



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103097952 B

(45) 授权公告日 2015. 11. 25

(21) 申请号 201180040604. 3

G01N 21/35(2014. 01)

(22) 申请日 2011. 08. 08

G01N 21/47(2006. 01)

(30) 优先权数据

2010-187563 2010. 08. 24 JP

2011-161411 2011. 07. 22 JP

(56) 对比文件

WO 2006/062073 A1 , 2006. 06. 15, 全文 .

Andrei G. 等. Efficient generation of subpicosecond terahertz radiation by phase-matched optical rectification using ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts. 《APPLIED PHYSICS LETTERS》. 2003, 第 83 卷 (第 15 期), 全文 .

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 02. 22

C .Weiss 等. Generation of tunable narrow-band surface-emitted terahertz radiation in periodically poled lithium niobate. 《OPTICS LETTERS》. 2001, 第 26 卷 (第 8 期), 全文 .

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2011/068492 2011. 08. 08

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/029534 EN 2012. 03. 08

(73) 专利权人 佳能株式会社

地址 日本东京

Koji Suizu 等. Extremely frequency-widened terahertz wave generation using Cherenkov-type radiation. 《OPTICS EXPRESS》. 2009, 第 17 卷 (第 8 期), 全文 .

(72) 发明人 关口亮太 加治木康介

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所 11038

代理人 曹瑾

审查员 叶菲

(51) Int. Cl.

G02F 1/377(2006. 01)

权利要求书2页 说明书10页 附图10页

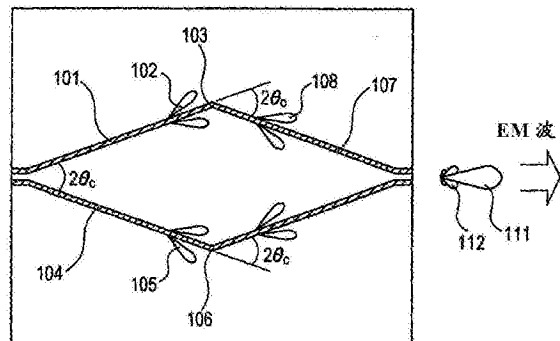
(54) 发明名称

电磁 THz 波产生器件、电磁 THz 波检测器件和时域分光装置

(57) 摘要

提供一种电磁波产生器件,该电磁波产生器件包括包含多个波导区段(101、104、107)的光学波导,使得合成的电磁波的主瓣(111)具有大致单一的大方向性。电磁波产生器件包括包含分别被夹在电介质(10、11)之间并包含非线性光学晶体的多个波导区段(101、104、107)的光学波导。波导区段被布置成使得由两个相邻的波导区段(101、104、107)中的光的传播方向形成的角度(2θ_c)基本上与2θ_c对应。当n_g表示非线性光学晶体对于光的折射率,且ε_{eff}表示电介质(10、11)和波导区段(101、104、107)的组件对于电磁波的有效相对介电常数时,θ_c被定义为

θ_c = cos⁻¹(n_g/√ε_{eff})。



CN 103097952 B

1. 一种电磁波产生器件,包括允许来自光源的光在其中传播的非线性光学晶体,并产生波长比所述光的波长长的电磁波,该电磁波产生器件包括:

第一电介质和第二电介质;和

光学波导,包含分别被夹在电介质之间并包含非线性光学晶体的多个波导区段,其中,当 n_g 表示非线性光学晶体对于所述光的折射率, ϵ_{eff} 表示第一电介质、第二电介质和波导区段的组件对于所述电磁波的有效相对介电常数,并且 $\theta_c = \cos^{-1}(n_g/\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}})$ 时,波导区段被布置成使得由两个相邻的波导区段中的所述光的传播方向形成的角度基本上对应于 $2\theta_c$ 。

2. 根据权利要求 1 的电磁波产生器件,其中,光学波导包含连接所述多个波导区段中的两个光学波导区段的弯曲部。

3. 根据权利要求 1 的电磁波产生器件,其中,光学波导包含连接至所述多个波导区段中的两个光学波导区段的 Y 形分支。

4. 根据权利要求 1 的电磁波产生器件,其中,第一电介质和第二电介质的厚度被调整成使得值 $\theta_c = \cos^{-1}(n_g/\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}})$ 具有实根。

5. 根据权利要求 1 的电磁波产生器件,其中,

第一电介质是支持非线性光学晶体的基板,并且

选择相对介电常数大于或等于基板的相对介电常数的第二电介质。

6. 根据权利要求 1 的电磁波产生器件,其中,

光学波导包含用作用于传播光的芯部的高折射率层和用作包层的低折射率层,

低折射率层中的至少一个分别与高折射率层和电介质相接触,使得低折射率层被夹在其间,并且

当 d 表示低折射率层的厚度, a 表示使得在低折射率层与电介质之间的界面上通过光学波导传播的光的强度为芯部中的光的强度的 $1/e^2$ 的厚度, e 是自然对数的底,并且 λ_{eq} 表示在具有最大频率的低折射率层中的电磁波的等价波长时,厚度 d 满足条件 $a \leq d \leq \lambda_{\text{eq}}/10$ 。

7. 根据权利要求 1 的电磁波产生器件,其中,电磁波包括在从 30GHz 到 30THz 的频率范围内的电磁波分量。

8. 根据权利要求 1 的电磁波产生器件,其中,所述多个波导区段是直的。

9. 一种时域分光装置,包括:

产生单元,被配置为产生电磁波;

检测单元,被配置为检测从产生单元放射的电磁波;和

延迟单元,被配置为调整产生单元的电磁波产生时间与检测单元的电磁波检测时间之间的延迟时间,其中,

产生单元包含根据权利要求 1 ~ 8 中的任一项的电磁波产生器件。

10. 根据权利要求 9 的时域分光装置,其中,检测单元被配置为检测从产生单元放射并被样品反射的电磁波并分析被样品反射的光以对样品的内部结构成像的断层摄影装置。

11. 根据权利要求 9 的时域分光装置,其中,从电磁波产生器件的光学波导的发射端出射的光被用作用于检测单元的探测光,并且

延迟单元调整电磁波产生器件的光学波导处的光的到达时间与检测单元处的探测光的到达时间之间的延迟时间。

12. 一种电磁波检测器件,包括允许来自光源的光在其中传播的非线性光学晶体,并检测波长比所述光的波长长的电磁波,该电磁波检测器件包括:

第一电介质和第二电介质;和

光学波导,包含分别被夹在电介质之间并包含非线性光学晶体的多个波导区段,其中,当 n_g 表示非线性光学晶体对于所述光的折射率, ϵ_{eff} 表示第一电介质、第二电介质和波导区段的组件对于所述电磁波的有效相对介电常数,并且 $\theta_c = \cos^{-1}(n_g/\sqrt{\epsilon_{eff}})$ 时,波导区段被布置成使得由两个相邻的波导区段中的所述光的传播方向形成的角度基本上对应于 $2\theta_c$ 。

13. 根据权利要求 12 的电磁波检测器件,还包括:

光传播状态检测单元,被配置为检测通过光学波导传播的光的传播状态。

14. 根据权利要求 13 的电磁波检测器件,其中,光传播状态检测单元包含偏振元件和光检测器件。

15. 根据权利要求 12 的电磁波检测器件,其中,电磁波包括在从 30GHz 到 30THz 的频率范围内的电磁波分量。

16. 根据权利要求 12 的电磁波检测器件,其中,所述多个波导区段是直的。

17. 一种时域分光装置,包括:

产生单元,被配置为产生电磁波;

检测单元,被配置为检测从产生单元放射的电磁波;和

延迟单元,被配置为调整产生单元的电磁波产生时间与检测单元的电磁波检测时间之间的延迟时间,其中,

检测单元包含根据权利要求 12 ~ 16 中的任一项的电磁波检测器件。

18. 根据权利要求 17 的时域分光装置,其中,检测单元被配置为检测从产生单元放射并被样品反射的电磁波并分析被样品反射的光以对样品的内部结构成像的断层摄影装置。

电磁 THz 波产生器件、电磁 THz 波检测器件和时域分光装置

技术领域

[0001] 本发明涉及产生诸如太赫兹波的电磁波的电磁波产生器件、检测诸如太赫兹波的电磁波的电磁波检测器件、和包括它们的时域分光装置,该电磁波包含从毫米波带到太赫兹波带 (30GHz ~ 30THz) 的频率区域中的电磁波分量。特别地,本发明涉及包含用于通过激光照射产生(检测)包含该频带中的傅立叶分量的电磁波的电光晶体的产生器件(检测器件)和基于太赫兹时域分光法 (THz-TDS) 的包括该产生器件(检测器件)的断层摄影装置。

背景技术

[0002] 近年来,开发了利用太赫兹波的非破坏性感测技术。该频带中的电磁波的应用领域包括制造取代荧光镜以执行成像的安全成像和检查装置的技术。并且,已开发了用于获得物质的吸收光谱或复介电常数以检查诸如分子键的物理性能的分光技术,用于检查诸如载流子密度、迁移率和电导率的物理性能的测量技术,以及用于生物分子的分析技术。关于产生太赫兹波的方法,广泛使用利用非线性光学晶体的方法。非线性光学晶体的一般的例子包括,例如, LiNbO_x (以下,也称为“LN”)、 LiTaO_x 、 NbTaO_x 、KTP、DAST、ZnTe、GaSe、GaP 和 CdTe。为了产生太赫兹波,利用二次非线性现象。已知的过程是由具有不同的频率的两个入射激光束导致的差值频率产生 (DFG)。另外,基于光学参数过程的单色太赫兹波产生、和通过由飞秒脉冲激光照射导致的光学整流产生太赫兹脉冲的过程也是已知的。

[0003] 关于通过使用这种非线性光学晶体产生太赫兹波的方法,电光 Cherenkov 放射近来受到关注。它是这样一种现象,即,当作为激励源的激光束 91 的传播群速度比产生的太赫兹波的传播相位速度高时,如图 9 所示,圆锥状的太赫兹波 92 如冲击波那样被放射。放射角 θ_c 由下式基于太赫兹波在介质(非线性光学晶体)中的折射率与光的折射率的比来确定:

$$[0004] \quad \cos \theta_c = v_{\text{THz}} / v_g = n_g / n_{\text{THz}}$$

[0005] 这里, v_g 表示激励光的群速度, n_g 表示其群折射率, v_{THz} 表示太赫兹波的相位速度, n_{THz} 表示其折射率。公开了这样的报告(参见 NPL 1) 其描述了利用 Cherenkov 放射现象,并允许具有倾斜的波前的飞秒束进入 LN 以导致光学整流,由此产生高强度的太赫兹脉冲。另外,公开了这样的报告(参见 NPL 2),其描述了使用厚度与要产生的太赫兹波的波长相比足够小的板式波导,使得不需要倾斜波前,并且,通过 DFG 产生单色太赫兹波。

[0006] 上述非专利文献中的情况涉及这样的提案,即,由行波激励导致太赫兹波产生,并且从不同的波源产生的太赫兹波沿放射方向在相位上匹配,并由此相互增强以提高提取效率。关于该放射方法的特性,可通过使用非线性光学晶体提供相对较高的效率,并且可产生高强度的太赫兹波。另外,可通过选择由晶体特有的光子共振导致的太赫兹区域中的吸收,在高频率侧加宽太赫兹波的频带。这些技术允许产生波带比使用光电元件的太赫兹产生的波带宽,并且,当通过使用光学整流产生太赫兹脉冲时,可以减小脉冲宽度。例如,当这些技术被应用于太赫兹时域分光装置时,分光装置的性能有望得到提高。

- [0007] 引文列表
- [0008] 非专利文献
- [0009] NPL 1 J. Opt. Soc. Am. B, vol. 25, pp. B6-B19, 2008
- [0010] NPL 2 Opt. Express, vol. 17, pp. 6676-6681, 2009

发明内容

- [0011] 技术问题
- [0012] 现有技术的 Cherenkov 太赫兹波产生器件在包含光学波导的面内具有两个方向性。使用起来非常不容易。本发明提供了具有大致单一的方向性的电磁波产生器件。
- [0013] 问题的解决方案
- [0014] 根据本发明的一个方面,一种包括允许来自光源的光在其中穿过的非线性光学晶体、并产生波长比光的波长更长的电磁波的电磁波产生器件包括:第一电介质和第二电介质、和包含分别被夹在电介质之间并包含非线性光学晶体的多个波导区段的光学波导。当 n_g 表示非线性光学晶体对于光的折射率, ϵ_{eff} 表示电介质和波导区段的组件对于电磁波的有效相对介电常数,并且 θ_c 被定义为 $\theta_c = \cos^{-1}(n_g/\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}})$ 时,波导区段被布置成使得由两个相邻的波导区段中的光的传播方向形成的角度基本上对应于 $2\theta_c$ 。
- [0015] 本发明的有利效果
- [0016] 根据本发明的该方面,由于电磁波产生器件包括包含波导区段的光学波导,这些波导区段被布置成使得由两个相邻的波导区段中的光的传播方向形成的角度基本上对应于 $2\theta_c$,因此允许合成的电磁波的主瓣具有大致单一的方向性。
- [0017] 从以下描述的实施例,本发明的其它方面将十分明显。

附图说明

- [0018] 图 1A 是根据本发明的第一实施例的电磁波产生器件的顶视图。
- [0019] 图 1B 是其前视图。
- [0020] 图 2A 是根据本发明的第二实施例的电磁波产生器件的顶视图。
- [0021] 图 2B 是其前视图。
- [0022] 图 3A 是根据本发明的第三实施例的电磁波产生器件的顶视图。
- [0023] 图 3B 是其前视图。
- [0024] 图 4 是根据本发明的第四实施例的电磁波产生器件的顶视图。
- [0025] 图 5A 是示出根据本发明的第五实施例的太赫兹时域分光装置的结构示意图。
- [0026] 图 5B 是示出根据本发明的第五实施例的太赫兹时域分光装置的变更例的示意图。
- [0027] 图 6A 是根据本发明的第六实施例的电磁波产生器件的前视图。
- [0028] 图 6B 是根据本发明的第六实施例的电磁波产生器件的前视图。
- [0029] 图 7 是示出根据本发明的第七实施例的太赫兹时域分光装置的结构示意图。
- [0030] 图 8A 是根据本发明的例子 1 的电磁波产生器件的顶视图。
- [0031] 图 8B 是其前视图。
- [0032] 图 9 是示出电光 Cherenkov 放射的原理的示意图。
- [0033] 图 10A 是根据本发明的第八实施例的电磁波检测器件的顶视图。

[0034] 图 10B 是其前视图。

[0035] 图 11A 是示出通过电磁波检测器件的检测方法的示图。

[0036] 图 11B 是示出通过电磁波检测器件的检测方法的示图。

[0037] 图 11C 是示出通过电磁波检测器件的检测方法的示图。

具体实施方式

[0038] 根据本发明的一个方面,电磁波产生器件包括包含有两个波导区段的多个波导区段的光学波导,这两个波导区段被布置成使得由波导区段中的光的传播方向形成的角度基本上与上述的 $2\theta_c$ 相对应。基于这种概念,根据本发明的实施例的电磁波产生器件和电磁波检测器件具有在上述的“问题的解决方案”中描述的基本结构。

[0039] 以下参照附图描述本发明的实施例和例子。

[0040] 第一实施例

[0041] 参照图 1A 和图 1B 描述根据第一实施例的电磁波产生器件。图 1A 是根据本实施例的电磁波产生器件的顶视图。图 1B 是其前视图。根据本实施例的电磁波产生器件包括分别由非线性光学晶体制成的光学波导区段和连接区段的弯曲部。在本实施例中,当光在其中传播时,光学波导区段 101 具有圆锥状方向性。在图 1A 的平面中,由 102 表示的方向性沿两个方向出现。电磁波的 Cherenkov 放射的方向(以下,称为“Cherenkov 放射方向”)与光学波导区段 101 中的光的传播方向(以下,称为“光传播方向”)形成大致为 θ_c 的角度,其将在后面描述。光学波导区段 104 中的光传播方向与光学波导区段 101 中的光传播方向形成大致为 $2\theta_c$ 的角度。当光在其中传播时,光学波导区段 104 也具有圆锥状方向性,并且由 105 表示的方向性沿平面内的两个方向出现。电磁波的 Cherenkov 放射方向还与光学波导区段 104 中的光传播方向形成 θ_c 的角度。弯曲部 103 将传播通过光学波导区段 101 的光偏转大致 $2\theta_c$,以将光引向光学波导区段 107。光学波导区段 107 中的光传播方向与光学波导区段 101 中的光传播方向形成大致为 $2\theta_c$ 的角度,并且当光在其中传播时,光学波导区段 107 具有沿平面内的两个方向出现的方向性 108。电磁波的 Cherenkov 放射方向与光学波导区段 107 中的光传播方向形成 θ_c 的角度。弯曲部 106 具有与上述的弯曲部 103 类似的功能。

[0042] 利用这种结构,来自波导区段的沿相同的方向放射的波分量相互增强,由此贡献于整个器件的方向性中的主瓣 111。沿不同的方向放射的电磁波分量相互弱化,并且没有完全消除的波分量变为副瓣 112。因此,整个器件具有大致单一的方向性。当激励光从图 1A 的左侧被引向波导的入射端时,电磁波(EM-WAVE)被放射到图 1A 的右侧。这是使得根据本发明的实施例的电磁波产生器件具有由主瓣代表的大致单一的方向性的机制。根据本实施例,光学波导区段以菱形图案被配置,使得由两个相邻的波导区段中的光传播方向形成的角度大致为 $2\theta_c$,由此构成具有单一方向性的结构。

[0043] 并且,为了实现 Cherenkov 放射,通过光学波导传播的光的速度 v_g 与放射的电磁波(诸如太赫兹波)的相位速度 v_{THz} 之间的关系必须满足条件 $v_g > v_{\text{THz}}$ 。原因在于, $\cos^{-1}(v_{\text{THz}}/v_g)$ 必须具有实根。在本发明的实施例中,导致具有比光长的波长的电磁波的 Cherenkov 放射,诸如太赫兹波、远红外光或中红外光。因此,与光相比,放射的电磁波具有空间延展性。根据本实施例的电磁波产生器件包括第一电介质 10 和第二电介质 11,其如

图 1B 所示的那样,沿垂直方向夹着光学波导,以利用上述的电磁波与光之间的空间延展性的差异来使得电磁波的相位速度变慢。在这种情况下,电磁波对于电介质 10 和 11 的介电常数强烈敏感,使得 θ_c 由电介质与光学波导的组件的有效相对介电常数 ϵ_{eff} 确定。换句话说,它由下式表达: $\cos\theta_c = n_g/\sqrt{\epsilon_{eff}}$ 。

[0044] 当图 1B 中的光学波导的厚度为厚度下限时,有效相对介电常数 ϵ_{eff} 可近似地由电介质 10 和 11 的介电常数 ϵ_{10} 和 ϵ_{11} 的平均值表达。它由下式表达: $\epsilon_{eff} \approx (\epsilon_{10} + \epsilon_{11})/2$ 。电介质 10 和 11 中的介电常数的偏移使图 1B 中的放射方向轻微波动。原因在于,当电介质 11 的介电常数比电介质 10 的介电常数高时,电磁波模的分布偏向电介质 11。在这种情况下,第一电介质 10 是支持非线性光学晶体的基板,并且,选择具有比基板高的相对介电常数的第二电介质 11。当电介质 10 的介电损失比电介质 11 高时,可通过利用这些性能避免介电损失。如果电介质表现相同的介电损失,那么电介质 10 和 11 可由相同的电介质材料 10 制成。在这种情况下, $\epsilon_{eff} = \epsilon_{10}$ 。假定电介质材料被选择为使得光学波导为典型的单模波导,那么光学波导最高具有约几微米的厚度。由于太赫兹波的波长与该值相比足够大,因此,在太赫兹放射时,该近似表达式通常成立。

[0045] 关于被选择为电介质材料 10 的例子,作为在“背景技术”中描述的非线性光学晶体的 LN 的近红外区域中的折射率(群折射率 n_g) 为约 2。因此,当使用具有约为 4 或更高的介电常数(相对介电常数)的电介质材料时, $\cos^{-1}(n_g/\sqrt{\epsilon_{eff}})$ 具有实根,使得实现 Cherenkov 放射。对于太赫兹波,例如,可以使用 Si 或 Ge 作为电介质材料。也可使用半绝缘性的半导体基板等。

[0046] 夹在电介质 10 和 11 之间的除光学波导以外的区域(未示出)可被例如电介质或空气填充。为了禁闭光,可以使用折射率比构成光学波导的非线性光学晶体低材料。例如,可以使用折射率为比 LN 低的约 1.5 的苯并环丁烯(BCB) 或聚酰亚胺。

[0047] 在上述的情况下,假定电介质 10 和 11 的厚度是厚度的上限。其厚度可在一定程度上减薄。原因如下。当放射的电磁波的空间延展比电介质 10 和 11 的厚度大时,电磁波对于外部空气敏感,由此减小有效介电常数(有效相对介电常数) ϵ_{eff} 。但是,当 $\sqrt{\epsilon_{eff}}$ 与 n_g 相比极小,以使得 $\cos^{-1}(n_g/\sqrt{\epsilon_{eff}})$ 没有实根时,不实现 Cherenkov 放射。放射的电磁波的空间延展可被识别为电介质材料 10 中的电磁波的等价波长 $(\lambda/\sqrt{\epsilon_{10}})$ 。

[0048] 第二实施例

[0049] 参照图 2A 和图 2B 描述根据第二实施例的电磁波产生器件。图 2A 是根据本实施例的电磁波产生器件的顶视图。图 2B 是其前视图。在本实施例中,光学波导区段通过弯曲部 203 和 206 连接以形成单个线。因此,光从外部入射到单个入射端,使得容易实现光学耦合。在其它方面,第二实施例在结构上与第一实施例相同。参照图 2A,光学波导区段 204 中的光传播方向与光学波导区段 201 中的光传播方向形成大致为 $2\theta_c$ 的角度,并且,光学波导区段 207 中的光传播方向与光学波导区段 204 中的光传播方向形成大致为 $2\theta_c$ 的角度。当光在其中传播时,光学波导区段分别具有圆锥方向性 202、205 和 208。沿相同的方向放射的电磁波分量相互增强,由此贡献于整个器件的方向性中的主瓣 211。因此,整个器件具有

大致单一的方向性。没有完全消除的电磁波分量变为副瓣 212。在本实施例中,光学波导区段以波形图案被布置,以使得两个相邻的波导区段中的光传播方向形成大致为 $2\theta_0$ 的角度,由此构成具有大致单一的方向性的结构。如图 2B 所示,根据本实施例的电磁波产生器件还包括沿垂直的方向夹着这种光学波导的电介质 20 和 21。

[0050] 根据本实施例和第一实施例,由于结构可沿横向延伸,因此,可以很容易地延长通过光学波导传播的光与构成光学波导的非线性光学晶体之间的交互作用长度。由于激励光被转换成电磁波(RF)的光到 RF 转换效率增加,因此,实施例适于需要光到 RF 转换效率的装置和应用。

[0051] 第三实施例

[0052] 参照图 3A 和图 3B 描述根据第三实施例的电磁波产生器件。图 3A 是根据本实施例的电磁波产生器件的顶视图。图 3B 是其前视图。由于不存在弯曲部,因此,本实施例具有不出现由弯曲部导致的光学损失的优点。在其它方面,第三实施例在结构上与第一实施例相同。参照图 3A,光学波导区段 303 中的光传播方向与光学波导区段 301 中的光传播方向形成大致为 $2\theta_0$ 的角度。当光在其中传播时,光学波导区段分别具有圆锥方向性 302 和 304。沿相同的方向放射的电磁波分量相互增强,由此贡献于整个器件的方向性中的主瓣 311。因此,整个器件具有大致单一的方向性,并且向图 3A 的右侧放射电磁波。没有完全消除的电磁波分量变为副瓣 312。根据本实施例,形成大致为 $2\theta_0$ 的角度的光学波导区段以 V 状图案被布置,由此构成具有大致单一的方向性的结构。如图 3B 所示,根据本实施例的电磁波产生器件还包括沿垂直的方向夹着这种光学波导的电介质 30 和 31。

[0053] 在本实施例中,由于光不与电磁波共线,因此它们可以很容易地相互分离。实施例适于需要分离光和 RF 的装置和应用。

[0054] 第四实施例

[0055] 在上述的实施例中,当电磁波产生器件的光学波导具有两个入射端时,必须用两个同相位的射束或者具有大的斑点的单个射束同时激励两个入射端。图 4 是包括具有一个入射端的光学波导和光学波导上的 Y 形分支 400 的电磁波产生器件。Y 形分支 400 不依赖于光的波长和偏振方向。它是公知的可用在单模/多模光学波导中的分支。可以使用 Mach-Zehnder 类型等。使用该分支可实现具有以菱形图案布置多个小菱形图案的结构的光学波导、和具有以 V 形图案布置多个 V 形图案的结构的光学波导。

[0056] 虽然没有提到,但是,Cherenkov 放射源自非线性光学晶体 401 和 402 的二次非线性系数(d 系数)。因此,为了组合电磁波分量的方向性,必须关注各晶体的 d 系数的方向。更确切地说,d 系数是张量。必须关注由例如 d 系数 d_{i1} 中的 i 表示的方向。在其中一个射束激励非线性光学晶体 401 和 402 的本实施例中,所有非线性光学晶体的 d 系数可简单地表示与图 4 所示的平面垂直的方向。

[0057] 可对于上述的电磁波产生器件的光学激励使用短脉冲激光束。在这种情况下,可通过光学整流产生具有比光的波长更长的波长的宽带电磁脉冲。可允许具有不同的波长的两个激光束入射到器件,由此产生具有与频率之间的差值对应的单一频率并具有比光的波长更长的波长的电磁波。在本实施例和第三实施例中,当允许两个射束同时进入到两个分离的光学波导区段时,光学波导的入射端和发射端可颠倒。可以在可能的范围内组合使用根据上述实施例的结构。例如,可以组合使用本实施例和第一实施例,以使得根据本实施例

的结构被应用于根据第一实施例的结构左半部分。

[0058] 第五实施例

[0059] 图 5A 示出基于包括根据上述的实施例的器件中的任一个作为电磁波产生器件的太赫兹时域分光 (THz-TDS) 系统的断层摄影成像装置。在该装置中, 使用包括光纤的飞秒激光器 51 作为激励光源, 并且, 通过分支单元 52 从光纤 53 和 54 提取输出。一般地, 使用具有 $1.55\ \mu\text{m}$ 的中心波长、 20fs 的脉冲宽度和 50MHz 的重复频率的光。可以使用 $1.06\ \mu\text{m}$ 的频带中的波长。脉冲宽度和重复频率不限于这些值。用作输出级的光纤 53 和 54 中的每一个可包括色散光纤, 用于执行预啁啾以补偿由例如光学器件 (包含太赫兹产生器、太赫兹检测器和设置在最终级上的用于高阶孤子压缩的高非线性光纤) 导致的色散。这些光纤中的每一个可包含偏振保持光纤。

[0060] 来自太赫兹波产生侧的光纤 53 的输出与根据本发明的实施例中的任一个的 Cherenkov 放射型的器件 50 的波导连接。在这种情况下, 为了增加耦合效率, 光纤的端部可与圆柱透镜阵列一体化, 或者可被加工为辫子型, 使得输出小于或等于器件 50 的波导的数值孔径 (NA)。光纤 53 可通过透镜 (未示出) 在空间上与器件 50 连接。在上述的情况中的每一个中, 向器件和光纤的端部中的每一个施加抗反射涂层导致 Fresnel 损失的减少和不必要的干涉噪声的减少。作为替代方案, 当光纤 53 和器件 50 的波导被设计为使得它们的 NA 和模场直径相互接近时, 它们可通过相互邻接以邻接耦合方式相互接合。在这种情况下, 正确地选择粘接剂可减少反射的不利影响。如果上游侧的光纤 53 或光纤激光器 51 包含不是偏振保持类型的光纤区段, 那么可通过线内 (inline) 偏振控制器使入射在 Cherenkov 放射型器件 50 上的光的偏振稳定化。激励光源不限于光纤激光器。当激励光源不是光纤激光器时, 用于使偏振稳定化的措施减少。

[0061] 通过基于图 5A 所示的公知的 THz-TDS 系统的机构检测产生的电磁波。具体而言, 抛物面镜 56a 将射束变换成平行射束, 射束分离器 55 将射束分成两个射束, 并且, 抛物面镜 56b 向样品施加射束中的一个。抛物面镜 56c 会聚从样品反射的电磁波。得到的波到达包含光电导元件的检测器 58 或者被其接收。光电导元件一般包含低温生长的 GaAs 和设置在其上面的偶极天线。如果光源 51 具有 $1.55\ \mu\text{m}$ 的波长, 那么谐波通过使用 SHG 晶体 (未示出) 产生, 并被用作用于检测器 58 的探测光。在这种情况下, 为了保持脉冲形状, 可以使用具有约 0.1mm 的厚度的周期极化铌酸锂 (PPLN)。当光源 51 具有 $1\ \mu\text{m}$ 的带中的波长时, 不必在包括包含单层 InGaAs 或 InGaAs MQW 的光电导元件的检测器 58 中产生谐波。可以使用基准波作为探测光。在该装置中, 信号获取单元 61 通过放大器 63 获取由检测器 58 检测的信号。数据处理和输出单元 62 包含 PC 等, 并且在移动用作延迟单元的光学延迟器 57 的同时获得电磁波信号的波形。只要单元可调整用作产生单元的器件 50 的电磁波产生时间与用作检测单元的检测器 58 的电磁波检测时间之间的延迟时间, 就可以使用任何延迟单元。如上所述, 本装置包括包含根据本发明的实施例中的任一个的用于产生电磁波的电磁波产生器件的产生单元、用于检测从产生单元放射的电磁波的检测单元和延迟单元。该装置被配置为其中检测单元检测从产生单元放射并被样品反射的电磁波, 并且来自样品的反射波被分析以对样品的内部结构成像的断层摄影装置。

[0062] 在图 5A 所示的系统中, 来自用作测量目标的样品的反射波与施加的电磁波共轴。射束分离器 55 的存在将电磁波的功率减半。因此, 如图 5B 所示, 镜子 56 的数量可增加,

以提供波之间的非共轴关系,使得虽然入射到样品上的角度不是 90 度,但电磁波的功率增加。

[0063] 在使用本装置时,如果在样品中存在材料不连续性,那么,在获取的信号中,在与该不连续对应的时间位置中出现反射回声脉冲。当样品被一维扫描时,获得断层摄影图像。当样品被二维扫描时,获得三维图像。由于如上面描述的那样配置包含非线性光学晶体的电磁波产生器件 50,因此器件具有大致单一的方向性,使得天线增益随单一方向性增加。因此,可以增加 S/N 比。因此,与现有技术相比,可以检测更小的信号。例如,在断层摄影中,可以增加样品沿深度方向的渗透厚度。另外,由于可以获得相对较短的持续期的太赫兹脉冲,即,300fs 或更小的单脉冲,因此,可以提高深度分辨率。并且,由于可使用包含光纤的激励激光器作为照射单元,因此,装置的尺寸和成本可减小。

[0064] 第六实施例

[0065] 根据上述的实施例,包含于电磁波产生器件中的光学波导的发射端面粗糙化,以使得从端部发射的光不变为噪声源,并且光被提取到外面。图 6A 和图 6B 示出用于控制从发射端发射的光的结构。

[0066] 图 6A 示出其发射端被涂层 610 覆盖的电磁波产生器件 60。关于用于光学衰减的涂层,例如,可以使用黑色聚乙烯膜。在这种情况下,涂层 610 的厚度可以小于或等于材料中的电磁波的等价波长的十分之一,例如,可以为几微米,以使得涂层不影响从器件的发射端发射的电磁波的产生。在具有波长的十分之一的尺寸的结构中,对于具有该波长的电磁波的影响(诸如反射、色散和折射)一般是可以忽略的。对于该涂层,可以使用对于光的抗反射(AR)涂层或高反射(HR)涂层。可以使用控制放射的电磁波的涂层。例如,可以使用 Ge 膜作为用于在遮蔽光的同时控制太赫兹电磁波的涂层。

[0067] 图 6B 示出具有斜角 620 的电磁波产生器件 60。光和电磁波可通过使用例如光学波导与空气之间的折射角差异和各电介质与空气之间的折射角差异而色散。在这种情况下,如果放射的电磁波是 P 偏振光,那么可以选择使得关于斜面 620 的法线的折射角与 Brewster 角 $\theta_B = \tan^{-1}(\sqrt{\epsilon_{eff}}/1)$ 相对应的切割。因此,可以在比被 AR 涂层覆盖的带宽的带中减少 Fresnel 损失。

[0068] 第七实施例

[0069] 根据第七实施例,实施例的电磁波产生器件中的任一个的发射端通过例如 AR 涂层被处理,使得从发射端发射的光被重新用作探测光。具体而言,根据本实施例,允许从包含于电磁波产生器件 70 中的波导的发射端出射的光穿过抛物面镜的孔 79,使得与光的光轴对应的射束与光分离,并且,使用分离的射束作为用于检测单元的探测光。为了使抛物面镜的孔 79 的直径最小化,可以使用与射束的直径对应的小的透镜(未示出)。延迟单元 77 调整电磁波产生器件 70 中的波导处的光的到达时间与检测单元处的探测光的到达时间之间的延迟时间。

[0070] 图 7 示出基于与图 5A 类似的 THz-TDS 系统的断层摄影装置。在图 7 中没有示出电子系统部件。本实施例与图 5A 中的第五实施例的不同在于,该装置不包括光纤分支单元,并且,允许包含光纤的激励激光器 71 的整个输出进入到电磁波产生器件 70。以与第五实施例类似的方式,从电磁波产生器件 70 产生的太赫兹波通过抛物面镜和半反射镜 75 被施加到样品。来自样品的反射光进入到太赫兹检测单元 78,由此获取信号。另一方面,在电

磁波产生器件 70 中传播的激光束的一部分重新从发射端出射,并且穿过抛物面镜的孔 79 和延迟单元 77,然后被重新用作用于检测单元 78 的探测光。在上述的布置中,由于不需要用于激励激光束的分支单元,因此,可以减少部件的数量,并且可以有效地利用激励激光器 71 的功率。用于激励的激光源 71 不限于飞秒激光源。可以使用用于 Nd:YAG 激光激励的 KTP-OPO(光学参数振荡器)光源(输出具有两个波长的光)或两个可调谐激光二极管。由于可通过改变波长来改变 DFG 的频率,因此放射的太赫兹波的频率也可被调制。

[0071] 第八实施例

[0072] 参照图 10A 和图 10B 描述根据第八实施例的电磁波检测器件。图 10A 是根据本实施例的电磁波检测器件的顶视图。图 10B 是其前视图。本实施例涉及以与实施例 1 类似的方式包括分别包含电光晶体的光学波导区段 101、104 和 107 和连接区段的弯曲部 103 和 106,并被配置为通过产生的逆过程检测电磁波的电磁波产生器件。这里使用的用于一次电光效应的电光晶体具有二次非线性。典型的实际电光晶体基本上与具有二次非线性的非线性光学晶体等同。

[0073] 在第一实施例中,激励光从图 1A 的左侧被引向光学波导的入射端,并且电磁波(例如,太赫兹波)被照射到图 1A 的右侧。根据本实施例,通过逆过程检测电磁波(例如,太赫兹波)。具体而言,允许电磁波(例如,太赫兹波)从图 10A 的右侧进入到光学波导。当探测光从图 10A 的右侧被引向光学波导的入射端时,探测光被调制。

[0074] 光传播状态检测单元 1010 被配置为检测探测光的传播状态。例如,通过布置在外面的外部偏振元件 1001 和光检测器件 1002 和 1003,检测基于电光晶体中的一次 Pockels 效应的偏振状态。具体而言,Wollaston 棱镜 1001 将从光学波导的发射端出射的探测光分成偏振分量,并且通过两个光电检测器 1002 和 1003 的差动放大,增加 S/N 比,使得可以检测电磁波。利用根据本实施例的该结构,可以检测电磁波的电场的幅度。

[0075] 为了补偿不施加电磁波(例如,太赫兹波)时的自然双折射,可以在发射端和偏振元件 1001 之间设置相位补偿器(例如, $\lambda/4$ 相位偏移器)(未示出)。并且,可以在光学波导上集成上述的光传播状态检测单元 1010。

[0076] 关于如何检测电磁波(例如,太赫兹波),描述了通过由合成的电磁波导致的一次电光效果检测光偏振状态的变化的方法。检测不限于该方法。可以使用检测通过波导传播的光的相位和强度的变化作为光的传播状态的变化方法。并且,可以使用检测光拍信号的方法,该方法检测表示通过光学波导传播的光的频率与合成的电磁波的频率之间的差值的光学信号。描述实施例。根据本实施例,器件被配置为检测第一电磁波(EM-WAVE 1 或 EM1),并且也产生第二电磁波(EM-WAVE 2 或 EM2)。在这种情况下,第一电磁波的波谱 ν_{EM1} 和第二电磁波的波谱 ν_{EM2} 可以彼此相同或者不同。在任意的情况下,根据本实施例,如图 11A 和图 11B 所示,设置其中第一电磁波的波前与第二电磁波的波前基本上一致的区域。因此,可以在通过光学波导传播的探测光上重叠 $(\nu_{EM1}-\nu_{EM2})$ 频率分量。此时,光学波导中的二次非线性效果允许该分量与探测光混合。图 11C 示出其中该分量与例如用作两个激光束的具有频率 ν_1 和 ν_2 的探测射束混合的状态。在这种情况下,在频率 ν_1 的侧带中出现 $(\nu_1 \pm \nu_{EM1}-\nu_{EM2})$ 分量 1102 和 1104,并且,在频率 ν_2 的侧带中出现 $(\nu_2 \pm \nu_{EM1}-\nu_{EM2})$ 的分量 1101 和 1103。因此,当通过例如光谱分析器观察频率 ν_1 和 ν_2 以及它们的侧带时,可以检测第一电磁波。并且,由于光学波导中的一次非线性效果允许通过第一电磁波调制第二电磁波,因此,也可通

过观察第二电磁波检测第一电磁波。

[0077] 另外,使用该器件允许构建在以上的实施例中描述的 THz-TDS 系统和断层摄影装置。关于这种情况下的产生器件,可以使用任何产生器件,例如,在本发明的实施例中描述的基于 Cherenkov 相位匹配的器件、或使用现有技术的光电导元件的器件等。

[0078] 例子 1

[0079] 描述与第一实施例相对应的具体例子 1。参照图 8A 和图 8B 描述根据本例子的电磁波产生器件。图 8A 是根据本例子的电磁波产生器件的顶视图。图 8B 是其前视图。

[0080] 根据本例子的器件包括:包含 ZnTe/CdZnTe 的脊形波导区段 801、804 和 807,和连接区段以使得区段被布置成图 8A 中的菱形图案的弯曲部 803 和 806。沿光传播路径的脊形波导区段 804 的长度被设为例如 $200\ \mu\text{m}$, 并且弯曲部 806 的弯曲半径被设为损失相对较小的 $20\ \mu\text{m}$ 。长度和弯曲半径不限于这些值。在本例子中,如果弯曲部的影响被消除,那么基本上主瓣 811 的半值角(与图 8A 中的方向性的最大功率的一半对应的一部分的延展角度)不依赖于光学波导的长度。为了减少弯曲部的影响以使半值角变得尖锐,与弯曲半径相比,可以增加光学波导的长度。它们是设计事项。根据本例子的电磁波产生器件包含半绝缘性的 GaAs 基板 80 上的 ZnTe (8040)/CdZnTe (8041) 的半导体异质结构。非线性光学晶体 ZnTe 的二次非线性系数 d_{14} 相对较高,为约 100pm/V 。对于 $1.06\ \mu\text{m}$ 的带和 800nm 的带是合适的。在本例子中,对于这种波带中的光学激励,使用具有折射率 $n_g = 2.8$ 的 ZnTe (高折射率层)。使用材料与电介质 80 相同的半绝缘性 GaAs 基板作为用于夹着光学波导的图 8B 中的电介质 81。夹在电介质 80 和 81 之间的光学波导以外的区域被具有较低的介电常数和较低的介电损失的电介质 BCB 809 填充。各 CdZnTe 层(低折射率层)8041 可足够厚以用作光传播时的包层,并且可被减薄到使得在 GaAs 层 80 和 81 之间可以忽略太赫兹波的多重反射或损失的影响的程度。关于前者,在包含用作芯部的 ZnTe 层 8040 和用作包层的 CdZnTe 层 8041 的波导中, CdZnTe 层 8041 可具有大于或等于使得与 GaAs 层 80 和 81 的界面上的光强度小于或等于芯部区域中的光强度的 $1/e^2$ (e 是自然对数的底)的厚度的厚度。关于后者, CdZnTe 层 8041 可具有小于或等于 CdZnTe 层 8041 中的具有作为最高放射频率的最大频率的太赫兹波的等价波长 λ_{eq} 的约 $1/10$ 的厚度。

[0081] 基于 ZnTe 层 8040 的折射率 ($n_g = 2.8$) 和半绝缘性 GaAs 基板 80 和 81 对于太赫兹波的相对介电常数 ($\epsilon_{80} = \epsilon_{81} = 12.9$), θ_c 被设计如下。

[0082]

$$\theta_c = 38.8 \text{ 度} = \cos^{-1}(n_g / \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}})$$

[0083] 正确地说,在使用对于 $1.06\ \mu\text{m}$ 的带的折射率 $n_g = 2.77$ 时,设计值为 39.5 度。在使用对于带 800nm 的折射率 $n_g = 2.85$ 时,设计值为 37.5 度。但是,实际上,如果基于在具有有限宽度的脊形波导中的放射图案 802、805 和 808 中的每一个的有限半值角(与图 8A 中的放射图案中的最大功率的一半对应的一部分的延展角)有效位数的数量为 2,那么获得足够的设计值。在本例子中,同一方向的放射的太赫兹波分量以与第一实施例类似的方式相互增强,由此贡献于整个器件的方向性中的主瓣 811。没有完全消除的波分量变为副瓣 812。因此,整个器件具有大致单一的方向性,使得太赫兹波可被放射到图 8A 的右侧。

[0084] 根据另一设计例子,基板 80 和 81 中的每一个可减薄至 $60\ \mu\text{m}$ 以减小 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 。虽然

Cherenkov 放射的带由于由电磁波的空间延展与各基板的厚度之间的尺寸关系导致的色散或低频带中的截止而变窄,但 θ_c 的减小会减小弯曲部 806 中的弯曲损失。例如,示出 1THz 电磁波模的计算。图 8B 示出计算的电磁波的电场的平方的分布。在这种情况下,基于 ZnTe 的折射率 ($n_g = 2.8$) 和在上述的结构中计算的 1THz 电磁波模中的等价折射率 ($n_{eq} = 3.04$), θ_c 被设计如下。

$$[0085] \quad \theta_c = 23 \text{ 度} = \cos^{-1}(n_g/n_{eq})$$

[0086] 有效介电常数 ϵ_{eff} 可被视为等价折射率 n_{eq} 的平方。可通过这种本领域技术人员公知的计算获得有效介电常数。在其中允许具有不同的振荡频率 ν_1 和 ν_2 的两个激光束进入结构以使得结构产生具有 $\nu_1 - \nu_2 = 1\text{THz}$ 的频率差的单色太赫兹波的情况下,该设计例子是有效的。

[0087] 制造这种结构,以使得通过例如分子束外延 (MBE) 在具有 $525 \mu\text{m}$ 的厚度的半绝缘性 GaAs 基板 80 上形成 ZnTe/CdZnTe 的半导体异质结构。注意,使用 (110) 或 (111) 面取向,以使得与图 8B 中的平面垂直的方向上的各波导区段的非线性系数 d_{14} 不为零。关于晶体生长,在基板上,按顺序形成具有 $2 \mu\text{m}$ 的厚度的 CdZnTe 层 8041、具有 $2 \mu\text{m}$ 的厚度的 ZnTe 层 8040 和具有 $2 \mu\text{m}$ 的厚度的 CdZnTe 层 8041,以外延生长阶跃折射率 (SI) 光学波导。然后,通过使用 SiO_2 等的掩模执行蚀刻,以形成具有 $5 \mu\text{m}$ 的宽度的脊形波导区段 804。当宽度更窄时,其更理想。宽度可具有使得实现单模传播的程度。当宽度更窄时,可以减小上述放射图案的半值角。关于蚀刻,可以使用利用例如溴-甲醇溶液的湿法蚀刻,也可替代性地使用干法蚀刻。通过对于脊形波导区段以外的区域施加 BCB,实现平坦化。最后,半绝缘性 GaAs 基板 81 与上述的部件接合,由此完成根据本例子的结构。关于基板 80 和 81 的减薄方法,例如,可以执行研磨。

[0088] 其它的实施例

[0089] 虽然已参照示例性实施例说明了本发明,但应理解,本发明不限于公开的示例性实施例。以下的权利要求的范围应被赋予最宽的解释以包含所有的变更方式和等同的结构和功能。

[0090] 本申请要求在 2010 年 8 月 24 日提交的日本专利申请 No. 2010-187563 和在 2011 年 7 月 22 日提交的日本专利申请 No. 2011-161411 的益处,在此引入其全部内容作为参考。

[0091] 附图标记列表

[0092] 10、11 电介质

[0093] 101、104、107 波导区段

[0094] 102、105、108 波导区段的放射图案

[0095] 111 整个器件的放射图案中的主瓣

[0096] 112 整个器件的放射图案中的副瓣

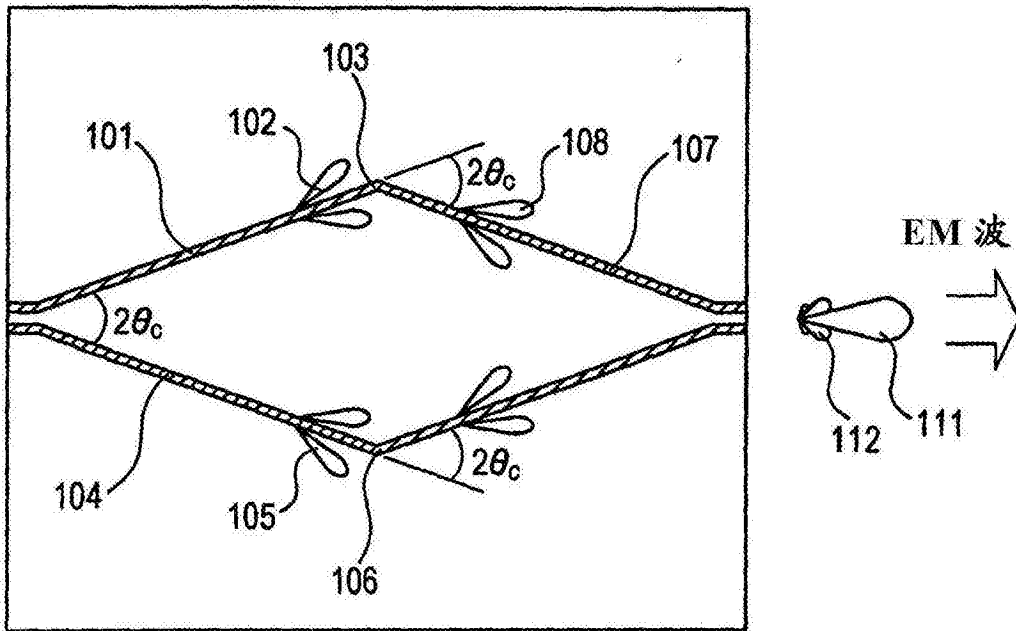


图 1A

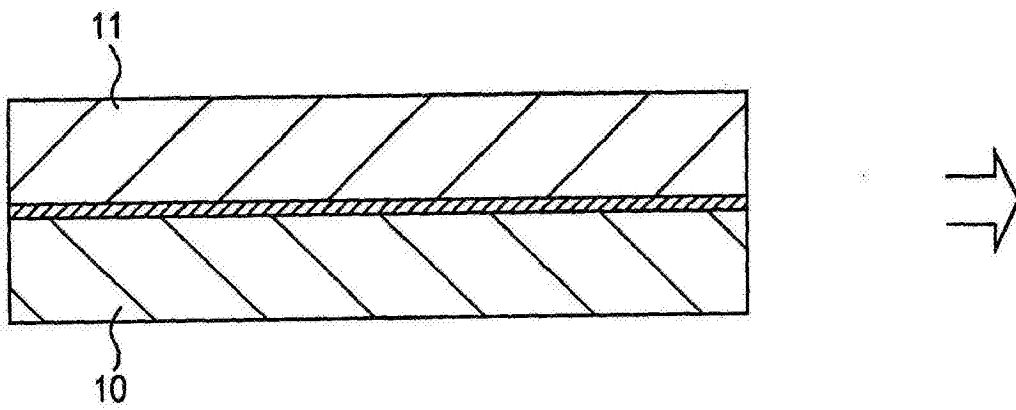


图 1B

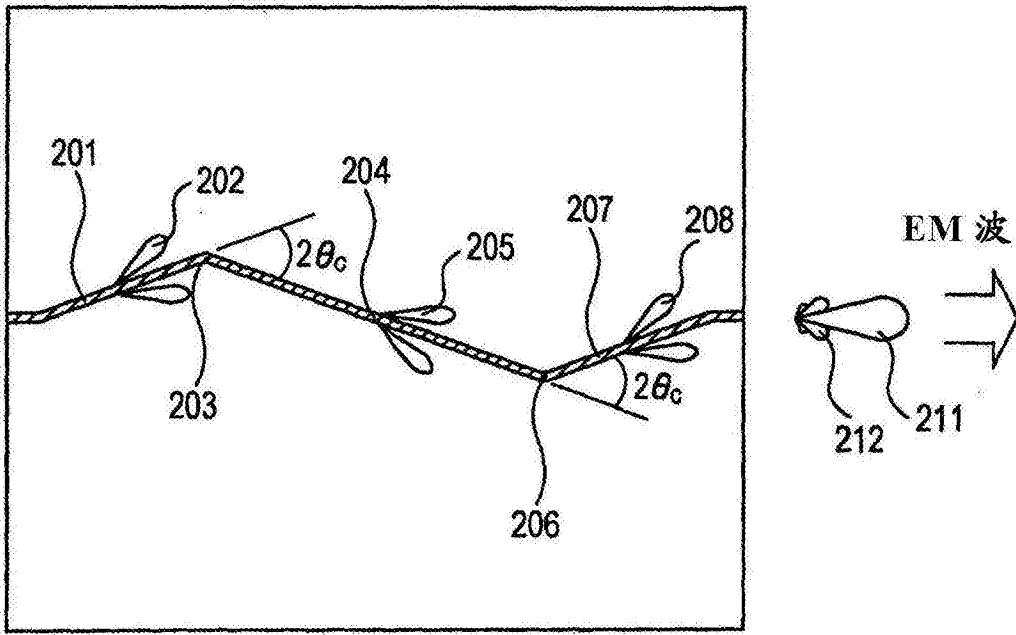


图 2A

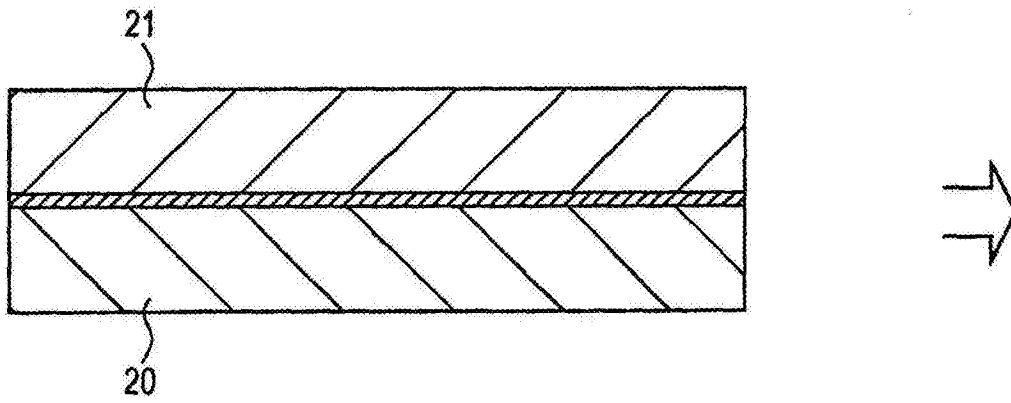


图 2B

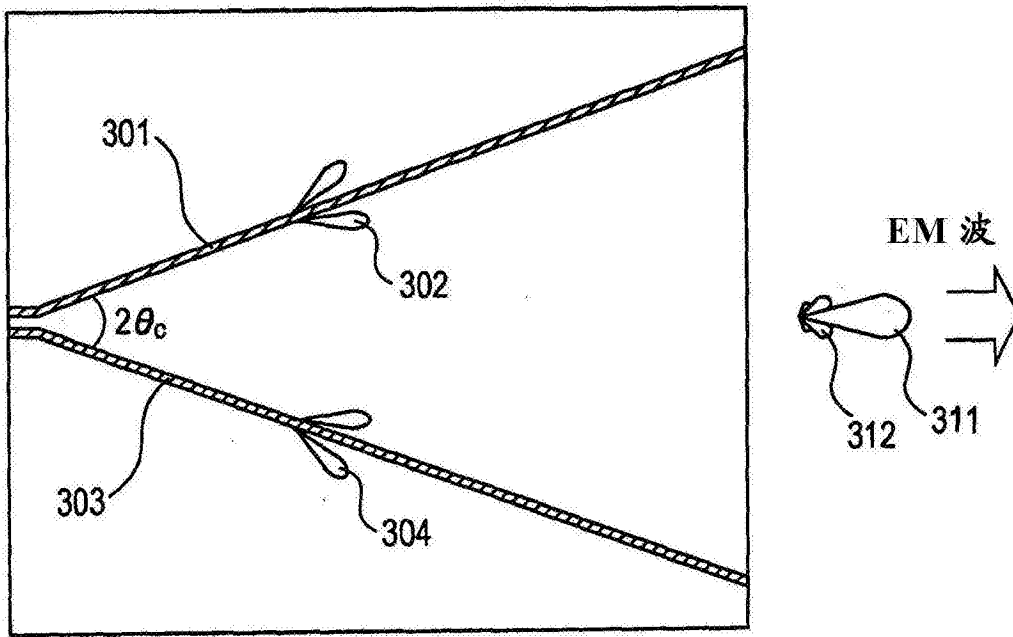


图 3A

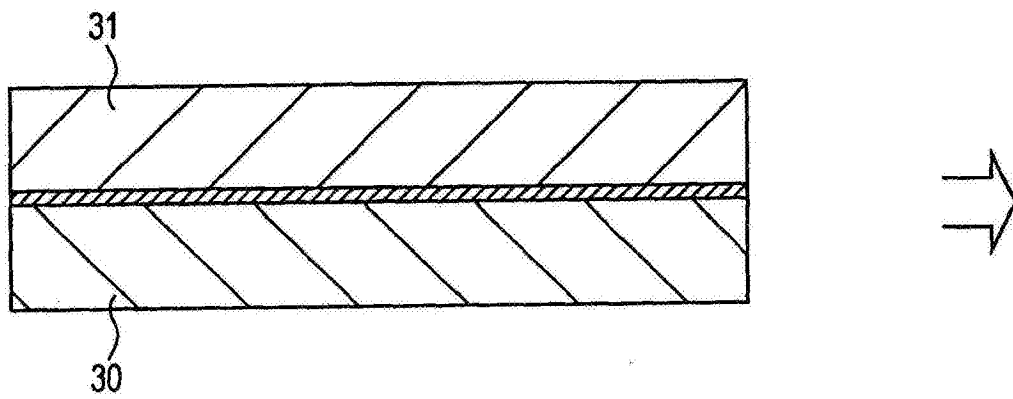


图 3B

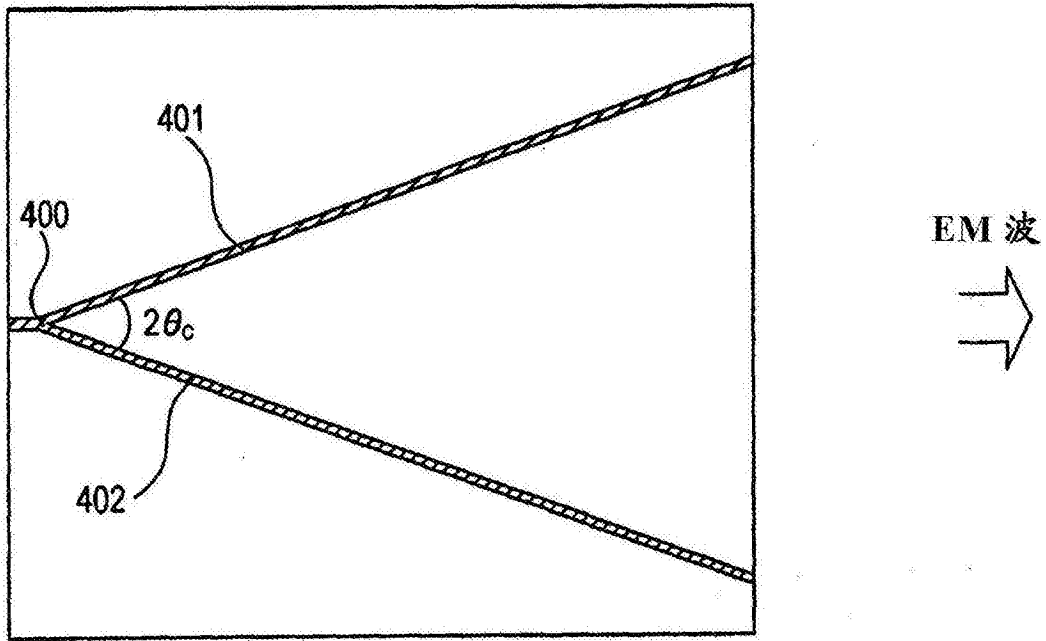


图 4

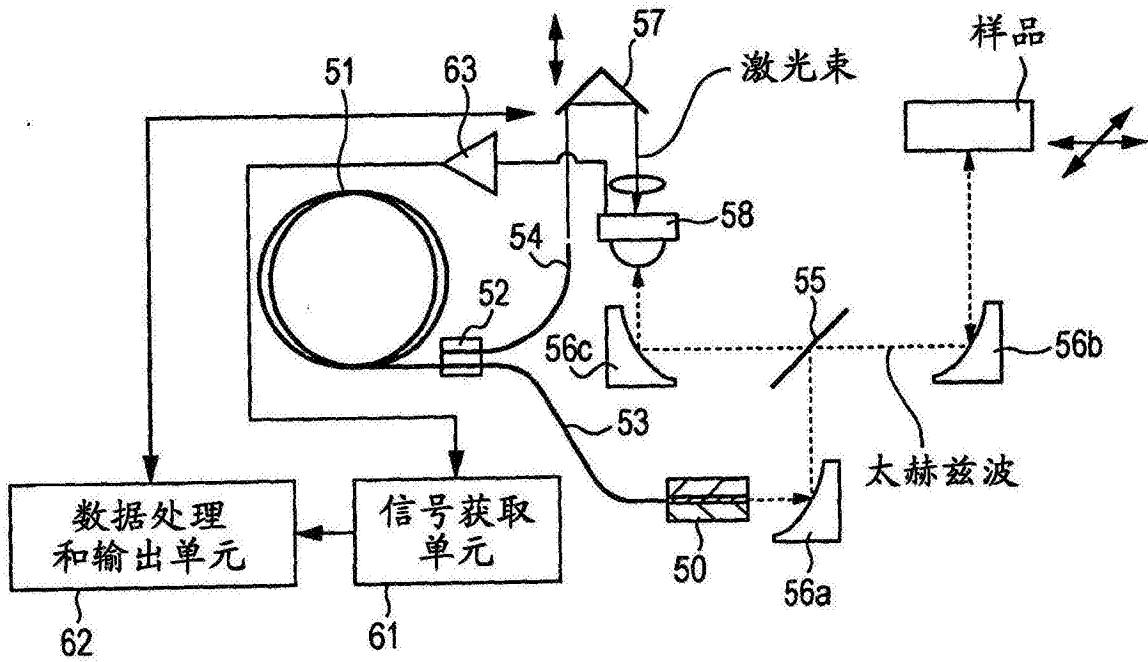


图 5A

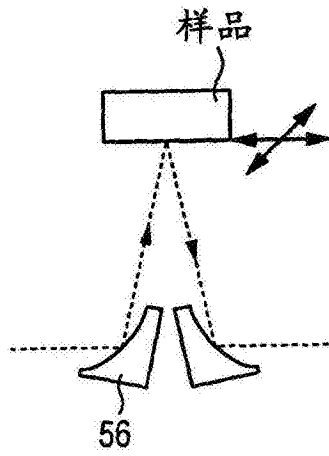


图 5B

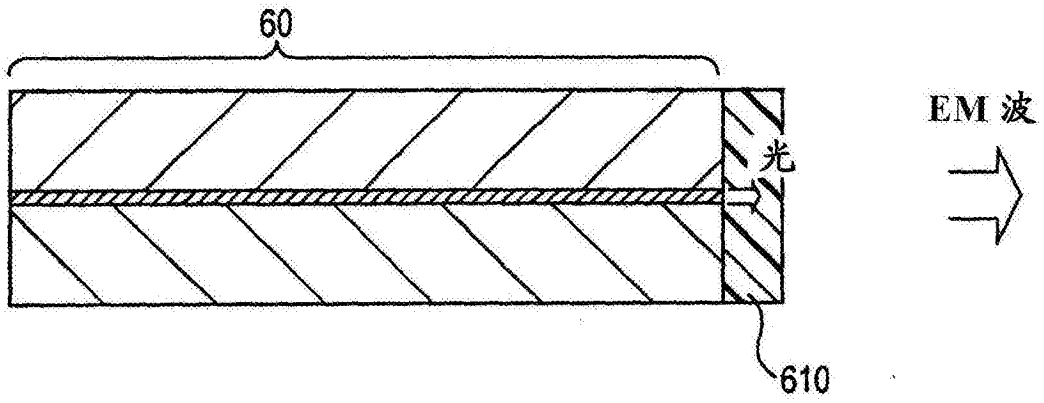


图 6A

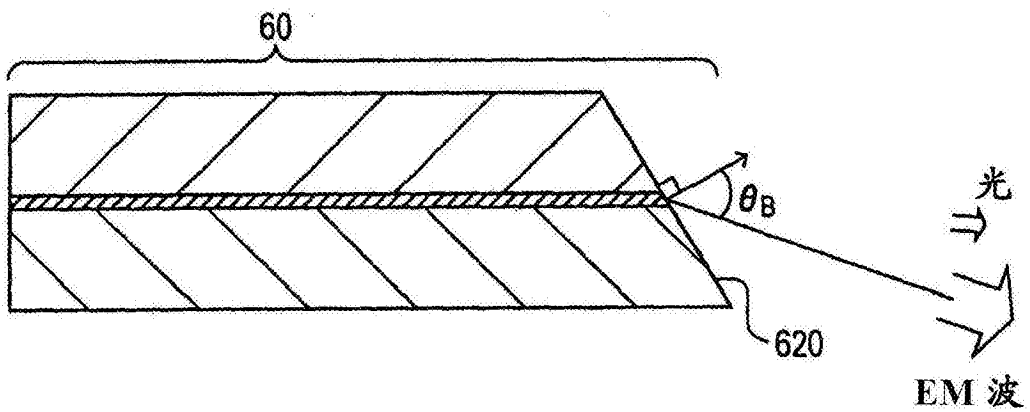


图 6B

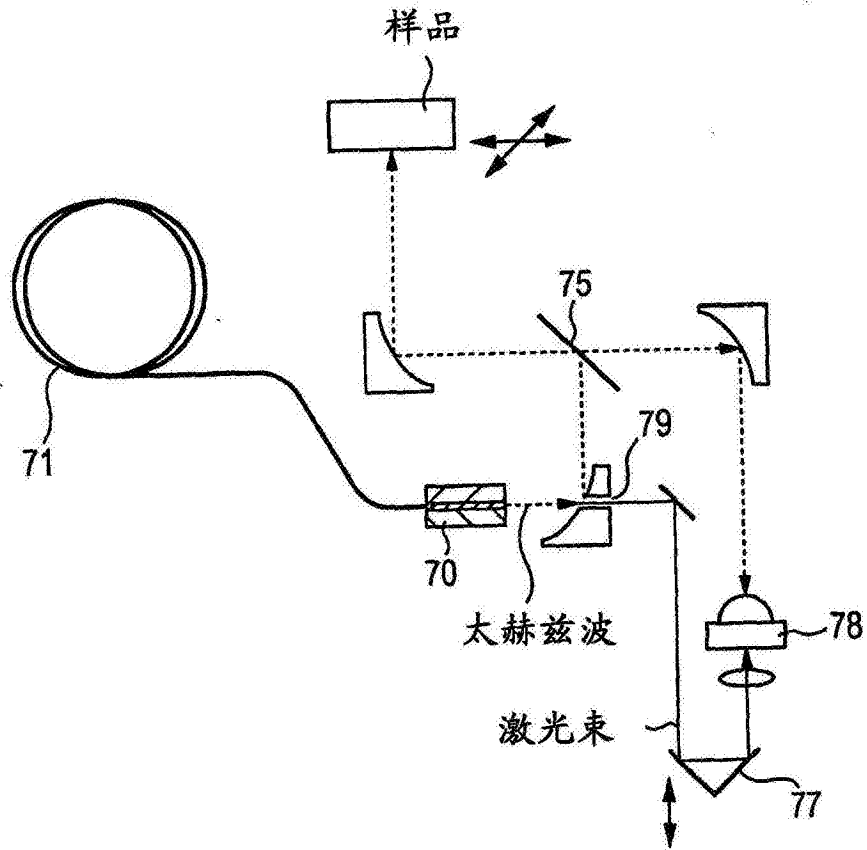


图 7

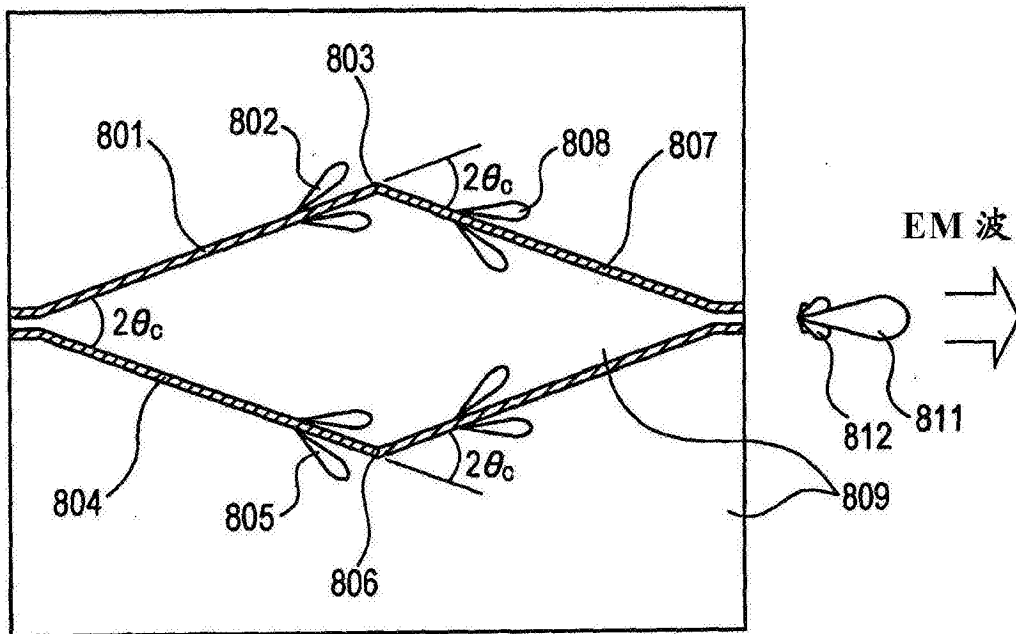


图 8A

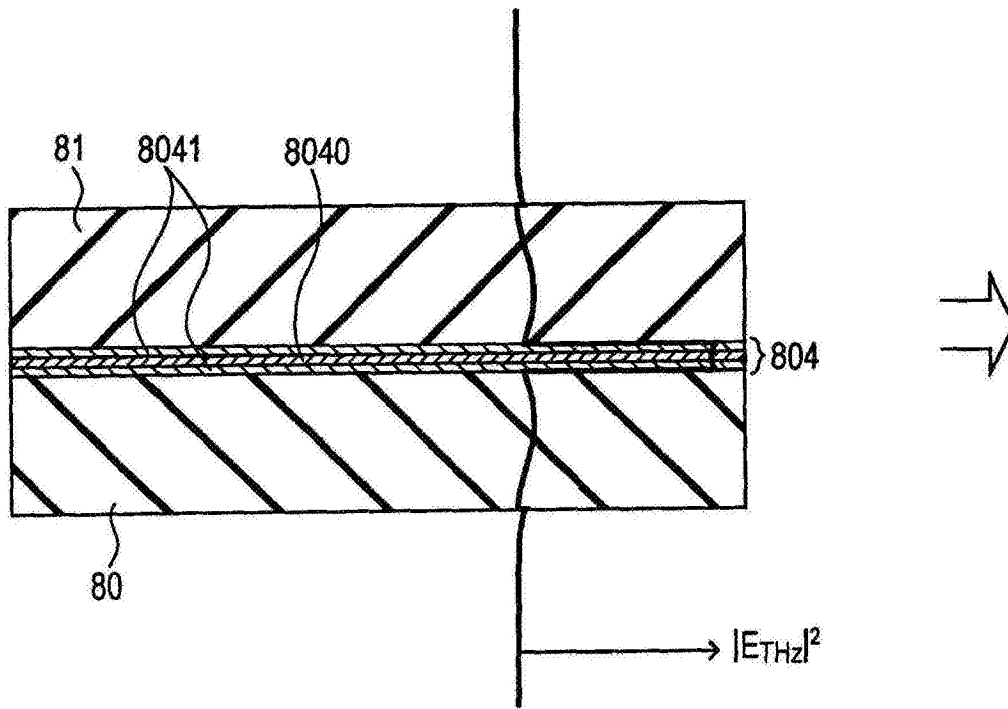


图 8B

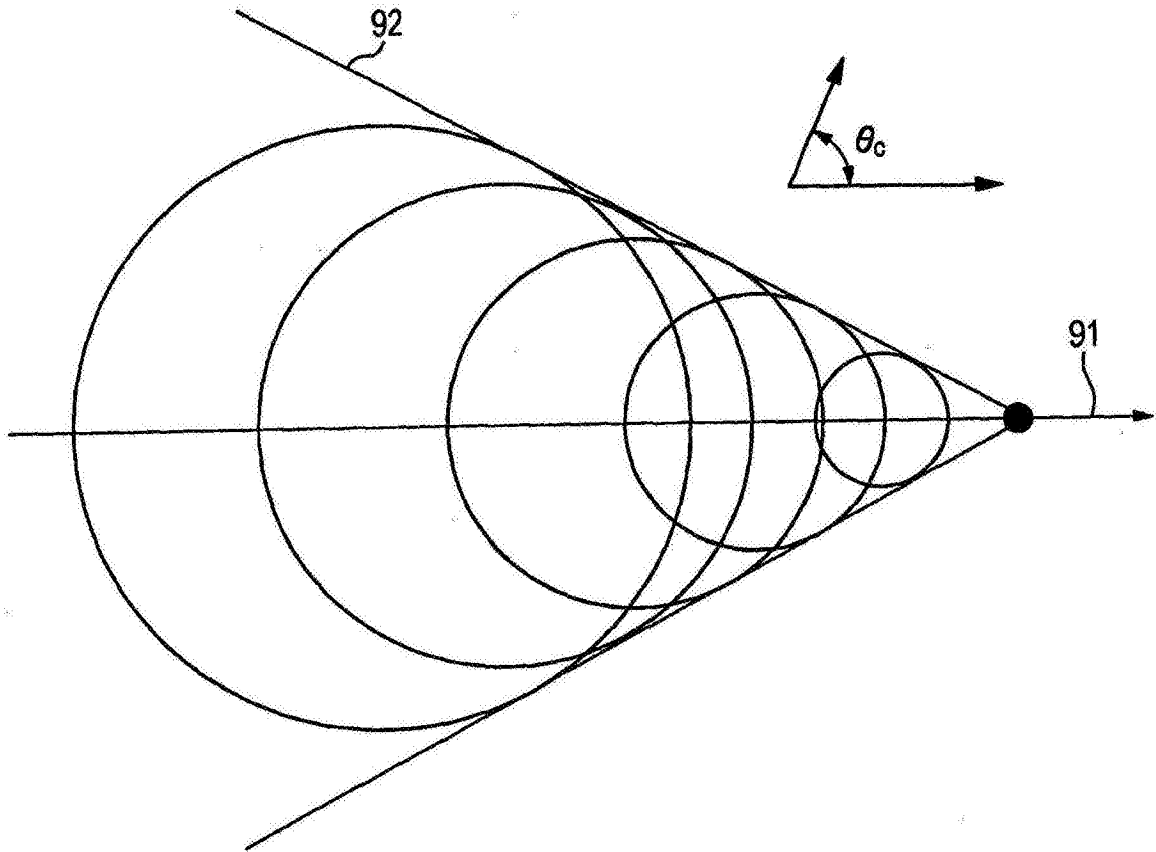


图 9

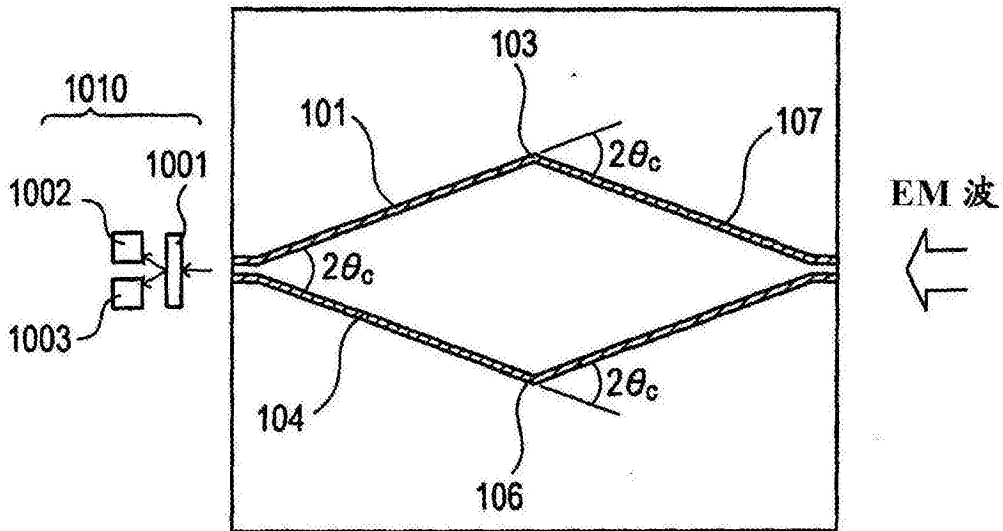


图 10A

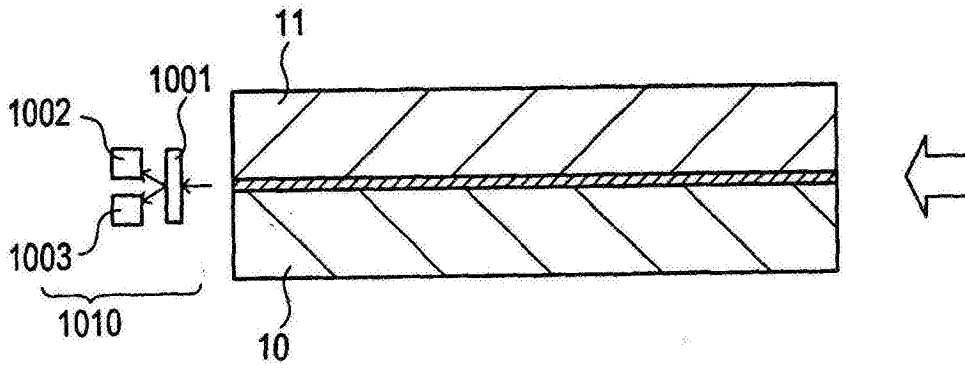


图 10B

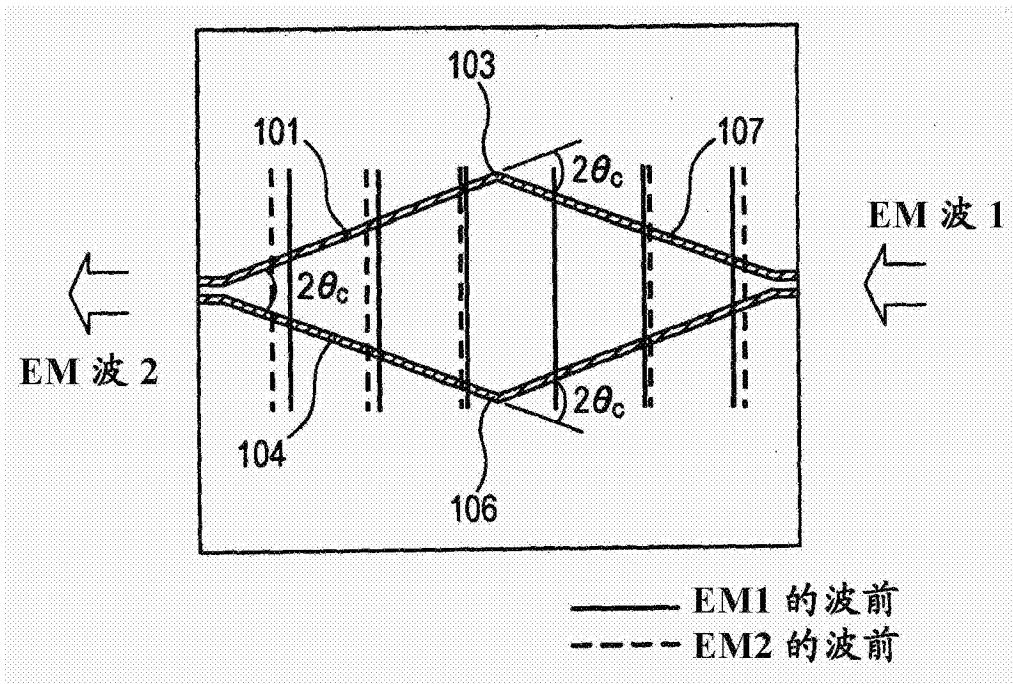


图 11A

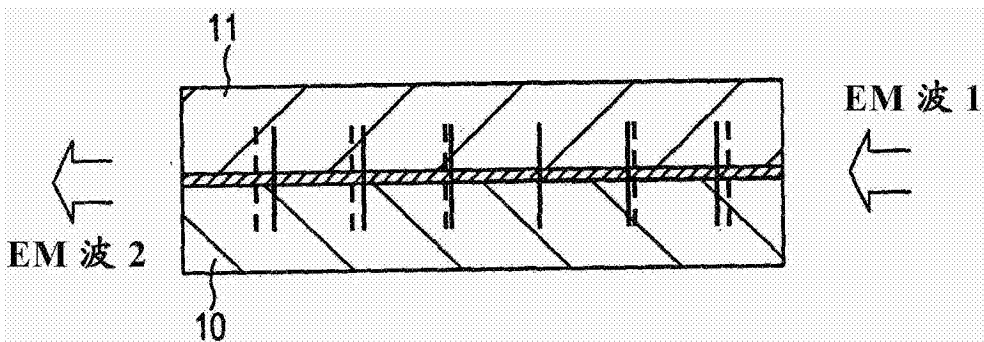


图 11B

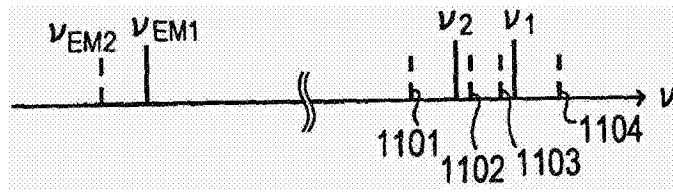


图 11C