



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101789769 A

(43) 申请公布日 2010. 07. 28

(21) 申请号 201010004674. 0

(22) 申请日 2010. 01. 20

(30) 优先权数据

2009-014578 2009. 01. 26 JP

2009-275300 2009. 12. 03 JP

(71) 申请人 株式会社村田制作所

地址 日本京都府

(72) 发明人 三村昌和

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任

公司 11021

代理人 张宝荣

(51) Int. Cl.

H03H 9/64 (2006. 01)

H03H 9/145 (2006. 01)

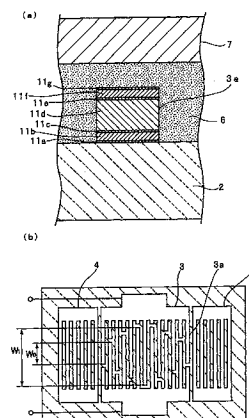
权利要求书 1 页 说明书 11 页 附图 18 页

(54) 发明名称

弹性波装置

(57) 摘要

本发明涉及一种弹性波装置,能够改善频率温度特性,并能够充分抑制高阶模杂散。其具有:由 $\text{LiNbO}_3$ 构成的压电体(2)、层叠在压电体(2)上的 $\text{SiO}_2$ 层(6)、设置于压电体(2)和 $\text{SiO}_2$ 层(6)的界面的IDT电极(3), $\text{LiNbO}_3$ 的欧拉角( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ )的 $\phi$ 以及 $\theta$ 分别为 $\phi = 0^\circ$ 及 $80^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$ ,且使用以SH波为主成分的弹性波,其中, $\psi$ 处于 $5^\circ \leq \psi \leq 30^\circ$ 的范围内。



1. 一种弹性波装置,其具有:  
由  $\text{LiNbO}_3$  构成的压电体;  
层叠在所述压电体上的电介体层;  
设置于所述压电体和所述电介体的界面的 IDT 电极,  
在所述  $\text{LiNbO}_3$  基板的欧拉角 ( $\phi, \theta, \psi$ ) 中,  $\phi$   
以及  $\theta$  分别为  $\phi = 0^\circ$  及  $80^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$ , 且使用以 SH 波为主成分的弹性波,  
其中,  $\psi$  处于  $5^\circ \leq \psi \leq 30^\circ$  的范围内。
2. 如权利要求 1 所述的弹性波装置,其中,  
所述电介体层为  $\text{SiO}_2$  层,还设有层叠在所述  $\text{SiO}_2$  层上的、音速比  $\text{SiO}_2$  层高的第二电介体层,且作为弹性波使用 SH 型弹性界面波。
3. 如权利要求 2 所述的弹性波装置,其中,  
所述  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角  $\theta$  处于  $105^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  的范围内。
4. 如权利要求 2 或 3 所述的弹性波装置,其中,  
所述第二电介体层是从由硅、氮化硅、氧化铝、氮化铝、氮氧化硅以及类金刚石碳构成的组中选择的至少一种,且由较慢的横波音速为 5000m/ 秒以上的电介体材料构成。
5. 如权利要求 1 所述的弹性波装置,其中,  
所述电介体层为  $\text{SiO}_2$  层,且作为所述弹性波利用 SH 型弹性表面波。
6. 如权利要求 5 所述的弹性波装置,其中,  
所述  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角  $\theta$  处于  $80^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  的范围内。
7. 如权利要求 5 或 6 所述的弹性波装置,其中,  
还具有层叠在所述  $\text{SiO}_2$  层上的第二电介体层。
8. 如权利要求 1 ~ 7 中任一项所述的弹性波装置,其中,  
所述 IDT 电极以电极膜或者层叠结构为主体,  
所述电极膜是从由 Au、Ag、Cu、Pt、Ta、W、Ni、Fe、Cr、Mo、Ti 及以这些金属中的一种为主成分的合金构成的组中选择的一种金属所构成的电极膜,  
所述层叠结构是将由与构成所述电极膜的金属不同的金属所构成的第二电极膜和所述电极膜层叠而成的层叠结构。
9. 如权利要求 8 所述的弹性波装置,其中,  
所述层叠结构包含多个各自由 Pt 或 Al 或者以这些金属为主成分的合金构成的电极膜。

## 弹性波装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用于共振器或带通滤波器等弹性波装置,更详细地涉及具有作为压电体使用  $\text{LiNbO}_3$ ,在压电体上层叠  $\text{SiO}_2$  层等电介体的结构的弹性波装置。

### 背景技术

[0002] 以往,弹性界面波装置或弹性表面波装置等弹性波装置在通信设备的带通滤波器等中使用。

[0003] 这种弹性界面波装置的一例在下述专利文献 1 中公开。图 24 以及图 25 是用于说明专利文献 1 所记载的弹性界面波装置的平面图以及表示其要部的示意局部切开放大剖视图。

[0004] 弹性界面波装置 1001 具有  $\text{LiNbO}_3$  基板 1002。在  $\text{LiNbO}_3$  基板 1002 上形成有 IDT 电极 1003。以覆盖 IDT 电极 1003 的方式层叠多晶氧化硅膜 1004。在多晶氧化硅膜 1004 上层叠有多晶硅膜 1005。

[0005] 由 IDT 电极 1003 激励的弹性界面波将能量聚集传播到层叠在  $\text{LiNbO}_3$  基板 1002 和多晶硅膜 1005 之间的多晶氧化硅膜 1004 中。由此,形成多晶硅膜 / 多晶氧化硅膜 /  $\text{LiNbO}_3$  以该顺序层叠的、所谓三介质结构的弹性界面波装置。

[0006] 专利文献 1 由于在多晶氧化硅膜上层叠有多晶硅膜 1005,所以能够可靠地将由 IDT 电极 1003 激励的弹性波关入多晶氧化硅膜中。

[0007] 另一方面,下述专利文献 2 记载到,在  $\text{LiNbO}_3$  基板上形成有 IDT 电极,以覆盖 IDT 电极的方式层叠有  $\text{SiO}_2$  膜的弹性表面波装置。在该弹性表面波装置中,通过  $\text{SiO}_2$  膜的形成,减小了频率温度系数 TCF 的绝对值。另外还记载到,设表面波的波长为  $\lambda$  的情况下,将  $\text{SiO}_2$  膜的膜厚从  $0.24\lambda$  增厚到  $0.35\lambda$ ,则会较大表现高阶模引起的杂散 (spurious)。

[0008] 专利文献 1 :W098/52279

[0009] 专利文献 2 :W02007/145057

[0010] 在专利文献 1 中记载的弹性界面波装置中,弹性界面波将能量聚集传播到层叠在  $\text{LiNbO}_3$  基板 1002 和多晶硅膜 1005 之间的多晶氧化硅膜 1004 中,存在表现高阶模引起的杂散的问题。已经知道,该高阶模杂散的大小在多晶氧化硅膜的膜厚变薄时而变小。但是,当多晶氧化硅膜的膜厚变小,则在弹性界面波装置 1001 中,存在频率温度系数 TCF 的绝对值变大的问题。即,高阶模杂散的抑制和频率温度特性的改善处于权衡的关系中。

[0011] 在专利文献 1 中记载的弹性界面波装置中,多晶氧化硅膜的横波音速比多晶硅膜及  $\text{LiNbO}_3$  基板的横波音速慢。由于是低速的多晶氧化硅膜由高音速的多晶硅膜以及  $\text{LiNbO}_3$  基板夹持的基板的结构,所以能够可靠地将由 IDT 电极激励的弹性界面波可靠地关入多晶氧化硅膜中。在该结构中传播弹性界面波的基模和高阶模。

[0012] 基模是指,朝向多晶氧化硅膜的外侧的方向是变位小的方向,在多晶氧化硅膜中存在一处峰 / 谷 (腹) 的模式,即所谓的零阶模。高阶模是指,朝向多晶氧化硅膜的外侧的方向是变位衰减的方向,在多晶氧化硅膜中存在一处节点,存在节点的上下各自变位的朝

向不同的两处峰 / 谷的模式,即所谓的一阶模。

[0013] 在多晶氧化硅膜中也能够存在具有多个节点的高阶模。但是,由于上述高阶模以外的高阶模的响应小,所以不成问题。

[0014] 另外,在专利文献2中如上所述记载到,将 $\text{SiO}_2$ 膜的膜厚从 $0.24\lambda$ 增厚到 $0.35\lambda$ ,则会较大表现高阶模引起的杂散。

[0015] 因此,即使在如专利文献2所记载的弹性表面波装置中,为了改善频率温度特性而增厚 $\text{SiO}_2$ 膜,则也会使高阶模杂散变大,频率温度特性的改善和高阶模杂散的抑制处于权衡的关系中。

## 发明内容

[0016] 本发明是为了消除上述现有技术的问题而做出的,其目的在于提供一种弹性波装置,其具有在 $\text{LiNbO}_3$ 上层叠 $\text{SiO}_2$ 层的结构,能够通过 $\text{SiO}_2$ 层的形成改善频率温度特性,并且能够充分地抑制高阶模杂散。

[0017] 根据本发明,具有由 $\text{LiNbO}_3$ 构成的压电体、层叠在所述压电体上的电介质层、设置于所述压电体和所述电介体的界面的 IDT 电极,在所述 $\text{LiNbO}_3$ 基板的欧拉角的 $(\phi, \theta, \psi)$ 中, $\phi$ 及 $\theta$ 分别是 $\phi = 0^\circ$ 及 $80^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$ ,且使用以 SH 波为主成分的弹性波,其中, $\psi$ 处于 $5^\circ \leq \psi \leq 30^\circ$ 的范围内。

[0018] 在本发明的弹性波装置的某一特定方面中,提供所述电介质层为 $\text{SiO}_2$ 层,还设置有层叠在所述 $\text{SiO}_2$ 层上的、音速比 $\text{SiO}_2$ 层高的第二电介质层,且作为弹性波使用 SH 型弹性界面波的弹性界面波装置。在这种情况下,在使用 SH 型弹性界面波的弹性界面波装置中,能够实现频率温度特性的改善和高阶模杂散的抑制。

[0019] 在弹性界面波装置的情况下,优选地, $\text{LiNbO}_3$ 的欧拉角 $\theta$ 处于 $105^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ 的范围内,在这种情况下,能够已知在 SH 型弹性界面波的响应附近表现的不需要模式响应。即,减小了作为不需要模式的斯通利 (Stoneley) 波的电气机械耦合系数。

[0020] 在本发明的弹性波装置是弹性界面波装置的情况下,作为构成上述第二电介质层的材料优选从由硅、氮化硅、氧化铝、氮化铝、氮氧化硅以及类金刚石碳构成的组中选择的至少一种,采用较慢的横波音速为 5000m/ 秒以上的电介质材料。这种情况下,由于这些电介质材料的横波音速比 $\text{SiO}_2$ 的横波音速快,并且, $\text{LiNbO}_3$ 基板的横波音速比 $\text{SiO}_2$ 的横波音速快,所以能够可靠地将 SH 型弹性界面波关入 $\text{SiO}_2$ 层侧。

[0021] 另外,在本发明的弹性波装置的其他特定方面中,提供所述电介质层为 $\text{SiO}_2$ 层,且作为所述弹性波利用 SH 型弹性波表面波的弹性表面波装置。这种情况下,在弹性表面波装置中,能够改善频率温度特性并抑制高阶模杂散。

[0022] 在本发明的弹性波装置是弹性表面波装置的情况下,优选地, $\text{LiNbO}_3$ 的欧拉角 $\theta$ 处于 $80^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内,这种情况下,能够已知在 SH 型表面波的响应附近表现的不需要模式的响应。即,减小了作为不需要模式的斯通利波的电气机械耦合系数。

[0023] 在弹性表面波装置的情况下,还可以具有层叠在 $\text{SiO}_2$ 层上的第二电介质层,这种情况下,能够通过该电介质层的层叠保护下方的 $\text{SiO}_2$ 层以及 IDT 电极。

[0024] 在本发明的弹性波装置的再其他特定方面中,上述 IDT 电极以电极膜或者层叠结构为主体,所述电极膜是从由 Au、Ag、Cu、Pt、Ta、W、Ni、Fe、Cr、Mo、Ti 及以这些金属中的一

种为主成分的合金构成的组中选择的一种金属所构成的电极膜,所述层叠结构是将与构成所述电极膜的金属不同的金属所构成的第二电极膜和所述电极膜层叠而成的层叠结构。这种情况下,能够增大 IDT 电极的反射系数。优选地,上述层叠结构含有多个各自自由以 Pt 或 Al 或者以这些金属为主成分的合金构成的电极膜。这种情况下,能够形成高可靠性且低阻抗的 IDT 电极。

[0025] (发明效果)

[0026] 在本发明的弹性波装置中,由  $\text{LiNbO}_3$  构成的压电体具有负的频率温度系数,而  $\text{SiO}_2$  层具有正的频率温度系数,所以能够减小频率温度系数 TCF 的绝对值。而且,在减小频率温度系数 TCF 的绝对值的方式选择了  $\text{SiO}_2$  膜的膜厚的情况下,由于  $\text{LiNbO}_3$  基板的欧拉角  $\psi$  在上述特定的范围内,所以能够可靠地抑制高阶模杂散。

[0027] 因此,能够同时实现频率温度特性的改善和高阶模杂散的抑制。

## 附图说明

[0028] 图 1(a) 以及 (b) 是表示本发明的一实施方式的弹性界面波装置的要部的局部切开放大正面剖视图以及表示电极结构的示意平面图。

[0029] 图 2(a) 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, \psi)$ , 其中  $\psi$  为  $0^\circ, 5^\circ$  或  $10^\circ$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置的阻抗特性的图,图 2(b) 是表示其相位特性的图。

[0030] 图 3(a) 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, \psi)$ , 其中  $\psi$  为  $15^\circ, 20^\circ$  或  $25^\circ$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置的阻抗特性的图,图 2(b) 是表示其相位特性的图。

[0031] 图 4(a) 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, \psi)$ , 其中  $\psi$  为  $30^\circ$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置的阻抗特性的图,图 2(b) 是表示其相位特性的图。

[0032] 图 5 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, 0^\circ)$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置中的高阶模的相位最大的音速和高阶模杂散的响应强度的关系的图。

[0033] 图 6 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, 5^\circ)$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置中的高阶模的相位最大的音速和高阶模杂散的响应强度的关系的图。

[0034] 图 7 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, 10^\circ)$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置中的高阶模的相位最大的音速和高阶模杂散的响应强度的关系的图。

[0035] 图 8 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, 15^\circ)$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置中的高阶模的相位最大的音速和高阶模杂散的响应强度的关系的图。

[0036] 图 9 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 115^\circ, 20^\circ)$  的  $\text{LiNbO}_3$  的弹性界面波装置中的高阶模的相位最大的音速和高阶模杂散的响应强度的关系的图。

[0037] 图 10 是表示使用欧拉角  $(0^\circ, 80^\circ, \psi)$  的  $\text{LiNbO}_3$  中较快的横波音速和较慢的横波音速的  $\psi$  的关系的图。

[0038] 图 11(a) 以及 (b) 是表示使用欧拉角分别为  $(0^\circ, 90^\circ, \psi)$  以及  $(0^\circ, 100^\circ, \psi)$  的  $\text{LiNbO}_3$  中较快的横波音速和较慢的横波音速的  $\psi$  的关系的图。

[0039] 图 12(a) 以及 (b) 是表示使用欧拉角分别为  $(0^\circ, 110^\circ, \psi)$  以及  $(0^\circ, 115^\circ, \psi)$  的  $\text{LiNbO}_3$  中较快的横波音速和较慢的横波音速的  $\psi$  的关系的图。

[0040] 图 13 是表示使用欧拉角为  $(0^\circ, 120^\circ, \psi)$  的  $\text{LiNbO}_3$  中较快的横波音速和较慢的横波音速的  $\psi$  的关系的图。

[0041] 图 14 是表示使用欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $\psi$ ) 的  $\text{LiNbO}_3$  中较快的横波音速和较慢的横波音速的  $\psi$  的关系的图。

[0042] 图 15 是表示在弹性界面波装置中,  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角  $\psi$  和频率温度系数 TCF 的关系的图。

[0043] 图 16 是表示在弹性界面波装置中,  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ ) 的情况下的阻抗特性的图。

[0044] 图 17 是表示在弹性界面波装置中,  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ ) 的情况下的相位特性的图。

[0045] 图 18 是表示在弹性界面波装置中,  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $0^\circ$ ) 的情况下的阻抗特性的图。

[0046] 图 19 是表示在弹性界面波装置中,  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $0^\circ$ ) 的情况下的相位特性的图。

[0047] 图 20 是表示在弹性界面波装置中,  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $127^\circ$ ,  $0^\circ$ ) 的情况下的阻抗特性的图。

[0048] 图 21 是表示在弹性界面波装置中,  $\text{LiNbO}_3$  的欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $127^\circ$ ,  $0^\circ$ ) 的情况下的相位特性的图。

[0049] 图 22 是用于说明作为本发明的其他实施方式的弹性表面波装置的示意正面剖视图。

[0050] 图 23(a) 以及 (b) 是分别表示在作为本发明的第二实施方式的弹性表面波装置中的欧拉角 ( $0^\circ$ ,  $86^\circ$ ,  $\psi$ ) 中, 使  $\psi$  变化的情况下的阻抗和传播角  $\psi$  的关系以及相位特性和传播角  $\psi$  的关系的图。

[0051] 图 24 是以往的弹性界面波装置的示意平面图。

[0052] 图 25 是放大表示以往的弹性界面波装置的要部的局部切开放大正面剖视图。

[0053] 附图标记说明

[0054] 1... 弹性界面波装置

[0055] 2... 压电体

[0056] 3... IDT 电极

[0057] 3a... 电极指

[0058] 4、5... 反射器

[0059] 6...  $\text{SiO}_2$  层

[0060] 7... 第二电介质层

[0061] 11a、11c、11e、11g... Ti 膜

[0062] 11b... Pt 膜

[0063] 11d... Al 膜

[0064] 11f... Pt 膜

[0065] 21... 弹性表面波装置

[0066] 22... 压电体

[0067] 23... IDT 电极

[0068] 24、25... 反射器

[0069] 26... SiO<sub>2</sub> 层

### 具体实施方式

[0070] 以下,通过参照附图说明本发明的具体实施方式,来明确本发明。

[0071] 图 1(a) 是本发明的一实施方式的弹性界面波装置的局部切开放大正面剖视图,图 1(b) 是表示该弹性界面波装置的电极结构的示意平面图。

[0072] 如图 1(a) 所示,弹性界面波装置 1 具有由 LiNbO<sub>3</sub> 构成的压电体 2。在压电体 2 上层叠有 SiO<sub>2</sub> 层 6。

[0073] 在压电体 2 和 SiO<sub>2</sub> 层 6 的界面上形成有 IDT 电极 3。在图 1(a) 中,放大并以剖视图表示 IDT 电极 3 的一根电极指部分。实际上,如图 1(b) 所示,在压电体 2 上配置有 IDT 电极 3 和配置在 IDT 电极 3 的弹性界面波传播方向两侧的反射器 4、5。IDT 电极 3 是被实施交错宽度加权的 IDT 电极,具有相互间插的多根电极指。在图 1(a) 中,放大表示一根电极指 3a。

[0074] 如图 1(b) 所示,上述加权以与 IDT 电极 3 的端部的交错宽度  $W_0$  相比, IDT 电极 3 的弹性界面波传播方向中央的交错宽度  $W_1$  更大的方式实施。即、交错宽度  $W_1$  为最大交错宽度,随着朝向 IDT 电极 3 的端部,交错宽度顺次变小的方式实施交错宽度加权。反射器 4、5 是光栅反射器。

[0075] 通过上述 IDT 电极 3 以及反射器 4、5,形成一端口型弹性界面波共振器的电极结构。

[0076] 上述 IDT 电极 3 以及反射器 4、5 由适当的金属材料构成。在本实施方式中,如图 1(a) 放大所示, IDT 电极 3 的电极指 3a 由从压电体 2 侧顺次层叠 Ti 膜 11a、Pt 膜 11b、Ti 膜 11c、Al 膜 11d、Ti 膜 11e、Pt 膜 11f 及 Ti 膜 11g 而得到的层叠金属膜构成。

[0077] 在上述层叠金属膜中,Pt 膜 11b、Al 膜 11d 及 Pt 膜 11f 比 Ti 膜 11a、11c、11e、11g 相对厚。这些 Pt 膜 11b、Al 膜 11d 以及 Pt 膜 11f 是主要的电极膜。Ti 膜 11a 起到作为提高向 IDT 电极 3 的压电基板的密接性的密接层的作用。Ti 膜 11c、11e 作为抑制两侧的电极膜间的扩散的势垒层形成。即、为了抑制 Pt 膜 11b、11f 和 Al 膜 11d 之间的原子的扩散,形成有 Ti 膜 11c、11e。另外, Ti 膜 11g 作为密接 SiO<sub>2</sub> 层和 Pt 膜的密接层形成。IDT 电极 3 全体由这样的层叠金属膜形成,反射器 4、5 也由同样的层叠金属膜形成。

[0078] 但是,本发明中, IDT 电极没有必要一定由层叠金属膜形成。另外,关于形成 IDT 电极 3 的金属材料也不作特别限定,但是优选由 Au、Ag、Cu、Pt、Ta、W、Ni、Fe、Cr、Mo、Ti 或以这些金属的一种为主成分的合金构成的金属材料用作作为主体的电极膜材料。这种情况下, IDT 电极 3 可以仅由这样的电极膜形成,但是如图 1(a) 所示的 Ti 膜 11a、11c、11e、11g 等所示,作为密接层、势垒层或保护层,也可以层叠作为构成主体的电极膜的 Al 膜或 Pt 膜等以外的电极膜。

[0079] 通过使用上述金属材料,能够提高 IDT 电极的反射系数,或提高导电性,由此能够进一步改善弹性界面波装置。

[0080] 更优选地,作为上述主要的电极膜,在本实施方式中采用 Pt 以及 Al,这种情况下,能够更有效地提高反射系数和导电性。

[0081] 在本实施方式的弹性界面波装置 1 中,以覆盖上述 IDT 电极 3 的方式在压电体 2

的上面层叠  $\text{SiO}_2$  层 6, 进而在  $\text{SiO}_2$  层 6 之上层叠第二电介质层 7。在本实施方式中, 第二电介质层 7 由  $\text{SiN}$  膜构成。

[0082] 由上述  $\text{SiO}_2$  层 6 以及  $\text{SiN}$  膜构成的第二电介质层 7 能够通过蒸镀、溅射等适当的薄膜形成方法形成。第二电介质层 7 如日本专利公开专利特开平 10-84247 公报所示, 也可以通过基板粘合工艺形成。

[0083] 关于  $\text{SiO}_2$  层 6 的厚度不作特别限定, 但是设界面波的波长为  $\lambda$  时, 该厚度为  $0.2\lambda \sim 0.7\lambda$  程度。 $\text{SiO}_2$  层 6 由于与  $\text{SiN}$  或  $\text{LiNbO}_3$  相比横波音速较慢, 所以由 IDT 电极 3 激励的弹性界面波能够将能量聚集传播到  $\text{SiN}$  和  $\text{LiNbO}_3$  之间、即上述  $\text{SiO}_2$  层 6 中。为了使这样的传播变为可能,  $\text{SiO}_2$  的厚度形成为如上所述的  $0.2\lambda \sim 0.7\lambda$  程度。但是, 该厚度并非限定。

[0084]  $\text{SiN}$  膜 7 的厚度设定为能够充分关入弹性界面波的厚度。即, 朝向  $\text{SiN}$  膜 7 的厚度方向, 弹性界面波的变位变小,  $\text{SiN}$  膜 7 的表面的弹性界面波的变位设定为大致为零的厚度。变位大致视为零的厚度例如为  $1\lambda$  以上。

[0085] 另外, 关于包含前述的 IDT 电极 3 的电极结构, 也能够使用公知的光刻法形成。

[0086] 在本实施方式的弹性界面波装置 1 中, 设置于由上述  $\text{LiNbO}_3$  构成的压电体 2 和  $\text{SiO}_2$  层 6 的界面上的 IDT 电极 3 激励的弹性界面波将能量聚集传播到  $\text{SiO}_2$  层 6 中。在此, 电介质层 7 由  $\text{SiN}$  膜构成, 其横波音速比  $\text{SiO}_2$  层 6 的横波音速快。因此, 弹性界面波由于难以泄露到由  $\text{SiN}$  膜构成的电介质层 7 侧, 所以能够可靠地将能量聚集到上述  $\text{SiO}_2$  层 6 中, 传播弹性界面波。

[0087] 另外, 在弹性界面波装置 1 中,  $\text{LiNbO}_3$  的频率温度系数 TCF 是负的值, 而  $\text{SiO}_2$  层的频率温度系数 TCF 是正的值, 所以能够整体上减少频率温度系数的绝对值。这样, 能够减小因温度变化引起的频率变动。

[0088] 此外, 在使用  $\text{LiNbO}_3$  基板的欧拉角  $(\phi, \theta, \psi)$  的  $\phi$  及  $\theta$  分别为  $\phi = 0^\circ$  及  $80^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$ , 且以 SH 波为主成分的弹性波的弹性波装置中, 由于  $\psi$  处于  $5^\circ \leq \psi \leq 30^\circ$  的范围内, 所以如后述的实验例可明确地, 能够有效地抑制高阶模杂散。关于此, 参照图 2 ~ 图 15 更具体地说明。

[0089] 图 1(a) 以及 (b) 所示的弹性界面波装置 1、即一端口型弹性界面波共振器使用各种传播角  $(\psi)$  的  $\text{LiNbO}_3$  制作, 测定阻抗特性和相位特性。

[0090] 制作的弹性界面波共振器的规格如以下所示。

[0091]  $\text{LiNbO}_3$  基板的欧拉角:  $(0^\circ, 115^\circ, \psi)$ 。传播角  $\psi$  采用  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$  及  $30^\circ$ 。

[0092] 由 IDT 电极的电极指的节距确定的波长  $\lambda = 1.9 \mu\text{m}$

[0093] IDT 电极的膜厚: Pt 膜 11b、11f 的膜厚 = 31nm、Al 膜 11d 的膜厚 = 300nm、Ti 膜 11a、11c、11e、11g 的膜厚 = 10nm

[0094] IDT 电极的负荷 = 0.5

[0095] 电极指的对数 = 60 对

[0096] 相对的总线的间隔 =  $30\lambda$

[0097] IDT 电极的变迹比 (最小交错宽度  $W_0$  / 最大交错宽度  $W_1$ ) = 0.40

[0098]  $\text{SiO}_2$  层的膜厚 = 712nm

[0099] 由 SiN 构成的电介质层 7 的膜厚 = 2000nm

[0100] 反射器的电极指的根数 = 各 51 根

[0101] 在各图中,横轴为由频率与波长之积表示的音速。A 是 SH 型界面波的基模的响应, B 是高阶模的响应。

[0102] 图 2(a) 以及 (b) 分别表示传播角  $\psi$  为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$  或  $10^\circ$  的情况下的各弹性界面波装置的阻抗特性以及相位特性。在图 2 中,实线表示  $\psi = 0^\circ$  的情况下的结果,虚线表示  $\psi = 5^\circ$  的情况下的结果,点划线表示  $\psi = 10^\circ$  的情况下的结果。

[0103] 同样地,图 3(a) 以及 (b) 分别表示传播角  $\psi$  为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  以及  $25^\circ$  的情况下的各弹性界面波装置的阻抗特性以及相位特性。实线表示  $\psi = 15^\circ$  的情况下的结果,虚线表示  $\psi = 20^\circ$  的情况下的结果,点划线表示  $\psi = 25^\circ$  的情况下的结果。

[0104] 另外,图 4(a) 以及 (b) 分别表示传播角  $\psi$  为  $30^\circ$  的情况下的各弹性界面波装置的阻抗特性以及相位特性。

[0105] 如图 2(a)、(b) ~ 图 4(a)、(b) 所明示可知,在欧拉角 ( $0^\circ$ ,  $115^\circ$ 、 $\psi$ ) 的  $\text{LiNbO}_3$  的情况下,随着传播角  $\psi$  从  $0^\circ$  至  $30^\circ$  变大,例如图 2(a) 以及 (b) 所示的箭头 B 所示高阶模的响应变小。另外,箭头 A 表示基模的响应。箭头 B 表示高阶模的响应。

[0106] 因此,可知在使用欧拉角 ( $0^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $\psi$ ) 的  $\text{LiNbO}_3$  基板的情况下,传播角  $\psi$  比  $0^\circ$  大,优选为  $5^\circ \sim 30^\circ$  的范围,从而与传播角  $\psi = 0^\circ$  即 X 传播的情况相比,能够抑制高阶模杂散。另外,考虑到图 2(a)、(b) ~ 图 4(a)、(b) 的结果,在相位特性中,求出高阶模的相位特性最大的音速和彼时的相位值。将高阶模的相位特性最大的音速适当地略称为高阶模的音速。另外,此时的相位值为高阶模响应的强度。

[0107] 高阶模的音速和高阶模响应的强度标图的结果示于图 5 ~ 图 9。

[0108] 当得到图 5 ~ 图 9 所示的结果,制作在同一压电晶片内,具有波长和线宽不同的 IDT 电极的多种一端口型弹性界面波共振器。测量这些一端口型弹性界面波共振器的特性。图 5 ~ 图 9 中的  $\times$  印是标图 (probe) 由相同欧拉角而加工条件不同的弹性界面波共振器的高阶模的相位最大的高阶模的音速和高阶模的响应强度最大的情况下的相位值的关系的标记,表示使用将 IDT 的波长  $\lambda$  变化为  $1.5 \mu\text{m}$ 、 $1.6 \mu\text{m}$ 、 $1.7 \mu\text{m}$ 、 $1.8 \mu\text{m}$ 、 $1.9 \mu\text{m}$ 、 $2.0 \mu\text{m}$  及  $2.1 \mu\text{m}$  的光掩模,在一张晶片上形成的多个弹性界面波共振器的特性。

[0109] 如图 5 ~ 9 所明示可知,无论在哪个传播角  $\psi$  中,当高阶模的音速为一定值以上时,高阶模的响应的强度急剧变小。即,存在高阶模的响应的强度变小的高阶模的音速的阈值。比较每个  $\psi$  值的高阶模音速的阈值,则可知在  $\psi$  为  $5^\circ$  以上的范围内,比  $\psi$  为  $0^\circ$  时的高阶模音速的阈值小。

[0110] 这是考虑到,在三介质结构的上述弹性界面波装置 1 中,作为音速相对较低的介质的  $\text{SiO}_2$  层 6 被夹持在由音速相对较高的介质的  $\text{LiNbO}_3$  构成的压电体 2 和由 SiN 膜构成的第二电介质层 7 之间,所以根据波导效应,弹性界面波被关入。即,在上述三介质结构中,当 SH 型弹性界面波的基模的音速比  $\text{LiNbO}_3$  或 SiN 的横波音速高的情况下,SH 型弹性界面波的基模变为泄漏模式,衰减变大。相对于此,高阶模的相位变为最大的音速为某一定值以上时高阶模响应的强度变小,是考虑到由于因高阶模的音速当超过  $\text{LiNbO}_3$  的较快的横波音速,会使高阶模向  $\text{LiNbO}_3$  侧泄漏。

[0111] 因此,考虑到若能够降低  $\text{LiNbO}_3$  的较快的横波音速,则能够减小高阶模响应。在

本实施方式中,考虑到由于上述传播角  $\psi$  形成为  $5^\circ$  以上,所以  $\text{LiNbO}_3$  的较快的横波音速充分变低,由此高阶模响应被抑制。

[0112] 上述抑制根据图 10 ~ 图 14 也能够获得支持。

[0113] 图 10 ~ 图 14 是表示欧拉角 ( $0^\circ$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ) 的  $\text{LiNbO}_3$  的传播角  $\psi$  和较快的横波音速以及较慢的横波音速的关系的图示。另外,实线表示较快的横波音速,点划线表示较慢的横波音速。

[0114] 图 10 表示各个欧拉角 ( $0^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $\psi$ ) 的情况下的结果,图 11(a) 及 (b) 分别表示欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\psi$ ) 及 ( $0^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $\psi$ ) 的情况下的结果,图 12(a) 及 (b) 分别表示欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $\psi$ ) 及 ( $0^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $\psi$ ) 的情况下的结果、图 13 表示欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $\psi$ ) 的情况下的结果,图 14 表示欧拉角为 ( $0^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $\psi$ ) 的情况下的结果。

[0115] 如图 10 ~ 图 14 所明示可知,即使在欧拉角的  $\theta$  为  $80^\circ \sim 130^\circ$  的任一个的情况下,  $\psi$  从  $0^\circ$  变大,随着朝向  $30^\circ$  而较快的横波音速变低。因此,如上所述可知,通过增大传播角  $\psi$ ,从而能够减小高阶模响应的强度。

[0116] 另外,如图 10 ~ 图 14 所明示可知,在欧拉角 ( $0^\circ$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ) 中,即使欧拉角的  $\theta$  是从  $80^\circ$  到  $130^\circ$  的任一个值,由于同样地较快的横波音速随着传播角  $\psi$  的增加而降低,所以与上述实施方式同样地,能够抑制高阶模杂散。

[0117] 如上所述那样,考虑欧拉角 ( $0^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $\psi$ ) 的情况下的对上述实施方式的较快的横波音速的传播角  $\psi$  的依赖性、图 5 ~ 图 9 中高阶模的构成相位最大的音速和高阶模响应的强度的关系。这种情况下,各个传播角  $\psi$  中的  $\text{LiNbO}_3$  的较快的横波音速与高阶模的构成相位最大的音速的阈值对应,通过增大  $\psi$ ,减小较快的横波音速,从而能够抑制高阶模。

[0118] 另外,根据图 10 ~ 图 14,上述  $\text{LiNbO}_3$  的较快横波音速在  $\psi$  比  $5^\circ$  小的范围内,与  $\psi$  为  $0^\circ$  的情况几乎没有变化。相对于此,若  $\psi$  为  $5^\circ$  以上,则较快的横波音速大副降低。因此,  $\psi$  为  $5^\circ$  以上。

[0119] 另外,当  $\psi$  变得过大,则基模的电气机械耦合系数  $k^2$  降低,所以为了避免基模的电气机械耦合系数的降低,优选  $\psi$  不大。但是,关于  $\psi$  的上限值,也根据用途不同而变化,在要求基模的电气机械耦合系数  $k^2$  较小的例如窄频带滤波器中使用的情况下,上限值能够非常大。

[0120] 在使用本实施方式的弹性界面波装置的主要用途的 RF 滤波器中,由于要求适度的电气机械耦合系数  $k^2$  的大小,所以优选传播角  $\psi$  比  $30^\circ$  小。因此,在本发明中,  $\psi$  为  $5^\circ$  以上、 $30^\circ$  以下。

[0121] 另外,如图 10 ~ 图 14 的结果所明示,即使欧拉角的  $\theta$  变化,在随着传播角  $\psi$  变大,  $\text{LiNbO}_3$  的较快的横波音速变慢的方面上是共通的。因此,  $\theta$  不限于  $115^\circ$ ,只要在  $8^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$  的范围,另外,若是该范围,则 SH 型弹性界面波的电气机械耦合系数也被提高。更优选地,  $\theta$  若是在  $105^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  的范围,则能够抑制不需要模式。

[0122] 另外,在本实施方式中,第二电介质层 7 由横波音速比  $\text{SiO}_2$  膜高的  $\text{SiN}$  膜形成,但是优选通过横波音速为 5000m/秒以上的适当电介质形成第二电介质层 7。这种情况下,这些电介质材料的横波音速比  $\text{SiO}_2$  的横波音速快,所以能够可靠地将 SH 型弹性界面波关入  $\text{SiO}_2$  层侧。

[0123] 作为这样的电介质材料,能够适宜使用从氮化硅 ( $\text{SiN}$ )、氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、氮化铝

(AlN)、硅(Si)、氮氧化硅(SiON)、类金刚石碳(DLC)等构成的组中选择的一种电介体材料。由此,能够可靠地将弹性界面波关入电介体层的内侧。

[0124] 另外,也可以代替第二电介体层7,采用层叠由从这些组中选择的一种电介体层和进而从上述组中选择的其他电介体材料构成的一个以上电介体层的层叠电介体层。

[0125] 另外,在上述实施方式中,在IDT电极中,作为用于提高电极膜间的密接性或防止金属的相互扩散的势垒层形成有Ti膜11a、11c、11e、11g,但是除Ti以外,也可以形成由NiCr构成的密接层或其他金属形成密接层和势垒层。

[0126] 但是,优选地,如本实施方式所示,在由Pt构成的电极膜和由Al构成的电极膜之间,或者在Pt膜或Al膜和LiNbO<sub>3</sub>之间、在Pt膜或Al膜和SiO<sub>2</sub>层之间层叠Ti膜。由此,能够提高可靠性,另外由于是低阻抗,所以能够实现损失的降低。

[0127] 参照图15说明在本实施方式的弹性界面波装置中,使上述LiNbO<sub>3</sub>的传播角 $\psi$ 变化的情况下频率温度特性不劣化的情况。

[0128] 众所周知,SiO<sub>2</sub>膜与LiNbO<sub>3</sub>组合使用的情况下,起到减小频率温度系数TCF的绝对值的作用,由此能够抑制温度导致的频率特性变化。

[0129] 图15是表示本实施方式的弹性界面波装置1和用于比较准备的传播角 $\psi = 0^\circ$ 的弹性界面波装置的频率温度系数TCF的图。如图15所示意,与传播角 $\psi = 0^\circ$ 的情况相比,根据上述实施方式,在 $\psi$ 为 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 及 $30^\circ$ 的情况下,频率温度系数TCF几乎不变化。因此,不会招致频率温度特性的劣化,换言之,能够得到SiO<sub>2</sub>层的形成带来的频率温度特性的提高效果,并且根据本发明可知能够抑制高阶模杂散。

[0130] 另外,图16~图21分别表示作为欧拉角为 $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 100^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 127^\circ, 0^\circ)$ 的各情况下的比较例准备的弹性界面波装置的阻抗特性和相位特性。

[0131] 图16以及图17分别表示 $\theta = 90^\circ$ 的情况下的结果,图18以及图19表示 $\theta = 100^\circ$ 的结果,图20以及图21表示欧拉角 $\theta = 127^\circ$ 的情况下的结果。

[0132] SH型弹性界面波装置的基模的响应以A表示,高阶模的响应以B表示。

[0133] 如图16~图21所明示,即使在欧拉角的 $\theta$ 为 $90^\circ$ 、 $100^\circ$ 或 $127^\circ$ 的情况中的任一种情况下,基模的阻抗比、即反共振频率中阻抗的共振频率相对于阻抗的比为60dB以上,与上述实施方式即 $\theta = 115^\circ$ 的情况的阻抗比相等。因此可知,若欧拉角 $\theta$ 在 $90^\circ \sim 127^\circ$ 的范围,则与上述实施方式同样地,基模的响应形成为充分的大小。另外,可知高阶模的杂散的响应大是个问题。这样,在本发明中,优选地,若欧拉角 $\theta$ 在 $90^\circ \sim 127^\circ$ 的范围内,则通过使欧拉角 $\psi$ 为 $5^\circ$ 以上、 $30^\circ$ 以下,从而能够抑制高阶模杂散,得到充分大的基模的响应。

[0134] (弹性表面波装置的实施方式)

[0135] 在图1(a)、(b)所示的实施方式中,利用将能量聚集传播到SiO<sub>2</sub>层中的弹性界面波,但是本发明的弹性波装置也可以是利用弹性表面波的弹性表面波装置。

[0136] 图22是示意表示作为本发明的第二实施方式的弹性表面波装置的正面剖视图。另外,在本实施方式的弹性表面波装置21中,在压电体22上形成有IDT电极23。以覆盖IDT电极23的方式形成SiO<sub>2</sub>层26。在此,IDT电极23的电极结构与图1(b)所示的IDT电极3同样。另外,在IDT电极23的弹性表面波传播方向两侧配置有反射器24、25。由此,构成一端口型的弹性表面波装置。

[0137] 在本实施方式中,以覆盖上述 IDT 电极 23 以及反射器 24、25 的方式形成  $\text{SiO}_2$  层 26 作为温度特性改善膜。 $\text{SiO}_2$  层 26 是用于减小频率温度系数 TCF 的绝对值而设置的部件,由于没必要关入弹性界面波,所以其膜厚在弹性表面波的波长为  $\lambda$  时为  $0.16\lambda \sim 0.30\lambda$  程度。

[0138] 在本实施方式中,关于构成 IDT 电极 23 的金属材料,在本实施方式中,使用从上顺次层叠 Ti 膜、Cu 膜以及 NiCr 膜而成的层叠金属膜,但是与前述的实施方式同样地,能够通过适当的金属材料形成 IDT 电极 23。

[0139] 在本实施方式中,作为由  $\text{LiNbO}_3$  基板构成的压电体 22 的欧拉角 ( $\phi, \theta, \psi$ ) 的传播角即  $\psi$  为  $5^\circ \sim 30^\circ$ ,由此能够抑制高阶模杂散。关于此,示于图 23(a)、(b)。

[0140] 在本实施例中,作为  $\text{LiNbO}_3$  基板,使用欧拉角 ( $0^\circ, 86^\circ, \psi$ ) 的  $\text{LiNbO}_3$ ,作为 IDT 电极使用 Ti/Cu/NiCr 的膜厚为 10/90/17(单位是 nm) 的层叠金属膜。关于 IDT 电极 23 的变迹比,与上述实施方式的弹性界面波装置 1 相同。另外,波长  $\lambda$  为  $1.6\mu\text{m}$ 。

[0141]  $\text{SiO}_2$  层 26 的膜厚为 450nm 即  $0.28\lambda$ 。反射器 24、25 与上述实施方式同样地由光栅反射器形成。

[0142] 图 23(a) 以及 (b) 分别表示如上所述制作的多种弹性表面波装置的阻抗特性以及相位特性。实线表示  $\psi = 0^\circ$  的情况下的结果,虚线表示  $\psi = 10^\circ$  的情况下的结果,点划线表示  $\psi = 20^\circ$  的情况下的结果。

[0143] 如图 23(a) 以及 (b) 所明示可知,箭头 D 所示的高阶模的响应与传播角  $\psi$  为  $0^\circ$  的情况相比显著小,为  $10^\circ$  以及  $20^\circ$ 。相对于此可知,箭头 C 所示的基模的响应不太劣化。

[0144] 因此,根据图 23 可知,在弹性表面波装置中,也同样地,通过增大传播角  $\psi$ ,能够抑制高阶模杂散。

[0145] 根据本发明人的实验可明确,若  $\psi$  为  $5^\circ$  以上、 $30^\circ$  以下,则同样地能够有效地抑制高阶模杂散。因此,弹性表面波装置的情况下也使  $\psi$  为  $5^\circ$  以上、 $30^\circ$  以下。

[0146] 另外,在弹性表面波的情况下,即使欧拉角  $\theta$  在  $80^\circ \sim 130^\circ$  的范围内变化,与弹性界面波装置的情况同样地,能够抑制高阶模杂散的效果不怎么变化。另一方面,在弹性表面波装置中,欧拉角 ( $0^\circ, \theta, \psi$ ) 的情况下, $\theta$  为  $80^\circ \sim 90^\circ$  的范围内,则能够抑制在 SH 型表面波的响应的附近表现的不需要模式的响应。

[0147] 另外,在本说明书中,表现基板的剖切面和界面波的传播方向的欧拉角 ( $\phi, \theta, \psi$ ) 使用文献「弹性波素子技術ハンドブック」(日本學術振興會彈性波素子技術第 150 委員會、第 1 版第 1 刷、平成 13 年 11 月 30 日発行、549 頁)(《弹性波元件技术手册》(日本学术振兴会弹性波元件技术第 150 委员会、第一版第一次印刷、平成 13 年 11 月 30 日发行,549 页)) 记载的右手式欧拉角。

[0148] 即,相对于  $\text{LiNbO}_3$  的结晶轴 X、Y、Z,以 Z 轴为轴,绕 X 轴逆时针旋转  $\phi$  而得  $X_a$  轴。

[0149] 接着,以  $X_a$  轴为轴,绕 Z 轴逆时针旋转  $\theta$ ,而得  $Z'$  轴。

[0150] 以包括  $X_a$  轴在内的、以  $Z'$  轴为法线的面为基板的剖切面。

[0151] 并且,以  $Z'$  轴为轴,绕  $X_a$  轴逆时针旋转  $\psi$  的轴  $X'$  方向为弹性波的传播方向。

[0152] 另外,作为欧拉角的初始值给予的  $\text{LiNbO}_3$  的结晶轴 X、Y、Z,将 Z 轴与 c 轴平行, X 轴与等价三方向的 a 轴中任意一个平行, Y 轴为包含 X 轴和 Z 轴的面的法线方向。

[0153] 另外,本说明书中的欧拉角 ( $\theta, \phi, \psi$ ) 包含结晶学上等价的欧拉角。由于  $\text{LiNbO}_3$

是三方晶类的  $3m$  点群所属的结晶,所以成立以下式子。

$$[0154] \quad F(\phi, \theta, \psi) = F(60^\circ + \phi, -\theta, \psi)$$

$$[0155] \quad \quad \quad = F(60^\circ - \phi, -\theta, 180^\circ - \psi)$$

$$[0156] \quad \quad \quad = F(\phi, 180^\circ + \theta, 180^\circ - \psi)$$

$$[0157] \quad \quad \quad = F(\phi, \theta, 180^\circ + \psi)$$

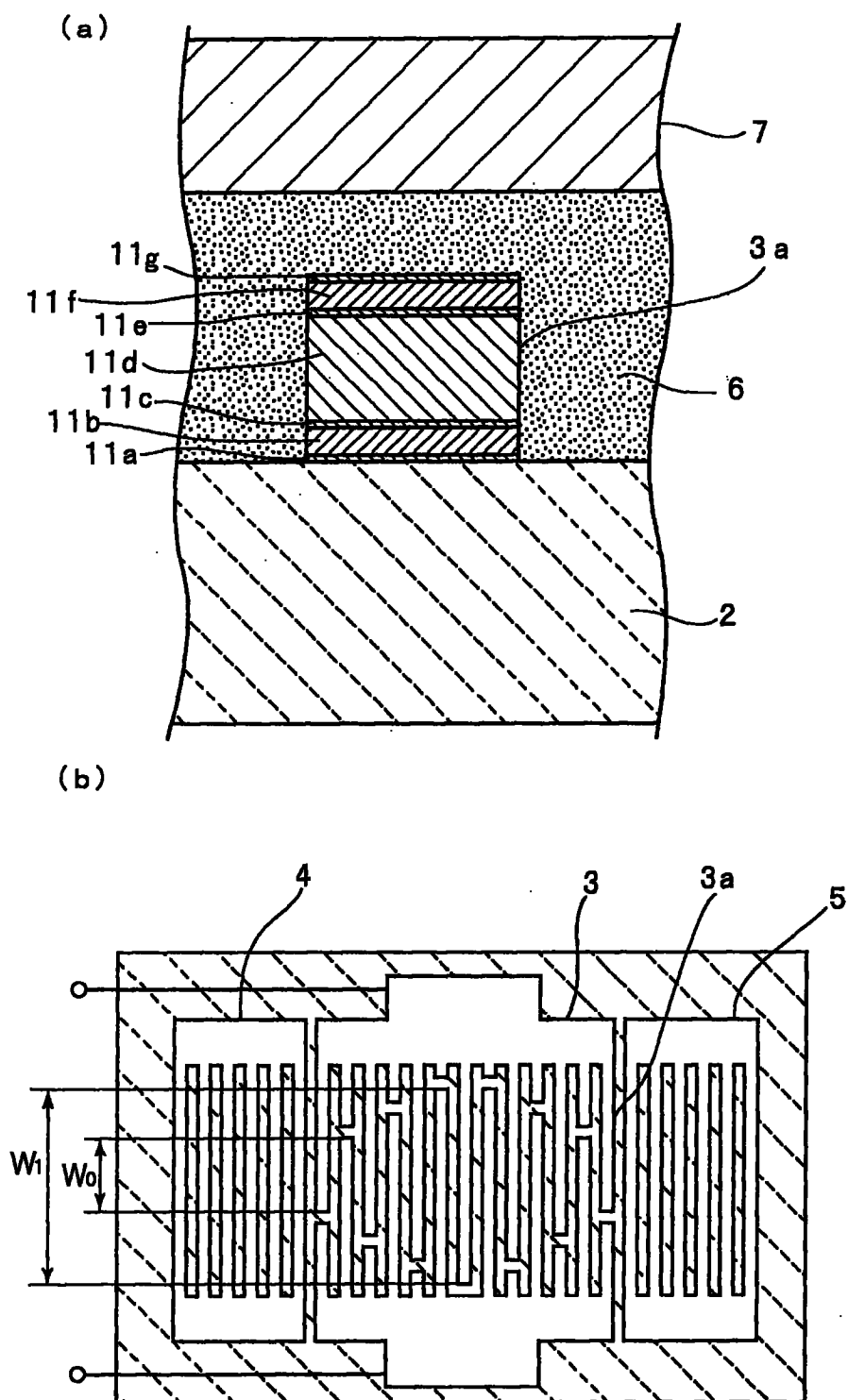


图 1

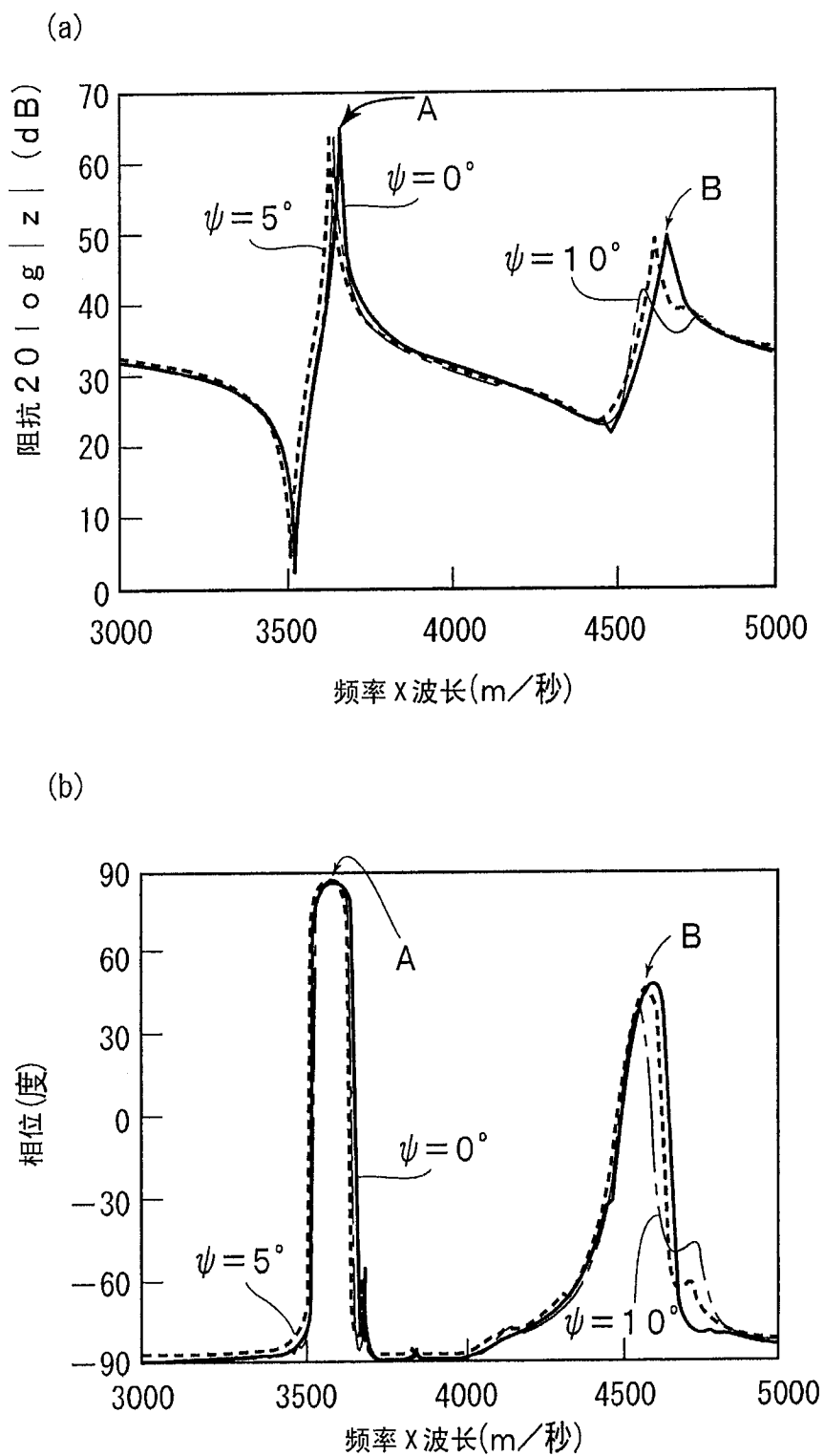


图 2

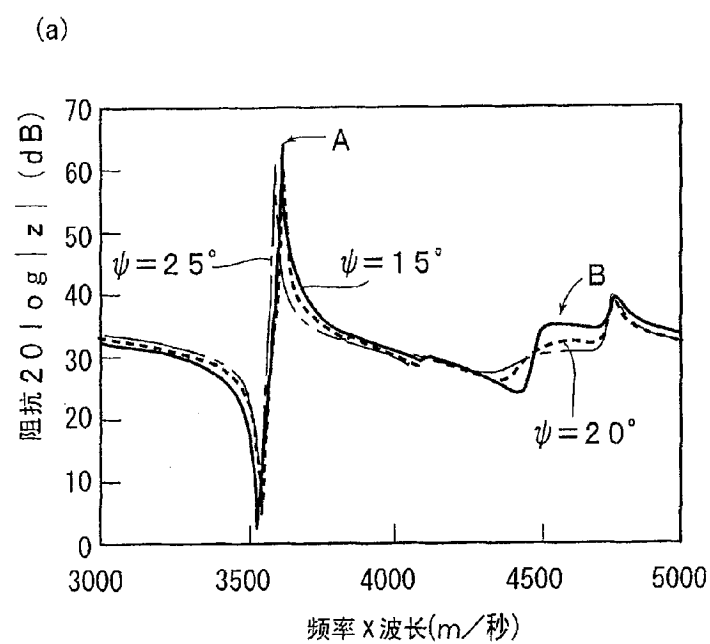
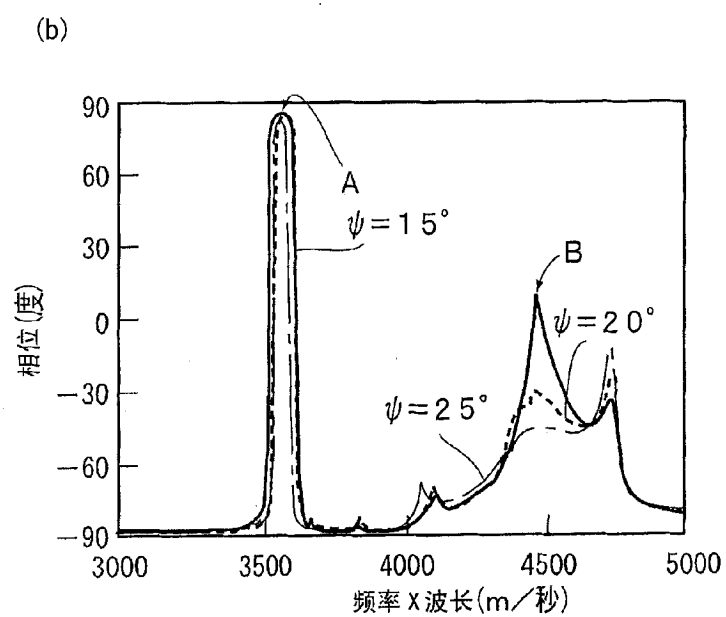
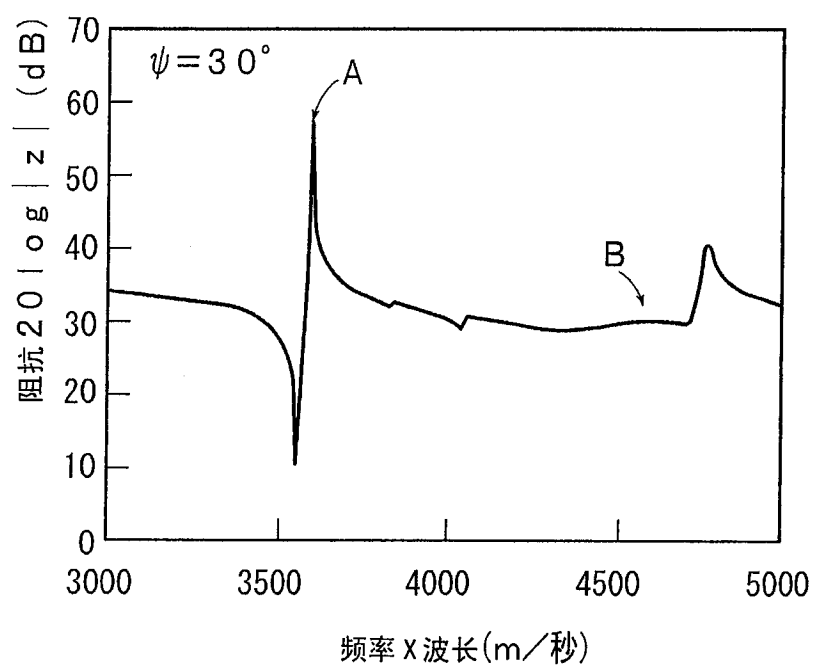


图 3

(a)



(b)

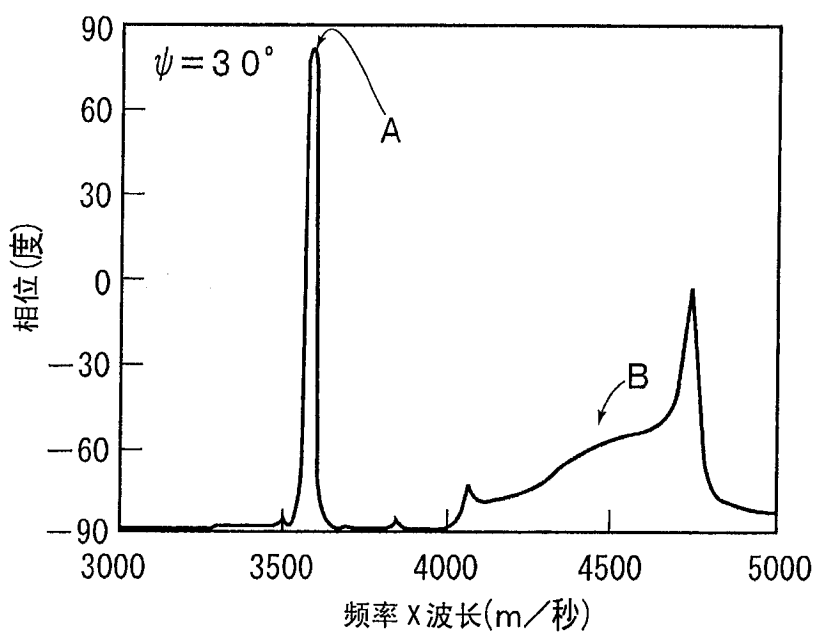


图 4

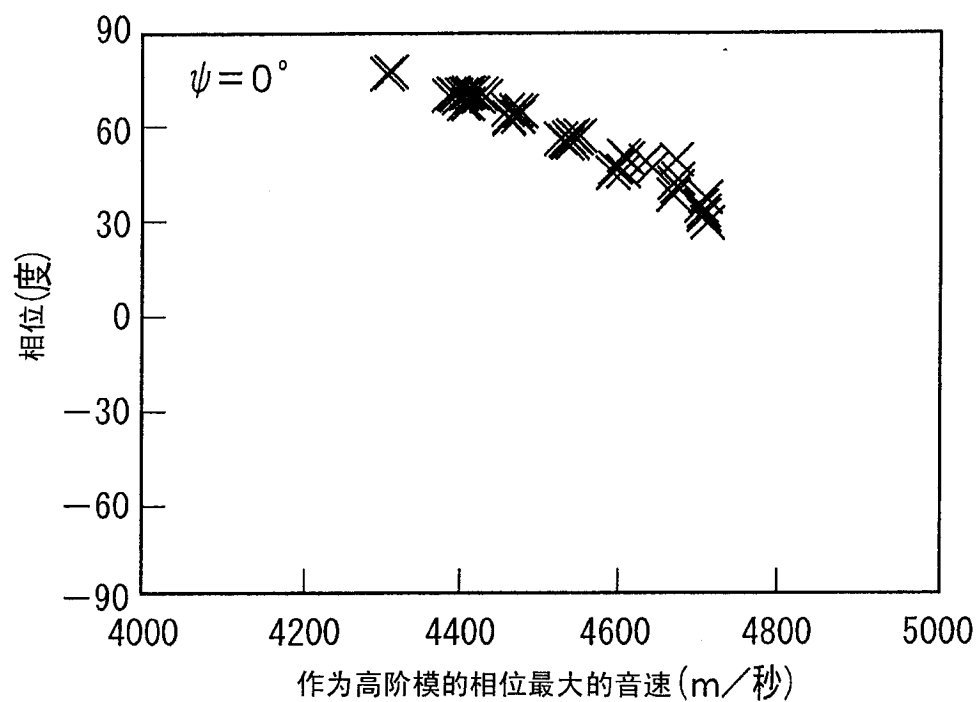


图 5

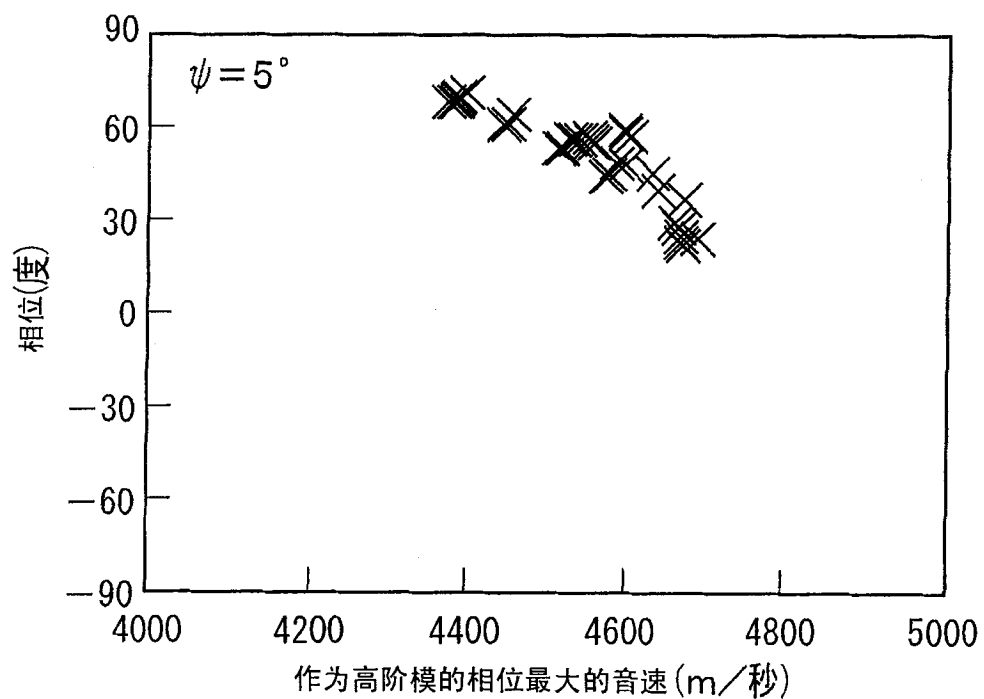


图 6

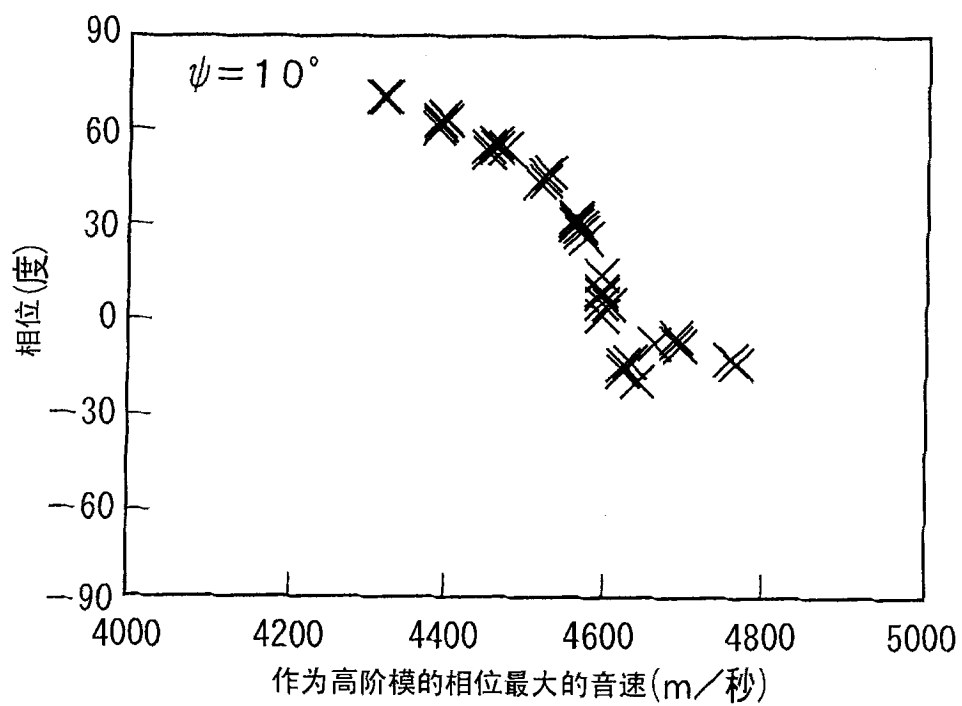


图 7

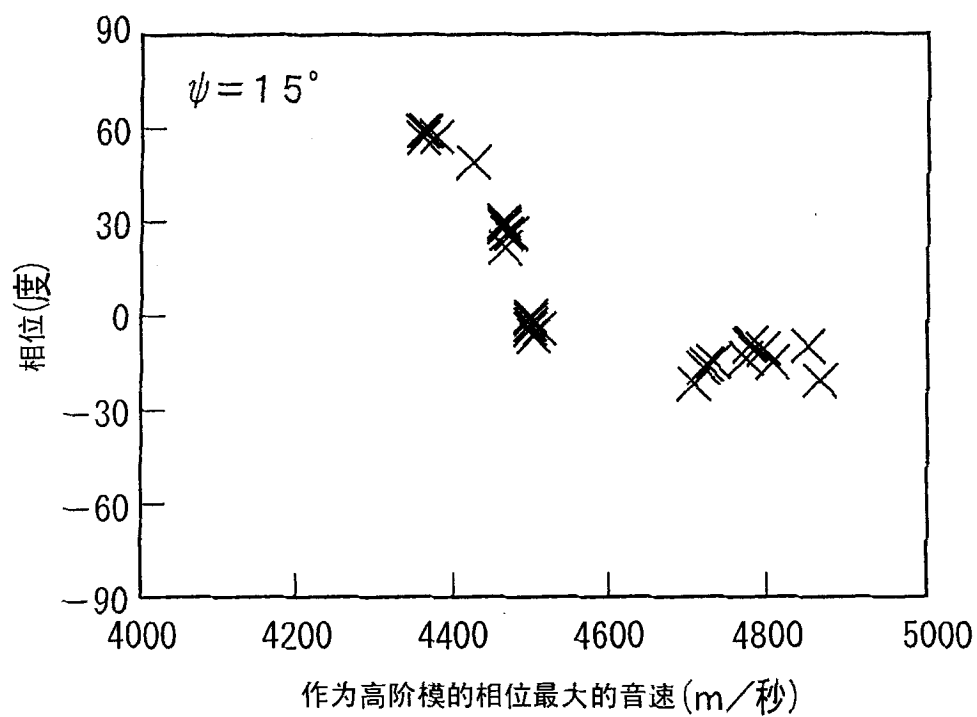


图 8

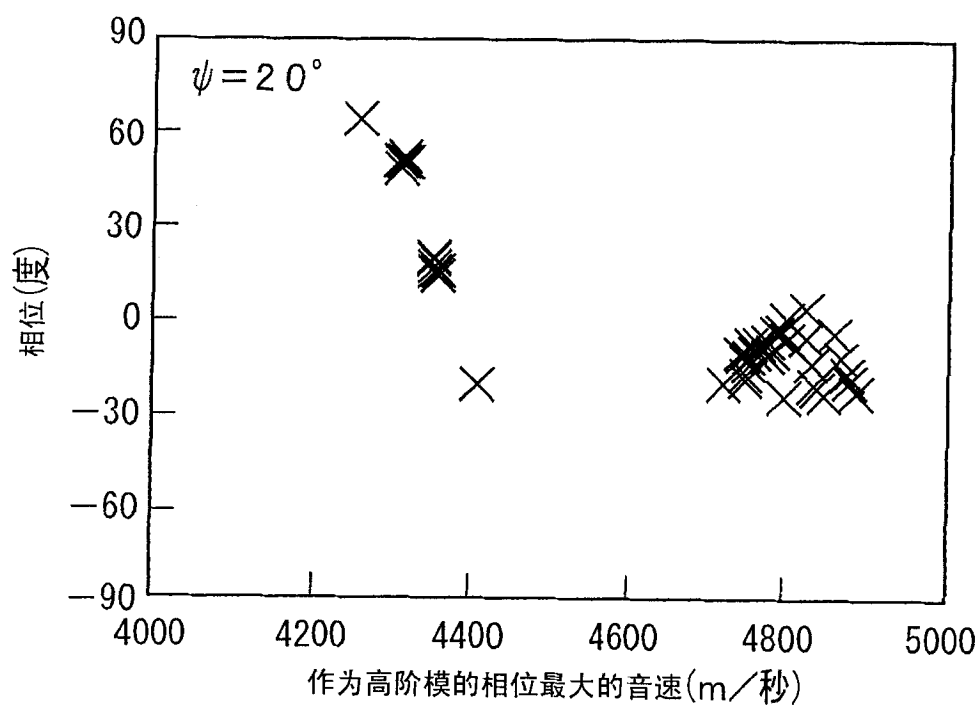


图 9

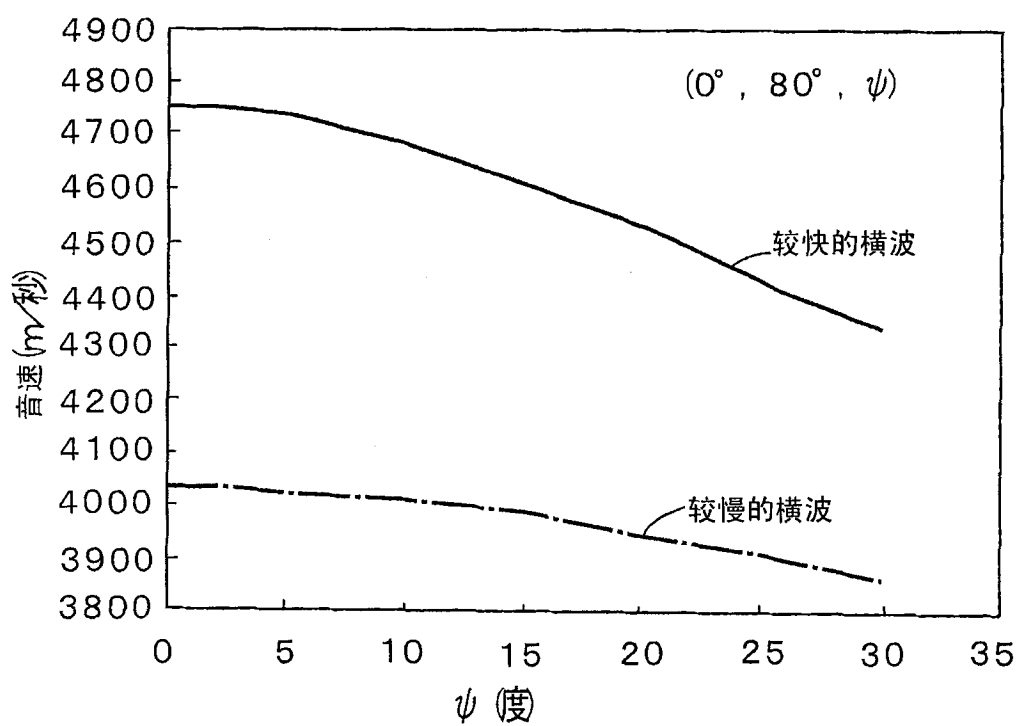
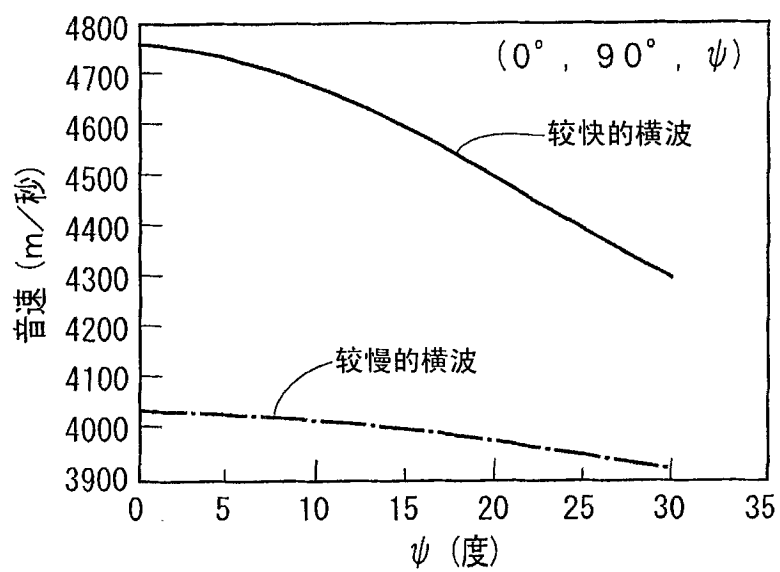


图 10



(b)

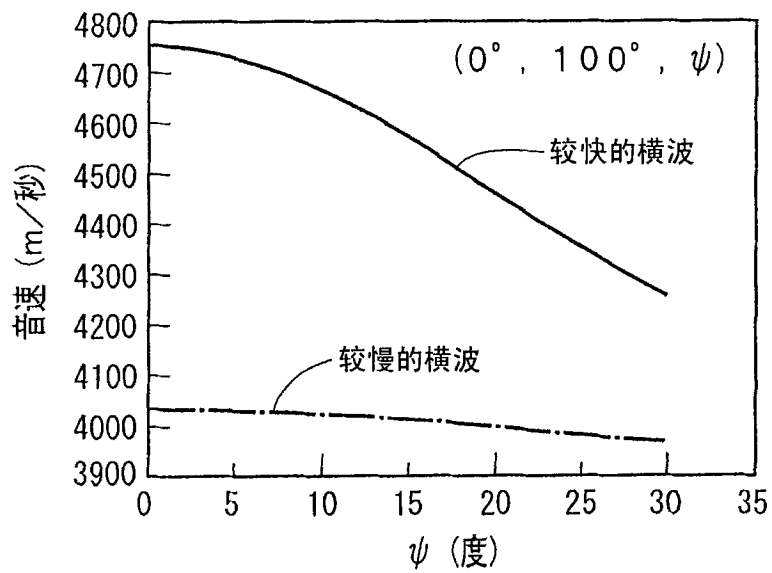
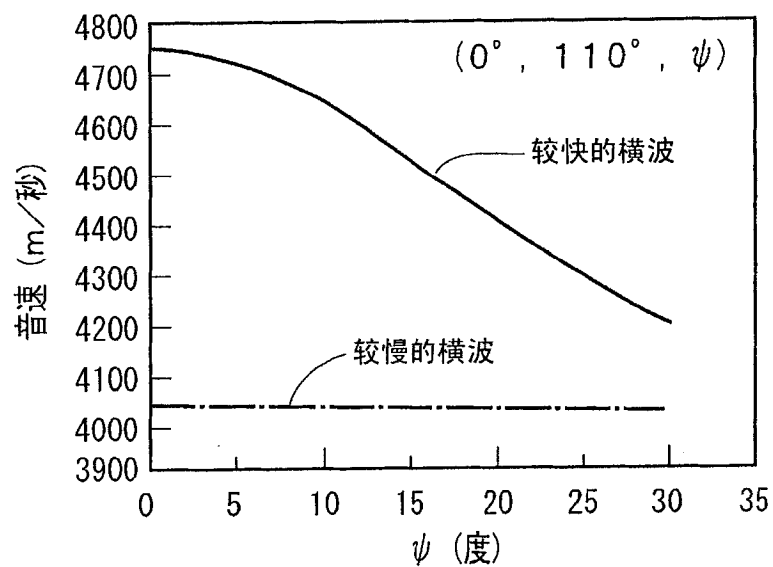


图 11

(a)



(b)

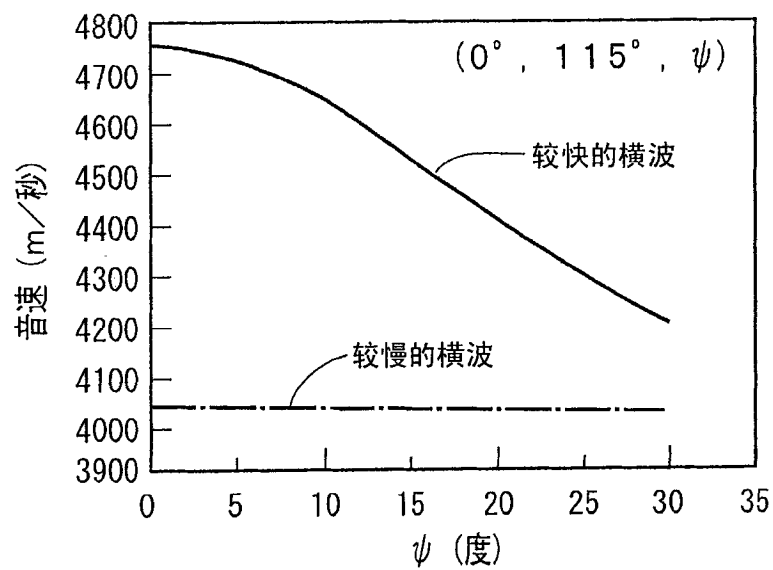


图 12

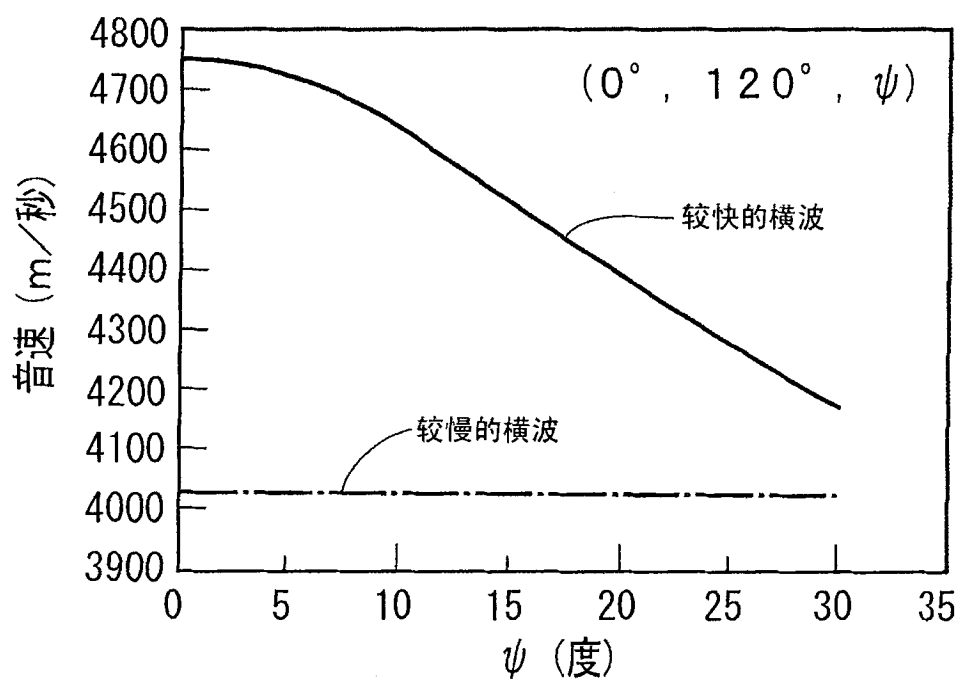


图 13

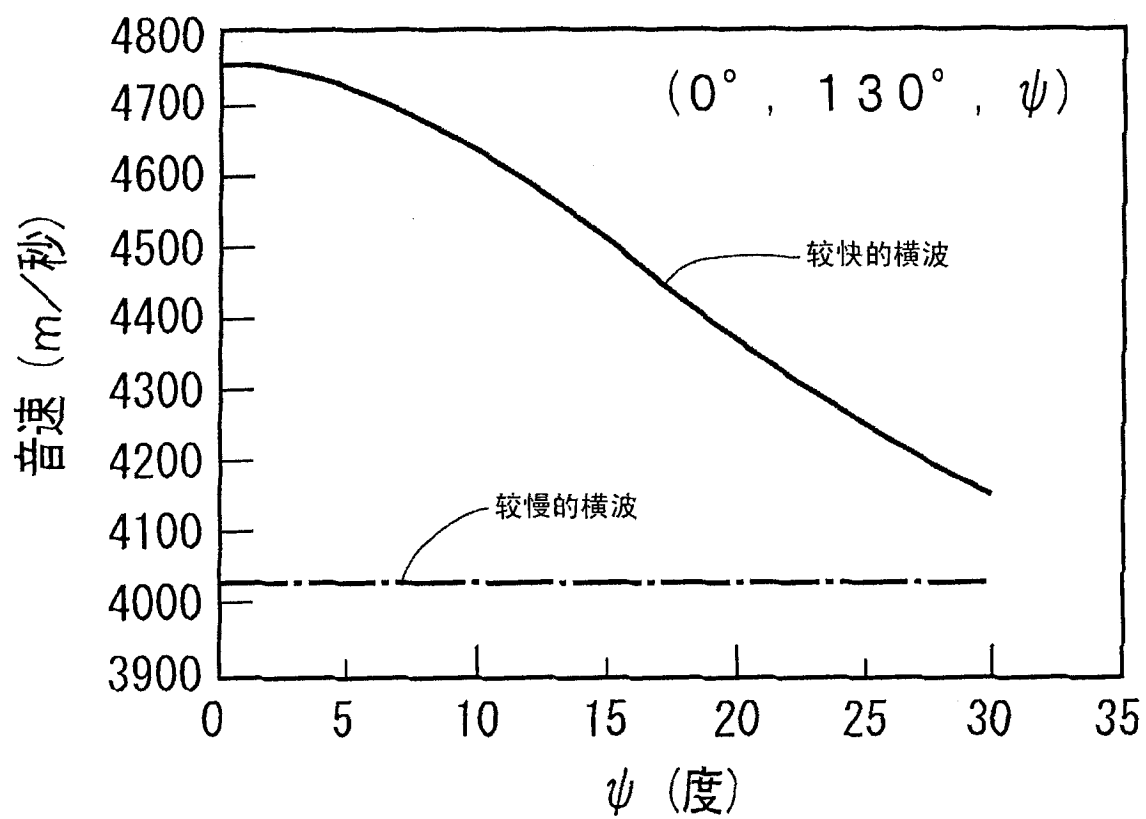


图 14

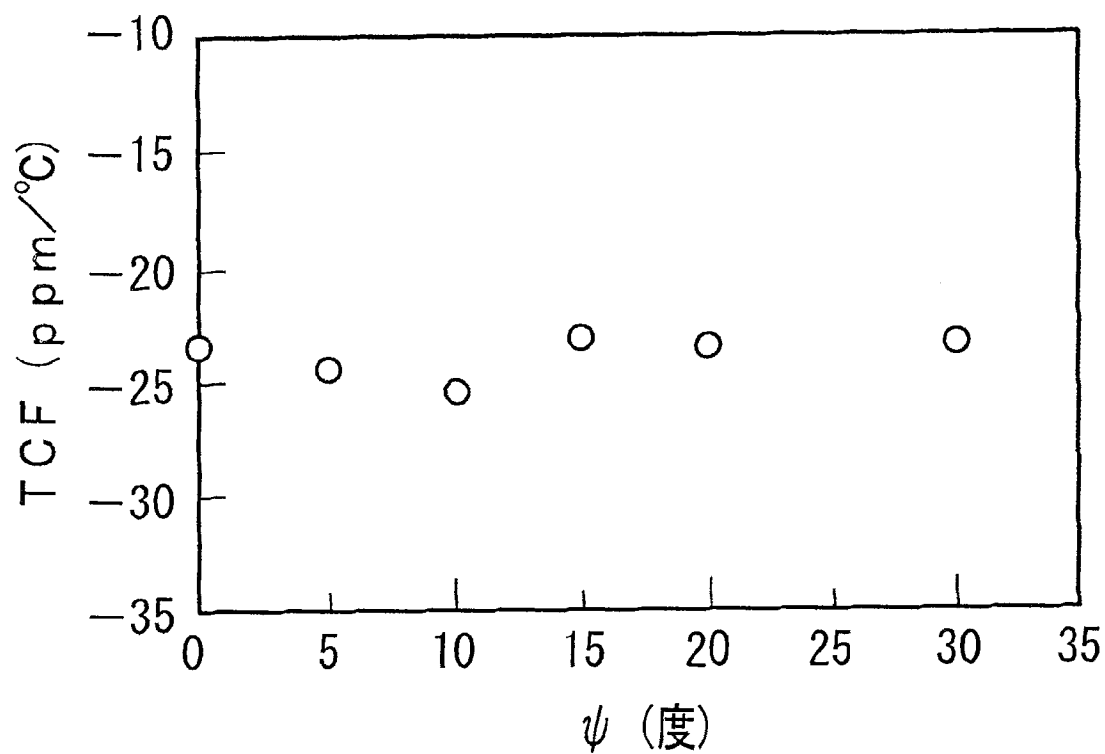


图 15

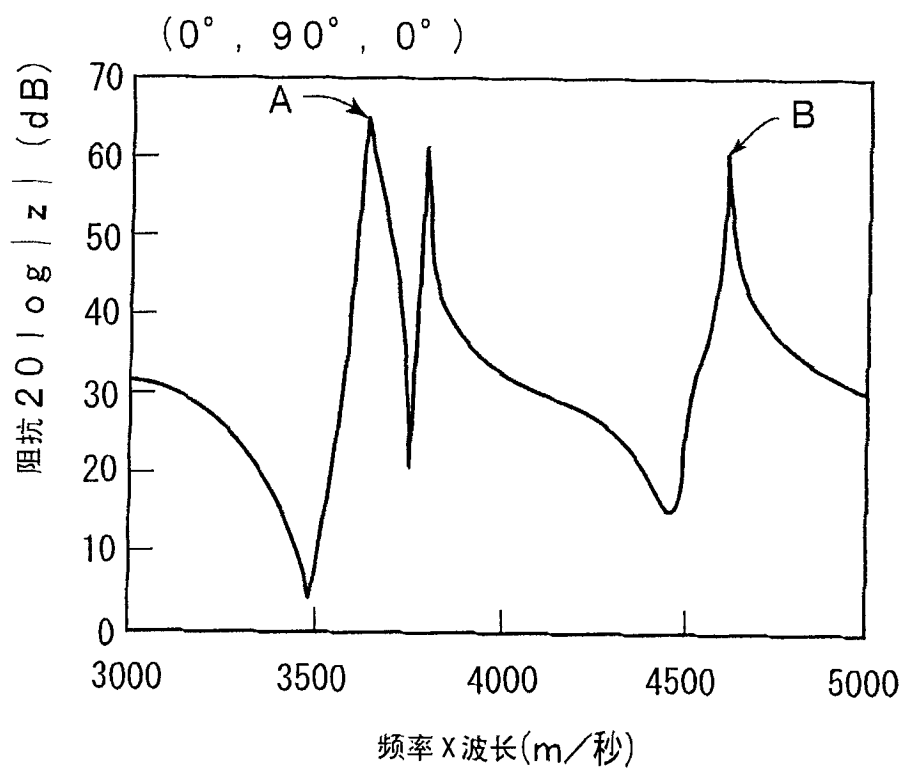


图 16

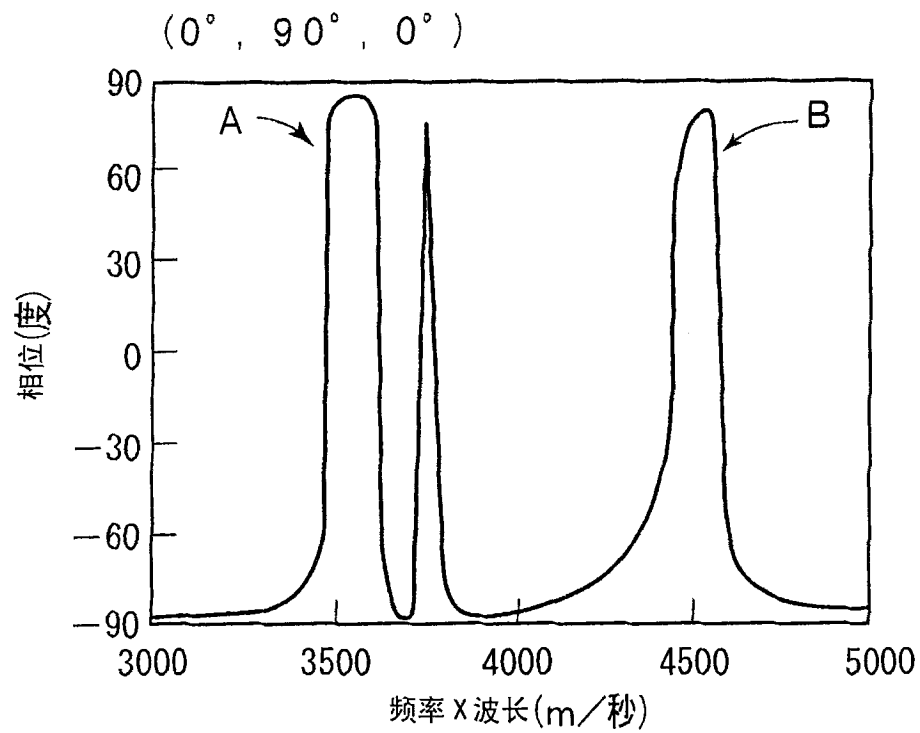


图 17

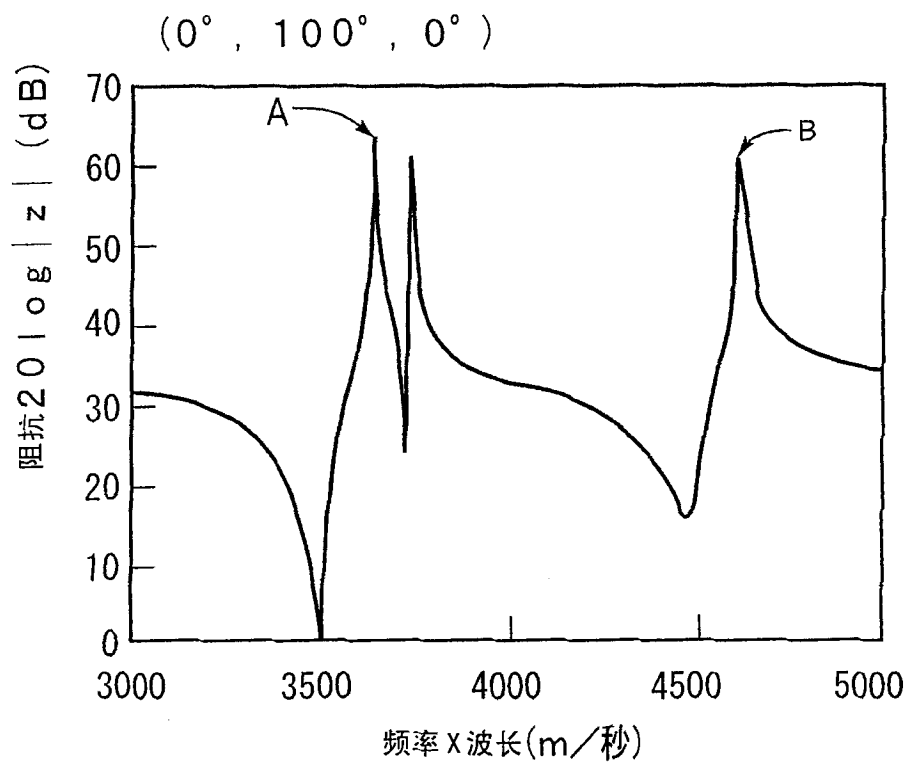


图 18

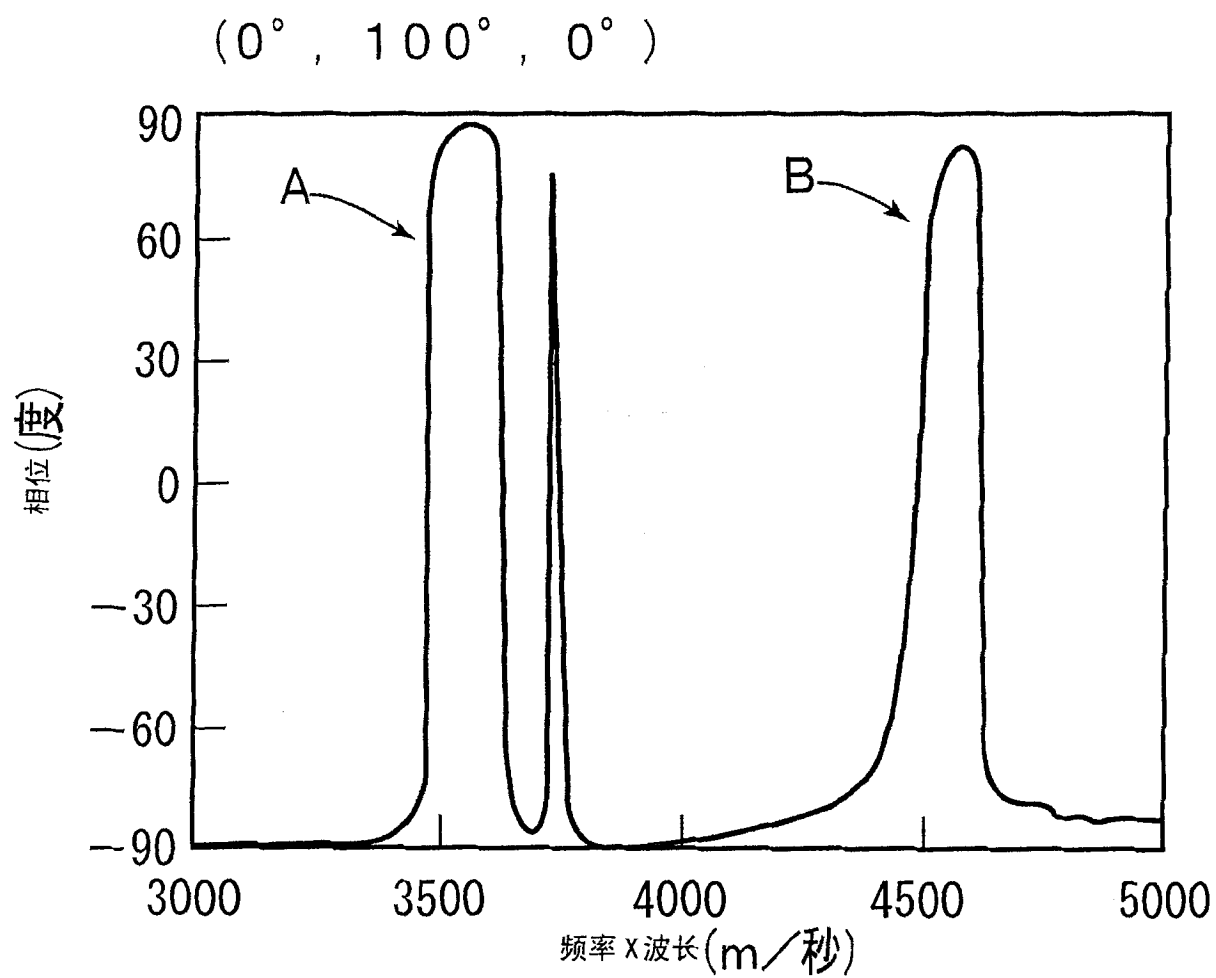


图 19

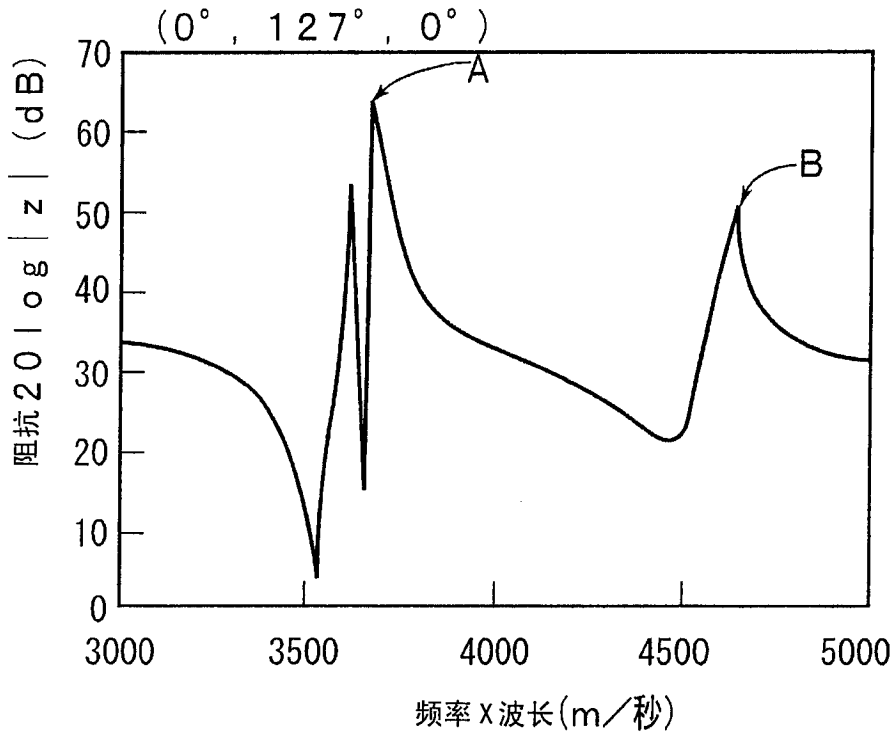


图 20

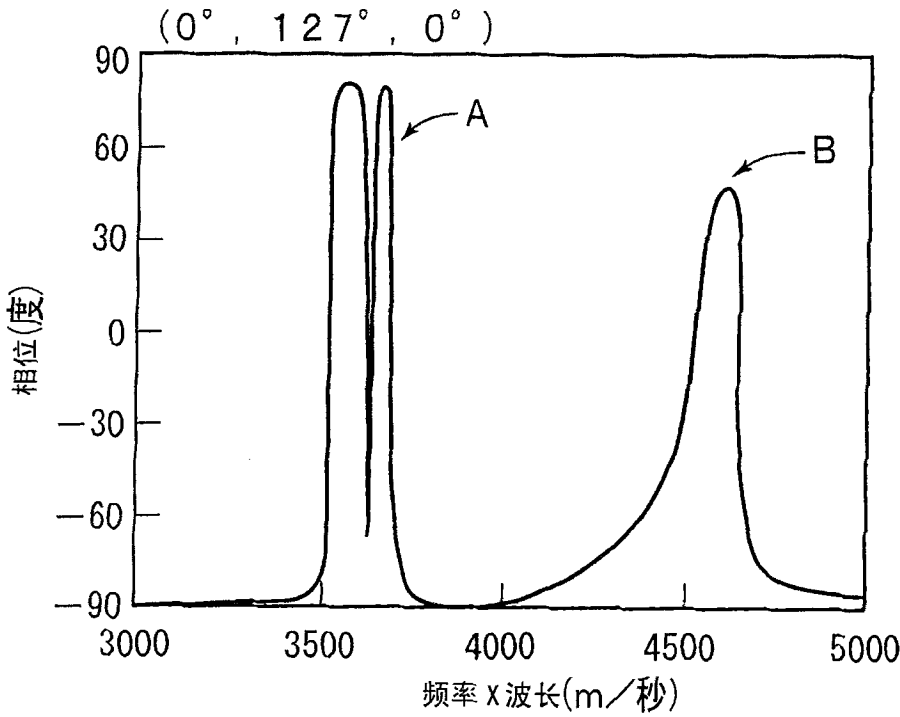


图 21

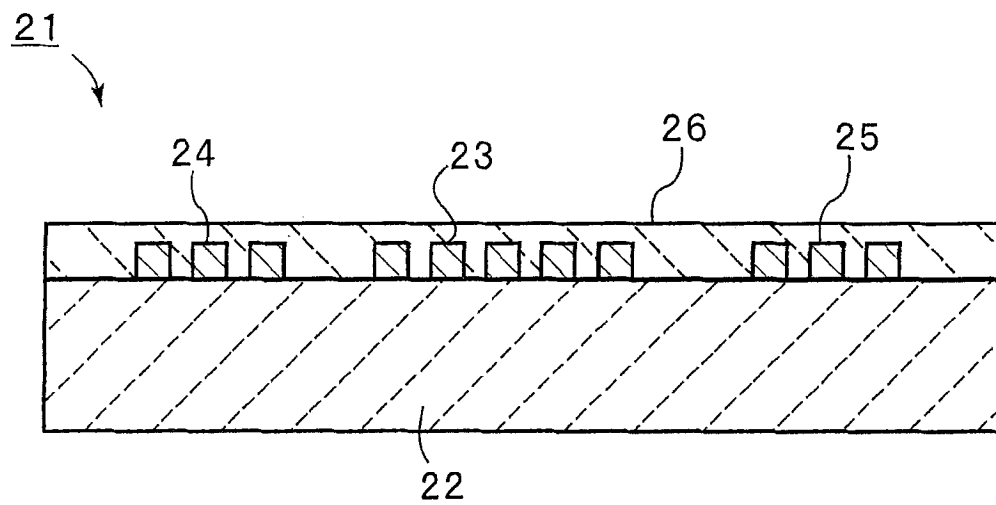
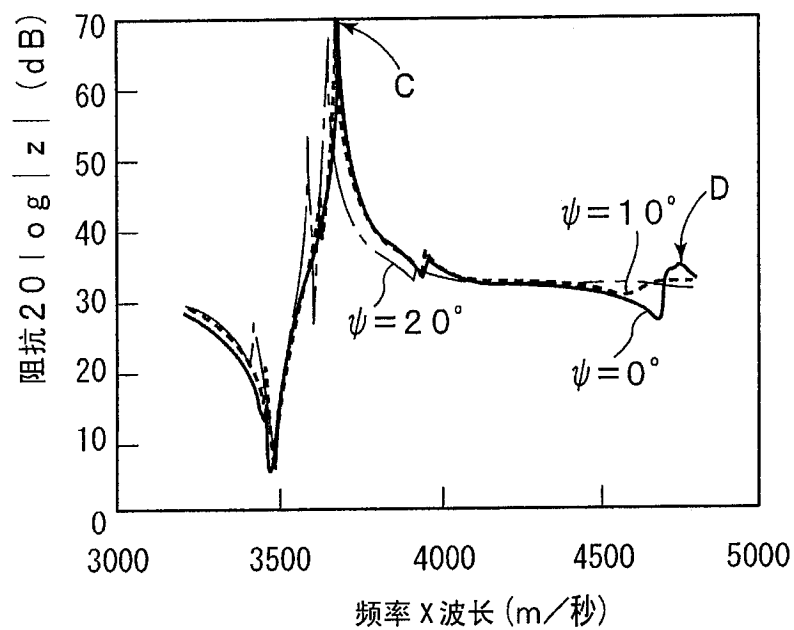


图 22

(a)



(b)

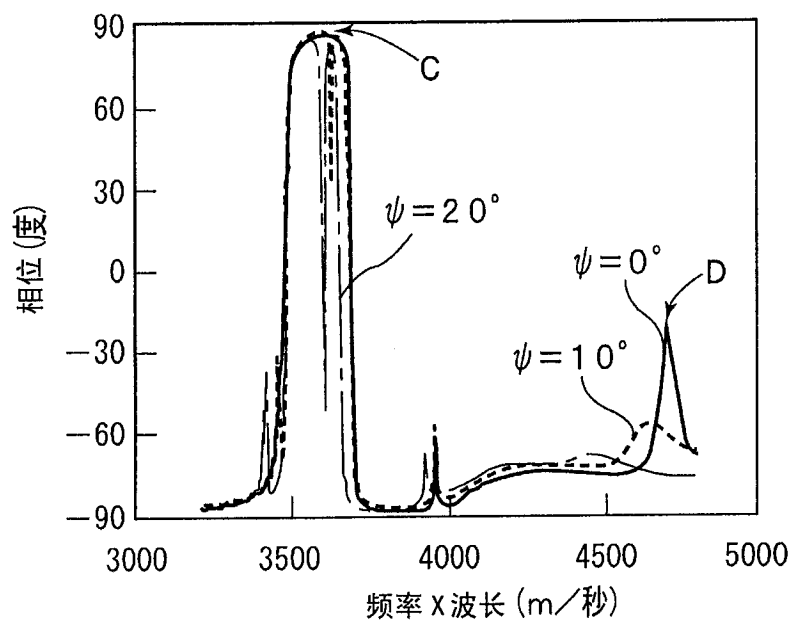


图 23

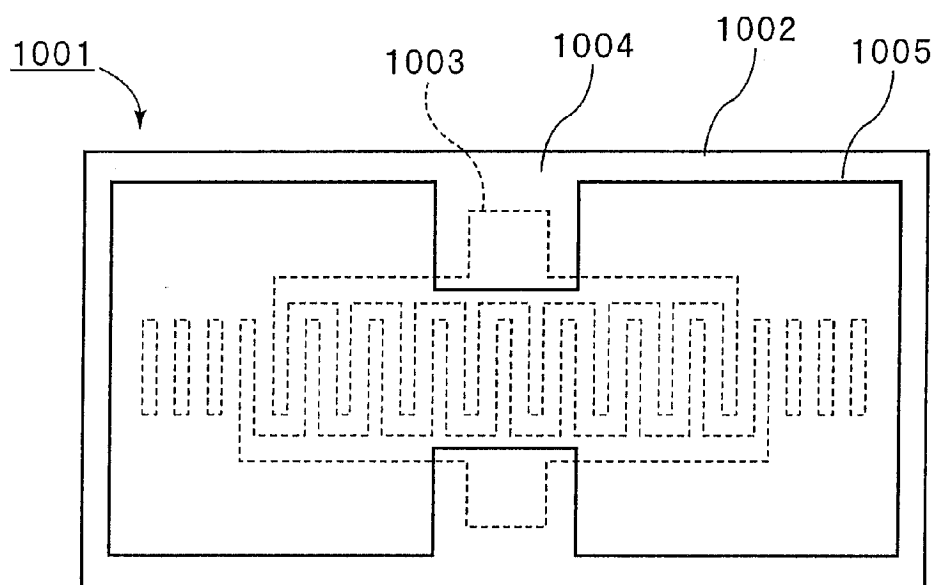


图 24

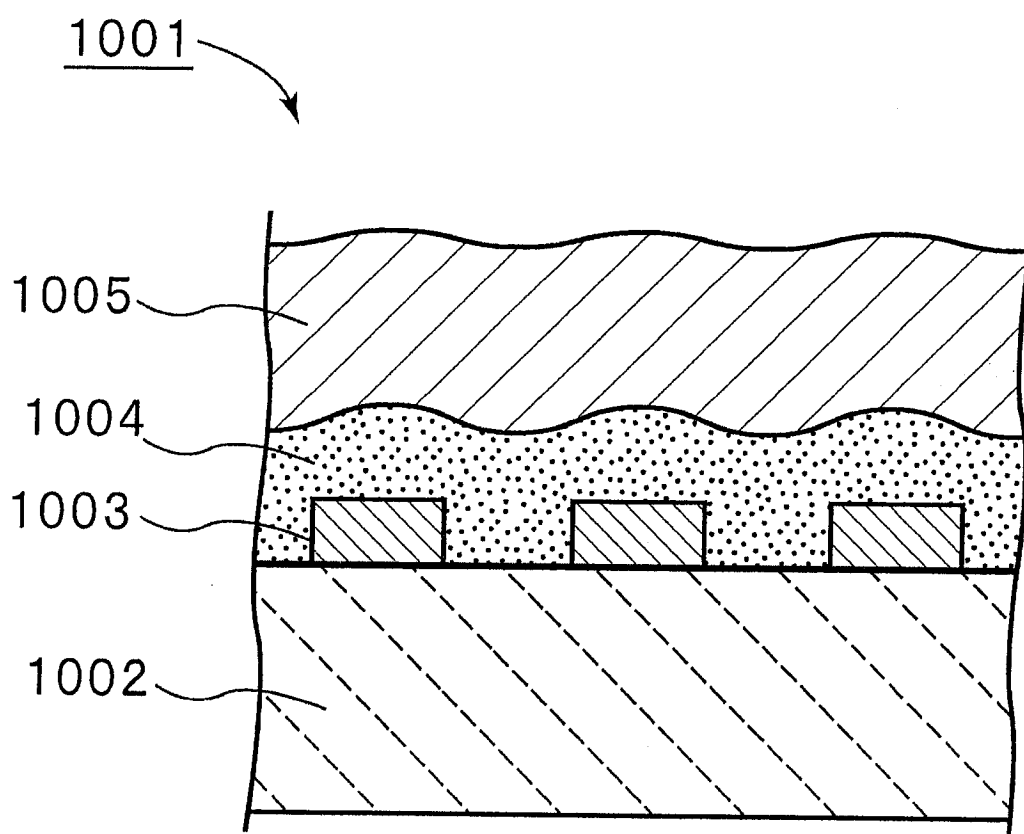


图 25