

(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2006-216795

(P2006-216795A)

(43) 公開日 平成18年8月17日(2006.8.17)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 39/22 (2006.01)	HO 1 L 39/22 Z A A A	2 G O 6 5
GO 1 T 1/24 (2006.01)	GO 1 T 1/24	2 G O 8 8
GO 1 T 1/36 (2006.01)	GO 1 T 1/36 D	4 M 1 1 3
HO 1 L 31/08 (2006.01)	HO 1 L 31/08	5 F O 8 8
GO 1 J 1/02 (2006.01)	GO 1 J 1/02 B	

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2005-28261 (P2005-28261)  
 (22) 出願日 平成17年2月3日(2005.2.3)

(71) 出願人 504190548  
 国立大学法人埼玉大学  
 埼玉県さいたま市桜区下大久保255  
 301021533  
 独立行政法人産業技術総合研究所  
 東京都千代田区霞が関1-3-1  
 (74) 代理人 100100918  
 弁理士 大橋 公治  
 (74) 代理人 100108729  
 弁理士 林 紘樹  
 (72) 発明者 田井野 徹  
 埼玉県さいたま市桜区下大久保255番地  
 国立大学法人 埼玉大学内

最終頁に続く

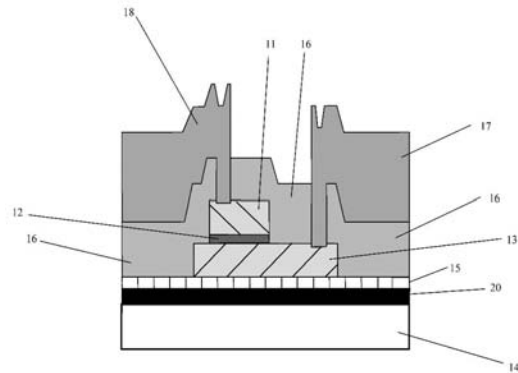
(54) 【発明の名称】 超伝導フォトン検出器

(57) 【要約】

【課題】フォノンイベントによる低エネルギーのノイズを除去することができる超伝導フォトン検出器を提供する。

【解決手段】基板14上に積層された下部超伝導電極13、トンネルバリア12及び上部超伝導電極11を有する超伝導フォトン検出器であって、基板14と下部超伝導電極13との間に介在し、基板14から入射する音響波の反射係数が透過係数よりも大きい材料で形成されたフォノン遮蔽層20を備える。このフォノン遮蔽層20は、基板14から下部超伝導電極13に入力するフォノンを遮断する。そのため、フォノンイベントによる低エネルギーのノイズを除去することができ、低エネルギーの可視光を正確に観測することができる。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

基板上に積層された下部超伝導電極、トンネルバリア及び上部超伝導電極を有する超伝導フォトン検出器であって、

前記基板と前記下部超伝導電極との間に介在し、前記基板から入射する音響波の反射係数が透過係数よりも大きい材料で形成されたフォノン遮蔽層を備える超伝導フォトン検出器。

## 【請求項 2】

請求項 1 に記載の超伝導フォトン検出器であって、前記上部超伝導電極の上に積層された絶縁層と、前記絶縁層の上に形成され、前記絶縁層の孔を通じて前記下部超伝導電極または上部超伝導電極に接続する配線電極とを備え、前記絶縁層の一部が除去されて、前記上部超伝導電極または下部超伝導電極の少なくとも一部が露出している超伝導フォトン検出器。

10

## 【請求項 3】

請求項 1 または 2 に記載の超伝導フォトン検出器であって、前記フォノン遮蔽層がポリイミドの膜から成る超伝導フォトン検出器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、可視光から X 線領域までのフォトンの測定が可能な超伝導フォトン検出器に関し、特に、低ノイズ化を実現したものである。

20

## 【背景技術】

## 【0002】

フォトン検出器は、医学分野でのレントゲン撮影や、未知の天体から飛来する光や宇宙線のエネルギーの検出、あるいは、半導体製造プロセス中の汚染物質の分析などに幅広く応用されている。

従来、フォトン計測する検出器として、主に半導体検出器が用いられて来たが、超伝導トンネル接合を利用してフォトンを検出する超伝導フォトン検出器は、半導体検出器に比較して、エネルギー分解能（近接するエネルギーを弁別する分解能）が高く、高速での観測が可能であるため、次世代のフォトン検出器として期待を集めている。

30

## 【0003】

超伝導フォトン検出器は、図 7 の模式図に示すように、超伝導体 31 及び 33 が絶縁体 32 で隔てられたサンドイッチ構造の超伝導トンネル接合素子を有している。この素子は、超伝導転移温度の  $1/10$  程度の温度に冷却され、また、磁場が印加されて、超伝導状態を担うクーパー対によるトンネル電流が流れないようにされている。この素子に光子が入射すると、クーパー対が壊れて準粒子が生成され、準粒子によるトンネル電流が増加する。このトンネル電流の増加を測定することにより、入射した光子の数やエネルギーを知ることができる。

半導体のエネルギーギャップは  $1\text{ eV}$  程度であるが、超伝導フォトン検出器の場合、超伝導エネルギーギャップが数  $\text{meV}$  と小さいため、光子のエネルギーで励起されるキャリア数（準粒子数）が多く、半導体フォトン検出器に比べて高精度の検出が可能になる。

40

## 【0004】

下記非特許文献 1 には、超伝導トンネル接合素子の製造方法が記載されている。この方法では、フォトリソグラフィ技術を用いて、直径が  $7.5\text{ cm}$  の Si 基板上に面積が  $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$  の接合素子を多数個形成している。

図 8 は、この製造方法で形成された超伝導トンネル接合素子の 1 つの断面を示している。この素子は、Si 基板 14 上に、Si 基板 14 をエッチングから保護する MgO 膜 15 を備え、その上に、微細形状にエッチング加工された、Nb から成る下部超伝導電極 13、Al/AlOx から成るトンネルバリア 12、及び、Nb から成る上部超伝導電極 11 の積層体を備え、その上にコーティングされた絶縁用のポリイミド膜 16 と、ポリイミド

50

膜 16 のピアホールを通じて下部超伝導電極 13 及び上部超伝導電極 11 に接続する配線電極 17、18 とを備えている。

Si 基板 14 の厚さは 400 nm であり、MgO 膜 15 は 50 nm、下部超伝導電極 13 及び上部超伝導電極 11 はそれぞれ 200 nm、トンネルバリア 12 は 15 nm の各厚さを有している。

#### 【0005】

ポリイミド膜 16 は、ポリイミドの状態では溶媒可溶性を有するポリイミド材料にジアゾナフトキノンの感光材を添加した感光性溶媒可溶ポリイミドを塗布し、溶媒を飛ばすための加熱処理を施して形成している。このポリイミド膜 16 は、配線電極層を下層から絶縁する絶縁層として設けられており、ポリイミド膜の厚さは、200 nm ~ 600 nm である。この膜にフォトリソグラフィ技術でピアホールを形成し、その上の全面に配線電極層を 600 nm の厚さに堆積し、不要部分をエッチングで除いて、所定パターンの配線電極 17、18 を形成している。

10

素子の加工を終えた Si 基板を 5 mm 四方のチップに切断し、このチップを用いて超伝導フォトン検出器が作成される。このように超伝導トンネル接合素子をアレイ化することで検出器の有感面積を稼ぐことができる。

また、従来の超伝導トンネル接合素子では、配線電極の絶縁層を SiO<sub>2</sub> で形成したものや、Si 基板 14 上のエッチング保護膜を Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> で形成したもの、また、基板に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (sapphire) を使用したものなども知られている。

【非特許文献 1】IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL.13, NO.2, JUNE 2003, pp.119 ~ 122

20

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0006】

しかし、従来の超伝導フォトン検出器では、低エネルギーのノイズが検出される。図 9 は、従来の超伝導フォトン検出器を用いて 5.9 KeV のエネルギーを有する X 線を観測した結果を示している。この図の横軸は光子のエネルギーを示し、縦軸は光子の計測数を示している。図 9 が示すように、X 線のエネルギーに相当する 5.9 KeV の箇所で計測数のピークが現れているが、それと共に、0.5 eV 以下の低エネルギーの高ノイズが検出されている。

30

このノイズの発生は、図 10 に示すように、超伝導トンネル接合以外の部分に入射したフォトンが、膜厚の薄い絶縁層 16 及びエッチング保護膜 15 を透過して基板 14 にまで達し、このフォトンのエネルギーを吸収した基板 14 が振動してフォノンが発生することが原因している。

#### 【0007】

このフォノンが、基板 14 を伝わり、エッチング保護膜 15 を介して超伝導トンネル接合の下部超伝導電極 13 に達すると、クーパ対が崩壊し、準粒子が発生してトンネル接合のトンネル電流が増加する。フォノンのエネルギーは低く、また、基板 14 内で多量の数のフォノンが発生するため、フォノンイベントによるノイズは、図 9 に示すように、低エネルギーの領域において極めて高い値を示す。

40

そのため、可視光を観測するときのように、識別しようとする光のエネルギーが小さい場合には、そのエネルギースペクトルがフォノンイベントによるスペクトルの中に埋もれて、検出することができなくなる。

#### 【0008】

本発明は、こうした従来の問題点を解決するものであり、フォノンイベントによる低エネルギーのノイズを除去することができる超伝導フォトン検出器を提供することを目的としている。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0009】

本発明の超伝導フォトン検出器は、基板と下部超伝導電極との間に介在し、基板から入

50

射する音響波の反射係数が透過係数よりも大きい材料で形成されたフォノン遮蔽層を備えている。

このフォノン遮蔽層は、基板から下部超伝導電極に入力するフォノンを遮断する。

【0010】

また、本発明の超伝導フォトン検出器は、上部超伝導電極の上に積層された絶縁層と、この絶縁層の上に形成され、絶縁層の孔を通じて下部超伝導電極または上部超伝導電極に接続する配線電極とを備え、この絶縁層の一部が除去されて、上部超伝導電極または下部超伝導電極の少なくとも一部が露出している。

この超伝導フォトン検出器では、低エネルギーの光子が、絶縁層でエネルギーを吸収されることなく、露出箇所から超伝導トンネル接合に入射し、フォノンイベントによるノイズに埋もれることなく計測される。

10

【0011】

また、本発明の超伝導フォトン検出器では、フォノン遮蔽層をポリイミドの膜で形成している。

Si等の基板にポリイミド膜を接合した場合、基板から入射する音響波の接合面での反射係数は極めて大きく、透過係数は極めて小さい。そのため、基板から超伝導トンネル接合へのフォノンの入射を完全に遮蔽することができる。

【発明の効果】

【0012】

本発明の超伝導フォトン検出器は、フォノンイベントによる低エネルギーのノイズを除去することができ、低エネルギーの可視光を正確に観測することができる。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

図1は、本発明の実施形態における超伝導フォトン検出器の超伝導トンネル接合素子を示している。

この素子は、Si基板14上に、Si基板14で発生したフォノンが超伝導トンネル接合に伝達するのを遮蔽するポリイミド膜20を備えている。その他の構成は、従来の素子(図8)と同じであり、ポリイミド膜20の上にエッチング保護膜15を有し、エッチング保護膜15の上に、Nbから成る下部超伝導電極13、Al/AlO<sub>x</sub>から成るトンネルバリア12、Nbから成る上部超伝導電極11、絶縁層16、及び、配線電極17、18を備えている。

30

【0014】

このフォノン遮蔽用ポリイミド膜20は、前記非特許文献1に記載された溶媒可溶性のポリイミド材料を用いて、スピンコーティング法により成形している。

このポリイミド材料は、株式会社ピーアイ技術研究所から市販されている。このポリイミド材料を溶媒に溶かしてSi基板上に滴下し、この基板を、回転数を制御しながら回転することにより、所望の膜厚の均一な膜を形成することができる。

図2は、滴下した液に含まれるポリイミド材料の含有量を変えてスピンコーティングを実施したときの基板の回転数と膜厚との関係を示している。この方法により、膜厚が40nm以上の均質な膜を得ることができる。

40

【0015】

スピンコーティング法で成形した膜を150程度の温度で10分間加熱乾燥すると、溶媒が除去されてポリイミド膜が生成する。この処理の間に、ポリイミド材料から「ブロック」と呼ばれる単機能のポリイミドが直接合成され、さらに、ブロックが重合してポリイミドが生成される。

このフォノン遮蔽用ポリイミド膜20を形成したSi基板14の上に、エッチング保護膜15、下部超伝導電極13、トンネルバリア12、上部超伝導電極11、絶縁層16及び配線電極17、18を形成する処理は、従来の素子と同じように行うことができる。

【0016】

図3は、300nmの膜厚のフォノン遮蔽用ポリイミド膜20を設けた超伝導トンネル

50

接合素子を備える超伝導フォトン検出器により5.9 KeVのエネルギーを有するX線を観測した結果を示している。図3から明らかなように、この検出器は、フォノンイベントの影響を完全に遮蔽しており、フォノンに対し無雑音の結果が得られている。

こうした現象は、図4に示すように、基板14から遮蔽層20に入射する音響波の反射波Rと透過波Tとを考慮した場合、ポリミドの遮蔽層20では、反射の割合が高く、透過の割合が低いために現れる。

#### 【0017】

図5(a)には、超伝導トンネル接合素子の基板材料として使われているSi及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(sapphire)、従来の超伝導トンネル接合素子でエッチング保護層として使われているMgO及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(layer)、並びに、この実施形態でフォトン遮蔽層を形成するポリミドの各体積密度( )、弾性係数(C)、及び固有音響インピーダンス(Z)を示し、図5(b)には、基板がSiまたはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(sapphire)であって、この基板にMgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>またはポリミドを接合した場合の透過係数(T)及び反射係数(R)を示している。

10

#### 【0018】

ここで、 $Z = \rho \cdot C$ である。また、 $T = 1 + R$ が成り立つ。Rは、基板14の固有音響インピーダンスを $Z_{sub}$ 、遮蔽層20の固有音響インピーダンスを $Z_{buf}$ とするとき

$$R = (Z_{sub} - Z_{buf}) / (Z_{sub} + Z_{buf})$$

となり、Tは、

$$T = 2Z_{buf} / (Z_{sub} + Z_{buf})$$

20

となる。

また、反射係数R及び透過係数Tの大きさを見るため、

$$R_a = |R|^2$$

$$T_a = 1 - |R|^2 = 1 - R_a$$

を算出している。

#### 【0019】

図5(b)から明らかなように、MgOやAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では、基板がSi及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(sapphire)のいずれであっても、反射係数Rの絶対値に比べて透過係数Tの絶対値の方が大きい。しかし、ポリミドでは、逆に、基板がSi及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(sapphire)のいずれであっても、透過係数Tの絶対値に比べて反射係数Rの絶対値の方が大きい。しかも、透過係数Tの絶対値は、MgOやAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に比べて、桁違いに小さい。そのため、遮蔽層20を介して下部超伝導電極13に入力するフォノンを完全にシャットアウトすることができる。

30

#### 【0020】

図6は、エネルギーが低い可視光の観測に適した超伝導フォトン検出器の超伝導トンネル接合素子を示している。この素子は、Si基板14上にフォノン遮蔽用ポリミド膜20を設けるとともに、上部超伝導電極11及び下部超伝導電極13を覆う絶縁層16を除去して、上部超伝導電極11及び下部超伝導電極13の一部が露出するように構成している。

40

この超伝導フォトン検出器では、ポリミド膜20のためにフォノンによる低エネルギーのノイズが遮蔽され、一方、低エネルギーの可視光は、絶縁層16でエネルギーが吸収されること無く、超伝導トンネル接合素子に入射する。そのため、低エネルギーの可視光を、ノイズに埋もれずに計測することができる。

#### 【0021】

なお、フォノン遮蔽に用いるポリミド膜20の膜厚は、均一な厚さが得られる範囲であれば良い。ポリミド膜20の膜厚が不均一であると、その後に積層する、極めて薄い超伝導トンネル接合のトンネルバリア12に破断などの損傷が生じ、良好な特性が得られない。

また、ポリミド材料としては、特開2003-98667号公報に記載されている材

50

料などを使用することもできる。

【0022】

また、ここではフォノン遮蔽層の材料としてポリイミドを用いる場合について説明したが、基板との接合面において、基板から入射する音響波の反射係数が透過係数より大きくなる材料であって、均一な膜厚が得られる有機材料または無機材料であれば、ポリイミドに代えて用いることができる。

また、ここでは、超伝導トンネル接合素子をエッチングで形成しているため、ポリイミド膜20の上にエッチング保護膜15を設けているが、他の方法で素子を形成する場合には、エッチング保護膜は不要である。

【産業上の利用可能性】

10

【0023】

本発明の超伝導フォトン検出器は、レントゲン撮影を行う医学分野、星の光や宇宙線を観測する天文分野、半導体製造プロセス中の汚染物質を分析する工業分野など、各種分野において、低エネルギーのフォトンが観測できる検出器として幅広く利用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1】本発明の実施形態における超伝導フォトン検出器の超伝導トンネル接合素子を示す図

【図2】スピンコーティング法でフォノン遮蔽層を形成する場合の回転数と膜厚との関係を示す図

20

【図3】本発明の実施形態における超伝導フォトン検出器での検出結果を示す図

【図4】基板及びフォノン遮蔽層の接合面での入射波、反射波及び透過波を説明する図

【図5】本発明の実施形態においてフォノン遮蔽層に用いたポリイミド、及び比較材料のパラメータを示す図

【図6】本発明の実施形態における、低エネルギーのフォトン観測に適した超伝導フォトン検出器の超伝導トンネル接合素子を示す図

【図7】超伝導フォトン検出器の原理を説明する図

【図8】従来の超伝導トンネル接合素子の構造を示す図

【図9】従来の超伝導フォトン検出器での検出結果を示す図

30

【図10】従来の超伝導フォトン検出器におけるノイズ発生原因を説明する図

【符号の説明】

【0025】

11 上部超伝導電極

12 トンネルバリア

13 下部超伝導電極

14 Si基板

15 MgO膜

16 絶縁膜

17 配線電極

18 配線電極

20 フォノン遮蔽層

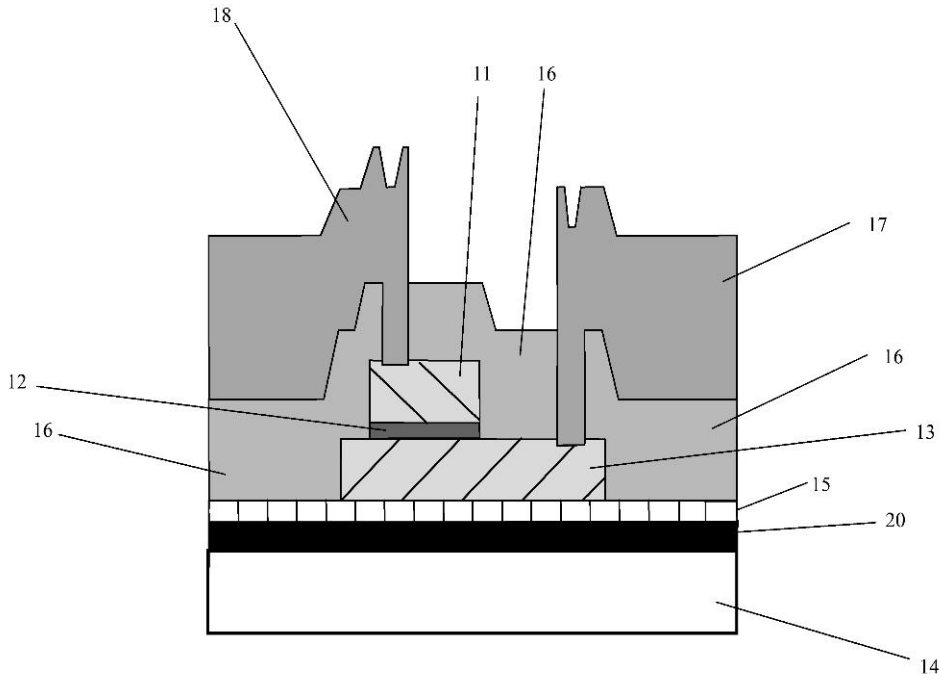
31 超伝導体

32 絶縁体

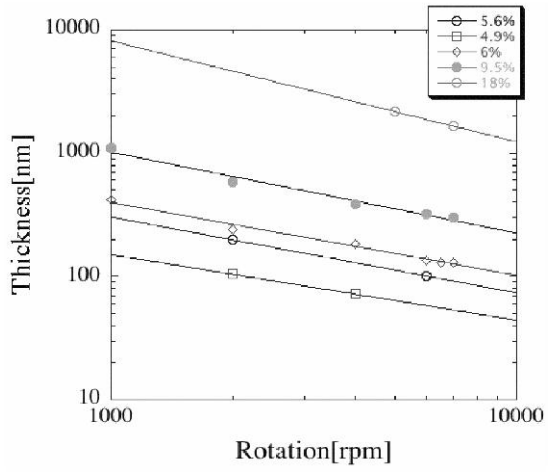
33 超伝導体

40

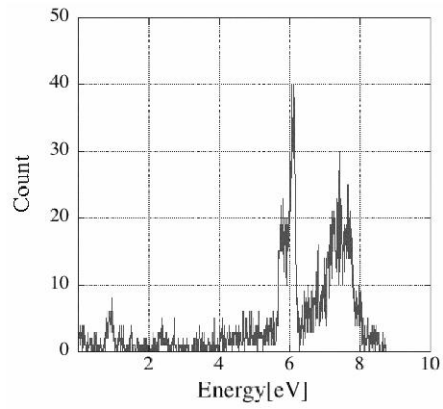
【 図 1 】



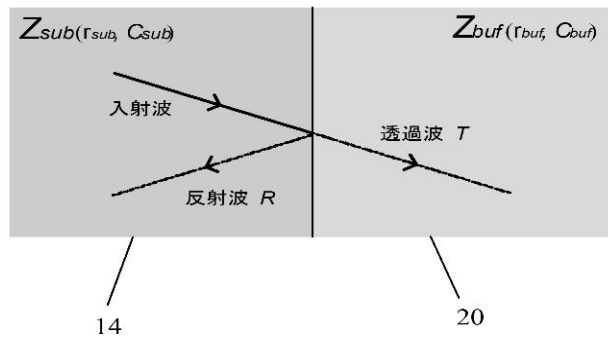
【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】

(a)

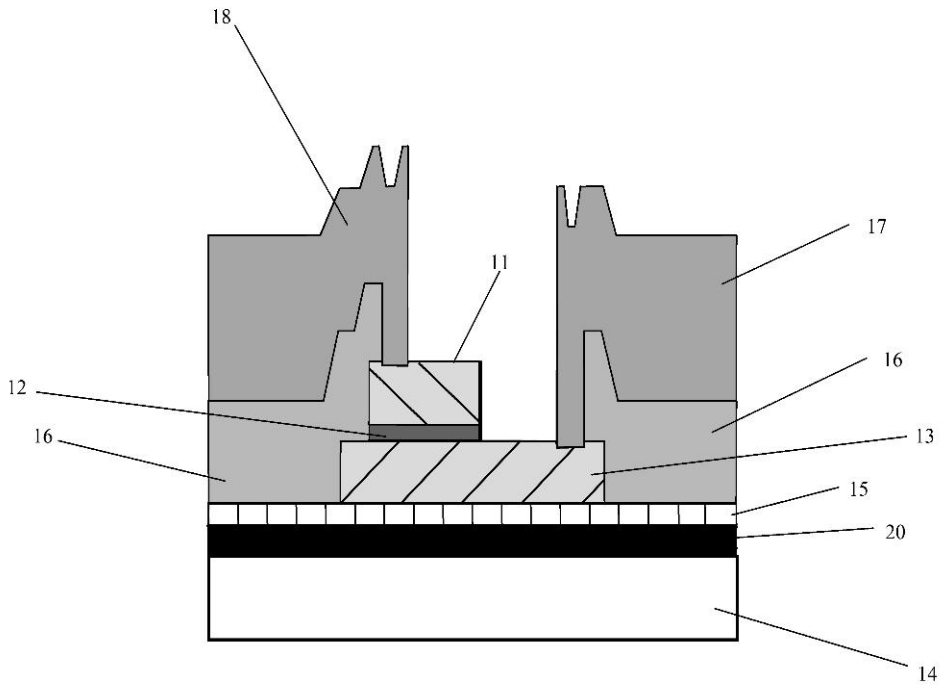
Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C$ ( $\times 10^9$ Pa)	$Z$ ( $\times 10^6$ Ns/m <sup>3</sup> )
Si	2.33	165.8	19.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (sapphire)	3.90	497	44.5
MgO	3.60	299.8	32.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (layer)	3.99	250	31.22
Polyimide	$1.17 \times 10^{-3}$	3.0	0.0591

(b)

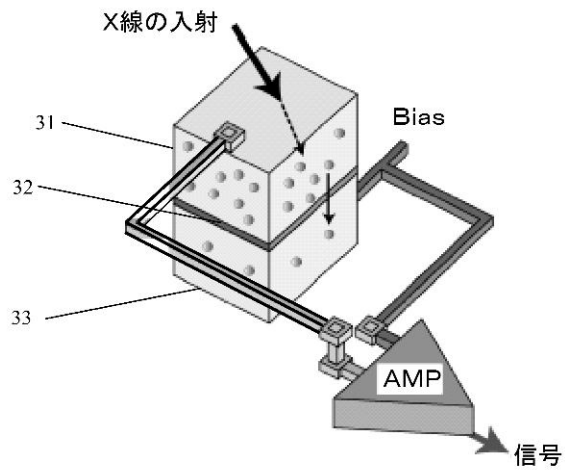
Substrate	Buffer layer	R	T	R <sub>a</sub>	T <sub>a</sub>
Si	MgO	0.251	1.251	0.063	0.937
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.227	1.227	0.052	0.948
	Polyimide	-0.994	0.006	0.988	0.012
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (sapphire)	MgO	-0.151	0.849	0.023	0.977
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.175	0.825	0.031	0.969
	Polyimide	-0.997	0.003	0.995	0.005



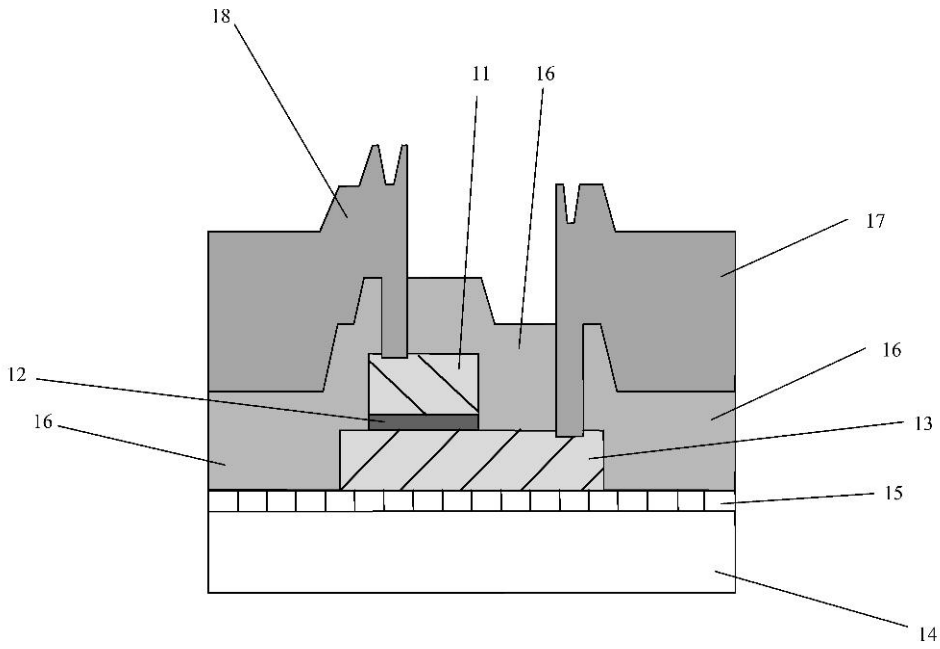
【 図 6 】



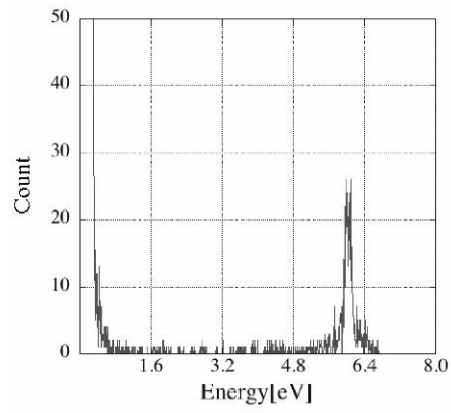
【 図 7 】



【 図 8 】

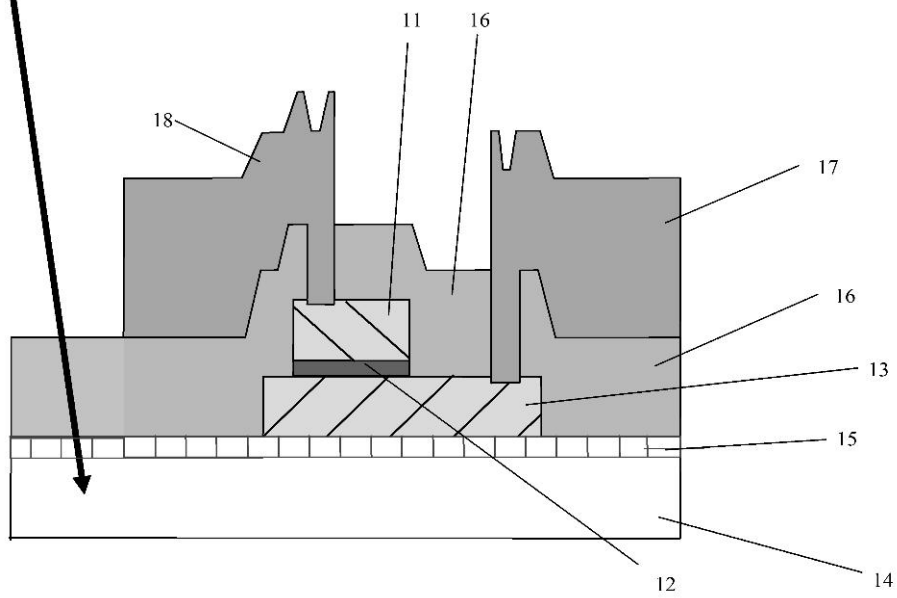


【 図 9 】



【 図 10 】

光子



## フロントページの続き

- (72)発明者 明連 広昭  
埼玉県さいたま市桜区下大久保2 5 5番地 国立大学法人 埼玉大学内
- (72)発明者 高田 進  
埼玉県さいたま市桜区下大久保2 5 5番地 国立大学法人 埼玉大学内
- (72)発明者 吉田 昌代  
埼玉県さいたま市桜区下大久保2 5 5番地 国立大学法人 埼玉大学内
- (72)発明者 仲川 博  
茨城県つくば市東一丁目1番地1 独立行政法人 産業技術総合研究所つくばセンター内
- (72)発明者 菊地 克弥  
茨城県つくば市東一丁目1番地1 独立行政法人 産業技術総合研究所つくばセンター内
- (72)発明者 青柳 昌宏  
茨城県つくば市東一丁目1番地1 独立行政法人 産業技術総合研究所つくばセンター内
- (72)発明者 赤穂 博司  
茨城県つくば市東一丁目1番地1 独立行政法人 産業技術総合研究所つくばセンター内

Fターム(参考) 2G065 BA02 BA31 DA20

2G088 EE30 FF02 FF03 FF15 GG22 JJ09 JJ31 JJ33 JJ37 LL11

4M113 AA04 AA14 AA25 AA29 AA33 AC22 AD35 AD36 CA13

5F088 AA11 AB01 BA03 LA03 LA08