施の形態 1 に係る波長可変光フィルタの構成を示す断面図である。

【図 2】図 2 は、KTN 結晶を用いた場合の第 1 部品における電極面と垂直な方向の位置  $z$  として、内部電荷による KTN 結晶内部の位置  $z$  における電界  $E_z (in)$  の変化を示す特性図である。

【図 3】図 3 は、KTN 結晶を用いた場合の第 1 部品における電極面と垂直な方向の位置  $z$  として、内部電荷による電界に外部電圧による電界を加算した際の、KTN 結晶内部の位置  $z$  における電界  $E_z$  の変化を示す特性図である。

【図 4】図 4 は、外部電圧による電界に内部電荷による電界を加算した KTN 結晶が、カソード側が凸となるように反ることを説明するための説明図である。

【図 5】図 5 は、KTN 結晶にオーミック接触する電極で 400V の定電圧を印加した時の、Z 軸方向の変位分布の実測値を示す特性図である。

【図 6】図 6 は、本発明の実施の形態 2 に係る波長可変光フィルタの構成を示す断面図である。

【図 7 A】図 7 A は、第 1 部品の両面に弾性シートを設けた場合の変位について説明するための説明図である。

【図 7 B】図 7 B は、第 1 部品の片面に弾性シートを設けた場合の変位について説明するための説明図である。

【図 8】図 8 は、電歪による KTN 結晶の変位と駆動電圧の関係を有限要素法で計算した結果を示す特性図である。

【図 9 A】図 9 A は、本発明の実施の形態 3 に係る波長可変光フィルタの構成を示す断面図である。

【図 9 B】図 9 B は、本発明の実施の形態 3 に係る波長可変光フィルタの一部構成を示す平面図である。

【図 10】図 10 は、本発明の実施の形態 4 に係る波長可変光フィルタの構成を示す断面図である。

【図 11】図 11 は、第 1 部品の両面に各々異なる弾性シートを設けた場合の変位について説明するための説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

以下、本発明の実施の形態に係る波長可変光フィルタについて説明する。

【0014】

[実施の形態 1]

はじめに、本発明の実施の形態 1 に係る波長可変光フィルタについて、図 1 を参照して説明する。この波長可変光フィルタは、板状の第 1 部品 101 と、板状の第 2 部品 102 と、第 1 反射膜 103 と、第 2 反射膜 104 とを備える。

【0015】

第 1 部品 101 は、第 1 入射面 101a と、第 1 入射面 101a と反対側に配置された第 1 出射面 101b とを備える。また、第 1 部品 101 は、電歪効果を有して光が透過する材料から構成されている。第 1 部品 101 は、例えば、電歪効果を有する誘電体から構

10

20

30

40

50

成することができる。第1部品101は、対象とする波長帯の光に対する透明度が高い材料から構成する。

【0016】

第1部品101は、例えば、 $\text{KTaN}[\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 (0 < x < 1)]$ 結晶、またはリチウムを添加した $\text{KLTaN}[\text{KLiTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 (0 < x < 1, 0 < y < 1)]$ 結晶のいずれかから構成することができる。KTN結晶やKLTN結晶は、電歪効果をもつ結晶として知られている。これら結晶の電歪効果は、電圧/電極間距離で定義される電界の、2乗に比例した歪み量を得ることができることが知られている。また、第1部品101は、チタン酸バリウム( $\text{BaTiO}_3$ )、ニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ )、フッ化カルシウム( $\text{CaF}_2$ )などから構成することもできる。なお、第1部品101は、第1入射面101aおよび第1出射面101bの面精度(最大形状誤差)が、対象とする光の波長/10程度とすることができる。

10

【0017】

第2部品102は、第2入射面102aと、第2入射面102aと反対側に配置された第2出射面102bとを備える。また、第2部品102は、光が透過する材料から構成されている。第2部品102は、対象とする波長帯の光に対する透明度が高い材料から構成することができる。第2部品102は、例えば、BK7ガラスや、石英ガラスから構成することができる。また、第2部品102は、 $\text{KTaN}[\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 (0 < x < 1)]$ 結晶、またはリチウムを添加した $\text{KLTaN}[\text{KLiTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 (0 < x < 1, 0 < y < 1)]$ 結晶のいずれかから構成することもできる。また、第2部品102は、チタン酸バリウム( $\text{BaTiO}_3$ )、ニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ )、フッ化カルシウム( $\text{CaF}_2$ )などから構成することもできる。なお、第2部品102は、第2入射面102aおよび第2出射面102bの面精度(最大形状誤差)が、対象とする光の波長/10程度とすることができる。

20

【0018】

ここで、第1部品101の第1入射面101aと第1出射面101bとは、光軸(光路)131上に配置され、第2部品102の第2入射面102aと第2出射面102bとも光軸131上に配置されている。また、光軸131上で、第1入射面101aと第2入射面102aとの距離が一定とされている。例えば、第1部品101および第2部品102を、図示しない定盤に固定して配置すれば、光軸131上で、第1入射面101aと第2入射面102aとの距離を固定することができる。

30

【0019】

また、第1反射膜103は、第1出射面101bに形成され、部分的に光を反射する。第2反射膜104は、第2入射面102aに形成され、部分的に光を反射する。第1反射膜103と第2反射膜104とにより、これらの間の距離を共振器長とするファブリペロー干渉計が構成されている。

【0020】

ここで、第1出射面101bと第2入射面102aとは、互いに向かい合って配置され、互いに平行な関係とすることができる。また、第1入射面101aと第1出射面101bとは、互いに平行な関係とすることができる。同様に、第2入射面102aと第2出射面102bとは、互いに平行な関係とすることができる。

40

【0021】

なお、第1出射面101bと第2入射面102aとの間に、反射光学系などを配置して光軸131を途中で曲げる場合、第1出射面101bと第2入射面102aとを、向かい合って位配置する必要はない。例えば、第1出射面101bおよび第2入射面102aは、光軸131に対して垂直な面とすることができる。ここで、上述した第1出射面101bと第2入射面102aとの位置関係は、第1反射膜103の反射面と第2反射膜104の反射面との関係と同義になる。

【0022】

また、実施の形態に係る波長可変光フィルタは、第1部品101の板厚方向に電界が生

50

じるように電圧を印加する電圧印加部となり、かつ第1部品101に電荷を注入する電荷注入部となる第1透明電極105および第2透明電極106を備える。第1透明電極105は、第1入射面101aに形成され、第1部品101にオーミック接続（接触）する。第2透明電極106は、第1出射面101bと第1反射膜103との間に形成され、第1部品101にオーミック接続（接触）する。例えば、第1透明電極105が、アノードとなり、第2透明電極106が、カソードとなるように電圧を印加することができる。

#### 【0023】

第1透明電極105および第2透明電極106は、例えば、酸化インジウムスズ（Indium Tin Oxide：ITO）から構成することができる。第1部品101が、KTN結晶またはKLTN結晶から構成されていれば、ITOから構成した第1透明電極105および第2透明電極106は、第1部品101にオーミック接続する。例えば、第1部品101が、KTN結晶またはKLTN結晶から構成される場合、透明電極は、仕事関数が5.0eV未満の材料から構成することで、電荷の注入が実現できる。なお、第1透明電極105と第2透明電極106との距離、言い換えると第1部品101の板厚は、光のビーム径よりも小さいものとすることができる。

#### 【0024】

図示しない電圧源により、第1透明電極105および第2透明電極106に電圧を印加すると、第1部品101には、板厚方向に電界が生じる。加えて、実施の形態によれば、第1透明電極105および第2透明電極106は、第1部品101にオーミック接続するので、第1部品101には、電荷（電子）が注入されるようになる。このように、電圧の印加に加えて電荷が注入される第1部品101には、カソードとなる電極の方に凸となる反りが発生する。これは、後述するように、電圧の印加による電界に加え、注入される電荷による内部電荷の電界が、第1部品101に作用するためである。この結果、実施の形態によれば、同一の電圧を印加しても、従来に比較して第1部品101の変位を大きくすることができる。この結果、実施の形態によれば、電歪結晶を用いた波長可変光フィルタの駆動電圧を低下させることが可能となる。

#### 【0025】

ここで、上述した変位の大きさは、印加電圧に依存するために、電圧を変化させることで可変である。また、ファブリペロー干渉計は、共振器長が半波長の整数倍を満たす光を透過させる。従って、第1透明電極105および第2透明電極106を介して第1部品101に電圧を印加し、電歪効果を使用することで共振器長を変化させれば、フィルタされる波長を変化させることができる。

#### 【0026】

ここで、電歪効果について説明する。参考文献1にあるように、KTN結晶を挟むように2つの電極を形成し、これら電極に電圧を印加することによって電歪効果が生じ、結晶は電界方向に伸び、電界と垂直な方向に縮むように変位する。上述したように、板状の第1部品の両面に第1透明電極および第2透明電極を形成している場合、電界方向は、板厚方向である。電歪効果による歪みは、歪みを $e$ 、電歪係数を $Q$ 、分極を $P$ とすると、下記の式で表される。

#### 【0027】

##### 【数1】

$$[e] = [Q][PP]$$

$$[e] = \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{yz} \\ e_{zx} \\ e_{xy} \end{bmatrix}, [Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{12} & Q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix}, [PP] = \begin{bmatrix} P_x P_x \\ P_y P_y \\ P_z P_z \\ P_y P_z \\ P_z P_x \\ P_x P_y \end{bmatrix}$$

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 8 】

分極  $P$  は、電界  $E$  に比例する。K T N 結晶の内部電荷が  $0 \text{ C / m}^3$  のとき、外部電圧による電界  $E$  は電圧を  $V (> 0)$ 、2つの電極の間の距離（電極間距離 = 板厚）を  $d$  とすると、 $E = V / d$  と表される。これより電界  $E$  は、電極間距離に反比例するため、電極間距離を短くする（板厚を薄くする）ことは駆動電圧の低下に寄与する。

## 【 0 0 2 9 】

この電歪効果は、K T N 結晶が立方晶のときに生じる現象である。K T N 結晶の結晶構造は温度に依存しており、結晶がキュリー温度以上にある場合に立方晶となる。また、K T N 結晶の比誘電率  $\epsilon_r$  は  $> 10000$  で使用するため、分極  $P$  は比誘電率  $\epsilon_r$  に比例するとみなせる。この比誘電率  $\epsilon_r$  は温度依存性を有するため、電歪効果を安定的に生じさせるためには、温度制御も重要となる。

10

## 【 0 0 3 0 】

さらに、参考文献 2 にあるように、K T N 結晶に対して電極がオーミック接触になっている場合、2つの電極間に高電圧を印加すると、K T N 結晶に電子が注入される。電極間距離を  $d$ 、真空の誘電率を  $\epsilon_0$ 、比誘電率を  $\epsilon_r$ 、電子密度を  $\rho$  とし、電極面と垂直な方向（板厚方向）の位置を  $z$  とし、アノードは  $z = -d / 2$  の位置、カソードは  $z = d / 2$  の位置にあるとすると、ガウスの法則より、内部電荷による位置  $z$  における K T N 結晶の内部の電界  $E_{z(\text{in})}$  は下記の式で表される。

## 【 0 0 3 1 】

【数 2】

$$E_{z(\text{in})}(z) = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} z$$

20

## 【 0 0 3 2 】

K T N 結晶の場合、内部電荷として電子が注入されるため、 $\rho$  は負の値となる。このため位置  $z$  と電界  $E_{z(\text{in})}$  との関係は、傾きが負の  $z$  の 1 次式となる（図 2）。外部電圧を印加した際には、上式に外部電圧による電界も加算されるので、K T N 結晶に与えられる電界  $E_z$  は下記のとおりになる。

30

## 【 0 0 3 3 】

【数 3】

$$E_z = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} z + \frac{V}{d}$$

## 【 0 0 3 4 】

よって、図 3 からわかるように、アノード付近（ $z = -d / 2$ ）の電界の大きさは、カソード付近（ $z = d / 2$ ）の電界の大きさと比較して大きくなる。

40

## 【 0 0 3 5 】

また、K T N の比誘電率  $\epsilon_r$  は  $1 \ll \epsilon_r$  であるため、分極  $P_z$  は下記の関係を満たす。

## 【 0 0 3 6 】

【数 4】

$$P_z \sim \epsilon_0 \epsilon_r E_z$$

50

【 0 0 3 7 】

$E_x = E_y = 0$  とすると、 $P_x = P_y = 0$  となり、 $e_{xx}$ 、 $e_{yy}$ 、 $e_{zz}$  はそれぞれ下記のように書ける。

【 0 0 3 8 】

【数 5】

$$\begin{aligned} e_{xx} &= Q_{12} P_z^2 \sim Q_{12} (\epsilon_0 \epsilon_r)^2 E_z^2 \\ e_{yy} &= Q_{12} P_z^2 \sim Q_{12} (\epsilon_0 \epsilon_r)^2 E_z^2 \\ e_{zz} &= Q_{11} P_z^2 \sim Q_{11} (\epsilon_0 \epsilon_r)^2 E_z^2 \end{aligned}$$

10

【 0 0 3 9 】

ここで、 $Q_{11} > 0$ 、 $Q_{12} < 0$  であるため、Z 軸方向（板厚方向）には結晶が伸び、X 軸方向、Y 軸方向に結晶は縮むことがわかる。さらに、以下の式の関係を満たす場合、 $e_{zz}$  は Z 軸方向に単調減少する。つまりカソード側の歪みの大きさが小さく、アノード側の歪みの大きさが大きくなる。

【 0 0 4 0 】

【数 6】

$$\left| \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{d}{2} \right| \leq \frac{V}{d}$$

20

【 0 0 4 1 】

以上のことにより、図 4 の ( a ) に示すように、X 軸方向、Y 軸方向の結晶の縮む量は、Z 軸方向の位置  $z$  によって異なる。なお、図 4 の ( a ) において、黒三角の大きさにより、上述した縮む量の大きさを示している。図 4 の ( a ) に示すように、アノードの側ほど、縮む量が多い。これにより、カソード側が凸となるような反りが電歪効果を有する結晶に生じる。

30

【 0 0 4 2 】

印加電圧が 0 V のときと、電圧を印加した時との、カソード側の結晶表面の重心位置の差（変位）を  $z$  とする。また、電圧印加がないときの、カソード側の結晶表面の重心位置の、アノード側の結晶表面の重心位置からの距離を  $d_1$  とする。また、内部電荷がなく、電圧が印加されたときの、カソード側の結晶表面の重心位置の、アノード側の結晶表面の重心位置からの距離を  $d_1'$  とする。また、内部電荷があり、電圧が印加されたときの、カソード側の結晶表面の重心位置の、アノード側の結晶表面の重心位置からの距離を  $d_2$  とする。これらの距離の関係は、 $d_1 < d_1' < d_2$  となる。

40

【 0 0 4 3 】

第 1 部品 1 0 1 に形成された第 1 反射膜 1 0 3 と、第 2 部品 1 0 2 に形成された第 2 反射膜 1 0 4 とによって構成されたファブリペロー共振器の共振器長は、第 1 反射膜 1 0 3 と第 2 反射膜 1 0 4 との距離と定義される。この共振器長が、電圧が印加された第 1 部品 1 0 1 の変位により短くなる。言い換えると、変位  $z$  の分、共振器長が変化する [ 図 4 の ( b ) ]。上述したように、実施の形態 1 によれば、第 1 部品 1 0 1 には内部電荷があるため、電圧が印加された第 1 部品 1 0 1 は、アノード側に凸となるように反る。このため、内部電荷がない場合に比較して、変位  $z$  が大きくなり、同じ電圧であっても、より大きな共振器長の変化が得られるようになる。

【 0 0 4 4 】

50

KTN結晶に400Vの定電圧を印加した時の、Z軸方向の変位分布の実測値を図5に示す。図5のX軸、Y軸は結晶の位置を示し、Z軸は変位を示し、400Vの電圧を印加した際のカソード面の変位を測定した結果である。変位は、レーザ変位計を用いて測定した。KTN結晶のサイズは4×3.2×1.2mmで、4×3.2の面にチタン電極が成膜されている。このチタン電極は、仕事関数が小さく高電圧(>200V)を印加した際には電荷が注入される。よって、図4を用いて説明したように、カソード面を凸にした変位が現れることが予想されるが、確かにKTN結晶のカソード面が凸になる変位が確認できた。なお、図5のZ軸の数字は任意単位である。

【0045】

[実施の形態2]

次に、本発明の実施の形態2に係る波長可変光フィルタについて、図6を参照して説明する。この波長可変光フィルタは、前述した実施の形態1と同様に、第1部品101、第2部品102、第1反射膜103、第2反射膜104、第1透明電極105、および第2透明電極106を備える。

【0046】

実施の形態2では、第1透明電極105、第1部品101、第2透明電極106、および第1反射膜103による積層体を挟んで保持する第1保持具107a、第2保持具107bを備える。また、第1反射膜103と第2保持具107bとの間に配置された、厚さ方向に弾性変形する弾性シート108をさらに備える。弾性シート108は、例えば、グラファイトまたはカーボンから構成することができる。なお、図示していないが、第1保持具107aにペルチェ素子を設けることができる。ペルチェ素子を設けることで、金属から構成した第1保持具107aを介して、第1部品101の温度を一定にする制御をすることができる。このように、温度制御を実施する場合、保持具は、熱伝導率が50W/(m×K)より高い金属から構成することが望ましい。

【0047】

第1保持具107a、第2保持具107bは、例えば、Auなどの金属から構成することができる。また、第1保持具107a、第2保持具107bは、光軸方向に貫通する穴が形成され、対象とする光が通過可能とされている。弾性シート108も同様に、光軸方向に貫通する穴が形成され、対象とする光が通過可能とされている。

【0048】

例えば、KTN結晶から構成した第1部品101は、1辺が5mmの正方形で厚さ0.5mmの板状とすることができる。また、ITOから構成した第1透明電極105および第2透明電極106は、平面視で1辺が5mmの正方形とすることができる。また、第1反射膜103は、反射率99%の誘電多層膜から構成することができる。なお、第1透明電極105の表面には、反射防止膜を形成することができる。また、第2部品102は、石英ガラスから構成することができる。また、第1保持具107a、第2保持具107b、および弾性シート108には、平面視で中央部に、5mmの穴を形成することができる。また、ペルチェ素子を設ける場合、第1保持具107aと同様の外形とすることができ、第1保持具107aと同様に、平面視で中央部に、5mmの穴を形成することができる。

【0049】

ところで、第1部品101を、金属などによる剛体による第1保持具107a、第2保持具107bで挟む構成は、高周波の電圧の印加による電歪効果で第1部品101が振動すると、破損する危険があることが知られている(参考文献3)。従って、弾性シート108を用いることで、上述した振動を吸収し、第1部品101の破損を防止することができる。

【0050】

ここで、弾性シートは、第1部品の両面に設けることもできるが、片側(カソード側)だけに設けることで、より大きな変位が得られるようになる。この点について、図7A、図7Bを参照して説明する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 5 1 】

図 7 A に示すように、第 1 部品 2 0 1 の両面に、弾性シート 2 0 8 a および弾性シート 2 0 8 b を設け、これらを、第 1 保持具 2 0 7 a と第 2 保持具 2 0 7 b とで挟んだ場合を考える。内部電荷がある第 1 部品 2 0 1 に電圧を印加すると、図 7 A に示すように、第 1 部品 2 0 1 は、カソード側が凸となるように反る。この状態において、カソード側の結晶表面の重心位置の、アノード側の結晶表面の重心位置からの距離は  $d_2$  となる。

## 【 0 0 5 2 】

ここで、沿った第 1 部品 2 0 1 の、カソード側の中央部は、弾性シート 2 0 8 a の側に入り込み、アノード側の端部は、弾性シート 2 0 8 b の側に入り込む。この状態では、第 1 部品 2 0 1 のアノード側の結晶表面の重心位置は、あまり変化せず、端部は、弾性シート 2 0 8 b の側に、反ったことによる変位の量  $\delta$  だけ入り込む。この結果、第 1 部品 2 0 1 のカソード側の結晶表面の重心位置は、電圧を印加していない  $d_1$  の状態より、 $d_2 - d_1$  だけ、第 2 部品（不図示）の側に移動する。

10

## 【 0 0 5 3 】

一方、図 7 B に示すように、第 1 部品 2 0 1 の第 2 部品（不図示）の側に、弾性シート 2 0 8 を設け、これらを、第 1 保持具 2 0 7 a と第 2 保持具 2 0 7 b とで挟んだ場合を考える。内部電荷がある第 1 部品 2 0 1 に電圧を印加すると、図 7 B に示すように、第 1 部品 2 0 1 は、カソード側が凸となるように反る。この状態において、カソード側の結晶表面の重心位置の、アノード側の結晶表面の重心位置からの距離は  $d_2$  となる。

## 【 0 0 5 4 】

ここで、沿った第 1 部品 2 0 1 のカソード側の中央部は、弾性シート 2 0 8 の側に入り込むが、アノード側には、剛体である第 1 保持具 2 0 7 a があるので、アノード側の端部が第 1 保持具 2 0 7 a の側に入り込むことはない。この状態では、第 1 部品 2 0 1 のアノード側の結晶表面の重心位置は、初期の第 1 保持具 2 0 7 a の表面から、反ったことによる変位の量  $\delta$  だけカソード側に移動する。この結果、第 1 部品 2 0 1 のカソード側の結晶表面の重心位置は、電圧を印加していない  $d_1$  の状態より、 $d_2 - d_1 + \delta$  だけ、第 2 部品（不図示）の側に移動する。このように、弾性シートを、第 1 部品のカソード側だけに設けることで、より大きな変位が得られるようになる。

20

## 【 0 0 5 5 】

電歪による K T N 結晶の変位と駆動電圧の関係を有限要素法で計算した結果を図 8 に示す。第 1 部品を K T N 結晶から構成し、1 辺が 5 mm の正方形で厚さ 0.5 mm の板状とする。また、内部電荷  $-6.0 \text{ C/m}^3$  の状態で、平面視で 5 × 5 mm の正方形の両面に電圧を印加したと想定した計算結果である。図 8 において、三角は、電圧の印加の変位に加えて反りの変位が加わった結果を示している。変位が、上述した「 $d_2 - d_1 + \delta$ 」の場合である。また、図 8 において、四角は、反りの変位が、上述した「 $d_2 - d_1$ 」の結果を示している。また、図 8 において、丸は、反りによる変位がない場合の結果を示している。

30

## 【 0 0 5 6 】

内部電荷がなく、反りが生じない場合は、丸に示すように、400 nm の変位を得るために 600 V の電圧が必要になるが、反りがある場合は、四角に示すように、200 V でよいことがわかる。このように反りがない状態に比べ、反りがある状態の方がより少ない駆動電圧で変位を多く取ることができる。また、変位を「 $d_2 - d_1 + \delta$ 」とすることができる条件では、図 8 に示すように、400 nm の変位を達成するのに、100 V の電圧でよいことがわかる。このように、条件によって、1/6 倍程度必要な電圧を下げるのが可能である。これは、波長 1300 nm を中心に 100 nm 掃引するために必要な電圧が 100 V p p でよいことに相当する。

40

## 【 0 0 5 7 】

## [ 実施の形態 3 ]

次に、本発明の実施の形態 3 に係る波長可変光フィルタについて、図 9 A、図 9 B を参照して説明する。この波長可変光フィルタは、前述した実施の形態 1 と同様に、第 1 部品

50

101、第2部品102'、第1反射膜103、第2反射膜104a、第1透明電極105、および第2透明電極106を備える。また、前述した実施の形態2と同様に、第1保持具107a、第2保持具107bを備え、第1反射膜103と第2保持具107bとの間に配置された弾性シート108を備える。

#### 【0058】

実施の形態3では、第2部品102'を、円柱形状とし、この一端面に第2反射膜104aを形成する。例えば、第2保持具107bの光軸方向に貫通する穴171の穴径を5mmとすると、第2部品102'の形は、穴171の穴径より小さい、2.5~4.5mmとすることができる。このようにすることで、第2部品102'を穴171に貫入させて配置し、穴171を保持部として、第2部品102'を保持する構成とすることができる。この構成によれば、光軸方向により厚い第2保持具107bを用いても、第2反射膜104aと第1反射膜103との距離を小さくした共振器を構成することが可能になる。

10

#### 【0059】

##### [実施の形態4]

次に、本発明の実施の形態4に係る波長可変光フィルタについて、図10を参照して説明する。この波長可変光フィルタは、前述した実施の形態1と同様に、第1部品101、第2部品102、第1反射膜103、第2反射膜104、第1透明電極105、および第2透明電極106を備える。また、前述した実施の形態2と同様に、第1保持具107a、第2保持具107bを備え、第1反射膜103と第2保持具107bとの間に配置された弾性シート108を備える。

20

#### 【0060】

実施の形態4では、さらに、第1透明電極105と第1保持具107aとの間に配置された弾性シート(他の弾性シート)109を備える。弾性シート109は、弾性率または硬度が、弾性シート108よりも大きい材料から構成する。この構成とすることで、第1部品101が反った場合に、弾性シート109の側への第1部品101の端部の入り込み量が抑制でき、カソード側への変位量の低下が抑制できる。

#### 【0061】

この点について、図11を参照して説明する。第1部品201の両面に、弾性シート208および弾性シート209を設け、これらを、第1保持具207aと第2保持具207bとで挟んだ場合を考える。弾性シート209は、弾性率または硬度が、弾性シート208よりも大きい材料から構成されている。

30

#### 【0062】

内部電荷がある第1部品201に電圧を印加すると、第1部品201は、カソード側が凸となるように反る。この状態において、カソード側の結晶表面の重心位置の、アノード側の結晶表面の重心位置からの距離は $d_2$ となる。

#### 【0063】

ここで、沿った第1部品201の、カソード側の中央部は、弾性シート208の側に入り込み、アノード側の端部は、弾性シート209の側に入り込む。例えば、第1部品201の端部が、弾性シート209の側に反ったことによる変位の量 $2$ 入り込む。ここで、アノード側における、弾性シート209の側に反ったことによる、中央部から見た端部の変位量を $1$ とすると、弾性シート209の弾性率または硬度が、弾性シート208よりも大きいため、 $2 < 1$ となる。この結果、第1部品201のカソード側の結晶表面の重心位置は、電圧を印加していない $d_1$ の状態より、 $d_2 - d_1 + 1 - 2$ だけ、第2部品(不図示)の側に移動する。

40

#### 【0064】

上述した変位量「 $d_2 - d_1 + 1 - 2$ 」は、図7Aを用いて説明した変位量「 $d_2 - d_1$ 」より、「 $1 - 2$ 」大きいものとなる。また、第1保持具107aの側にも弾性シート109を設けているので、弾性シート108のみの場合に比較し、さらに、振動による第1部品101の破損を防ぐことが可能となる。

#### 【0065】

50

以上に説明したように、電歪効果を有して光が透過する材料から構成された第 1 部品に電荷を注入するので、電歪結晶を用いた波長可変光フィルタの駆動電圧を低下させることができるようになる。

【 0 0 6 6 】

なお、本発明は以上に説明した実施の形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想内で、当分野において通常の知識を有する者により、多くの変形および組み合わせが実施可能であることは明白である。

【 0 0 6 7 】

[ 参考文献 ]

[ 参考文献 1 ] S. Kawamura et al., "Temperature independent electrostrictive coefficients of  $K_{0.95}Li_{0.05}Ta_{0.73}Nb_{0.27}O_3$  single crystals", Journal of Applied Physics, vol. 122, 114101, 2017. 10

[ 参考文献 2 ] T. Imai et al., "Anomalous index modulations in electrooptic  $KTa_{1-x}Nb_xO_3$  single crystals in relation to electrostrictive effect", Optics Express, vol. 23, no. 22, pp. 28784-28791, 2015.

[ 参考文献 3 ] 特開 2 0 1 3 - 1 9 5 9 1 6 号公報

【 符号の説明 】

【 0 0 6 8 】

1 0 1 ... 第 1 部品、 1 0 1 a ... 第 1 入射面、 1 0 1 b ... 第 1 出射面、 1 0 2 ... 第 2 部品、 1 0 2 a ... 第 2 入射面、 1 0 2 b ... 第 2 出射面、 1 0 3 ... 第 1 反射膜、 1 0 4 ... 第 2 反射膜、 1 0 5 ... 第 1 透明電極、 1 0 6 ... 第 2 透明電極、 1 3 1 ... 光軸。 20

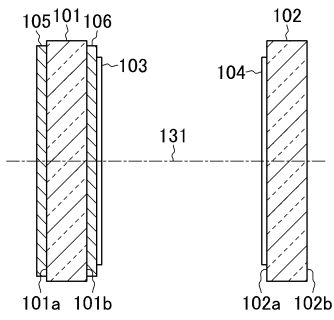
30

40

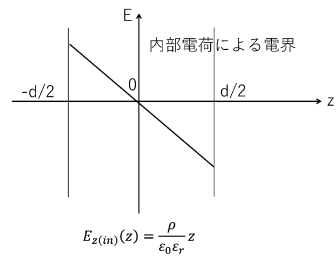
50

【図面】

【図 1】

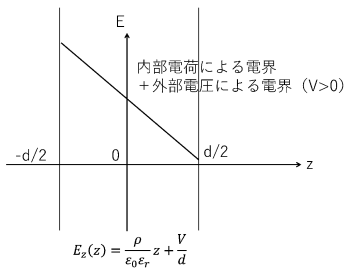


【図 2】

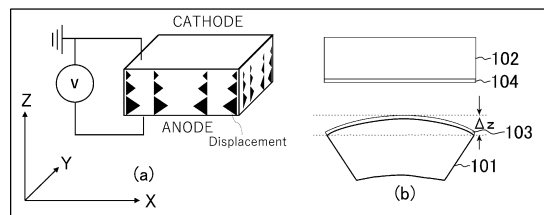


10

【図 3】

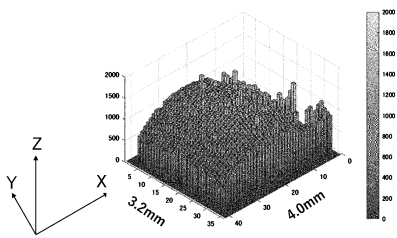


【図 4】

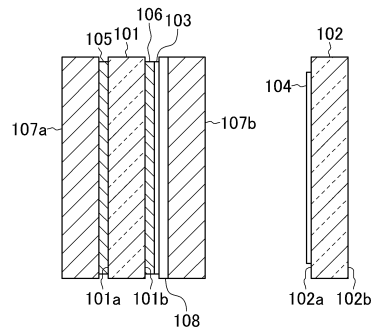


20

【図 5】



【図 6】

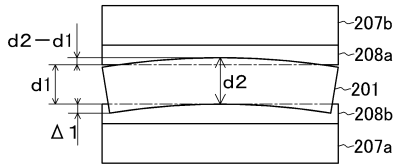


30

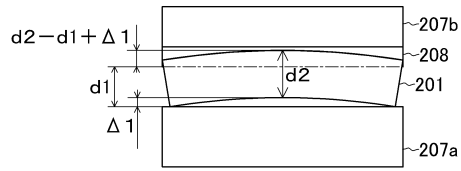
40

50

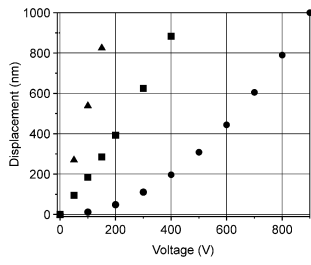
【 図 7 A 】



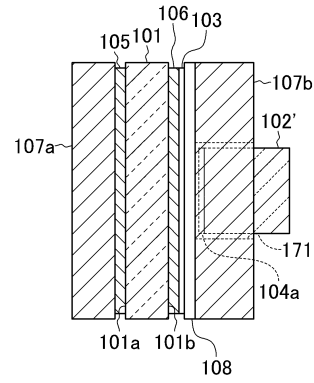
【 図 7 B 】



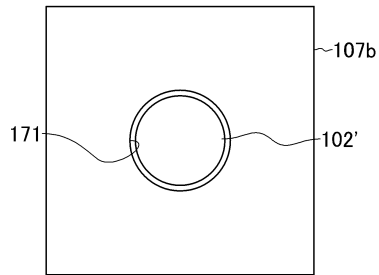
【 図 8 】



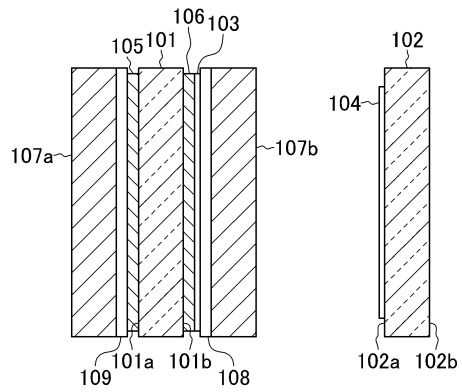
【 図 9 A 】



【 図 9 B 】



【 図 10 】




10

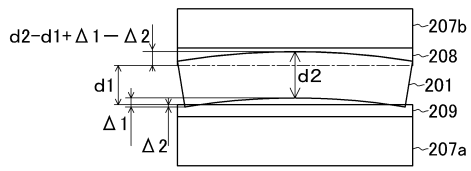
20

30

40

50

【 1 1】



10

20

30

40

50

## フロントページの続き

- 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 赤毛 勇一  
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 岡 宗一  
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- 審査官 酒井 康博
- (56)参考文献 特開2017-126037(JP,A)  
国際公開第2004/111717(WO,A1)  
特開2011-248231(JP,A)  
米国特許出願公開第2010/0027096(US,A1)  
国際公開第95/023993(WO,A1)  
特開2001-208911(JP,A)  
米国特許出願公開第2014/0362442(US,A1)  
中国特許出願公開第109884837(CN,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
G02B 5/28  
G02B 26/00  
Scopus