



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200510000160.7

[43] 公开日 2005 年 9 月 14 日

[11] 公开号 CN 1667379A

[22] 申请日 2005.1.4

[74] 专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理有限公司
代理人 柳春雷

[21] 申请号 200510000160.7

[30] 优先权

[32] 2004. 3. 8 [33] US [31] 10/795,917

[71] 申请人 安捷伦科技有限公司

地址 美国加利福尼亚州

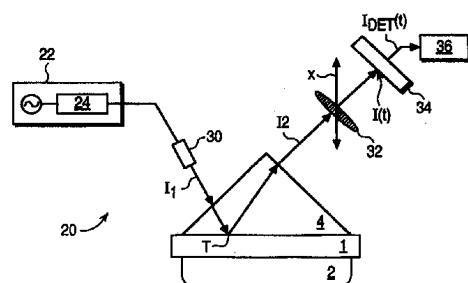
[72] 发明人 格雷戈里·D·范维格瑞恩
丹尼尔·B·罗伊特曼

权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图 9 页

[54] 发明名称 目标的光相位测量

[57] 摘要

本发明提供了用于目标的光相位测量的装置和方法。光相位检测包括产生具有第一偏振的第一光波和具有从第一偏振偏移的第二偏振的第二光波，并在第一和第二光波之间施加相对延迟。当波长在指定波长范围上被调谐时，相对延迟引起光波之间的频率偏移。将第一和第二光波引导到目标上，来提供第三光波和第四光波。第三光波的偏振分量和第四光波的偏振分量被检测，以提供在频率偏移处的检测信号。光相位检测然后还包括提取由目标引入的在第三和第四光波的偏振分量之间的相位差。



1. 一种光相位检测器，包括：

可调谐光源，所述可调谐光源产生具有第一偏振的第一光波和具有第二偏振的第二光波，所述第二光波相对于所述第一光波有延迟，当所述可调谐光源在指定波长范围上被调谐时，所述延迟在所述第一光波与所述第二光波之间引入频率偏移；

目标，所述目标接收所述第一光波和所述第二光波，并响应于所述第一光波和所述第二光波提供第三光波和第四光波；

10 检测器，所述检测器截获所述第三光波的偏振分量和所述第四光波的偏振分量，并提供在所述频率偏移处的检测信号；和

处理器，所述处理器接收所述检测信号，并提取由所述目标引入的在所述第三光波与所述第四光波之间的相位差。

15 2. 根据权利要求 1 所述的光相位检测器，其中，提取所述第三光波与所述第四光波之间的相位差包括将所述检测信号与在所述频率偏移处的频率参考进行相位比较。

20 3. 根据权利要求 2 所述的光相位检测器，其中，所述频率参考是通过这样提供的：从所述可调谐光源中分出所述第一光波和所述第二光波、使所述被分出的第一光波和所述被分出的第二光波穿过偏振器、并检测所得到的来自所述偏振器的在所述被分出的第一光波和所述被分出的第二光波之间的所述频率偏移处的信号。

4. 根据权利要求 3 所述的光相位检测器，其中，所述被分出的第一光波和所述被分出的第二光波在穿过所述偏振器之前在参考目标处被反射。

25 5. 根据权利要求 1 所述的光相位检测器，其中，所述第一光波具有 s 偏振，所述第二光波具有正交的 p 偏振。

6. 根据权利要求 4 所述的光相位检测器，其中，所述相位差是所述 p 偏振分量的相位。

7. 根据权利要求 1 所述的光相位检测器，其中，所述目标包括表面等离子谐振转换器。

8. 根据权利要求 1 所述的光相位检测器，还包括被置于所述目标与检测器之间的成像元件，所述成像元件将所述目标的物理位置映射到所述检测器的物理位置。

9. 根据权利要求 8 所述的光相位检测器，其中，所述目标包括表面等离子谐振转换器的阵列。

10. 根据权利要求 1 所述的光相位检测器，其中，所述可调谐光源包括被耦合到偏振保持耦合器上的可调谐激光器、被耦合到所述偏振保持耦合器的第一输出上的光学延迟元件、被耦合在所述光学延迟元件与所述偏振保持耦合器的第二输出之间的偏振束合成器，其中所述偏振束合成器被耦合到准直器。

11. 根据权利要求 1 所述的光相位检测器，其中，所述频率偏移是通过所述可调谐光源的调谐速率与所述相对延迟而建立的。

12. 一种光相位检测方法，包括：

在指定波长范围上对具有第一偏振的第一光波和具有从所述第一偏振偏移的第二偏振的第二光波进行调谐；

通过在所述第一光波与所述第二光波之间施加相对延迟，而在所述第一光波与所述第二光波之间提供频率偏移；

将所述第一光波和所述第二光波引导到目标上，所述目标响应于所述第一光波和所述第二光波提供第三光波和第四光波；

20 检测所述第三光波的偏振分量和所述第四光波的偏振分量，以提供在所述频率偏移处的检测信号；以及

提取由所述目标引入的在所述第三光波的所述偏振分量与所述第四光波的所述偏振分量之间的相位差。

13. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，提取所述相位差的步骤包括将所述检测信号与在所述频率偏移处的频率参考进行相位比较。

14. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，所述第一光波具有 s 偏振，所述第二光波具有正交的 p 偏振。

15. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，所述频率参考从检测经过了偏振器的参考光信号而获得，所述参考光信号包括所述第一光波的分支和

所述第二光波的分支。

16. 根据权利要求 14 所述的方法，其中，所述相位差是所述 p 偏振分量的相位。

5 17. 根据权利要求 16 所述的方法，其中，相对于在所述指定波长范围上的波长来记录所述相位。

18. 根据权利要求 12 所述的方法，其中，所述目标包括表面等离子谐振转换器。

19. 根据权利要求 13 所述的方法，还包括将所述目标的物理位置映射到检测器的物理位置。

10 20. 根据权利要求 19 所述的方法，其中，所述目标包括表面等离子谐振转换器的阵列。

目标的光相位测量

5 技术领域

本发明一般地涉及光相位测量，更具体地，涉及光相位检测器和光相位检测方法。

背景技术

10 表面等离子谐振（surface plasmon resonance, SPR）涉及沿导电薄膜与相邻电介质之间界面的表面等离子波的光激发。在谐振中，来自入射光信号的能量被耦合到表面等离子波中，导致在发生谐振的光波长处，从导电薄膜反射的光信号的强度降低。在谐振光波长处还发生反射光信号中的相变。由于与延伸到电介质中的表面等离子波相关联的倏逝尾部
15 （evanescent tail），在谐振光波长处的反射光信号的相位对与导电薄膜相邻的电介质的折射率的变化是敏感的。这种相位对折射率的敏感性使得电介质可以被用作感应介质。例如，当电介质包括生化样本的时候，折射率的变化可以被用于指示生化样本中的生化情况或者过程。

由于反射光信号中的相变对电介质或感应介质的折射率变化的敏感
20 性，基于 SPR 的相位测量已经被开发作为生化感应的分析工具。例如，
Immunosensor based on optical heterodyne phase detection, Sensors and
Actuators B, 第 76 卷, Xinglong Yu 等, (2003), 第 199~202 页, 发表了干涉测量法、光外差法以及其他技术，用于检测与折射率中小于微量单位的变化相对应的相位变化，这些折射率的变化与生化样本中抗体与蛋白
25 质的结合/解离相联系。

对进一步增加敏感性的相位检测方案有着持续的需求，利用该敏感性可以检测折射率的变化。此外，存在对这样的基于 SPR 的相位检测方案的需求，这些相位检测方案是可变规模的，以便与包含用于生化感应的样品阵列的分析系统相适应。

发明内容

根据本发明的实施例，光相位检测包括产生具有第一偏振的第一光波和具有从第一偏振偏移的第二偏振的第二光波，并在第一和第二光波之间
5 施加相对延迟。当这些光波的波长在指定波长范围上被调谐时，所施加的延迟就引起频率偏移。

光波被引导到响应于第一和第二光波而提供第三光波和第四光波的目标上。第三光波的偏振分量和第四光波的偏振分量被检测，以提供在频率偏移处的检测信号。光相位检测然后还包括提取由目标引入的在第三和第
10 四光波的偏振分量之间的相位差。根据本发明的另外的实施例，将光相位检测增大规模（scaling）使得能够从目标阵列同时或者顺序地检测 SPR 所引入的相移。

附图说明

15 图 1 示出了 SPR 转换器的传统结构。

图 2 示出了对于图 1 的结构的示例相位-波长图。

图 3 示出了根据本发明实施例的光相位检测器。

图 4A~4B 示出了图 3 的光相位检测器的示例实施方式。

图 5A~5B 示出了本发明实施例中所包括的偏振光信号的详细示图。

20 图 6 示出了根据本发明实施例的示例相位线对光波长的关系。

图 7 示出了根据本发明实施例的对于不同偏振对准的相变对光波长的关系。

图 8A~8B 示出了根据本发明实施例的增大規模的光相位检测器。

图 9 示出了根据本发明另外的实施例的相位检测方法的流程图。

25

具体实施方式

图 1 示出了被称为 Kretschmann 结构的传统 SPR 转换器 10。SPR 转换器 10 包括与电介质 2 相邻的导电薄膜 1。但是，在 SPR 转换器 10 的某些应用中，电介质 2 是感应介质，连接层（未示出）介于导电薄膜 1 与电介

质 2 之间，用于提供生物分子受体连接的位置。为了清楚，图 1 中的导电薄膜被示出为与电介质 2 相邻，而没有连接层。棱镜 4 被定位成相邻于导电薄膜 1 的和电介质 2 相对的一侧。在多篇参考文献中描述了 Kretschmann 结构的 SPR 转换器 10，包括 *Simulation and Analysis of Surface Plasmon Resonance Biosensor Based on Phase Detection*, Sensors and Acuators B, 第 91 卷, Xinglong Yu 等, (2003), 第 285~290 页。

在 SPR 转换器 10 的典型应用中，导电薄膜 1 是金层，其对于在指定的入射角 Φ_{SP} 和用于激发沿着导电薄膜 1 的表面等离子波或表面等离子激元 (surface plasmon) 的波长处的入射光信号 I_i ，具有适当的厚度 d_1 。与 10 表面等离子激元相关联的是倏逝尾部 (未示出)，该倏逝尾部穿透到与导电薄膜 1 相邻的电介质 2 中。入射光信号 I_i 的没有被耦合到表面等离子激元中的能量在导电薄膜 1 处被反射，并产生反射光信号 I_r 。

图 2 示出了在图 1 的 SPR 转换器 10 的情形中，入射光信号 I_i 撞击到 15 在导电薄膜 1 上的目标 T 上所得到的反射光信号 I_r 的示例相位曲线。相对于波长 λ_R 附近的波长 λ 来表示相位，其中在波长 λ_R 处，入射光信号 I_i 耦合到表面等离子激元。该波长 λ_R 是 SPR (表面等离子谐振) 的光波长，此后称为谐振波长 λ_R 。图 2 显示出反射光信号 I_r 的相位对在谐振波长 λ_R 附近的入射光信号 I_i 的波长 λ 高度敏感。而由于穿入电介质 2 的倏逝尾部， 20 谐振波长 λ_R 又对电介质 2 的折射率 n_s 的变化高度敏感。检测反射光信号 I_r 的相位使得能够检测出电介质 2 的折射率 n_s 的变化。

图 3 示出了根据本发明实施例的光相位检测器 20。光相位检测器 20 包括产生光信号 I_1 的可调谐光源 22。光信号 I_1 包括具有第一偏振的第一光波和具有第二偏振的第二光波，其中第二偏振从第一偏振偏移。在典型的示例中，第一和第二光波的偏移偏振是常规的偏振 p、s。为了说明的目的，具有 p 偏振的光波被称为光波 p，具有 s 偏振的光波被称为光波 s。

可调谐光源 22 包括延迟元件 24，该延迟元件 24 在光信号 I_i 的光波 p、s 之间引入相对延迟 τ 。当可调谐光源 22 的波长 λ 在 λ_1 与 λ_2 之间的波长范围上以速率 γ 被调谐或扫频时，该被引入的延迟 τ 导致光波 p 与光波 s 之间的频率偏移 $\gamma\pi$ 。

图 4A 示出了本发明的一个实施例，其中，可调谐光源 22 包括与偏振延迟单元 PDU 级联的可调谐激光器 26。可调谐激光器 26 可以在 λ_1 与 λ_2 之间的波长范围上被扫频。 λ_1 与 λ_2 之间的波长范围足够宽，以容纳由于电介质 2 的折射率 n_s 中的相应改变而引起的谐振波长 λ_R 的改变。在一个示例中，可调谐激光器 26 是安捷伦科技有限公司的型号 81680D，其可以在至少 1492~1640 纳米的波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内以线性斜率被调谐。偏振延迟单元 PDU 包括偏振维持光纤耦合器 23，其将由可调谐激光器 26 提供的光信号分到第一支路和第二支路中。这些支路中的一个，例如第一支路，包括一段光纤 25，用于在第一支路与第二支路中的光之间引入相对延迟 τ 。第一支路和第二支路然后被耦合到偏振束合成器 28，该偏振束合成器 28 向准直器 30 传输来自第一支路的具有一种偏振（例如偏振 p）的光，以及来自第二支路的具有被偏移的偏振（例如偏振 s）的光。偏振束合成器 28 提供光信号 I_1 的光波 p、s。

或者，使用平面光学回路实现偏振延迟单元 PDU，其中，在平面光学系统中实现偏振维持光纤耦合器 23 和偏振束合成器 28，并且使用平面光波导实现延迟元件 24。在另一个示例中，使用偏振束分光器 21、作为延迟元件 24 的自由空间光路以及偏振束合成器 28，实现偏振延迟单元 PDU，如图 4B 所示。

准直器 30 或者其他束调整元件被耦合到可调谐光源 22 上，以将光信号 I_1 引导至导电薄膜 1 上的目标 T 上，如图 5A 所示。在目标 T 处反射光信号 I_2 。光信号 I_2 包括一对光波 p_r, s_r ，光波 p_r, s_r 具有与光信号 I_1 的光波 p 和光波 s 的偏移偏振相对应的偏移偏振。光波 p 具有与导电薄膜 1 的平面垂直的电场分量，而光波 s 具有位于导电薄膜 1 的平面中的电场。光波 p 耦合到表面等离子激元，而光波 s 不耦合到表面等离子激元。因此，光信号 I_2 的光波 p_r 经历了如图 2 所指示的在谐振波长 λ_R 处的相移，而光信号 I_2 的光波 s_r 不经历这样的相移。

光信号 I_2 被偏振器 32 接收，该偏振器 32 具有偏振轴 X，该偏振轴 X 从光波 p_r, s_r 的偏振轴旋转偏移了 45 度，如图 5A 所示。但是，偏振器 32 的偏振轴 X 从这些偏振轴的除了 45 度之外的其他旋转偏移量可以是可以

的。

光信号 I_2 的光波 p_r 、 s_r 由于穿过偏振器 32 而互相作用，在检测器 34 处形成干涉信号 $I(t)$ 。干涉信号 $I(t)$ 由等式 (1) 表示。

$$I(t) = E_s(t)^2 + E_p(t)^2 + 2E_s E_p \cos(2\pi\gamma\tau + \Delta\phi_{sp}) \quad (1)$$

在等式 (1) 中， $E_s(t)$ 、 $E_p(t)$ 分别代表光信号 I_2 的光波 p_r 、 s_r 的电场大小； γ 是可调谐光源 22 被调谐或扫频的速率； τ 是在由可调谐光源 22 提供的光信号 I_1 的光波 p 、 s 之间引入的相对延迟； $\Delta\phi_{sp}$ 是光信号 I_2 的光波 p_r 、 s_r 之间的相位差。由于光信号 I_1 的光波 s 并不耦合到表面等离子激元，所以光信号 I_2 的光波 s_r 并不由于 SPR 而产生相移。从而，相位差 $\Delta\phi_{sp}$ 是光波 p_r 的相移，被指定为相位 ϕ_p 。因为光波 s 、 s_r 通过了与光波 p 、 p_r 相同的光路，所以确定光波 p_r 相对于光波 s_r 相位的相位 ϕ_p 提供了对机械震动、温度变化以及其他影响的抗扰性。

随着可调谐光源 22 的波长 λ 在谐振波长 λ_R 附近的波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 上被调谐，干涉信号 $I(t)$ 被检测器 34 截获。检测器 34 响应于干涉信号 $I(t)$ 中的项 $2E_s E_p \cos(2\pi\gamma\tau + \phi_p)$ ，并且可以被滤波或者以其他方式被调谐，以在频率 $\gamma\tau$ 附近的窄的带宽中响应，来改善可以测量或检测项 $2E_s E_p \cos(2\pi\gamma\tau + \phi_p)$ 的敏感性。检测器 34 提供了检测信号 $I_{DET}(t) = K_1 \cos(2\pi\gamma\tau + \phi_p)$ ，其中 K_1 是常数，并且其中 $\gamma\tau$ 是由可调谐光源 22 提供的光信号 I_1 的光波 p 、 s 之间的频差或者拍频。检测信号 $I_{DET}(t)$ 通常是电信号。

通常，检测器 34 是光电二极管、光传感器或者用于将被截获的光信号转换为相应的电信号的其他适合的转换器。或者，检测器 34 是检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 的二维栅格或阵列，这些检测器元件提供与被各个检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 截获的一系列光信号相对应的一系列电信号。

在光相位检测器 20 中包括参考信号 I_{REF} ，这使得干涉信号 $I(t)$ 的项 $2E_s E_p \cos(2\pi\gamma\tau + \phi_p)$ 中的相位 ϕ_p 可以被分离出来。例如，如图 4A 的实施例中所示，经由光耦合器 37 从光信号 I_1 中分出、从参考目标 T_{REF} 反射、并穿过偏振器 32 的参考信号 I_{REF} ，在参考检测器 34R 处提供了包含项 $E_{SREF} E_{PREF} \cos(2\pi\gamma\tau)$ 的干涉信号 $I_R(t)$ 。参考检测器 34R 响应于干涉信号 $I_R(t)$ 中的项 $E_{SREF} E_{PREF} \cos(2\pi\gamma\tau)$ ，并提供频率参考 $I_{RDET}(t) = K_2 \cos(2\pi\gamma\tau)$ ，其中

K_2 是常数。频率参考 $I_{RDET}(t)$ 通常是电信号。

来自检测器 34、34R 的检测信号 $I_{DET}(t)$ 和频率参考 $I_{RDET}(t)$ 被施加到相位比较器或者其他处理器 36，以提取相位 ϕ_p 。适合于提取所施加的信号之间的相位差的相位比较器在本领域中是公知的，例如在 Markus, John 所著的 *Modern Electronic Circuits Reference Manual*, McGraw-Hill 公司, ISBN 0-07-040446-1, 第 699 页中有所描述。但是，可以使用任何适合的处理器 36 来从检测信号 $I_{DET}(t)$ 和频率参考 $I_{RDET}(t)$ 提取或者以其他方式确定相位 ϕ_p 。

图 4A 示出了参考光信号 I_{REF} 入射到参考目标 T_{REF} 上，使得参考光信号 I_{REF} 通过与信号 I_1 、 I_2 所通过的光路平行的光路。当参考信号 I_{REF} 的光路中的参考目标 T_{REF} 不支持在谐振波长 λ_R 处的表面等离子激元的激发时，参考信号 I_{REF} 不经历与 SPR 相关联的相移。于是，检测到的相位可归因于目标 T 的电介质 2 的折射率。当参考信号 I_{REF} 的光路中的参考目标 T_{REF} 支持在谐振波长 λ_R 处的表面等离子激元的激发时，参考信号 I_{REF} 经历与 SPR 相关联的相移。这时，检测到的相位是相位差，其可归因于目标 T 的电介质 2 的折射率与参考目标 T_{REF} 的电介质的折射率之间的差异。

虽然已经介绍了提供参考光信号 I_{REF} 的示例方案，但是应当认识到，任何其他适合的系统、设备、元件或方案也可以被替代地用于提供参考光信号 I_{REF} ，以分离由 SPR 引入的相位 ϕ_p 。参考光信号 I_{REF} 提供了干涉信号 $I(t)$ 的拍频 γ 的频率参考 $I_{RDET}(t)$ ，如图 4A 所示。在对图 4A 所示的实施例的替代实施例中，参考光信号 I_{REF} 是从光信号 I_1 中分出的，并被直接传给偏振器 32 和检测器 34，而不在参考目标 T_{REF} 上反射。

随着相位 ϕ_p 被测量，光信号 I_1 的光波 p 的波长 λ 被记录在存储器或者其他存储设备（未示出）中，以建立在谐振波长 λ_R 附近光波长 λ 与相位 ϕ_p 之间的关系。使用如在 *Fiber Optic Test and measurement*, Dennis Derickson 编, ISBN 0-13-534330-5, 第 42~44 页中所描述的光干涉测量法、零差法或外差法光谱分析，或者使用其他任何适合的波长辨别技术，来记录或确定光信号 I_1 的波长 λ 。或者，基于开始波长 λ_1 和开始时间 t_1 、停止波长 λ_2 和停止时间 t_2 、可调谐光源 22 在时间间隔 t_2-t_1 中的开始波长 λ_1 与停止波长 λ_2 之间被调谐或扫频的调谐速率 γ ，来确定波长 λ 。对于在波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$

上具有线性调谐特性的可调谐光源 22，在时间 t_x 与波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 中的波长 λ_x 之间建立了直接映射。例如，在可调谐光源 22 的调谐或扫频范围内，基于相位 ϕ_p 被测量的相应时间 t_x ，根据关系 $\lambda_x = \lambda_1 + (t_x - t_1)\gamma$ ，来确定波长 λ_x 。当可调谐光源 22 具有非线性调谐特性时，这些特性被用于将可调谐光源 22 的扫频或调谐中的指定时间映射到波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的波长 λ_x 。通过在可调谐光源 22 被调谐或扫频时将相位 ϕ_p 记录为时间的函数，并使用可调谐光源 22 的时间 t_x 与波长 λ_x 之间所建立的映射，确定了相位 ϕ_p 对波长 λ 的关系。

从波长 λ 与相位 ϕ_p 之间的关系，可以容易地确定在谐振波长 λ_R 处或者足够接近谐振波长 λ_R 处的量 $d\phi_p/d\lambda$ ，其中量 $d\phi_p/d\lambda$ 代表相位 ϕ_p 对在谐振波长 λ_R 处的波长 λ 的变化的敏感度。

根据本发明的另一个实施例，相位 ϕ_p 的测量被用于近似在谐振波长 λ_R 处的 $d\phi_p/d\lambda$ 。图 2 显示出在谐振波长附近，存在一个波长范围，其中由量 $d\phi_p/d\lambda$ 表示的相移对波长变化的敏感度近似是常量。因而，在该波长范围内的量 $d\phi_p/d\lambda$ 提供了在谐振波长处的量 $d\phi_p/d\lambda$ 的近似。该近似的准确度依赖于在发生 SPR 相变的波长范围内相位 ϕ_p 对波长 λ 的斜率的一致性。

从在谐振波长 λ_R 处的量 $d\phi_p/d\lambda$ 、以及确定了代表在谐振波长 λ_R 处的波长对折射率的敏感度的量 $d\lambda/dn_s$ ，将代表相位 ϕ_p 对折射率 n_s 变化的敏感度的量 $d\phi_p/dn_s$ 建立为 $d\phi_p/dn_s = (d\phi_p/d\lambda)(d\lambda/dn_s)$ 。以多种方式确定量 $d\lambda/dn_s$ 。在一个示例中，从使用 MATLAB 或者其他适合的程序或环境来求解导电薄膜-电介质界面处的菲涅耳反射以对谐振波长 λ_R 对折射率 n_s 变化的敏感度建模，而对图 1 的结构 10 的计算机仿真中，确定量 $d\lambda/dn_s$ 。在另一个示例中，以经验方式确定量 $d\lambda/dn_s$ ，其中用在谐振波长 λ_R 附近的波长 λ 处的光信号 I_l 顺序地或同时地照射包括具有不同已知折射率 $n_{s1}、n_{s2} \dots \dots n_{sx}$ 的电介质 2 的目标 T，以确定 SPR 对应于每个折射率 $n_{s1}、n_{s2} \dots \dots n_{sx}$ 的谐振波长 $\lambda_{R1}、\lambda_{R2} \dots \dots \lambda_{Rx}$ 。谐振波长 $\lambda_{R1}、\lambda_{R2} \dots \dots \lambda_{Rx}$ 对折射率 $n_{s1}、n_{s2} \dots \dots n_{sx}$ 的曲线拟合、差值法或者其他适合的技术被用于建立折射率 n_s 与谐振波长 λ_R 之间的映射，以确定在谐振波长 λ_R 处的量 $d\lambda/dn_s$ 。

还可以通过匹配导电薄膜 1 与电介质 2 之间的界面处的适当的波矢，

确定量 $d\lambda/dn_s$ 。这包括使表面等离子激元的波矢 $k_{SPR} = w/c((\epsilon_1 n_s^2)(\epsilon_1 + n_s^2))^{1/2}$ 等于光信号 I_l 的波矢 $k_x = n_4(2\pi/\lambda)\sin\phi_{SP}$, 其中, ϵ_1 是导电薄膜 1 的介电常数, n_4 是棱镜 4 的折射率, ϕ_{SP} 是光信号 I_l 的入射角。可以从波矢 k_{SPR} 、 k_x 的等式获得量 $d\lambda/dn_s$, 如等式 (2), 其中导电薄膜 1 的介电常数 5 ϵ_1 的虚部被设为零。

$$\frac{d\lambda}{dn_s} = \frac{n_4 \epsilon_1}{\frac{n_4 n_s^3}{\lambda} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) + \frac{dn_4}{d\lambda} n_s (n_s^2 + \epsilon_1)} \quad (2)$$

所表示出的用于确定在谐振波长处的量 $d\lambda/dn_s$ 的可选方法是示例性的。应当认识到, 任何适合的方案可以被替代地用于确定或近似在谐振波长 λ_R 处或者在适当靠近谐振波长 λ_R 的波长处的量 $d\lambda/dn_s$, 使得相位 ϕ_p 对 10 折射率 n_s 变化的敏感度可以被建立为 $d\phi_p/dn_s = (d\phi_p/d\lambda)(d\lambda/dn_s)$ 。

根据本发明的另一个实施例, 基于对具有不同折射率 n_s 的电介质 2 测量相位 ϕ_p , 来建立相位 ϕ_p 与折射率 n_s 之间的映射。在该实施例中, 检测相位 ϕ_p , 并从所建立的映射确定电介质 2 的折射率 n_s 的变化。在一个示例中, 折射率 n_s 的变化 dn_s 通过常量与在谐振波长 λ_R 处的相位 ϕ_p 的移位相关, 例如在 *Immunosensor based on optical heterodyne phase detection, Sensors and Actuators B*, 第 76 卷, Xinglong Yu 等, (2003), 第 200 页 15 所提出的。

根据本发明的另一个实施例, 相对于具有不同折射率 (例如, 折射率 n_s 和折射率 $n_s + \Delta n_s$) 的两个或更多个目标 T 的波长 λ , 检测相位 ϕ_p 。如 20 图 6 所示, 所检测到的与折射率 n_s 、 $n_s + \Delta n_s$ 相对应的相位 ϕ_p 是这样的偏移曲线, 其是由于因折射率的差异 Δn_s 造成的从谐振波长 λ_R 到谐振波长 $\lambda_R + \Delta\lambda_R$ 的谐振波长中的移位而产生的。谐振波长与折射率之间的映射然后可以被用于将谐振波长的差 $\Delta\lambda_R$ 转换到相应的折射率的差 Δn_s 。

在本发明的另一个实施例中, 通过使光信号 I_l 的光波 p、s 的偏移偏振 25 相对于如图 5A 所示的目标 T 处的常规偏振 p、s 偏向或者旋转, 以得到如图 5B 所示的具有偏向的偏振 p'、s' 的光波 p'、s', 来修改在谐振波长 λ_R 附近相位 ϕ_p 的变化对波长 λ 的变化的敏感度。由于偏振中的偏向而引起的

表现为量 $d\phi_p/d\lambda$ 的增大的该敏感度的增加，提供了相位对电介质 2 的折射率变化的敏感度的增加。图 7 示出了当光信号 I_1 具有相对于光波 p、s 偏向的光波 p'、s' 时光信号 I_2 的相位 ϕ_p （被表示为 $\phi_p(p',s')$ ）。在图 7 中，当光信号 I_1 具有光波 p、s 时光信号 I_2 的相位被表示为 $\phi_p(p,s)$ 。

5 可以以许多方式获得偏振的偏向。例如，通过例如在图 4A 所示的实施例中的偏振束合成器 28 与准直器 30 之间的光纤中建立半波长平板双折射（未示出），这样来产生偏向。或者，通过在偏振束合成器 28 之后立即光信号 I_1 准直，并在被准直的光信号的光束中插入稍微偏向的自由空间半波长平板，这样来实现偏向。或者，可以在准直器 30 与偏振束合成器 28 相邻放置的情况下，通过偏振束合成器 28 的稍微偏向，来实现偏振分量中的偏向。
10

可以例如通过当存在插入的半波长平板时旋转该半波长平板，或者通过在随着在谐振波长 λ_R 附近扫频或者调谐光波长 λ 而测量相位 ϕ_p 的同时旋转偏振束合成器 28，来以经验方式对于光信号 I_1 的偏振的给定偏向，使
15 相位 ϕ_p 的变化对在谐振波长 λ_R 附近的波长 λ 的变化的敏感度增加或者最大化。

可以基于对偏振偏向的分析测定，来增加或优化相位 ϕ_p 的变化对在谐振波长 λ_R 附近的波长 λ 的变化的敏感度。在分析测定中，光信号 I_2 的与光波 p_r、s_r 相对应的电场 E_{SO} 、 E_{PO} 由矩阵等式 (3) 表示。
20

$$\begin{bmatrix} E_{SO} \\ E_{PO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p e^{j\phi_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

在矩阵等式 (3) 中，项 r_s 是用于光波 s 在目标 T 处的反射的琼斯矩阵元；项 $r_p e^{j\phi_p}$ 是用于光波 p 在目标 T 处反射的琼斯矩阵元；项 a 和 b 是用于偏振偏向的琼斯矩阵元，其中 $a = |a|e^{j\delta a}$ ， $b = |b|e^{j\delta b}$ ；项 E_s 、 E_p 分别是光信号 I_1 的光波 p、s 的电场分量。
25

来自目标 T 的反射信号 I_2 穿过偏振器 32 以提供干涉信号 $I'(t)$ ，如图 5B 所示。干涉信号 $I'(t) = |\cos\alpha E_{SO} + \sin\alpha E_{PO}|^2$ 被检测器 34 截获，其中角 α 代表光信号 I_2 的光波与偏振器 32 的轴 X 之间的旋转偏移。检测器 34 响应于在频率 γ 附近的干涉信号 $I'(t)$ 中的项，其中频率 γ 是由可调谐光源 22

提供的光信号 I_l 的光波 p' 、 s' 之间的频率差或者拍频。检测器 34 可以被滤波或者以其他方式被调谐为在频率 $\gamma\pi$ 左右的窄的带宽内响应，以改善可以测量或检测干涉信号 $I'(t)$ 中的指定项的敏感度。检测器 34 提供等式 (4) 中所表示的电信号 $I'_{DET}(t)$ 。

$$I'_{DET}(t) = \cos^2 \alpha |a||b| r_s^2 E_{SO} E_{PO} \cos(2\pi\gamma\pi t + \delta_a - \delta_b) + \\ \cos \alpha \sin \alpha |a|^2 r_s r_p E_{SO} E_{PO} \cos(2\pi\gamma\pi t + 2\delta_a - \phi_p) - \\ \cos \alpha \sin \alpha |b|^2 r_s r_p E_{SO} E_{PO} \cos(2\pi\gamma\pi t - 2\delta_b + \phi_p) - \\ \sin^2 \alpha |a||b|r_p^2 E_{SO} E_{PO} \cos(2\pi\gamma\pi t + \delta_a - \delta_b) \quad (4)$$

对于光信号 I_l 的偏振的偏向，基于等式 (4) 实现了相对于波长的高的相位敏感度，其中 $|b|$ 近似等于来自目标 T 的光波 p 的反射率 r_p ，SPR 的相位 ϕ_p 与偏向 $\delta_a + \delta_b$ 的相位的和是 π 的奇数倍。在典型的示例中，对于光波 p 、 s 的偏振与光波 p' 、 s' 的偏振之间小于 5 度的偏向，实现了敏感度的增加。

在图 8A~8B 中所示的本发明的另一个实施例中，光相位检测器 20 被增大规模，使得能够同时或者顺序地检测来自目标 T 的 SPR 所引入的相移，其中目标 T 包括 SPR 转换器阵列，表示为目标 $T_1 \sim T_N$ 。在图 8A 中，目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列被光信号 $I_{l1} \sim I_{lN}$ 照射，其中光信号 $I_{l1} \sim I_{lN}$ 通过分光器 42 从光信号 I_l 提供并通过准直器 $30_1 \sim 30_N$ 被引导。诸如透镜的成像元件 43 被插入在目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列与检测器 44 之间，其中检测器 44 包括检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 的阵列。成像元件 43 被定位在如图所示目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列与偏振器 32 之间的光路中，或者在偏振器 32 与检测器阵列 44 之间的光路中。成像元件 43 提供目标 $T_1 \sim T_N$ 的物理位置与检测器阵列 44 中的检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 的物理位置之间的映射或者其他对应，使得从目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列所反射的光信号 $I_{21} \sim I_{2N}$ 被检测器阵列 44 中的相应的检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 截获。检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 向相位比较器或者其他处理器 46 提供检测信号 $I_{1DET}(t) \sim I_{NDET}(t)$ 。处理器 46 将检测信号 $I_{1DET}(t) \sim I_{NDET}(t)$ 与频率参考 $I_{RDET}(t)$ 相比较，以提取从目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列中的每个目标反射的信号 $I_{21} \sim I_{2N}$ 的相应的相位。

在图 8A 所示的实施例中，由可调谐光源 22 提供的光信号 I_l 通过从光

信号 I_1 中分出而获得参考光信号 I_{REF} 、经由偏振器 47 使参考光信号 I_{REF} 偏振、并经由检测器 44R 检测所得到的干涉信号 $I_R(t)$ ，这样来产生频率参考 $I_{RDET}(t)$ 。在另一个实施例中，由检测信号 $I_{1DET}(t) \sim I_{NDET}(t)$ 中的指定的一个，例如检测信号 $I_{XDET}(t)$ ，提供频率参考 $I_{RDET}(t)$ 。该指定的检测信号 5 $I_{XDET}(t)$ 对应于目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列中的目标 T_X 。当目标 T_X 没有在入射到目标 T_X 上的光信号 I_{1X} 的波长处引入 SPR 相移时，处理器 46 所提取的相位与参考光信号 I_{REF} 的相位有关。当目标在入射到目标 T_X 上的光信号 I_{1X} 的波长处引入了 SPR 相移时，处理器 46 所提取的相位是有差异的。该相位差对应于目标阵列中的目标之间的折射率差，其与对应于目标 T_X 的折射率有关。
10

根据图 8B 中所示的本发明的实施例，诸如透镜的聚焦元件 47 从光信号 I_1 形成适当宽的束 B_1 来照射目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列。目标阵列反射光信号 I_1 的束 B_1 ，以形成束 B_2 。定位在目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列与偏振器 32 之间的光路中的成像元件 43 提供目标 $T_1 \sim T_N$ 的物理位置与检测器阵列 44 中的检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 的物理位置之间的对应，使得束 B_2 中从位于目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列中的相应目标所反射的部分被检测器阵列 44 中相应的检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 截获。检测器元件 $D_1 \sim D_N$ 向相位比较器或者其他处理器 46 提供检测信号 $I_{1DET}(t) \sim I_{NDET}(t)$ ，其中相位比较器或处理器 46 将检测信号 $I_{1DET}(t) \sim I_{NDET}(t)$ 中的每个与频率参考 $I_{RDET}(t)$ 相比较，以提取从目标 $T_1 \sim T_N$ 20 的阵列中的每个目标反射的束 B_2 中的光信号的相位。

在图 8B 所示的实施例中，由可调谐光源 22 提供的光信号 I_1 通过从光信号 I_1 分出而获得参考光信号 I_{REF} 、经由偏振器 47 使参考光信号 I_{REF} 偏振、并经由检测器 44R 检测所得到的干涉信号 $I_R(t)$ ，这样来产生频率参考 $I_{RDET}(t)$ 。在另一个实施例中，由检测信号 $I_{1DET}(t) \sim I_{NDET}(t)$ 中的指定的一个，例如检测信号 $I_{XDET}(t)$ ，提供频率参考 $I_{RDET}(t)$ 。该指定的检测信号 25 $I_{XDET}(t)$ 对应于目标 $T_1 \sim T_N$ 的阵列中的目标 T_X 。当目标 T_X 没有在光束 B_1 中入射到目标 T_X 上的部分的波长处引入 SPR 相移时，处理器 46 所提取的相位与参考光信号 I_{REF} 的相位有关。当目标 T_X 在光束 B_1 中入射到目标 T_X 上的部分的波长处引入了 SPR 相移时，处理器 46 所提取的相位是有差异

的。该相位差对应于目标阵列中的目标之间的折射率差，其与对应于目标 T_x 的折射率有关。

图 9 示出了根据本发明另外的实施例的相位检测方法 50 的流程图。在方法 50 的步骤 51 中，光波 p 和光波 s 在波长范围上被调谐。在步骤 52 5 中，在对光信号 I_1 的波长进行调谐时通过在光波 p 与光波 s 之间施加相对延迟 τ ，而在光波 p 与光波 s 之间提供了频率偏移 $\gamma\tau$ 。步骤 54 包括将光波 p 与光波 s 引导到目标 T，以提供响应于光波 p 与光波 s 的光波 p_r 与光波 s_r 。步骤 56 包括检测光波 p_r 的偏振分量以及光波 s_r 的偏振分量，以提供在频率偏移 $\gamma\tau$ 处的检测信号。在步骤 58 中，提取在光波 p_r 、 s_r 的偏振分量 10 之间由目标 T 引入的相位差或相位 ϕ_p 。提取相位 ϕ_p 通常包括检测信号与在频率 $\gamma\tau$ 处的频率参考的相位比较。在一个示例中，通过检测经过偏振器的参考光信号来获得频率参考，其中参考光信号从光信号 I_1 的光波 p、s 中分出。

虽然已经将 SPR 转换器 10 或者 SPR 转换器阵列用作根据本发明实施 15 例的示例目标 T，但是目标 T 也可以是适合于响应于所施加的光信号 I_1 而提供光信号 I_2 的任何设备、元件或者系统，其中光信号 I_2 通过光信号 I_1 的反射、透射或者其他处理产生。

虽然已经详细地说明了本发明的实施例，但是很显然，本领域的技术人员可以想到对这些实施例的修改和变化，而不脱离如所附权利要求中所 20 提出的本发明的范围。

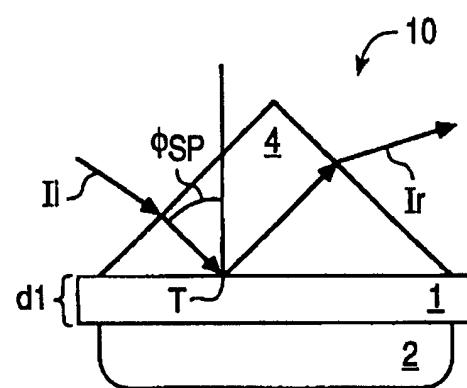


图 1

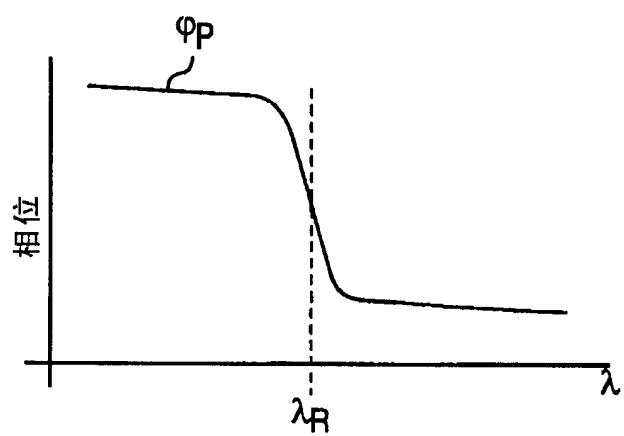


图 2

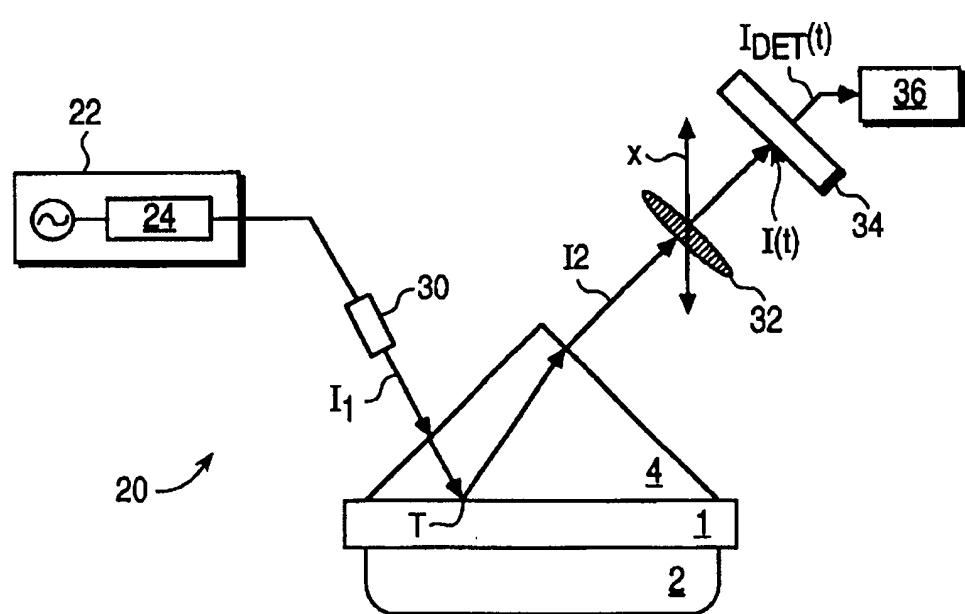


图3

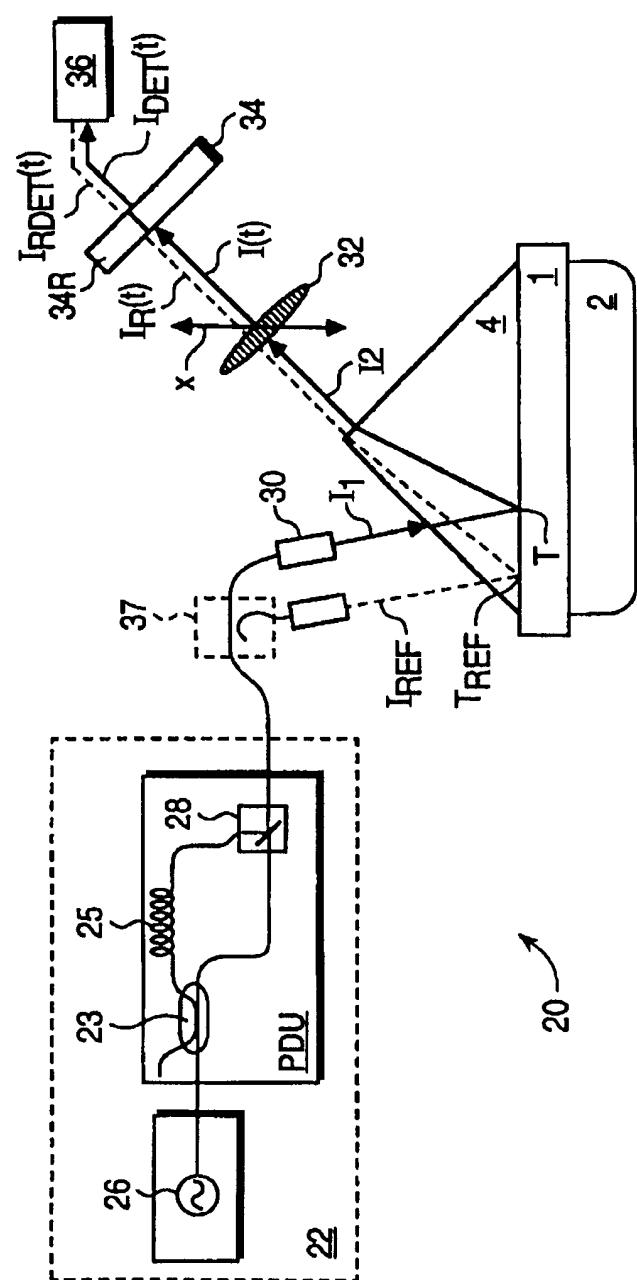


图4A

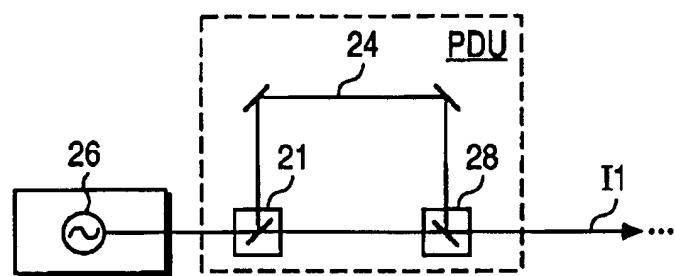


图4B

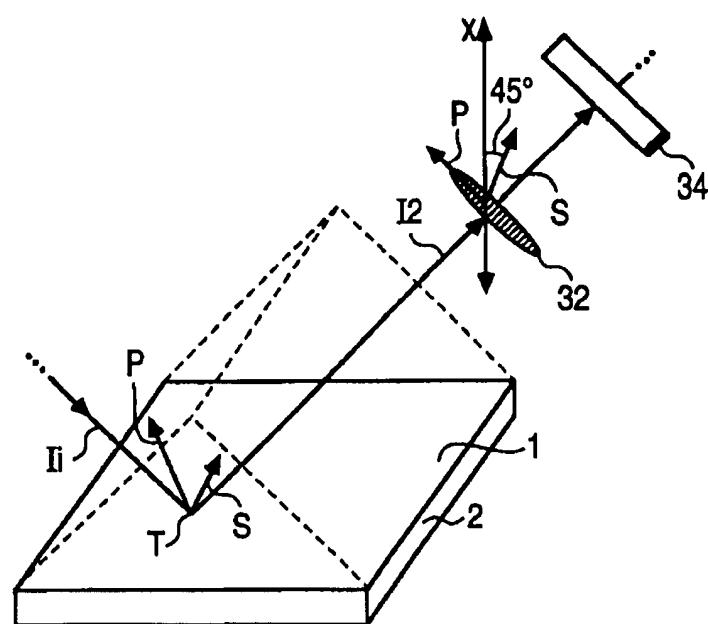


图5A

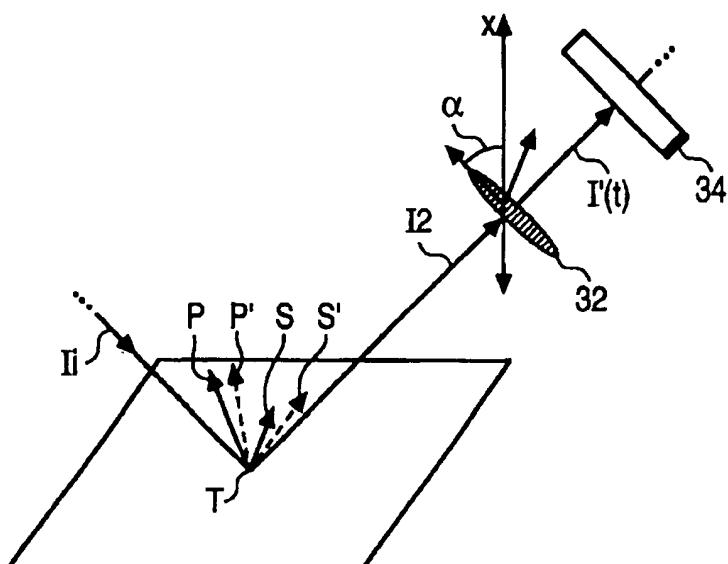


图5B

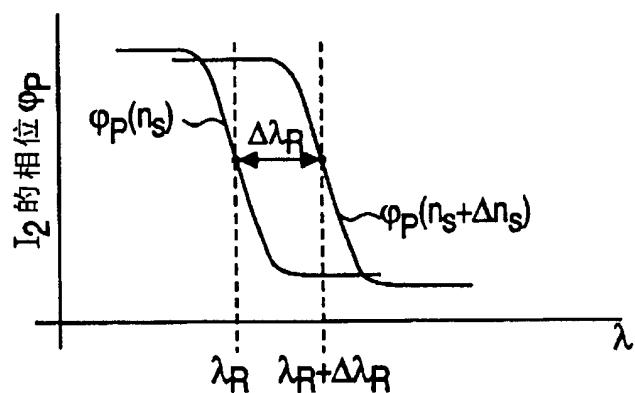


图 6

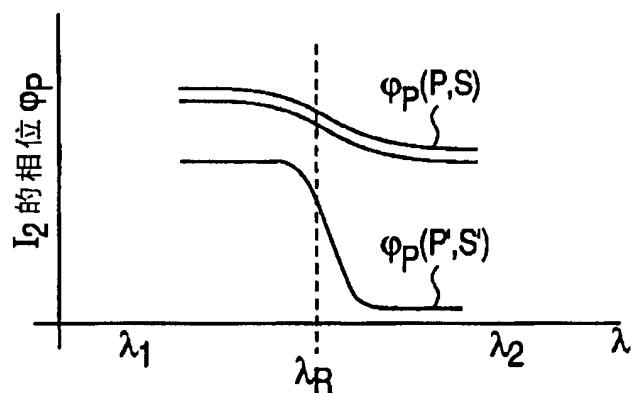


图 7

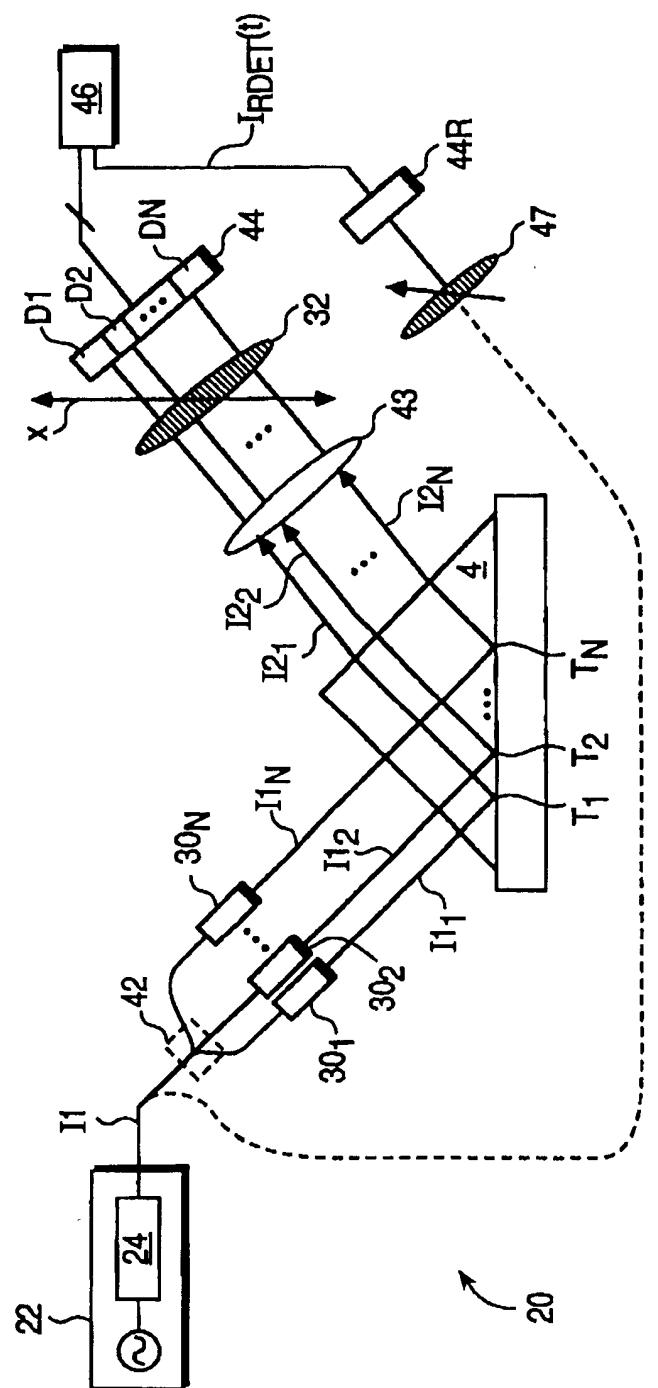


图8A

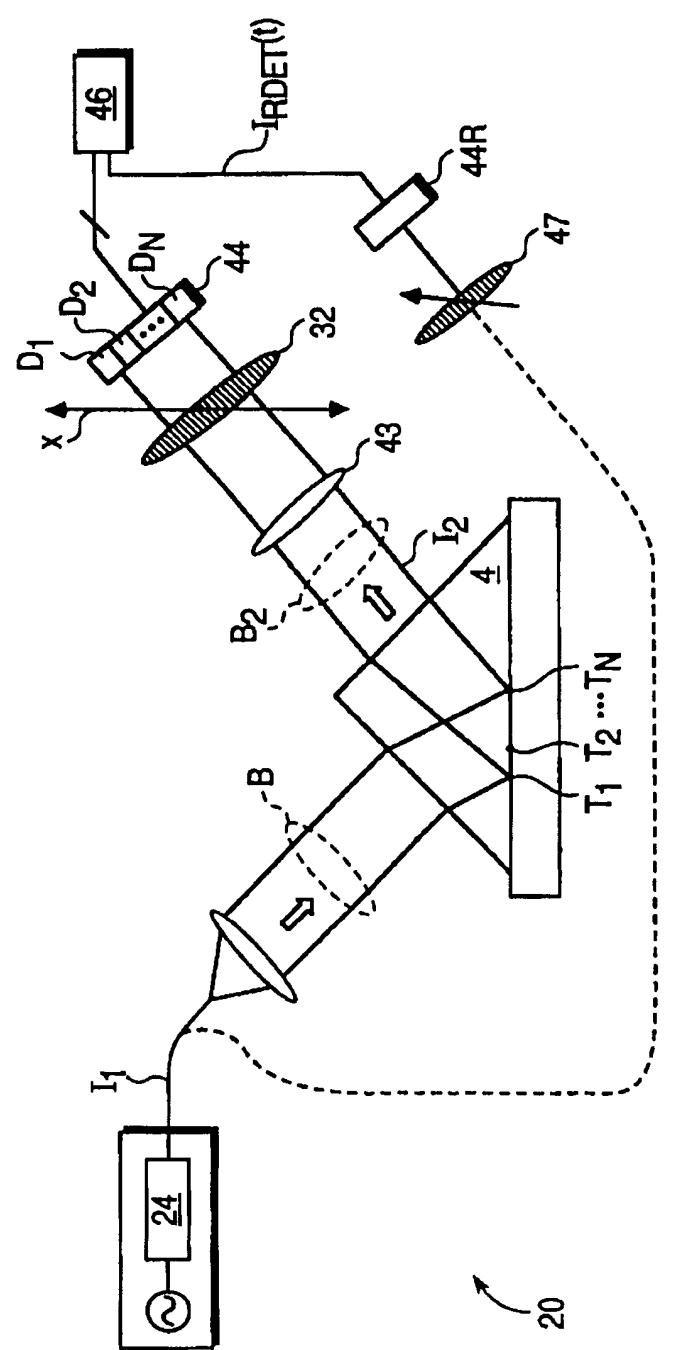


图8B

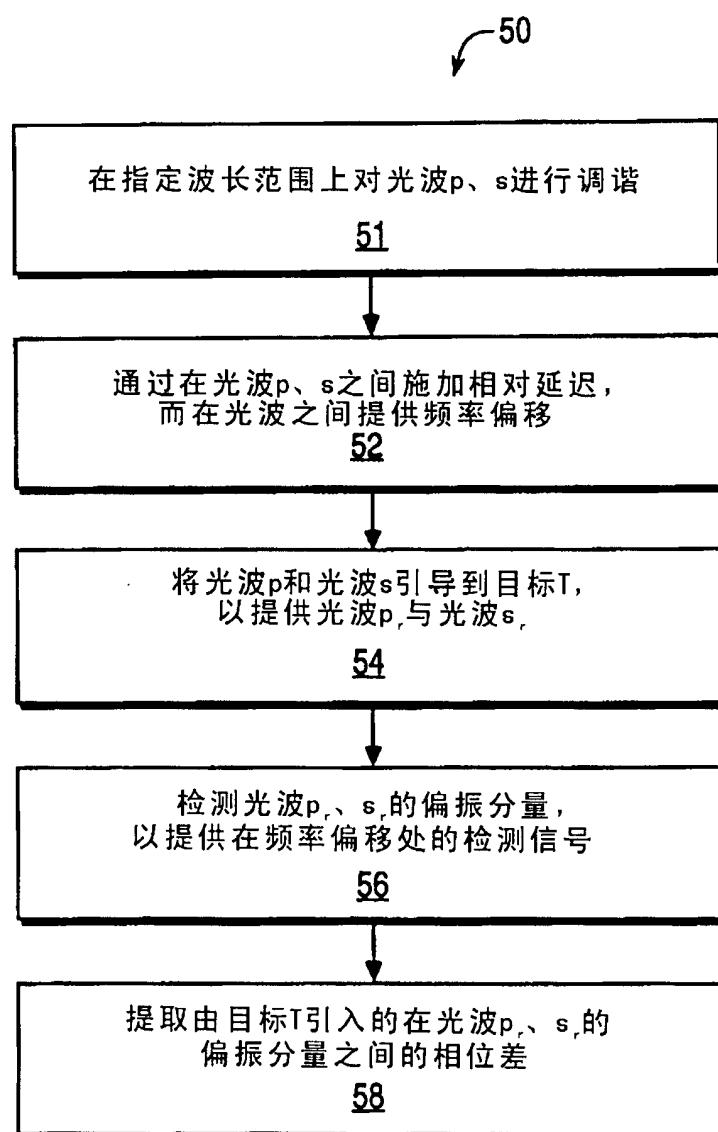


图9