



[12] 发 明 专 利 说 明 书

[21] ZL 专利号 96121765.0

[45] 授权公告日 2004 年 9 月 15 日

[11] 授权公告号 CN 1167193C

[22] 申请日 1996. 11. 21 [21] 申请号 96121765.0

[30] 优先权

[32] 1995. 11. 21 [33] JP [31] 302860/1995

[32] 1996. 11. 13 [33] JP [31] 302095/1996

[71] 专利权人 株式会社村田制作所

地址 日本京都府

[72] 发明人 门田道雄

审查员 李 琼

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所

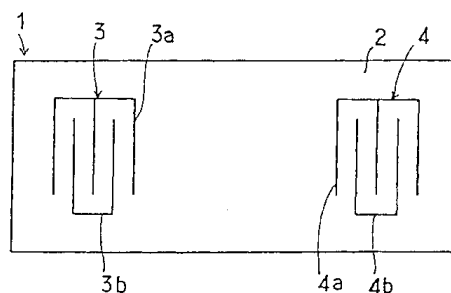
代理人 钱慰民

权利要求书 1 页 说明书 8 页 附图 8 页

[54] 发明名称 表面波器件

[57] 摘要

本发明提供了一种由石英衬底构成并可以使用高声速表面波的表面波器件。表面波器件(1)由包含其上具有 ZnO 薄膜(2b)形成压电薄膜的石英衬底的表面波衬底构成。形成的分别包含一对梳齿电极(3a, 3b, 4a, 4b)的 ITD(3, 4,)与 ZnO 薄膜(2b)接触。控制压电薄膜(2b)的厚度使之能够产生泄漏弹性表面波高次模的振荡。



1. 一种表面声波器件，其特征在于，它包含：

石英衬底；

压电薄膜，它位于所述石英衬底上；以及

多个梳齿电极，它们与所述压电薄膜接触放置；

其中，所述压电薄膜的厚度足以产生瑞利波、泄漏弹性表面声波的低次模和泄漏弹性表面声波的高次模，并且

在给定所述压电薄膜的厚度为 H ，所述泄漏弹性表面声波之高次模的波长为 λ 的情况下，所述压电薄膜相对所述波长的归一化厚度 H/λ 位于 0.28 到 0.6 的范围内。

2. 如权利要求 1 所述的表面声波器件，其特征在于，所述压电薄膜由 ZnO 制成。

3. 如权利要求 1 所述的表面声波器件，其特征在于，所述压电薄膜由选自 AlN 、 Ta_2O_5 和 CdS 中的任何一种材料制成。

表面波器件

5 本发明涉及采用石英衬底的表面波器件，更确切地说，涉及一种在石英衬底上镀覆压电薄膜形成的并使用更高次模泄漏弹性表面波的表面波器件。

以往，人们在如移动通信设备中的带通滤波器中广泛应用表面波器件，该表面波器件有一个结构，即形成与压电体接触的至少一个叉指换能器（IDT），它包含至少一对梳齿电极。这样一种表面波器件除了带通滤波器以外，已经具有各种应用形式，如谐振器和延迟线(delay line)。

用作表面波器件结构材料的有人们熟知的单晶，如 LiNbO_3 、 LiTaO_3 和石英。至今，人们已经采用了在用上述任何一种材料制得的衬底上形成 IDT 以产生瑞利(Rayleigh)波振荡的结构。

日本未经审查的公开号为 61 - 222312 的专利申请揭示了一种表面波装置，这种装置中，压电薄膜形成在石英衬底上，而梳齿电极形成在压电薄膜上。该公开的专利申请描述的表面波具有约为普通瑞利波声速 1.7 倍的声速，可以在采用大体设定为 90 度 Eulerian 角下经 ST 切割的石英衬底、并形成电极从而使表面波由于经 ST 切割而沿相对于传播方向大体成 90 度的角度方向传播的情况下使用。

采用石英衬底的表面波器件有这样一个问题，即尽管石英衬底呈现良好的温度特性，但实际上是一种由石英衬底产生的振荡表面波的瑞利波却具有较低的声速。

同时，人们知道，在采用石英衬底的表面波器件中，除了瑞利波以外，还有泄漏弹性表面波在振荡，并且这些泄漏弹性表面波的声速相当高，然而，在传输期间，泄漏弹性表面波出现很大程度的衰减。由于这个原因，目前人们认为很难在实践中采用泄漏弹性表面波。

所以，尽管石英衬底具有良好的温度特性，但是由于瑞利波使用时的低声速以及利用泄漏弹性表面波的困难，人们目前认为石英衬底是不适于作为在更高频率下工作的表面波器件的。

另外，如上所述，日本未经审查的专利公开号为 61 - 222312 的文献中揭示了一种表面波器件，这种装置可以用石英衬底构成具有高声速的表面波(即采用在大体设定为 90 度的 Eulerian 角下切割的石英衬底，并形成电极，从而由于 ST 切割，表面波沿相对于传播方向大体成 90 度的方向传播)，然而，人们认为上述现有技术中可以按照揭示的方法使用的表面波在事实上是两个相互接近的表面波的组合，所以，现有技术的装置很难应用于表面波谐振器等。

更确切地说，图 14 所示的结果是按照上述公开的文献中描述的条件制造表

面波器件、并测量表面波器件的衰耗-频率特性而得到的。图 14 所示的特性是这样
一个表面波器件的结果，即，所使用的石英衬底的 Eulerian 角为(0°, 132.75°, 90°)，
ZnO 归一化厚度 H/λ 为 0.242，并且梳齿电极的归一化厚度为 0.0207。这里， H 为压电薄膜的厚度， λ 为表面波的波长。

5 从图 14 可以看到，普通的瑞利波出现在用箭头 A 表示的频率处，而另一表面波在由箭头 B 表示的频率下振荡。这里，将由箭头 A 表示的普通瑞利波的频率乘以 7.4 λ 得到的值约为将由箭头 B 表示的表面波的频率乘以 7.4 λ 得到的值的 0.625 倍。

10 因此，可以理解，上述日本未经审查的专利申请公开号 61 - 222312 中描述的具有高声速的波与图 14 中用箭头 B 表示的波对应。但是，用箭头 B 表示的波是人们已经知道的如图中所示的关系密切的已有 SSB 波和 ST 波。因为这两个不同的波如图 14 中用箭头 B 表示的那样相互靠近，所以这两个波之间存在用箭头所示的凹部。

15 换句话说，尽管上述未经审查的日本专利公开号 61 - 222312 中描述了可以使用比普通瑞利波 A 的声速高的波，但是，现有技术中建议可以使用的更高声速的波事实上是相互接近的两种波的组合形式，所以在两个波之间必然产生一凹部。因此，即使用这样一种更高声速的波构筑表面波谐振器，也无法得到满意的特性。而且，当用这样一种更高声速的波制作谐振器时，必须增加叉指电极的对数，这样就产生另一个问题，即谐振器的尺寸增大。

20 本发明的目的在于提供一种采用石英衬底的表面波器件，这种器件可以利用高声速，适用于在更高频率下运行，并确保满意的谐振和滤波特性。

为了实现上述目标，本申请的发明人进行了深入的研究，发现可以用包含有其上形成了压电薄膜(如 ZnO)的石英衬底的复合衬底、以及用具有高声速的更高次模泄漏弹性表面波来实现上述目标并完成本发明。

25 更确切地说，按照本发明的第一个广泛方面，提供了一种表面波器件，这种器件包含石英衬底、在该石英衬底上形成的压电薄膜，以及与压电薄膜接触而形成的梳齿电极，形成的压电薄膜其厚度能够使高次模的泄漏弹性表面波振荡，从而表面波器件以高次模泄漏弹性表面波工作。

30 以前，人们认为在透射(transmission)时由于衰耗大很难在实践中应用泄漏弹性表面波。不管人们在本领域中的习惯认识如何，本申请的发明人认为可以通过恰当选择石英衬底的切割角以及波的传播方向来减小泄漏弹性表面波的衰耗，并且可以用高次模泄漏弹性表面波来获得更高的声速。基于这一考虑，本发明人用高次模的泄漏弹性表面波制造并试验了表面波器件的样品。结果发现，可以通过在石英衬底上形成压电薄膜(如 ZnO)、形成与该压电薄膜接触的梳齿电极并控制
35 压电薄膜的厚度使高次模的泄漏弹性表面波振荡来得到产生高声速和适于在更高频下工作的表面波器件。

换言之，我们已经根据按照启发本申请发明人的上述原理并经实验确认的上述发现制得了本发明。这一原理并非是以往共同的技术概念(即由于透射时衰耗大而较难在实践中应用泄漏弹性表面波)的简单延伸。因此，应当理解，本发明不是从普通的常规实验得到的。

- 5 按照本发明的具体方面，给定压电薄膜的厚度为 H ，并且高次模的泄漏弹性表面波波长为 λ ，则对于该波长来说，压电薄膜的归一化厚度 H/λ 处在 0.28 至 0.6 的范围内。在镀覆石英衬底上的压电薄膜形成的合成衬底中，通过设置压电薄膜的归一化厚度 H/λ 使之落在上述特定范围内来确保高次模泄漏弹性表面波的振荡。尽管压电薄膜归一化厚度 H/λ 的数值取决于所使用的压电薄膜的种类、
10 石英衬底的切割角等等，但可以通过设置该数值使之不小于 0.28 来确保高次泄漏弹性表面波的振荡。

压电薄膜可以由任何一种合适的材料制成，只要该材料具有压电性能就行。通常采用的薄膜材料是 ZnO 、 AlN 、 Ta_2O_5 、 CdS 等等。最好如权利要求 2 所述的那样，把 ZnO 薄膜用作压电薄膜。

- 15 在按照本发明第一个方面的表面波器件的最佳形式中，压电薄膜是用 ZnO 制成的，并且 ZnO 压电薄膜的归一化厚度 H/λ 在 0.28 到 0.6 的范围内。

按照本发明的第二个广泛的方面，提供的表面波器件包含一石英衬底、形成在石英衬底上的压电薄膜和与压电薄膜接触而形成的梳齿电极，其中，石英衬底、压电薄膜和梳齿电极的形成使泄漏弹性表面波的高次模振荡，并防止泄漏弹性表面波在传输期间衰耗。
20

同时，在按照本发明第二个广泛方面的表面波器件中，压电薄膜最好用 ZnO 制成。

另外，在按照第二个广泛方面的表面波器件中，压电薄膜的归一化厚度 H/λ 最好在 0.28 到 0.6 的范围内。这可以使泄漏弹性表面波的更高次模可靠振荡。

- 25 在按照本发明第二个方面的表面波器件最佳形式中，采用上述最佳形式，压电薄膜由 ZnO 制成， ZnO 压电薄膜的归一化厚度 H/λ 在 0.28 到 0.6 的范围内。

此外，在按照本发明第二个广泛方面的表面波器件中，压电薄膜可以由从含有 AlN 、 Ta_2O_5 和 CdS 的材料组中选出一材料制成。

- 30 图 1A 和 1B 是用作采用本发明的一种形式表面波器件的表面波滤波器的示意图和局部剖面图。

图 2 是当采用具有 Eulerian 角 $(0, 141, 0)$ 的石英衬底时，由石英衬底/ ZnO 压电薄膜组成的合成衬底中表面波声速和 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 之间的关系图。

- 35 图 3 是用实施例 1 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和温度特征 TCD 的关系图。

图 4 是用实施例 1 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和电气

机械耦合系数之间的关系图。

图 5 是用实施例 1 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和电气机械耦合系数之间的关系图。

图 6 是当采用具有 Eulerian 角(0, 132.75, 90)的石英衬底时,由石英衬底/ZnO 压电薄膜组成的合成衬底中表面波声速和 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 之间的关系图。

图 7 是用实施例 2 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和温度特征 TCD 之间的关系图。

图 8 是用实施例 2 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和电气机械耦合系数之间的关系图。

图 9 是用实施例 2 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和电气机械耦合系数之间的关系图。

图 10 是当使用具有 Eulerian 角(0, 150, 0)的石英衬底时由石英衬底/ZnO 压电薄膜中表面波声速和 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 之间的关系图。

图 11 是用实施例 3 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和电气机械耦合系数之间的关系图。

图 12 是用实施例 3 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和电气机械耦合系数之间的关系图。

图 13 是用实施例 3 制成的表面波器件中 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 和温度特征 TCD 之间的关系图。

图 14 是说明现有技术所揭示的表面波器件中所使用的高声速表面波的衰耗一频率特性的曲线图。

采用本发明的表面波器件其特定形状并没有特别的限制。这种表面波器件可以通过如表面波滤波器来构成,表面波滤波器是如图 1A 和 1B 所示意描述的一种横向带通滤波器。表面波滤波器 1 由表面波衬底 2 构成,表面波衬底 2 上的 IDT 3 和 4 之间具有预定的间隔。IDT 3 和 4 分别包含一对梳齿电极 3a、3b、4a、4b,这两对电极都成叉指关系排列。表面波衬底 2 具有这样一种结构,即压电薄膜 2b 形成在石英衬底 2a 上。在这种结构中, IDT 3 和 4 可以在压电薄膜 2b 的上表面或下表面上形成。同样,短路电极(未图示)可以在压电薄膜 2b 的上表面或下表面上。

这里要注意的是,采用本发明的表面波器件并非仅限于上述表面波滤波器,本发明也可以用于各种表面波器件,如表面波振荡器和表面波延迟线。

下面参照附图描述本发明的各种实施例,以便更清楚地理解本发明。

35 实施例 1

图 2 是表面波衬底中产生的表面波声速图，每一个表面波衬底包含石英衬底上形成有压电薄膜 ZnO。所使用的石英衬底的 Eulerian 角为(0, 141, 0)，尺寸为直径 7.62 mm x 厚度 0.5 mm。表面波衬底是通过在整个石英衬底的表面上形成各种厚度的 ZnO 薄膜制成的。

- 5 测量以上述方法制得的、具有不同 ZnO 薄膜厚度的不同表面波衬底表面波声速。声速的测量是以下述方法进行的。

声速的测量：在每一块表面波衬底上形成波长覆盖范围为 $7\ \mu\text{m}$ 到 $52\ \mu\text{m}$ 的 ITD，并根据产生的 SAW(表面声波)滤波器的中间频率确定声速。

从图 2 可以清楚地看到，当 ZnO 薄膜的归一化厚度

- 10 H/λ 为 0 时，即，当没有 ZnO 薄膜时，振荡的只有瑞利波和泄漏弹性表面波的基模(LSAW1)。相反，对于每一块都包含石英衬底表面波衬底来说，并且在石英衬底上形成有 ZnO 薄膜时，振荡的还有 Sezawa 波，以及高次模瑞利波和高次模(LSAW 2)泄漏弹性表面波。

- 15 同样，从图 2 可以清楚地看出，当 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 不低于 0.28 时，产生高次模(LSAW 2)泄漏弹性表面波振荡，并且呈现相当高的声速。例如，当 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 是 0.32 时，声速为 5000m/sec，是瑞利波声速最大值的 1.6 倍，即，没有 ZnO 薄膜时石英衬底中瑞利波的声速 = 3170m/sec。

- 20 因此，应当理解，当采用在具有 Eulerian 角(0, 141, 0)的石英衬底上形成 ZnO 薄膜而制得的表面波衬底时，可以通过选择 ZnO 薄膜归一化厚度 H/λ 使之不小于 0.28 来获得具有高声速的表面波器件。

- 25 图 3 是表面波器件中温度特性(TCD)和 ZnO 薄膜归一化厚度 H/λ 之间的关系图，其中，每一个表面波器件都是由在具有 Eulerian 角(0, 141, 0)的石英衬底上形成压电薄膜而制得的表面波衬底构筑而成的。从图 3 可以看出，与没有 ZnO 薄膜的石英衬底中的 TCD 相比，具有镀覆 ZnO 薄膜的表面波衬底中的 TCD 移向正侧。所以可以理解，采用具有负 TCD 值的石英衬底，并镀覆 ZnO 薄膜，可以使 TCD 值更接近 ± 0 ，所以可以获得具有良好温度特征的表面波器件。

- 30 图 4 和图 5 是表面波器件中电气机械耦合系数和 ZnO 薄膜的归一化厚度之间的关系图，其中，每一个表面波器件是由在具有 Eulerian 角(0, 141, 0)的石英衬底上形成压电薄膜而制得的表面波衬底构筑而成的。图 4 描述的是在 ZnO 薄膜的上表面形成 IDT(即梳齿电极)时的特征，图 5 描述的是在 ZnO 薄膜的上表面上形成 IDT 并且在 ZnO 薄膜和石英衬底之间的界面处形成短路电极时得到的特征。

- 35 如图 4 和图 5 所示的任一种表面波器件中，均产生高次模 LSAW 2 泄漏弹性表面波振荡，并得到相对较高的电气机械耦合系数。

实施例 2

除了采用具有 Eulerian 角(0, 132.75, 89)、并以 89°角切割石英衬底, 以适用于透射外, 表面波器件是以与实施例 1 中相同的方式制造的。所使用的每一个石英衬底其尺寸为直径 7.62mm x 厚度 0.5mm。

5 图 6 描述的是表面波器件中表面波的声速和 ZnO 薄膜归一化厚度 H/λ 之间的关系, 其中, 形成的 ZnO 薄膜具有各种厚度。从图 6 可以看出, 采用具有上述切割角的石英衬底时, 如果 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 不小于 0.28, 则也产生高次模 LSAW 2 泄漏弹性表面波的振荡。另外, 当 ZnO 薄膜的归一化厚度超过 0.6 时, 产生的是 Sezawa 波的高次模 Sezawa2 的振荡, 而不是泄漏弹性表面波的高次模 LSAW2 的振荡。

10 因此, 应当理解, 在实施例 2 的表面波器件中, 通过选择 ZnO 薄膜的归一化厚度使之落在 0.28 到 0.6 的范围内来产生高次模泄漏弹性表面波振荡, 因而可以采用具有比瑞利波已有最大声速更高声速的高次模泄漏弹性表面波。

图 7 与图 3 相应, 描述的是上述表面波器件中的温度特性和 ZnO 薄膜归一化厚度 H/λ 之间的关系。从图 7 可以看出, 在用具有 Eulerian 角(0, 132.75, 89)的石英衬底上形成 ZnO 薄膜而制得的每一个表面波器件中, 可以通过增加 ZnO 薄膜的厚度将温度特征 TCD 移向正侧。所以可以理解, 与实施例 1 的情况相同, 可以通过将具有负温度特征 TCD 的石英衬底和 ZnO 薄膜组合在一起而得到具有温度特征值约为 ± 0 的表面波器件。

20 图 8 和图 9 分别与图 4 和 5 相应, 均描述的是通过在具有 Eulerian 角(0, 132.75, 89)的石英衬底上形成压电薄膜而制得的每一个表面波器件中电气机械耦合系数和 ZnO 薄膜归一化厚度 H/λ 之间的关系。

可以理解的是, 如果采用具有 Eulerian 角(0, 132.75, 89)的石英衬底, 则通过在石英衬底上的镀覆 ZnO 薄膜可以获得具有足够大电气机械耦合系数的表面波器件。

25 顺便指出, 图 8 描述的是在 ZnO 薄膜的上表面形成梳齿电极时的特征, 图 9 描述的是在 ZnO 薄膜的下表面上形成梳齿电极时的特征。

30 实施例 3

除了采用具有 Eulerian 角(0, 150, 0)的石英衬底以外, 这里的表面波器件是用与实施例 1 中相同的方式制得的。图 10 描述的是表面波器件中表面波的声速和 ZnO 薄膜归一化厚度 H/λ 之间的关系, 不同的 H/λ 意味着在这些 Eulerian 角的石英衬底上的 ZnO 薄膜具有各种不同的厚度。

35 从图 10 可以看出, 如果采用具有 Eulerian 角(0, 150, 0)的石英衬底, 则当 ZnO 薄膜的归一化厚度 H/λ 落在 0.28 到 0.6 的范围内时, 产生泄漏弹性表面波高

次模 LSAW 2 的振荡, 并且可以获得高声速。

图 11 和 12 描述的是在上述制造的表面波器件中, ZnO 薄膜的电气机械耦合系数和 ZnO 薄膜归一化厚度 H/λ 之间的关系。图 11 描述的是在 ZnO 薄膜上表面上形成梳齿电极时得到的特征, 而图 12 描述的是在 ZnO 薄膜的上表面形成梳齿电极以及在 ZnO 薄膜和石英衬底之间的整个界面处形成由 Al 制成的短路电极时得到特征。

从图 11 和 12 可以看出, 如果采用具有 Eulerian 角(0, 150, 0)的石英衬底, 则通过在石英衬底上形成 ZnO 薄膜而构筑成的表面波衬底也可以得到足够大的电气机械耦合系数。

图 13 描述的是用具有 Eulerian 角(0, 150, 0)的石英衬底时, 表面波器件中的温度特征 TCD 和 ZnO 薄膜中归一化厚度 H/λ 之间的关系。从图 13 可以看出, 在这些表面波器件中, 由于形成了 ZnO 薄膜, 因而泄漏弹性表面波高次模 LSAW2 的温度特征 TCD 也移向正侧。所以可以理解, 通过将具有温度特征 TCD 负值的石英衬底和 ZnO 薄膜组合在一起, 可以得到具有温度特征 TCD 值约 ± 0 的表面波器件。

如上所述, 按照本发明第一个方面的表面波器件, 由于压电薄膜是形成在石英衬底上的、形成的梳齿电极与该压电薄膜接触、并且选择压电薄膜的厚度使之能够产生泄漏弹性表面波高次模的振荡, 因此, 与普通由石英衬底构筑并且利用瑞利波的表面波器件相比, 可以使用具有更高声速和更大电气机械耦合系数的表面波。另外, 该表面波器件易于在更高频下工作。

特别是, 通过选择压电薄膜的归一化厚度使之落在 0.28 到 0.6 的范围内, 可以确保泄漏弹性表面波的振荡。

采用按照本发明第二个方面的表面波器件, 并且在该结构中, 压电薄膜形成在石英衬底上, 并且梳齿电极的形成与压电薄膜接触, 那么, 形成的石英衬底、压电薄膜和梳齿电极可以使泄漏弹性表面波以高次模振荡, 并防止泄漏弹性表面波的更高次模在传输期间衰减。因此, 与普通由石英衬底构筑并且利用瑞利波的表面波器件相比, 可以使用具有更高声速和更大电气机械耦合系数的表面波。另外, 该表面波器件易于在更高频下工作。

同时, 在按照本发明第二个方面的表面波器件中, 通过将压电薄膜的归一化厚度 H/λ 选择在 0.28 到 0.6 的范围内, 可以确保与采用前述装置一样产生泄漏弹性表面波的更高次模的振荡。

另外, 日本未经审查的专利公开号 61 - 222312 中描述了一种可以将具有比普通瑞利波具有更高声速的波应用于采用石英衬底的表面波器件的情况, 但是, 按照所揭示的方法的现有技术器件中所采用的表面波事实上是 SSB 波和 STW 波的组合, 并且频率特性必定在相邻峰值之间产生一凹部。所以, 当将现有技术的器件用作表面波谐振器或表面波滤波器时, 不可能获得满意的特性。另外, 当用

现有技术的器件制造谐振器时，必须增加叉指电极的对数，从而产生另一个问题，即谐振器的尺寸增大。相反，在按照本发明第一个方面或第二个方面的表面波器件中，由于采用了泄漏弹性表面波的更高次模，即，由于采用的表面波不是两个波的组合，所以，不会在频率特性中产生凹部。因此，当采用本发明第一个或第二个方面的表面波器件来构筑表面波谐振器或表面波滤波器时，可以获得满意的谐振和滤波特性。此外，由于在不增加叉指电极对数的情况下可以获得充分的谐振特性，所以，可以减小表面波器件的尺寸。

因此，本发明提供了一种可以在更高频下工作的表面波器件。另外因为采用的是具有良好温度特征的石英衬底，所以可以容易地提供一种具有良好温度特征的表面波器件，即，不管环境温度的变化，该器件都具有稳定的特征。

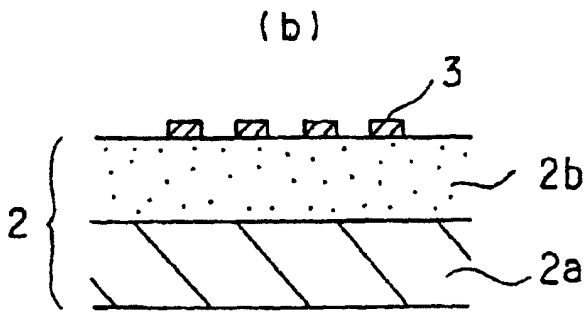
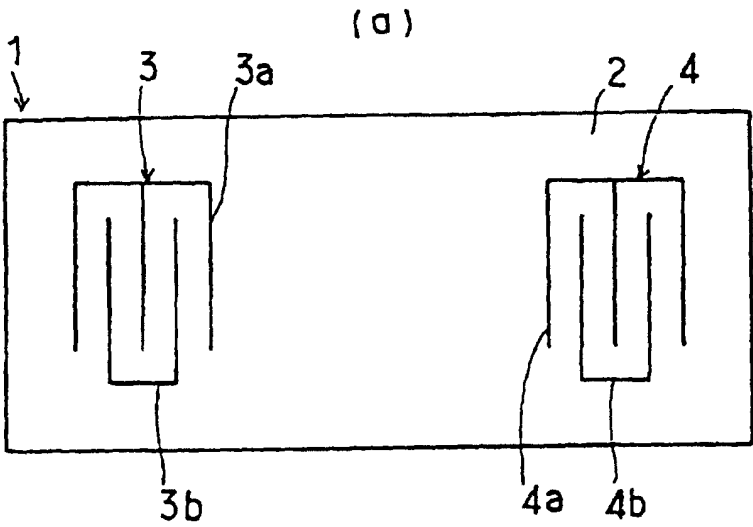


图 1

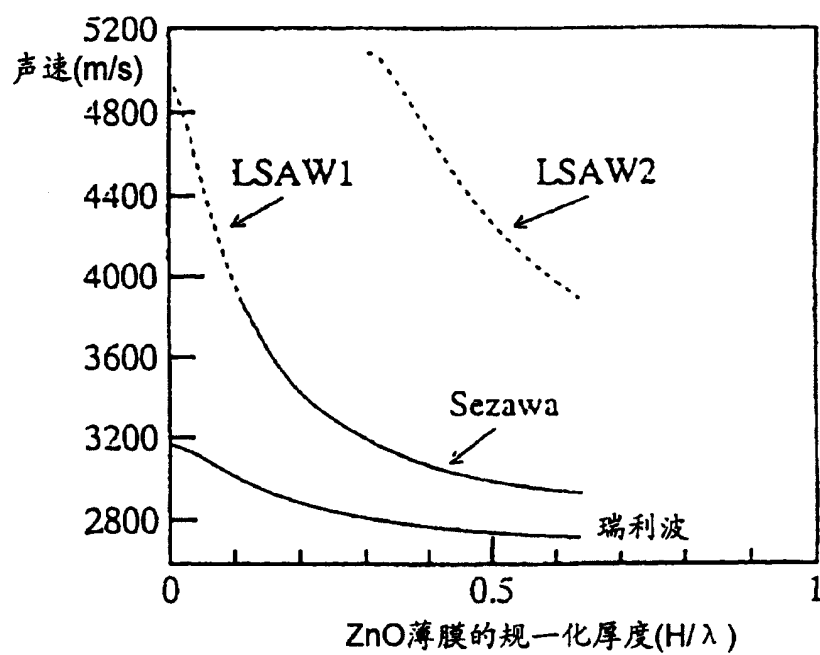


图 2

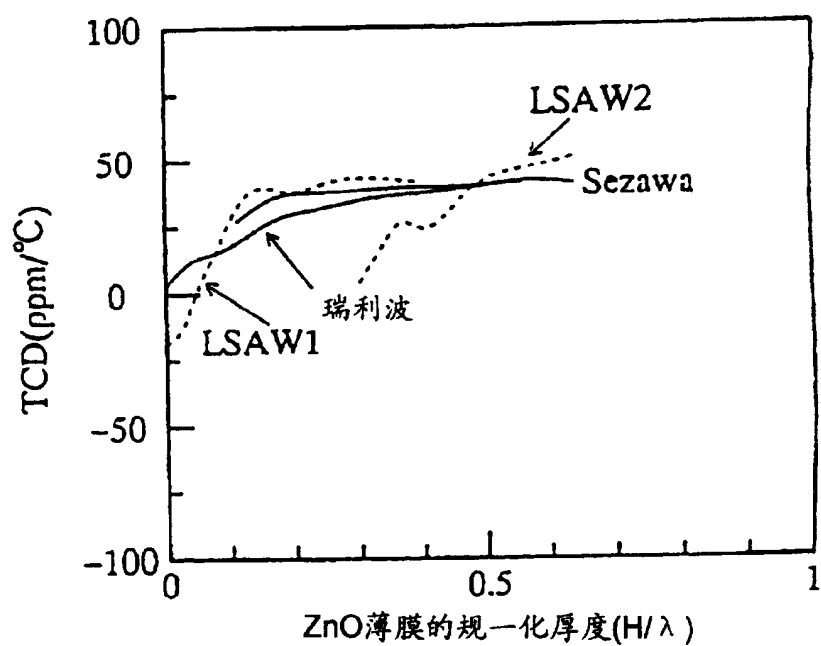


图 3

电气机械耦合系数 k

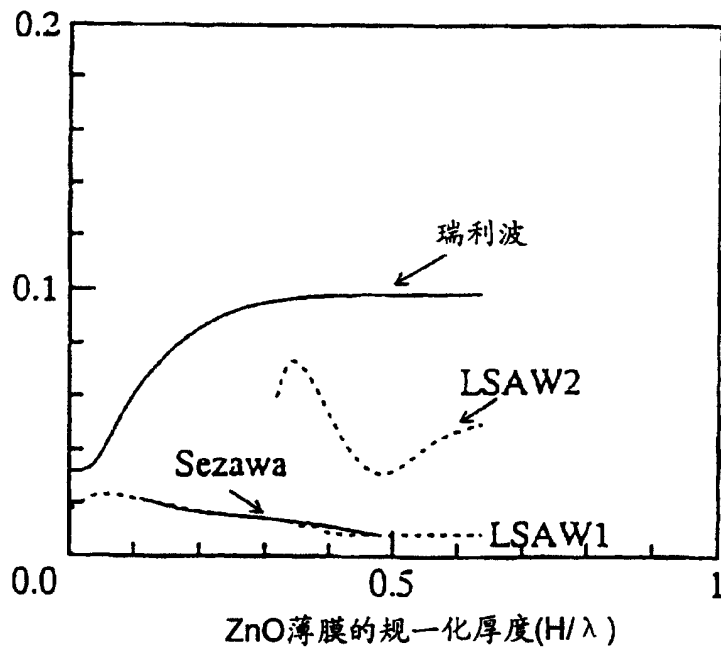


图 4

电气机械耦合系数 k

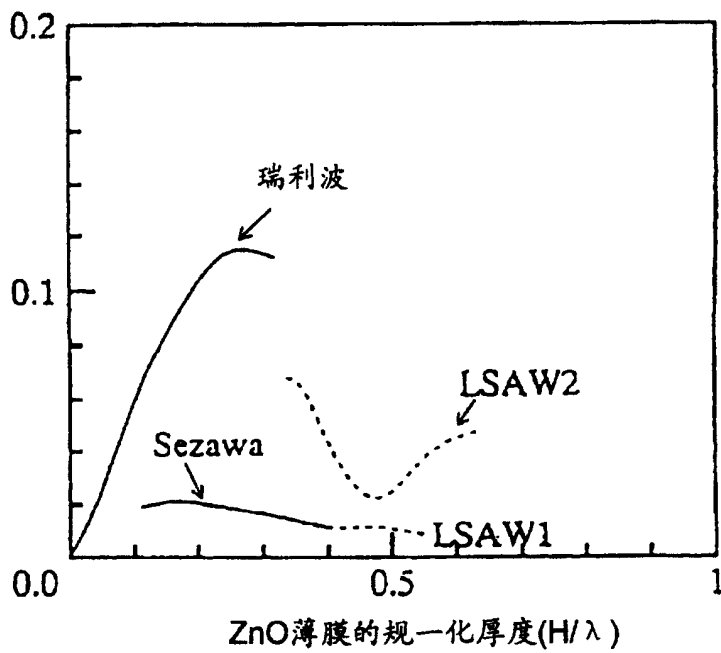


图 5

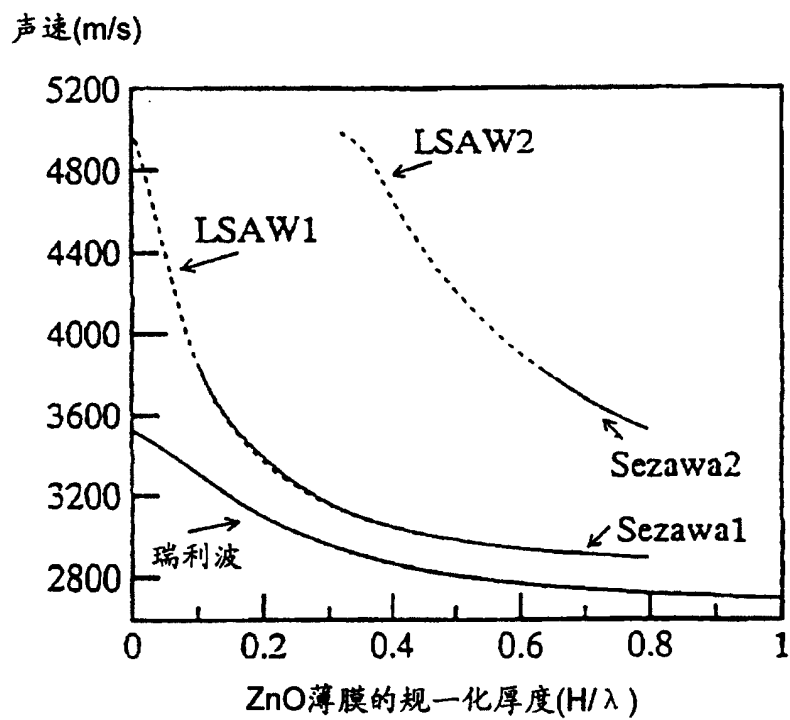


图 6

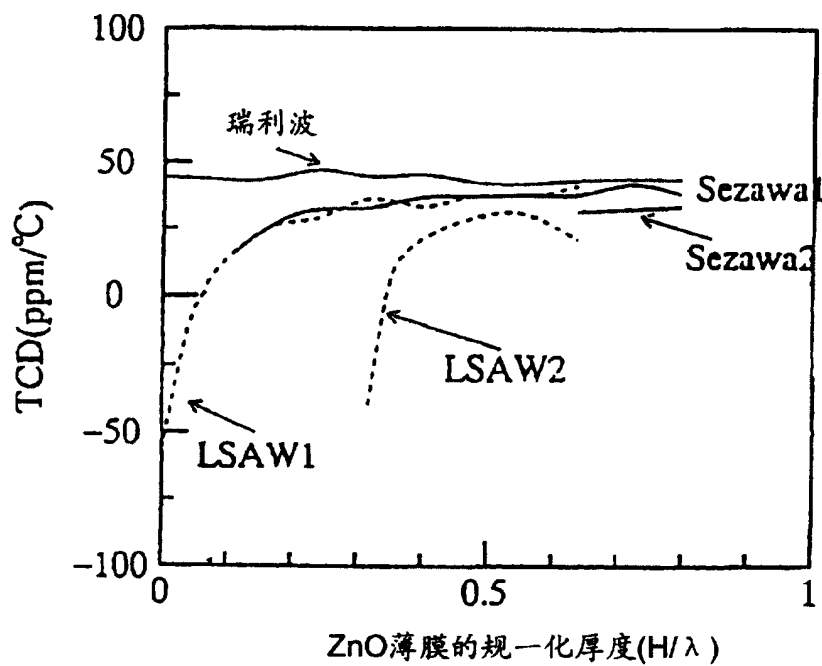


图 7

电气机械耦合系数 k

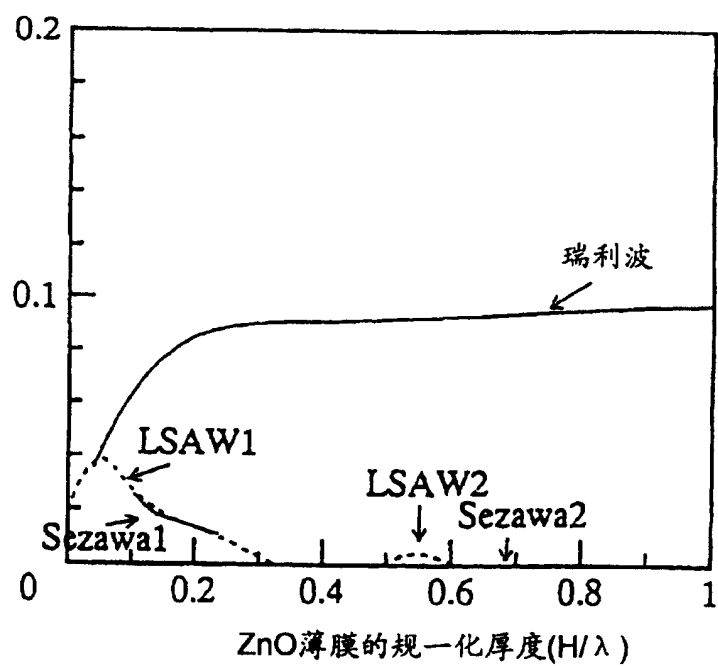


图 8

电气机械耦合系数 k

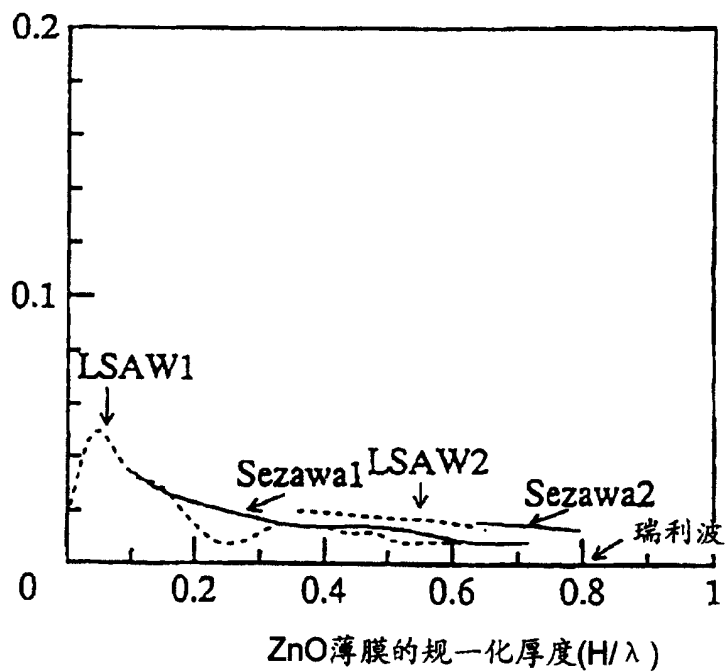


图 9

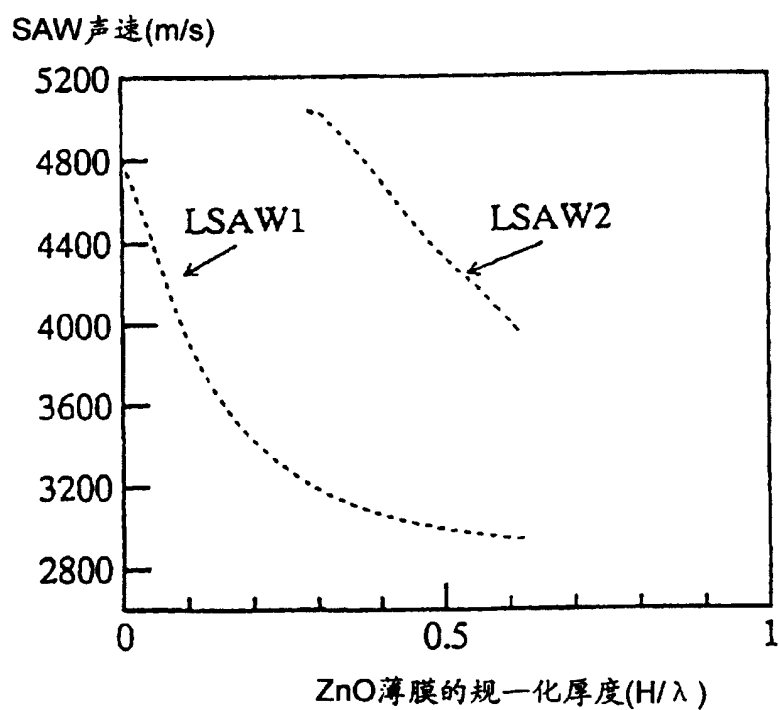


图 10

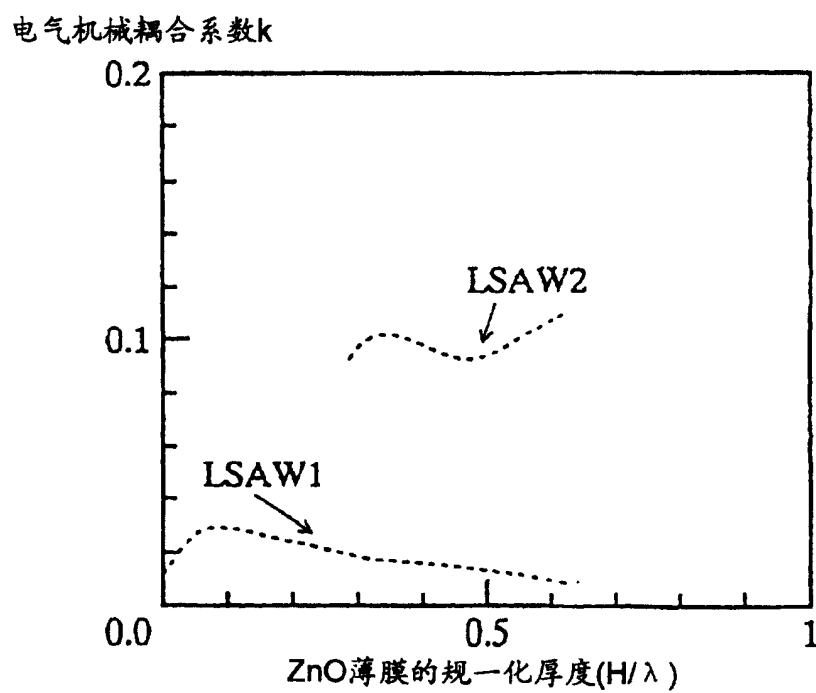


图 11

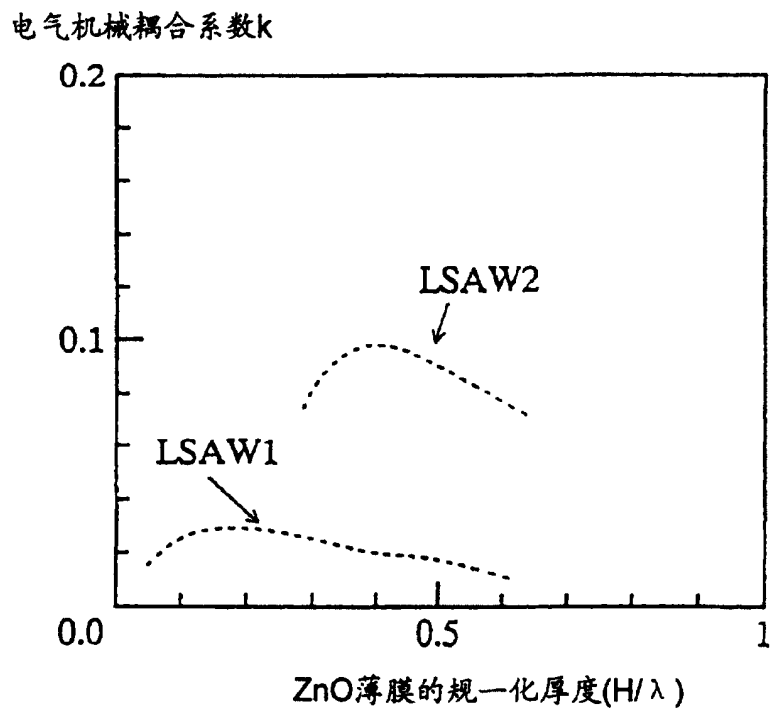


图 12

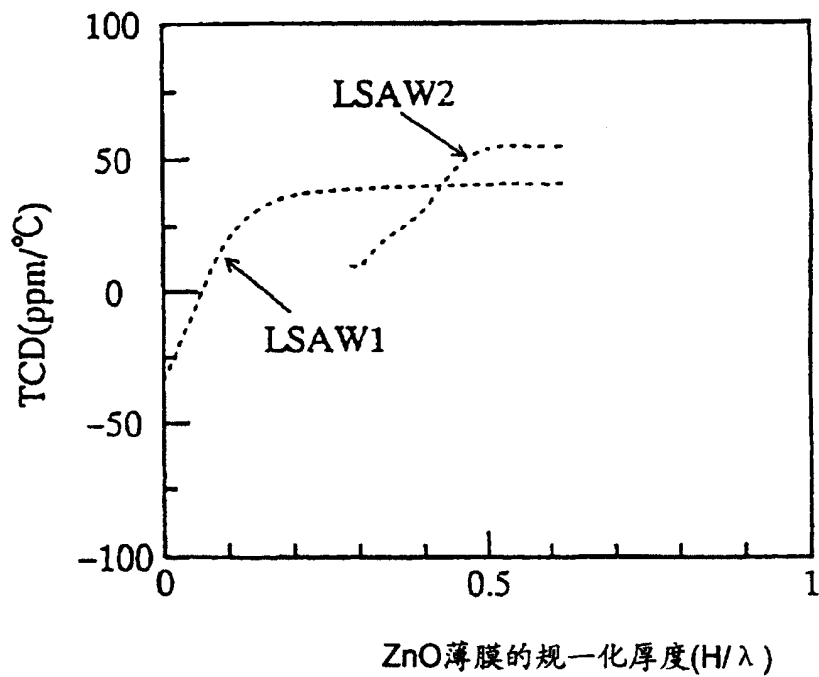


图 13

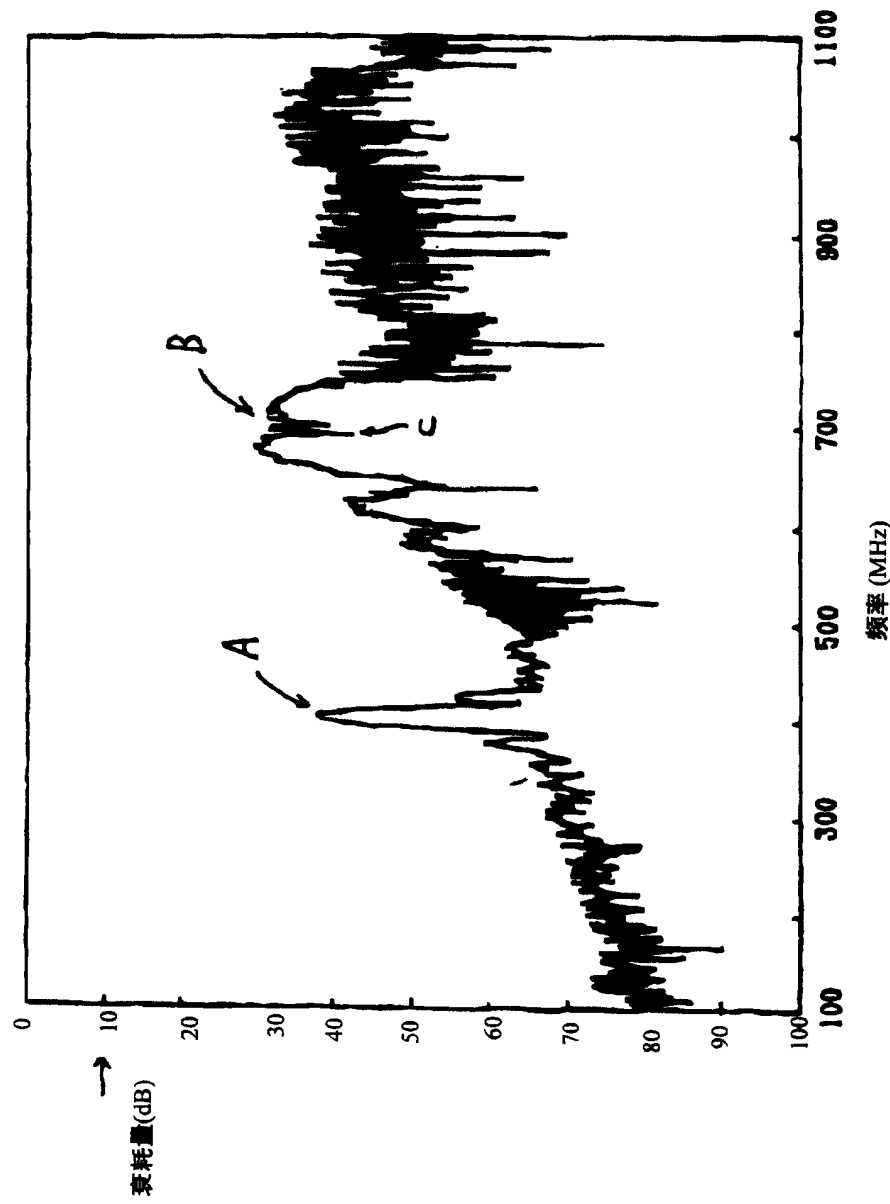


图 14