

(21)申請案號：102134756

(22)申請日：中華民國 102 (2013) 年 09 月 26 日

(51)Int. Cl. : G01M11/02 (2006.01)

G01L1/24 (2006.01)

(30)優先權：2012/09/28 美國

61/706,891

(71)申請人：康寧公司(美國) CORNING INCORPORATED (US)  
美國

(72)發明人：劉安平 LIU, ANPING (US)；路瑟夫羅斯提斯拉夫費契夫 ROUSSEV, ROSTISLAV VATCHEV (BG)；施耐德維特馬利諾 SCHNEIDER, VITOR MARINO (US)；惠地爾阿拉那馬利 WHITTIER, ALANA MARIE (US)

(74)代理人：蔡坤財；李世章

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：21 項 圖式數：12 共 84 頁

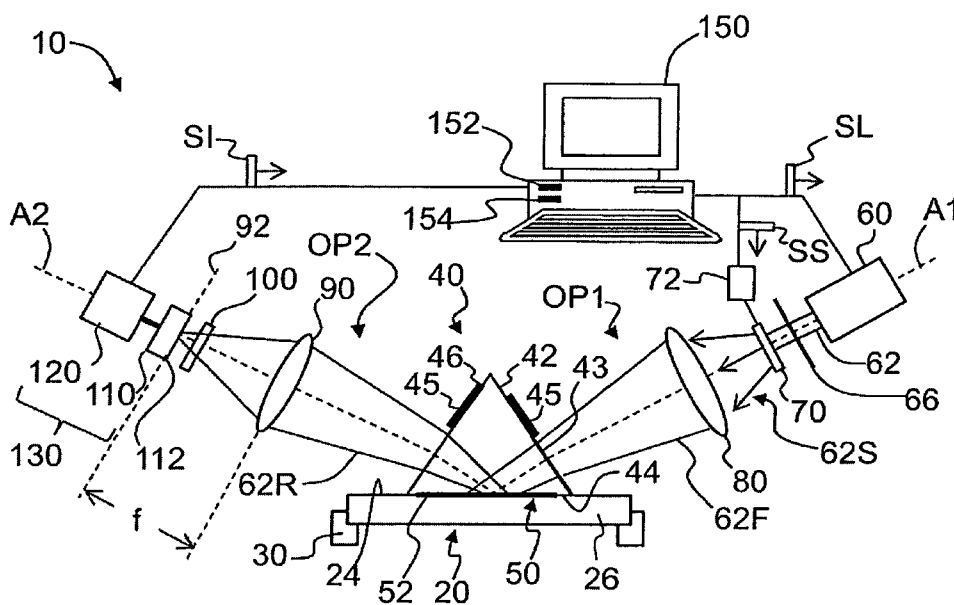
(54)名稱

用於測量在玻璃及玻璃陶瓷中之雙折射的系統和方法

SYSTEMS AND METHODS FOR MEASURING BIREFRINGENCE IN GLASS AND GLASS-CERAMICS

(57)摘要

揭示用於測量由經離子交換之玻璃或陶瓷製造之樣品中之雙折射及應力的系統及方法，其中該方法包括以下步驟：數位捕獲樣品之強度對像素數量之 TE 及 TM 角光譜。TE 及 TM 角光譜經處理以最小化 TE 及 TM 角光譜之各別區域之間的差異。判定最好地重疊經處理之 TE 及 TM 光譜之像素的偏移量。雙折射 B 藉由像素偏移乘以折射率解析度來計算。應力藉由雙折射乘以應力光學係數來計算。



第1圖

- 10：近表面雙折射/應力測量系統
- 24：頂表面
- 26：主體或整體部分
- 30：樣品保持器
- 40：耦合稜鏡
- 42：輸入表面
- 43：光散射部分
- 44：耦合表面
- 45：光阻擋構件
- 46：輸出表面
- 50：介面
- 52：折射率匹配流體
- 60：光源
- 62：光

62F：聚焦光  
62R：反射光  
62S：散射光  
66：濾光器  
70：光散射元件  
72：驅動單元  
80：聚焦光學系統  
90：收集光學系統  
92：焦平面  
100：TE/TM 極化器  
110：IP 類比偵測器  
112：光敏表面  
120：框接收器  
130：光偵測器系統  
150：控制器  
152：處理器  
154：記憶體單元

(21) 申請案號：102134756

(22) 申請日：中華民國 102 (2013) 年 09 月 26 日

(51) Int. Cl. : G01M11/02 (2006.01)

G01L1/24 (2006.01)

(30) 優先權：2012/09/28 美國

61/706,891

(71) 申請人：康寧公司 (美國) CORNING INCORPORATED (US)  
美國

(72) 發明人：劉安平 LIU, ANPING (US)；路瑟夫羅斯提斯拉夫費契夫 ROUSSEV, ROSTISLAV VATCHEV (BG)；施耐德維特馬利諾 SCHNEIDER, VITOR MARINO (US)；惠地爾阿拉那馬利 WHITTIER, ALANA MARIE (US)

(74) 代理人：蔡坤財；李世章

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：21 項 圖式數：12 共 84 頁

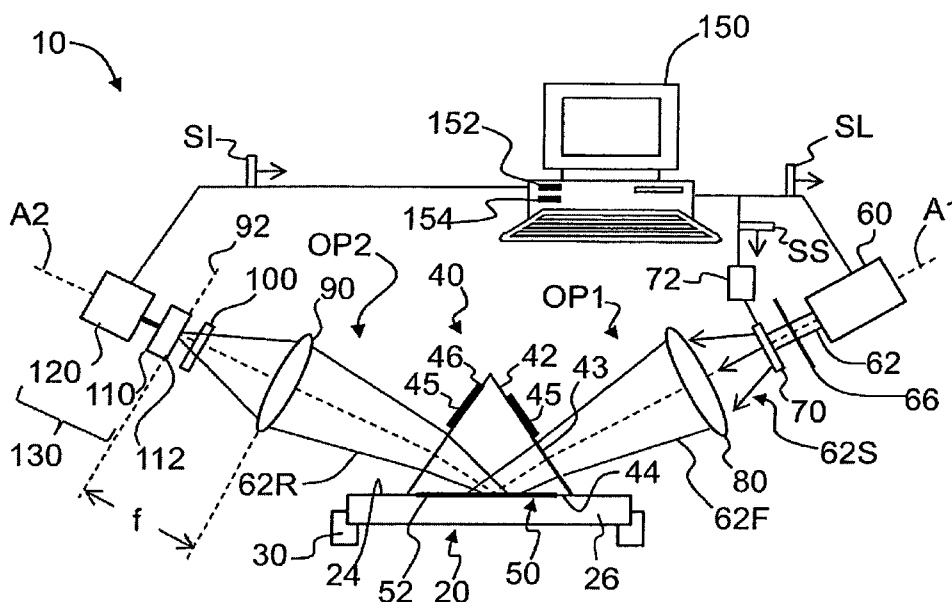
(54) 名稱

用於測量在玻璃及玻璃陶瓷中之雙折射的系統和方法

SYSTEMS AND METHODS FOR MEASURING BIREFRINGENCE IN GLASS AND GLASS-CERAMICS

(57) 摘要

揭示用於測量由經離子交換之玻璃或陶瓷製造之樣品中之雙折射及應力的系統及方法，其中該方法包括以下步驟：數位捕獲樣品之強度對像素數量之 TE 及 TM 角光譜。TE 及 TM 角光譜經處理以最小化 TE 及 TM 角光譜之各別區域之間的差異。判定最好地重疊經處理之 TE 及 TM 光譜之像素的偏移量。雙折射 B 藉由像素偏移乘以折射率解析度來計算。應力藉由雙折射乘以應力光學係數來計算。



第1圖

- 10：近表面雙折射/應力測量系統
- 24：頂表面
- 26：主體或整體部分
- 30：樣品保持器
- 40：耦合稜鏡
- 42：輸入表面
- 43：光散射部分
- 44：耦合表面
- 45：光阻擋構件
- 46：輸出表面
- 50：介面
- 52：折射率匹配流體
- 60：光源
- 62：光

## 發明摘要

※ 申請案號：102134756

G01M 11/02 (2006.01)

※ 申請日：2013 年 9 月 26 日

※IPC 分類：G01L 1/34 (2006.01)

## 【發明名稱】（中文/英文）

用於測量在玻璃及玻璃陶瓷中之雙折射的系統和方法

SYSTEMS AND METHODS FOR MEASURING

BIREFRINGENCE IN GLASS AND GLASS-CERAMICS

## 【中文】

揭示用於測量由經離子交換之玻璃或陶瓷製造之樣品中之雙折射及應力的系統及方法，其中該方法包括以下步驟：數位捕獲樣品之強度對像素數量之 TE 及 TM 角光譜。TE 及 TM 角光譜經處理以最小化 TE 及 TM 角光譜之各別區域之間的差異。判定最好地重疊經處理之 TE 及 TM 光譜之像素的偏移量。雙折射 B 藉由像素偏移乘以折射率解析度來計算。應力藉由雙折射乘以應力光學係數來計算。

## 【英文】

Systems and methods of for measuring birefringence and stress in a sample made of ion-exchanged glass or a ceramic are disclosed, wherein the method includes digitally capturing TE and TM angular spectra of intensity versus pixel number for the sample. The TE and TM angular spectra are processed to minimize differences between respective regions of the TE and TM angular spectra. The amount of shift in pixels that best overlaps the processed TE and TM spectra is determined. The birefringence B is calculated by multiplying the pixel shift by the index

resolution. The stress is calculated by multiplying the birefringence by the stress-optic coefficient.

• **【代表圖】**

✓ **【本案指定代表圖】**：第（1）圖。

**【本代表圖之符號簡單說明】**：

- 10 近表面雙折射/應力測量系統
- 24 頂表面
- 26 主體或整體部分
- 30 樣品保持器
- 40 耦合稜鏡
- 42 輸入表面
- 43 光散射部分
- 44 耦合表面
- 45 光阻擋構件
- 46 輸出表面
- 50 介面
- 52 折射率匹配流體
- 60 光源
- 62 光
- 62R 反射光
- 62S 散射光
- 62F 聚焦光
- 66 濾光器
- 70 光散射元件

resolution. The stress is calculated by multiplying the birefringence by the stress-optic coefficient.

• **【代表圖】**

✓ **【本案指定代表圖】**：第（1）圖。

**【本代表圖之符號簡單說明】**：

10 近表面雙折射/應力測量系統

24 頂表面

26 主體或整體部分

30 樣品保持器

40 耦合稜鏡

42 輸入表面

43 光散射部分

44 耦合表面

45 光阻擋構件

46 輸出表面

50 介面

52 折射率匹配流體

60 光源

62 光

62R 反射光

62S 散射光

62F 聚焦光

66 濾光器

70 光散射元件

- 72 驅動單元
- 80 聚焦光學系統
- 90 收集光學系統
- 92 焦平面
- 100 TE/TM 極化器
- 110 IP 類比偵測器
- 112 光敏表面
- 120 框接收器
- 130 光偵測器系統
- 150 控制器
- 152 處理器
- 154 記憶體單元

【本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式】：

無

# 發明專利說明書

(本說明書格式、順序，請勿任意更動)

## 【發明名稱】 (中文/英文)

用於測量在玻璃及玻璃陶瓷中之雙折射的系統和方法

SYSTEMS AND METHODS FOR MEASURING

BIREFRINGENCE IN GLASS AND GLASS-CERAMICS

## 【相關申請案之交叉引用】

【0001】 本申請案主張在 2012 年 9 月 28 日申請之美國臨時申請案第 61/706,891 號的優先權利，本案依賴於該案之內容且如下文所充分闡述該案之內容全文以引用之方式併入本文中。

## 【技術領域】

【0002】 本發明係關於測量雙折射，且詳言之，係關於用於測量具有相對高之衰減之某些類型之玻璃及陶瓷以及接近表面之折射率降低之玻璃及陶瓷中的雙折射的系統及方法。

## 【先前技術】

【0003】 某些類型之玻璃及玻璃陶瓷可藉由離子交換過程而化學增強，該離子交換過程可改變材料之表面折射率。該增強係歸因於通常產生雙折射之近表面壓縮層之形成。

【0004】 隨著化學增強之玻璃及玻璃陶瓷在如智慧型手機、電腦螢幕及平板電視之此等產品中之增加的使用，爲了製造期間之品質控制，需要增加表面應力之非破壞性的、高產量測量。

【0005】 用於特徵化應力曲線之基於稜鏡耦合的非破壞性方法當前用於化學增強之玻璃，其中，離子交換過程導致表面折射率之增加並因此形成



光學波導。該方法基於對基於橫向電場（TE）及橫向磁場（TM）引導模式光譜之測量的可見波長光的兩個正交極化之折射率曲線之恢復。兩個折射率曲線之差異（亦即，雙折射之深度分佈之差異）經由應力光學係數（SOC）而與應力之深度分佈近似線性地相關。

**【0006】** 另一基於稜鏡耦合之方法用於以 $\pm 0.0002$  RIU（折射率單位）之典型精度測量透明基板之表面折射率。該方法在稜鏡樣品介面處在角度範圍內掃描雷射束。若用於測量表面雙折射及應力，該方法將基於兩個任意誤差之求和規則產生 $\pm 0.0003$  RIU 之雙折射誤差，每一極化測量產生一個任意誤差。因普通化學增強玻璃之典型 SOC 近似  $3 \times 10^{-6}$  RIU/MPa，故所得應力測量誤差將為約 100 MPa。對於典型表面應力近似 200 MPa-900 MPa 的多數實際應用，此任意誤差太大。對於製造期間之處理及品質控制，通常需要在 5% 以下之測量誤差。此外，該方法中所使用之掃描耗時並導致緩慢之測量，此對在商業環境中之執行品質控制而言係不理想的。

**【0007】** 習知之基於稜鏡之應力測量方法的另一問題是，該等方法不能夠精確測量具有降低之表面折射率或高衰減之經離子交換之玻璃中之表面應力。

### **【發明內容】**

**【0008】** 本發明係關於非破壞性的、高產量測量玻璃及玻璃陶瓷中之表面或近表面雙折射及表面或近表面應力。由於顯著之光學吸收、顯著之光散射或兩者，玻璃或玻璃陶瓷可能係不透明的。

**【0009】** 本發明之態樣係關於高精度測量化學增強玻璃中之表面應力，其中增強過程（例如，離子交換）已引起表面折射率之降低。

**【0010】** 本揭示案包含具有適當波長（例如，紅外）之稜鏡耦合光之使用，在該適當波長下，歸因於散射及吸收之所測量樣品中之總衰減為每

毫米幾十 dB 或更小。儘管衰減之此等位準係實質性的，但結合影像處理使用稜鏡耦合可在習知系統不能執行可接受之測量的情況下精確測量表面雙折射及壓縮應力。一般而言，在玻璃陶瓷的情況下，在可能執行有用之測量之波長下之衰減已實質上大於 1 dB/cm，且在多數情況下，大於約 1 dB/mm。

**【0011】** 本文所揭示之系統及方法通常適用於玻璃陶瓷，其中離子交換過程導致表面折射率之降低，以使得 TE 及 TM 光譜僅含輻射（非引導）模式。該等系統及方法亦適用於一些情況，在該等情況中，離子交換過程主要歸因於應力經由應力光學係數而改變表面折射率，但其中歸因於媒體之極化率之變化的折射率變化是非常小的且並不導致形成光波導。該等系統及方法亦適用於一些情況，在該等情況中，離子交換過程導致表面折射率之增加，但其中歸因於樣品之過度光學衰減個別模式在角耦合光譜中係不可分解的。

**【0012】** 示例性系統包括在光源與耦合稜鏡耦合表面之間的光學路徑中之至少一個光散射元件。示例性光散射元件可包括（例如）耦合稜鏡輸入表面上之粗糙表面或耦合稜鏡輸入表面上之擴散膜。示例性光散射元件亦可包括在耦合稜鏡輸入表面與光源之間的光學路徑中之獨立光散射元件（擴散器）。該獨立擴散器可為可移動的以減少斑點。至少一個光散射元件可提供照明之更均勻角分佈。此外，在稜鏡與光源之間的路徑中可能存在兩個擴散器：靜態擴散器，該靜態擴散器經最佳化以用於改良角分佈之均勻度；及移動擴散器，該移動擴散器經最佳化以用於減少角耦合光譜之影像中之斑點。因此可使用光散射元件之各種組合。

**【0013】** 本揭示案之其他態樣包括一種用於測量雙折射之系統。該系統包括控制器，該控制器經配置以執行經測量之 TE 及 TM 光譜之影像處理

(亦即，訊號處理)以測量應力誘導之雙折射。該系統經配置以具有足以達成雙折射之測量在 0.00006 折射率單位 (RIU) 內之照明之角均勻度。儘管原始測量之 TE 及 TM 光譜由於發生在不同極化時的不同光學效應具有不同形狀，但控制器經配置 (亦即，包括在電腦可讀媒體中體現之軟體的形式的指令) 以最小化該等光譜之形狀之差異的方式處理該等光譜。以允許精確測量該等光譜之對應曲線之間的偏移的方式比較經處理之 TE 及 TM 光譜。偏移以像素寬度為單位來測量，該像素寬度表示每像素偏移一折射率解析度或雙折射之寬度。像素偏移乘以折射率解析度提供雙折射之測量。然後，雙折射可用於藉由乘以 SOC 來計算表面應力。

**【0014】** 本發明之態樣為一種用於光學測量樣品之表面中之雙折射 B 之量的方法。該樣品可為經離子交換之玻璃或玻璃陶瓷。該方法包括以下步驟：a) 數位捕獲樣品之強度對像素數量之 TE 及 TM 角光譜，其中數位捕獲由具有折射率解析度之像素界定；b) 處理 TE 及 TM 角光譜以最小化 TE 及 TM 角光譜之各別區域之間的差異，其中各別區域包括強度隨著角度之變化率，該變化率為強度隨著角度之最大變化率之至少 40%；c) 判定最好地重疊經處理之 TE 及 TM 光譜之像素的偏移量；及 d) 藉由將像素偏移乘以折射率解析度判定雙折射 B 之量。

**【0015】** 本發明之另一態樣為一種用於光學測量由經離子交換之玻璃或玻璃陶瓷形成之樣品之表面中之雙折射 B 之量的方法。該方法包括以下步驟：a) 數位捕獲樣品之強度對像素數量之 TE 及 TM 角光譜，其中數位捕獲由具有折射率解析度之像素界定；b) 視情況正規化 TE 及 TM 角光譜至在無樣品之情況下獲得之總反射率光譜，該總反射率光譜表示照明系統之角分佈；c) 處理經視情況正規化之 TE 及 TM 角光譜以獲得經濾波之 TE 及 TM 光譜；d) 計算該經濾波之 TE 及 TM 光譜之各別導數；e) 判定

各別導數之各別最大值之角位置；及藉由各別最大值之角距判定偏移。

**【0016】** 本發明之另一態樣為一種用於光學測量由經離子交換之玻璃或陶瓷形成之樣品之表面中之雙折射  $B$  之量的系統。該系統包括稜鏡，該稜鏡在耦合表面處光學耦合至樣品表面並具有輸入表面及輸出表面。該系統具有光源，該光源發射具有紅外範圍中之操作波長之光，其中光源經由輸入表面及經由第一光學路徑光學耦合至稜鏡耦合表面。該系統亦包括光偵測器系統，該光偵測器系統經由第二光學路徑經由輸出表面光學耦合至稜鏡耦合表面，且該光偵測器系統經配置以接收表示樣品之 TE 及 TM 角光譜之 TE 及 TM 光，其中該光偵測器系統包括具有折射率解析度之一或多個像素。該系統亦具有控制器。控制器電性連接至光偵測器系統並經佈置以接收 TE 及 TM 影像。控制器配置有指令，該等指令在電腦可讀媒體中體現以處理 TE 及 TM 影像以最小化 TE 及 TM 角光譜之各別區域之間的差異。各別區域包括強度隨著角度之一變化率，該變化率為強度隨著角度之最大變化率。控制器經配置以判定最好地重疊各別區域中之經處理之 TE 及 TM 光譜的像素偏移的量並藉由像素偏移乘以折射率解析度來判定雙折射  $B$  的量。

**【0017】** 將在隨後之實施方式中闡述額外特徵及優點，且對於熟習此項技術者而言，額外特徵及優點將部分地自描述顯而易見或藉由實踐如在書面描述及書面描述之申請專利範圍以及附隨圖式中描述的實施例而瞭解。應瞭解，前述一般描述及以下具體實施方式僅為示例性的，且意在提供用於理解申請專利範圍之性質及特性的概述或框架。

### **【圖式簡單說明】**

**【0018】** 包括附隨圖式以提供進一步理解，且附隨圖式併入本說明書中並構成本說明書之一部分。圖式圖示一或多個實施例，且該等圖式與實

施方式一起用以解釋各種實施例之原理及操作。如此，本發明將結合隨附圖式自以下實施方式而變得顯而易見，其中：

【0019】 第 1 圖為根據本揭示案之表面應力測量系統之示例性實施例之示意圖；

【0020】 第 2 圖為第 1 圖之表面應力測量系統之示例性光偵測器系統之高視圖，圖示 IR 類比偵測器及 TE/TM 極化器；

【0021】 第 3A 圖示繪 TE 光（實線）及 TM 光（虛線）之反射率  $R$  對  $\Delta\theta = \theta - \theta_c$ （以度為單位）；

【0022】 第 3B 圖示繪 TE 光（實線）及 TM 光（虛線）之反射率  $R$  對角度  $\theta$  之導數對角度  $\theta$ （以度為單位）；

【0023】 第 3C 圖示繪 TE 光（實線）及 TM 光（虛線）根據在表面處具有降低之折射率之模型經離子交換之玻璃之數值模擬之反射率  $R$  對  $\theta$ （以度為單位）；

【0024】 第 4A 圖及第 4B 圖為具有 0.351 mm 之厚度之白玻璃陶瓷樣品（第 4A 圖）及具有 0.80 mm 之厚度之黑玻璃陶瓷樣品（第 4B 圖）之衰減  $\alpha$  (dB/mm) 對波長 (nm) 之繪圖；

【0025】 第 5 圖為耦合稜鏡及樣品之近側視圖，圖示與耦合稜鏡及聚焦及反射光相關聯之關鍵角度；

【0026】 第 6 圖為典型 ASE 源之輸出功率密度(mW/nm)對波長(nm)之繪圖，並圖示在約 9 nm 之半高寬 (FWHM) 處之頻寬；

【0027】 第 7 圖為正規化影像  $IM_N$  之示意性表示，該表示圖示分別與影像之頂部及底部部分相關聯之正規化 TE 及 TM 角反射率光譜  $S_{TE}$  及  $S_{TM}$ ；

【0028】 第 8A 圖為總行強度對像素行之繪圖並圖示正規化且平均之 TE 及 TM 光譜（分別為虛線及實線）；

【0029】 第 8B 圖類似於第 8A 圖並圖示在已經低通濾波以減少雜訊以及已經正規化至該等光譜之各別最大值後之角行強度分佈；

【0030】 第 8C 圖類似於第 8B 圖並圖示藉由用第 8B 圖之經低通濾波且正規化之強度除以該等訊號之各別角平均值而獲得的 TM 及 TE 極化之初始對比訊號；

【0031】 第 8D 圖類似於第 8C 圖並圖示在正規化至該等訊號之各別總強度範圍後第 8C 圖之 TE 及 TM 對比訊號；

【0032】 第 8E 圖類似於第 8D 圖並圖示在該等訊號偏移至共點後之第 8D 圖之正規化對比訊號，在實例中，對於每一訊號，該共點為在偏移至值 1 時對比訊號中之最大強度點。

【0033】 第 8F 圖圖示藉由水平偏移 TE 對比訊號而在比較區域（在實例中，像素行 100-130）內重疊之 TE 及 TM 極化之正規化對比訊號；

【0034】 第 9 圖為 Goos-Hänchen 偏移  $S_{G-H}$  之示意性射線光學圖（其中樣品在頂部且耦合稜鏡在底部），圖示 Goos-Hänchen 位移如何界定近似交互長度；

【0035】 第 10 圖為作為入射角與臨界角  $\Theta_c$  之偏差之函數的 TE 極化光之 Goos-Hänchen 偏移的繪圖；

【0036】 第 11A 圖及第 11B 圖為第 1 圖之表面應力測量系統之偵測器側之近示意圖並圖示光偵測器系統之替代示例性實施例；及

【0037】 第 12A 圖至第 12C 圖為根據本揭示案之表面應力測量系統之替代示例性實施例的示意圖，其中耦合稜鏡具有彎曲表面。

### 【實施方式】

【0038】 現將詳細參考本揭示案之各種實施例，在附隨圖式中圖示該等實施例之實例。在可能之情況下，在全部圖式中使用相同或類似元件符

號及符號及來代表相同或類似部件。該等圖式不一定按比例繪製，且熟習此項技術者將認識到已簡化該等圖示來圖示本發明之關鍵態樣。

【0039】 下文所闡述之申請專利範圍併入此實施方式並構成此實施方式之部分。

【0040】 本文中所提及之任意出版物或專利檔之整個揭示內容以引用之方式併入。

【0041】 爲了參考，在一些圖式中圖示笛卡兒座標，且笛卡兒座標並不意指限制方向或定向。

【0042】 第 1 圖爲根據用於測量樣品 20 中之近表面雙折射/應力之量的揭示內容的示例性近表面雙折射/應力測量系統（「系統」）10 之示意圖。樣品 20 具有頂表面 24 及具有折射率  $n_s$  之主體或整體部分 26。在一個實施例中，系統 10 包括配置以保持樣品 20 之樣品保持器 30。然而，在替代實施例中，不需要樣品保持器 30。在一個實施例中，樣品 20 由折射率匹配液體之表面張力保持，該折射率匹配液體位於樣品與稜鏡之間（下文所引入及論述之）。在另一實施例中，倒轉系統 10，以使得樣品 20 安置在稜鏡耦合表面上並在此藉由重力保持。

【0043】 在實例中，樣品 20 已經歷離子交換過程，藉此離子已經交換穿過頂表面 24，從而改變頂表面處（及接近頂表面處）之樣品之折射率至折射率  $n_0$ ，對於 s 極化之光（橫向電場，TE），此折射率可能不同於 p 極化之光（橫向磁場，TM），該 p 極化之光平行於該光之入射平面而極化。此過程在樣品 20 之頂表面 24 處及接近頂表面 24 處產生雙折射。此雙折射由系統 10 測量，且所得測量可用於計算頂表面 24 處（及接近頂表面 24 處）之應力。測量應力及雙折射可用於經離子交換之樣品 20 之製造中之程序控制及品質控制。此等樣品可包括化學增強玻璃及玻璃陶瓷，類似於紐約

Corning 的 Corning Inc.製造的 GORILLA®玻璃。樣品 20 可為基板之形式，以使得在下文之論述中，樣品 20 亦稱為基板 20。

【0044】 系統 10 亦包括耦合稜鏡 40，該耦合稜鏡 40 具有輸入表面 42、耦合表面 44 及輸出表面 46。耦合稜鏡 40 具有折射率  $n_p > n_s$ 。耦合稜鏡 40 藉由使耦合稜鏡耦合表面 44 及樣品頂表面 44 光學接觸並從而界定樣品耦合稜鏡介面（「介面」）50 來與樣品 20 介面連接。

【0045】 在實例中，耦合稜鏡輸入表面 42 包括光散射部分 43，目的為在下文論述。光散射部分 43 可（諸如，藉由粗化耦合稜鏡輸入表面）直接形成在耦合稜鏡輸入表面 42 上。或者，光散射部分 43 可為附著至耦合稜鏡輸入表面 42 之散射（例如，光擴散）膜或元件或可為位於輸入表面 42 及光源 60 之間的單獨散射光學元件。

【0046】 在實例中，在輸入表面 42 及輸出表面 46 中之一者或兩者上包括光阻擋構件 45 以消除來自雜散光之不利影響並從而改良訊號背景比（SBR）。

【0047】 在示例性實施例中，耦合稜鏡 40 具有梯形的、彎曲的或其他橫截面形狀而不是經由說明在第 1 圖中圖示之三角形橫截面形狀。一或多個光阻擋元件 45 可放置在梯形或其他橫截面形之耦合稜鏡上，包括可放置在並非輸入表面、輸出表面或耦合表面之一或多個表面上。

【0048】 在實例中，薄層之折射率匹配流體 52 可用於促進耦合稜鏡 40 與樣品 20 之間的光學耦合。折射率匹配流體 52 具有折射率  $n_f$ ，以使得  $n_f \geq n_s$ ，且最常為使得  $n_p \geq n_f \geq n_s$ 。在實例中，為最佳化表面應力測量之測量精度，折射率匹配流體 52 之折射率  $n_f$  等於或非常接近耦合稜鏡折射率  $n_p$ 。在實例中，折射率匹配流體之折射率  $n_f$  與耦合稜鏡折射率  $n_p$  之間的差異為小於約 0.03 或小於 0.01。



【0049】 使用折射率匹配流體 52 與耦合稜鏡 40 之間的小折射率差異幫助減小寄生邊緣與形成在耦合稜鏡與樣品 20 之間的準波導之漏溢模態的反差，該等寄生邊緣歸因於耦合共振而可能出現在部分反射之光譜（該光譜在全內反射之區域外）中。示例性耦合稜鏡折射率  $n_p$  在 1550 nm 之操作波長下為約 1.6。如下文所論述，可選擇耦合稜鏡折射率  $n_p$  來基於樣品 20 之特徵最佳化系統 10 之效能。

【0050】 繼續參考第 1 圖，系統 10 包括光軸 A1 及光軸 A2，該等光軸分別穿過耦合稜鏡 40 之輸入表面 42 及輸出表面 46 以在說明在稜鏡/空氣介面處之折射後大體聚集在耦合稜鏡介面 50 處。系統 10 沿軸 A1 按順序包括發射光 62 之光源 60，或者可包括在軸 A2 上之偵測器路徑中之可選濾光器 66、可選光散射元件 70 及形成如下文所解釋之聚焦光 62F 之可選聚焦光學系統 80。因此，在系統 10 之實例中，在光源 60 與稜鏡輸入表面 42 之間無光學元件。

【0051】 系統 10 亦沿軸 A2 自耦合稜鏡 40 按順序包括收集光學系統 90（該系統 90 具有焦平面 92 及焦距  $f$  並接收如下文所解釋之反射光 62R、TM/TE 極化器 100 及光偵測器系統 130。軸 A1 界定光源 60 與耦合稜鏡耦合表面 44 之間的光學路徑 PO1 之中心。軸 A2 界定耦合表面 44 與光偵測器系統 130 之間的光學路徑 PO2 之中心。注意，由於折射，軸 A1 及軸 A2 可分別在輸入表面 42 及輸出表面 46 處彎曲。

【0052】 在實例中，光偵測器系統 130 包括 IR 類比偵測器（攝影機）110 及框接收器 120。在下文所論述之其他實施例中，光偵測器系統 130 包括 CMOS 或 CCD 攝影機、單元件光二極體或一或兩個線性光偵測器（亦即，一列整合光二極體或光感測元件）。光偵測器系統亦可使用一或多個微測熱輻射計、微測熱輻射計攝影機、一或多個基於 InGaAs 之光偵測器或 InGaAs

攝影機。光偵測器系統 130 包括光敏表面 112，該光敏表面 112 經由實例圖示為 IR 類比偵測器 110 之光敏表面。光敏表面 112 位於收集光學系統 90 之焦平面 92 中，其中光敏表面大體垂直於軸 A2。此佈局用於將退出耦合稜鏡之光 62R 之角分佈轉換成在攝影機 110 之感測器平面處之光的橫向空間分佈。

**【0053】** 在焦距  $f$  比光敏表面 112 之尺寸大 5 倍的替代實施例中，此表面可相對於軸 A2 傾斜以用於緩和的增加沿  $x$  之位置對有效折射率之靈敏度。光偵測器系統 130 產生影像訊號 SI，如下文所論述。在第 1 圖之示例性系統中，影像訊號 SI 圖示為由框接收器 120 產生。框接收器 120 用於數位化來自 IR 類比偵測器 110 之類比影像，以便界定具有相關聯之折射率等值之像素。一個像素之折射率等值可被視為折射率解析度  $\delta n_{\text{pix}}$ ，如由光偵測器系統 130 之像素解析度所指定。

**【0054】** 在實例中，像素解析度（亦即，兩個相鄰像素之間的間隔）在測量過程中約等於折射率解析度、收集光學系統 90 之焦距  $f$  與光學路徑 OP2 中之光線之出射角度對有效折射率之變化的靈敏度的乘積。

**【0055】** 示例性光源 60 包括紅外雷射、紅外發光二極體、紅外放大自發射（ASE）源、紅外超輻射發光二極體（SLD）源及較寬頻寬源，諸如與用於縮小光譜之適當手段（包括波長選擇濾波器或繞射光柵）組合的熱絲燈及石英燈。由光源 60 產生之光 62 之示例性操作波長  $\lambda$  包括紅外波長，諸如（標稱）940 nm、1060 nm、1550 nm、1613 nm、1900 nm 或 2200 nm。

**【0056】** 已認識到，具有商業利益之玻璃陶瓷之範圍可用在波長之紅外範圍中操作之系統以足夠精度測量。在一個實例中，操作波長  $\lambda$  長於約 1400 nm。在另一實例中，操作波長  $\lambda$  長於約 1500 nm。在又一實例中，操作波長  $\lambda$  長於約 1800 nm。在替代實例中，操作波長長於約 820 nm，且取

決於所測量樣品之衰減特性（諸如，吸收及散射），操作波長可能需要長於約 900 nm 或 1000 nm。該等近紅外波長範圍非常適用於使用 CMOS 或 CCD 攝影機偵測，在此情況下，波長亦最佳地短於約 1100 nm。

【0057】 另一方面，在一個實例中，操作波長  $\lambda$  短於約 7500 nm，且在另一實例中，操作波長  $\lambda$  短於約 5500 nm。

【0058】 三個示例性操作波長區域為  $1530 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1650 \text{ nm}$ 、 $1900 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2800 \text{ nm}$  及  $2900 \text{ nm} \leq \lambda \leq 4700 \text{ nm}$ 。另一示例性區域為  $3300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 4600 \text{ nm}$ ，在更特定之實例中，為  $3400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 4500 \text{ nm}$ 。

【0059】 當操作波長  $\lambda$  長於約 2200 nm 時，系統 10 中之一些光學元件（諸如，耦合稜鏡 40、聚焦光學系統 80、收集光學系統 90、濾波器 66、一或多個光散射元件 70 及 TE/TM 極化器 100）可能需要由實質上在操作波長下為透明之材料製造。具有足夠高之折射率以用作耦合稜鏡 40 之此等材料包括 ZnSe、ZnTe、鈮鋁石榴石（YAG）、Si、LiTaO<sub>3</sub> 及藍寶石等。

【0060】 當使用雙折射材料（諸如，藍寶石）時，需要執行校正，因歸因於雙折射材料，即使在所測量之基板 20 不具有表面雙折射時，仍可能觀察到在 TE 及 TM 區域之間的全內反射（TIR）過渡之偏移。用於系統 10 之透鏡、濾波器及擴散器之適當材料包括 CaF<sub>2</sub>、MgF<sub>2</sub>、ZnSe、Si、各種氧化物晶體及一些薄塑膠，當塑形成菲涅耳透鏡時，上述材料係尤其有用的。

【0061】 在實例中，操作波長  $\lambda$  約等於或長於組成樣品 20 之微晶體或奈米晶體之平均直徑。舉例而言， $\lambda=1550 \text{ nm}$  之操作波長可用於測量白玻璃陶瓷樣品 20 之應力誘導之雙折射，其中最大晶體具有約 800 nm 之尺寸。在另一實例中，操作波長  $\lambda$  可經選擇以比微晶體或奈米晶體之典型尺寸至少大五倍，微晶體或奈米晶體之折射率顯著高於所測量之玻璃陶瓷樣品之玻璃基質之折射率。或者，在一些情況下，操作波長  $\lambda$  可經選擇以實質上

大於此等高折射率微晶體之平均間隔。

【0062】 基於 ASE 之光源 60 可係基於光纖的，例如，就二極體泵浦摻鉬光纖放大器（EDFA）而言，基於 ASE 之光源 60 或可包含代替二極體泵浦 EDFA 之超輻射發光二極體（SLD）。此可幫助降低光源 60 之成本以及使光源更緊密，並在一些情況下可說明增加頻寬以便減少斑點。

【0063】 當可藉由使用合適靈敏度之 IR 類比偵測器 110 獲得足夠訊號雜訊比（SNR）時操作近  $\lambda=1550$  nm 之基於 ASE 之光源 60 可由基於 LED 之光源替代。

【0064】 基於雷射之光源 60 可為有利的，因為該光源可具有高功率及亮度，例如在所需角及光譜範圍內之光功率。因為樣品 20 中  $1400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1500 \text{ nm}$  之操作波長範圍中之光學衰減可能僅稍微高於在  $1530 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1570 \text{ nm}$  之範圍中之衰減，故具有範圍 1400 nm 至 1500 nm 中之波長的、通常作用於 EDFA 的泵浦雷射的市售二極體雷射可在某些情況下使用。為增加頻寬以便減少斑點，泵浦雷射可藉由調變雷射電流而調變波長。此外，可使用多個泵浦雷射器。在實例中，可使用雷射電流調變、多個雷射器及可移式光散射元件 70 中之一或多者來降低斑點至可接受位準。

【0065】 因此，在一個實例中，光散射元件 70 為可移式的，以便降低斑點歸因於光 62 之相干性之不利影響。舉例而言，光散射元件 70 可為旋轉及光擴散磁碟之形式。斑點減少可藉由產生多個不相關斑點圖形來完成，該等斑點圖形隨後經時間平均以降低斑點誘導之影像雜訊。在實例中，光散射元件 70 為擴散器。與耦合稜鏡輸入表面 42 之光散射部分 43 組合或與安置在光學路徑 OP1 中之獨立靜態散射構件組合使用，光散射元件 70 可僅用作光散射構件。

【0066】 同樣，光散射部分 43 可僅用作系統 10 中之光散射構件。兩

個或兩個以上光散射元件 70 之組合可提供實質寬度並改良照明介面 50 之角光譜之均勻度。在實例中，光散射元件 70 可操作地連接至驅動單元 72，該驅動單元 72 回應於控制訊號 SS 控制光散射元件之移動（例如，旋轉、振動等）。在實例中，控制器 150 可操作地連接至驅動單元 72 以經由控制訊號 SS 控制驅動單元之操作，以便實現光散射元件 70 之移動。在另一實例中，驅動單元 72 未連接至控制器 150 且手動地啟動或去啟動，或可由與光源 60 之電力開關同時操作之開關來啟動或解除啟動。

**【0067】** 聚焦光學系統 80 可用於大體調節經由介面 50 與樣品 20 互動之角光譜含量。然而，在系統 10 之一些實施例中，不需要聚焦光學系統 80。舉例而言，使用一或多個光散射元件 70（例如，光散射表面）可在耦合稜鏡 40 之耦合表面 44 處產生足夠寬的且足夠均勻的角分佈。

**【0068】** 聚焦光學系統 80 或收集光學系統 90 中之任一者或兩者皆可包括彎曲反射表面，或可各包含多個光學元件，包括折射及/或反射元件。聚焦光學系統 80 可包括作為聚焦光學系統 80 之表面中之一者之光散射表面以提供導向介面 50 之光 62 之更寬或更均勻之角分佈並在聚焦光學系統之下游提供更均勻之光分佈。

**【0069】** 第 2 圖為 IR 類比偵測器 110 及 TE/TM 極化器 100 之近高視圖。TE/TM 極化器 100 包括相鄰之部分 100TE 及部分 100TM，該等部分分別具有 TE 及 TM 極化元件。部分 100TE 及部分 100TM 分別在光敏表面 112 上界定對應之 TE 部分 112TE 及 TM 部分 112TM。TE/TM 極化器 100 可具有超過一個 TE 部分 100TE 或超過一個 TM 部分 100TM。在實例中，TE/TM 極化器 100 包括三個或三個以上總極化器部分 100TM 及 100TE。在一個實施例中，極化器部分 100TE 及 100TM 可在 TE 部分 100TE 與 TM 部分 100TM 之間空間地交替，以使得 TE 部分不與 TE 部分相鄰或 TM 部分不與 TM 部

分相鄰。在另一實施例中，TE 極化器部分 100TE 及 TM 極化器部分 100TM 可經佈置，以使得一些 TE 部分相鄰於其他 TE 部分，或一些 TM 部分相鄰於其他 TM 部分。

**【0070】** 在其他實施例中，TE/TM 極化器 100 可包含在兩個近似垂直之狀態之間順序地旋轉以獲得 TE 及 TM 光譜之單一極化元件。在下文所論述之其他實施例中，使用與單獨 IR 類比偵測器 110 相關聯之兩個單獨光敏表面 112。

**【0071】** 系統 10 包括控制器 150，該控制器 150 經配置以控制系統之操作。控制器 150 亦經配置以接收及處理來自光偵測器系統 130 之影像訊號 SI，該等訊號 SI 表示（原始）TE 及 TM 光譜，如下文所述。控制器 150 包括處理器 152 及記憶體單元（「記憶體」）154。控制器 150 可經由光源控制訊號 SL 控制光源 60 之啟動及操作，並接受及處理來自光偵測器系統 130（例如，來自如圖所示之框接收器 120）之影像訊號 SI。

**【0072】** 在實例中，控制器 150 包括電腦，並包括讀取裝置，例如，軟式磁碟驅動器、CD-ROM 驅動器、DVD 驅動器、磁光碟（MOD）裝置（未圖示）或任意其他數位裝置，該任意其他數位裝置包括用於自電腦可讀媒體讀取指令及/或資料的網路連接裝置，諸如乙太網裝置（未圖示），該電腦可讀媒體諸如軟式磁碟、CD-ROM、DVD、MOD、快閃驅動器或另一數位源（諸如網路或網際網路）。控制器 150 經配置以執行儲存在韌體及/或軟體（未圖示）中之指令，該等指令包括用於執行本文中所揭示之表面雙折射/應力測量之訊號處理指示。在實例中，術語「控制器」及「電腦」可互換。

**【0073】** 控制器 150 為可程式化的以執行本文中所述之功能，該等功能包括系統 10 之操作及影像訊號 SI 之上述訊號處理以達成表面雙折射/應

力之測量。如在本文中所使用，術語「電腦」不限於僅在此項技術中稱為電腦之彼等積體電路，而是廣泛地指電腦、處理器、微處理器、微電腦、可程式化邏輯控制器、特殊應用積體電路及其他可程式化電路，且該等術語在本文中可交換地使用。

**【0074】** 軟體可實施或幫助本文中所揭示之系統 10 之操作之效能，該等操作包括上述訊號處理。軟體可經可操作地安裝在控制器 150 中且詳言之安裝在處理器 152 及記憶體 154 中。軟體功能性可能涉及程式化，包括可執行碼，且此等功能性可用於實施本文中所揭示之方法。此軟體碼可藉由通用電腦或藉由下文所述之處理器單元執行。

**【0075】** 在操作中，該碼及可能相關聯之資料記錄儲存在通用電腦平臺內、在處理器 152 內及/或在記憶體 154 中。然而，在其他時候，軟體可儲存在其他位置處及/或可經傳輸以用於載入適當之通用電腦系統中。因此，本文中所論述之實施例涉及由至少一個機器可讀媒體運載之碼的一或多個模組之形式的一或多個軟體產品。由電腦系統 150 之處理器 152 或由處理器單元執行此碼使平臺能夠在本質上以在本文中所論述及說明之實施例中執行之方式實施目錄及/或軟體下載功能。

**【0076】** 電腦 150 及/或處理器 152 可各使用電腦可讀媒體或機器可讀媒體（例如，記憶體 154），該電腦可讀媒體或機器可讀媒體係指參與向處理器提供指令以用於執行（例如，判定樣品 20 中之表面雙折射/應力之量）之任意媒體。記憶體 154 構成電腦可讀媒體。此媒體可採用許多形式，包括但不限於非揮發性媒體、揮發性媒體及傳輸媒體。非揮發性媒體包括（例如）光碟或磁碟，諸如作為上文所論述伺服器平臺中之一者操作的任意一或多個電腦中的儲存裝置中的任一者。揮發性媒體包括動態記憶體，諸如此電腦平臺之主記憶體。實體傳輸媒體包括同軸電纜、銅線及光纖，包括

包含電腦系統內之匯流排的電線。

【0077】 因此，電腦可讀媒體之通用形式包括（例如）軟式磁碟、軟性磁碟、硬碟、磁帶、快閃驅動器及任意其他磁性媒體；CD-ROM、DVD 及任意其他光學媒體；不常用之媒體，諸如打孔卡片、紙帶及具有孔圖形之任意其他實體媒體；RAM、PROM、EPROM、FLASH-EPROM 及任意其他記憶體晶片或盒式磁帶；傳輸資料或指令之載波、傳輸此載波之電纜或鏈路或任何其他媒體，電腦可自該任何其他媒體讀取程式碼及/或資料。許多該等形式之電腦可讀媒體可能涉及向處理器 152 運載一或多個序列之一或多個指令以用於執行。

【0078】 在系統 10 之一般操作中，控制器 150 可向光源 60 發送控制訊號 SL 以便啓動及控制光源之操作。或者，可手動地啓動光源 60。光源 60 發射光 62，該光 62 沿軸 A1 朝向耦合表面 44 行進。若存在，則光 62 穿過濾光器 66。濾光器 66 可安置在光學路徑 OP1 及光學路徑 OP2 中之任一者中。然後，光散射元件 70 可散射光 62 以形成散射光 62S。散射光 62S 可由聚焦光學系統 80 接收，該聚焦光學系統 80 大體上重定向散射光。術語「聚焦光」62F 係指以散射元件 70 或不以散射元件 70 形成且以角光譜或入射角之範圍來表徵之此大體上經重定向之光。聚焦光 62F 穿過耦合稜鏡輸入表面 42，耦合稜鏡輸入表面 42 可包括光散射部分 43。聚焦光 62F 在角範圍內入射到介面 50 上。聚焦光 62F 在介面 50 處經反射以形成反射光 62R，反射光 62R 行進至收集光學系統 90。

【0079】 由於介面 50 之本質，反射光 62R 經由消逝場與樣品 20 之互動包括關於樣品頂表面 24 之資訊。反射光 62R 退出耦合稜鏡輸出表面 46 並行進至收集光學系統 90，收集光學系統 90 收集反射光並引導該反射光穿過 TE/TM 極化器 100 並在光偵測器系統 130 之光敏表面 112 上形成影像。



【0080】 形成在光敏表面 112 上之影像表示自介面 50 反射之角光譜。在介面 50 處之此光反射涉及聚焦或角度地分散之光 62F 與下層樣品表面 24 歸因於與自介面之全內反射相關聯之上述消逝場之互動。此互動涉及聚焦光 62F 入射到介面 50 上之位置與反射光 62R 離開介面之位置之間的有效偏移。此偏移被稱為 Goos-Hänchen 偏移，且此偏移之長度可用作光 62 與樣品表面 24 之互動長度之近似估計值。系統 10 之操作方法之態樣包括：藉由選擇耦合稜鏡 40 之折射率來說明樣品 20 在測量波長下之光學衰減來選擇此互動長度。在實例中，在操作波長下之稜鏡折射率  $n_p$  介於 1.54 與 1.8 之間。在另一實例中， $n_p$  介於 1.8 與 4 之間。

【0081】 在實例中，IR 類比偵測器 110 偵測藉由收集光學系統 90 形成之影像並產生發送至框接收器 120 之類比影像訊號（未圖示）。框接收器 120 數位化類比影像訊號以形成數位影像訊號 SI。TE/TM 極化器 100 之配置允許 TE 及 TM 光兩者在光敏表面 112 之對應部分上形成影像。因此，由使用在第 2 圖中所示之示例性 TE/TM 極化器 100 由收集光學系統 90 形成之影像包括彼此相鄰之 TE 部分 100TE 及 TM 部分 100TM 兩者。因此，來自光偵測器系統 130 之影像訊號 SI 包括來自該等部分中之每一者之影像資訊。由光偵測器表面 112 之 TE 部分 112TE 及 TM 部分 112TM 提供之 TE 及 TM 資訊表示 TE 及 TM 光譜，TE 及 TM 光譜可用於判定樣品 20 之表面 24 中之雙折射之量。如上所論述，TE/TM 極化器可包括超過一個 TE 部分 100TE 及超過一個 TM 部分 100TM，以使得在其他實施例中，可存在超過一個 TE 部分 112TE 及超過一個 TM 部分 112TM。

【0082】 儘管對於範圍 1100 nm 至 2400 nm 中之波長而言，IR 類比偵測器 110 及框接收器 120 可由較高解析度數位光偵測器（諸如 InGaAs 攝影機）替代，但從成本角度來看，如在第 1 圖中所示及描述之光偵測器系統

130 的配置為有利的。IR 類比偵測器 110 亦可包含：(例如) 在 800 nm 至 5000 nm 之波長範圍下操作之 PbSe 偵測器或攝影機；在 2000 nm 與約 10000 nm 之間的波長範圍下操作之 HgCdTe 偵測器或攝影機；在約 2000 nm 至約 10000 nm，更具體而言，在約 3000 nm 與約 5000 nm 之間的波長範圍下操作之 PbS、InAs、InSb 或類似偵測器。IR 類比偵測器 110 可為列掃描攝影機或一或多個  $1 \times N$  偵測器或一或多個 (幾列)  $\times N$ ，其中  $N$  為每列之像素之數目。系統 10 之示例性數位解析度為每像素約 20 微米。

**【0083】** 此低數位影像解析度可實際用於獲得樣品 20 中之表面雙折射之相對高精度測量 (亦即，約  $10^{-5}$  RIU) 係有悖常理的。然而，本文中所揭示之訊號處理方法使成功地使用 IR 類比偵測器 110 及框接收器 120 實現此高精度測量成為可能。

**【0084】** 與 CMOS 或 CCD 感測器相比，IR 類比偵測器 110 具有在明顯更長之波長 (例如高達約 2200 nm) 下靈敏之優勢。已判定，例如，此等更長波長 (尤其是長於 1500 nm 之波長) 有利於測量在具有目前商業利益之大多數玻璃陶瓷中且詳言之在許多白玻璃陶瓷中之表面雙折射。

**【0085】** 在系統 10 之一些應用中，可使用範圍  $800 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1100 \text{ nm}$  中之近紅外操作波長  $\lambda$ 。在此等情況下，可使用 CMOS 或 CCD 感測器來形成光偵測器系統 130。

**【0086】** 存在稱為臨界角之角  $\theta_c$ ，在該臨界角下，聚焦光 62F 自介面 50 之內反射變為全內反射 (TIR)。光 62 之 TE 及 TM 極化將具有在本文中表為  $\theta_{c-TE}$  及  $\theta_{c-TM}$  之不同臨界角  $\theta_c$ 。第 3A 圖示繪反射率  $R$  對  $\Delta\theta = \theta - \theta_c$  (以度為單位)， $\Delta\theta$  為入射角與臨界角  $\theta_c$  之間的差異。第 3A 圖圖示針對基板中各種位準之光學衰減  $\alpha_s$  及與如下所述之該光學衰減相關聯之正規化衰減  $\gamma_s$  而言，簡單的、均勻折射率基板 20 之在臨界角  $\theta_c$  周圍之區域中之

計算 TE（實線）及 TM（虛線）反射率， $\gamma_s$  值為 0、0.0015 及 0.003。銳角出現在無衰減的情況時，且隨著衰減之增加過渡變得逐漸平滑（及角逐漸變鈍）。

【0087】 第 3B 圖類似於第 3A 圖並圖示針對基板中等於 0、0.0015 及 0.0030 之三個位準之正規化衰減作為角  $\theta$  之函數的函數反射率  $R$  之導數，其中  $\gamma_s = \kappa_s n_p / n_s^2$ ，及  $\kappa_s = \alpha_s \lambda / 4\pi$  為表示具有衰減  $\alpha_s$  之基板之複合折射率之虛數部分。在第 3B 圖之特定實例中， $n_p = 1.14 n_s$ 。正規化衰減  $0 \leq \gamma_s \leq 0.003$  之該等值包含 0 至近似最高衰減位準之範圍，其中藉由使用本揭示案之方法進行具實際意義之精確測量是可能的。

【0088】 TE 極化光之繪圖圖示為實線，同時 TM 極化光之繪圖圖示為虛線。作為角度之函數之導數之峰值變得逐漸寬廣且隨著  $\gamma_s$  之增加數值更小。第 3B 圖之繪圖圖示，導數訊號之峰值保持在針對低損失基板情況計算之 0.1 度之臨界角  $\theta_c$  內。此外，TE 極化之導數訊號及 TM 極化之導數訊號之峰值之間的差異比 0.1 度小得多，且因此通常可忽略不計。

【0089】 亦在第 3B 圖中所見，導數訊號之半高寬（FWHM）寬度隨著衰減增加，同時最大導數降低。根據  $n_s = 1.535$  及如上所述之稍微大於  $n_s$  之  $n_p$ ，在所考慮之範圍之頂部處之值  $\gamma_s = 0.003$  對應於  $\alpha_s \lambda = 0.0162\pi$ 。

【0090】 第 3C 圖示繪反射率  $R$  對角  $\theta$ （以度為單位）並圖示折射率曲線對臨界角  $\theta_c$  周圍之過渡區域的形狀的影響，此由垂直點劃線標示（僅針對 TE 情況）。當基板 20 之折射率  $n_s$  不隨著進入基板之深度而變化時，實 TE 曲線無損失地過渡至 TIR。虛曲線圖示當接近基板 20 之表面 24 之折射率隨著深度單調地變化時過渡中之偏移及邊緣之圓化（鈍化），起始於表面處低於整體折射率 0.002 之值。在此情況下，由  $n(z) = n_s - (0.002) \cdot \text{erfc}(z/50)$  給定樣品 20 之折射率曲線之形狀，其中  $z$  為進入基板 20 之以微米計之深度

且  $n_s$  為在近表面折射率修改前之上述基板整體折射率。

【0091】 過渡之模糊使得難以藉由尋找導數之突變而精確地測量邊緣之位置。本文中所揭示之方法包括：使用訊號之濾波來平滑波紋，及然後比較具有最陡變化（例如，最大導數）之區域中之 TE 及 TM 訊號。

【0092】 因此，當所測量之基板 20 具有可以忽略之光學衰減及均勻之折射率時，至 TIR 之過渡通常是陡峭的。在所測量基板 20 中存在強光學衰減的情況下，且尤其在存在強散射的情況下，至 TIR 之過渡不突然地發生。在許多先前技術測量系統中，過渡為平滑的，以致對某些類型之樣品 20 而言該過渡不能準確地偵測。

【0093】 此外，在其中離子交換導致表面折射率之降低的一些經離子交換之玻璃中，表面折射率分佈產生至 TIR 之過渡之陡峭部分之緩和平滑（例如，在角光譜中之 TIR 角附近之尖銳特徵之圓化）。此實質上降低現有測量方法可測量兩種極化之臨界角及轉而測量相關聯表面雙折射之精度。聚焦光 62F 在介面 50 處之入射角之範圍必須足以為角 TE 及 TM 光譜中之每一者測量所謂之全內反射（ETIR）邊緣之位置，此舉標稱地發生在臨界角處。

【0094】 已觀測到，在某些不透明玻璃陶瓷樣品 20 中，在操作波長  $\lambda$  自可見增加至紅外時，自 TIR 至部分反射之過渡（下文為 TIR/PR 過渡）在逐漸變窄之角範圍內發生。因此，本發明之態樣使用上述紅外操作波長來使 TIR/PR 過渡更明顯。此又導致雙折射之更準確之測量。

【0095】 第 4A 圖為基板衰減  $\alpha$  (dB/mm) 對波長  $\lambda$  (nm) 之繪圖並圖示穿過示例性樣品 20 之電磁輻射之衰減，該樣品 20 由具有經拋光頂表面 24 之白玻璃陶瓷材料組成。該繪圖覆蓋 1100 nm 至 1750 nm 之波長範圍。示例性樣品 20 之厚度為 0.35 mm。在約 1400 nm 下之繪圖之尖峰區域為用

於執行衰減測量之光纖之吸收的殘餘並可忽略。第 4A 圖之繪圖指示，隨著波長之降低衰減顯著增加，在 1100 nm 下接近 100 dB/mm。

【0096】 第 4B 圖為黑玻璃陶瓷形式之示例性樣品 20 之類似繪圖。樣品厚度為 0.8 mm，其波長範圍為 850 nm 至 1750 nm。如在第 4A 圖中，應忽略尖峰部分。正如白玻璃陶瓷，隨著波長之降低衰減顯著增加。此外，在長於 1000 nm 之波長下黑玻璃陶瓷之衰減小於在 1550 nm 下之白玻璃陶瓷之衰減。

【0097】 第 4A 圖及第 4B 圖之資料指示，歸因於散射及在一些情況下之吸收之顯著衰減可與明顯寬廣之 TIR/PR 過渡相關聯。基於所觀測之顯著衰減與 TIR/PR 過渡之增加的寬度之間的相關性以及在黑玻璃陶瓷中觀測之較低衰減，由此斷定，若系統 10 可經配置以測量在接近 1550 nm 之波長下白玻璃陶瓷中之應力誘導之雙折射，則系統 10 可經配置以測量在 1000 nm 至 1100 nm 範圍中之波長下黑玻璃陶瓷中之應力誘導之雙折射。在黑玻璃陶瓷之應力光學係數不顯著小於白玻璃陶瓷之應力光學係數的情況下為如此。

【0098】 如稍後在本揭示案中所述，與測量能力相關之優值為波長與衰減係數之乘積；因此，配置為在 1550 nm 下及以某一精度測量第 4A 圖之白玻璃陶瓷之表面雙折射的系統應能夠以類似精度在至少短至 850 nm（及可能短至 800 nm）之波長下測量第 4B 圖之黑玻璃陶瓷。此系統可將 CMOS 或 CCD 感測器用作偵測器，從而降低系統成本。

【0099】 第 5 圖為耦合稜鏡 40 及樣品 20 之近視圖，該圖圖示與耦合稜鏡及聚焦光 62F 及反射光 62R 相關聯之關鍵角。在實例中，耦合稜鏡 40 配置為橫截面為等腰三角形。在實例中，等腰三角形具有稜角  $\alpha=60^\circ$ 。以角  $\theta$  入射至介面 50 上之聚焦光 62F 相對於表面法線 N 以角  $\beta_2$  退出耦合稜鏡輸

出表面 46。

【0100】 在實例中，收集光學系統 90 之間的光學路徑具有焦距  $f$ （對應於聚焦平面 92）且 IR 類比偵測器 110 之光敏表面 112 定位為遠離收集光學系統一段距離  $f$ 。在此配置中，對應於平行線（或平面波）之反射光 62R 聚焦到光敏表面 112 上之點。

【0101】 將光敏表面 112 分離成 TE 部分 112TE 及 TM 部分 112TM 允許同時記錄反射光 62R 之 TE 及 TM 極化之角反射光譜。假定系統參數可隨時間偏移，此同時偵測消除可由在不同時刻執行 TE 及 TM 測量引起之測量雜訊源。

【0102】 在 TE 及 TM 極化兩者處同時自 ETIR 之附近之介面 50 收集全角反射光譜對商業環境中之經離子交換之玻璃及玻璃陶瓷之製造的品質控制及監視所必須之快速（高產量）測量而言亦為有利的。當在兩種相互正交之極化狀態之間順序地旋轉單一極化器時，亦可使用本揭示案之光學配置相對快速地執行順序地收集 TE 及 TM 光譜。光譜之此類型之順序收集保持避免不得不經由光譜之順序入射角掃描收集移動部件之大優勢。此優勢有助於實質上降低每一掃描時歸因於馬達滯後或不良參照引起之所測量雙折射之隨機誤差。

【0103】 對第 1 圖之系統 10 之測量配置而言，當以下關係保持時，相對於在第 5 圖中所示之介面法線以角  $\theta$  在具有折射率  $n_p$  之耦合稜鏡 40 中傳播之光 62 的平面波可相匹配至具有有效折射率  $n_{eff}$  之樣品 20 的經引導、準引導或輻射傳播模式：

$$n_{eff} = n_p \sin \theta \quad (1)$$

當輸入表面 42 及輸出表面 46 在第 1 圖之圖式之平面中具有相等尺寸時，

由下式給定對應於有效折射率  $n_{eff}$  之耦合稜鏡輸出表面相對於表面法線 N 之出射角  $\beta_2$ ：

$$\beta_2 = \cos^{-1} \sqrt{1 + \sin 2\alpha n_{eff} \sqrt{n_p^2 - n_{eff}^2} - n_{eff}^2 \cos^2 \alpha - (n_p^2 - n_{eff}^2) \sin^2 \alpha} \quad (2)$$

由下式給定出射角  $\beta_2$  對有效折射率  $n_{eff}$  之改變之靈敏度：

$$\frac{d\beta_2}{dn_{eff}} = \frac{\cos \alpha + \frac{n_{eff}}{\sqrt{n_p^2 - n_{eff}^2}} \sin \alpha}{\sqrt{1 + \sin 2\alpha n_{eff} \sqrt{n_p^2 - n_{eff}^2} - n_{eff}^2 \cos^2 \alpha - (n_p^2 - n_{eff}^2) \sin^2 \alpha}} \quad (3)$$

【0104】 在實例中，對具有折射率  $n_s=1.536$  之樣品 20 及具有折射率  $n_p=1.5948$  及角  $\alpha=\pi/3$  弧度之耦合稜鏡 40 而言， $d\beta_2/dn_{eff}=3.85$  弧度/RIU 或  $0.0022$  度/ $10^{-5}$  RIU，其中 RIU 代表「折射率單位」， $10^{-5}$  RIU=0.00001。在此實例中，有效折射率  $n_{eff}$  之  $10^{-5}$  RIU 之變化對應於出射角之  $3.85 \times 10^{-5}$  的弧度變化。

【0105】 當 IR 類比值測器 110 之光敏表面 112 近似垂直於軸 A2 時，形成在光敏表面上並表示不同稜鏡耦合角之兩列之間隔  $\Delta x$  經由簡化運算式與該等兩列之對應相匹配樣品傳播模式之有效折射率差異  $\Delta n_{eff}$ ：

$$\Delta x \approx f \Delta \beta_2 = f \frac{d\beta_2}{dn_{eff}} \Delta n_{eff} \quad (4)$$

其中  $f$  為收集光學系統 90 之上述焦距，且  $x$  為光敏表面 112 之  $x$  方向，如在第 2 圖中所示。

【0106】 逆向方程式 (4) 可用於判定包括耦合稜鏡 40 及 IR 類比值測器 110 之光學系統之典型折射率解析度。若光偵測器系統 130 之解析度為  $\delta x$  (亦即， $\delta x$  之像素尺寸)，則有效折射率測量 (及因此雙折射率測量之)

典型解析度近似為：

$$\delta n_{ptx} = \frac{\delta x}{f \frac{d\beta_2}{dn_{eff}}} \quad (5)$$

**【0107】** 雙折射之測量之標準差可不同於方程式（5）界定之雙折射解析度。舉例而言，當系統 10 具有高均勻照明角光譜、低振動、低電性雜訊及在由 IR 類比偵測器 110 獲得之影像中允許良好訊號雜訊比之照明強度時，使用者（特別是使用如下所述之訊號處理時）可達到小於雙折射解析度之雙折射測量之標準差。

**【0108】** 另一方面，系統 10 具有非均勻照明角光譜、影像中之差訊號雜訊比或大量斑點時，雙折射測量之標準差可顯著地超過系統之雙折射解析度，有時超過幾乎整個數量級。

**【0109】** 當使用相對寬頻光源 60（諸如 LED 或燈泡）時，可使用上述濾光器 66（例如，帶通濾光器、低通濾光器或高通濾光器）來降低照明頻寬及改良 TIR/PR 過渡之銳度。舉例而言，當 1550 nm LED 之波長光譜太大時（例如，在 FWHM 下大於約 50 nm），此濾波可改良系統 10 之效能。同一濾光器 66 亦可降低來自環境光之雜訊或不必要之錯誤背景訊號。

**【0110】** 基於摻鉕光纖放大器（EDFA）使用配置有具有 ASE 源之光源 60 之示例性系統 10 執行樣品測量。因此源 60 之明確定義之輸出模式及此源 60 相較於 1550 nm 下之可用 LED 的相對高輸出功率而使用此源 60。儘管標稱地 1550 nm LED 之典型功率近似 1-2 mW，但在相同波長附近集中之 EDFA-ASE 源之功率可超過 30 mW。此外，由於光譜頻寬之顯著差異，相較於 LED 之光譜亮度，ASE 源之光譜亮度進一步增加。

**【0111】** 1550 nm LED 源之典型光譜頻寬在 FWHM 下為約 100 nm。第 6 圖為典型 ASE 源之輸出功率光譜密度  $P_{OUT}$  (mw/nm) 對波長 (nm) 之



繪圖。對於低於約 150 mA 之泵浦雷射二極體電流，此源之 FWHM 頻寬為約 9 nm。在較高之電流下，觀測到雷射振動之開始，此舉使光譜變窄。在 48 mA 之泵浦雷射二極體電流下操作 EDFA-ASE 光纖光源 60，其中 EDFA 之輸出功率顯著小於 30 mW，但功率光譜密度仍顯著高於 2-mW 之 1550 nm LED 源之功率光譜密度。

【0112】 EDFA-ASE 光纖光源 60 發射具有第 6 圖之輸出光譜之光 62。光 62 在移動光散射元件 70 後入射，光散射元件 70 由在板之表面上具有微晶體之薄圓塑膠板形成。典型晶體大小為約 30-35 微米。盤狀光散射元件 70 以光束 62 穿過塑膠板之此方式安裝在小馬達上，並持續地旋轉以在不同時刻及時提供實質上不相關之斑點圖形。光偵測器系統 130 捕獲之影像經時間平均，亦即，將具有不同斑點圖形之不同影像加起來（求和）以便減少斑點及獲得實質上無斑點之平均影像。

【0113】 取決於影像捕獲時間及移動光散射元件 70 之速率，當許多實質上不相關之斑點圖形在單一影像捕獲時間內形成時，即使有單一影像，亦可看見部分或甚至大量斑點降低。在所述之實驗中，影像捕獲時間由設備確定，且發現平均化多個影像對實質上降低單一影像中之斑點超過部分降低有效。

【0114】 亦觀測到，具有 15 微米之典型晶體大小之移動光散射元件 70 亦對降低具有接近 1550 nm 之波長及約 9 nm 之頻寬之 ASE 源之斑點有效，而具有 6 微米及更小之晶體大小之移動光散射元件 70 並非同樣有效。

【0115】 對在波長 $\lambda$ 下操作之系統 10 而言，具有大於約  $5\lambda$ （或在另一實施例中大於約  $10\lambda$ ）之細微性之移動光散射元件 70 對抑制斑點以用於在強衰減樣品 20 中之表面雙折射測量有效。

【0116】 在耦合稜鏡 40 之輸入表面 42 上之光軸 A1（例如，光散射

部分 43) 上或接近耦合稜鏡 (例如, 在聚焦光學系統 80 中或在耦合稜鏡與光學系統 80 之間) 具有靜態光散射表面降低比當靜態光散射元件 70 接近光源安置時的情況下更多之密度損失, 該密度損失係歸因於收集光學系統 90 之數值孔徑外的光散射。此外, 僅以適當散射及移動光散射元件 70 及置於耦合稜鏡輸入表面 42 上之光散射部分 43, 可將多數聚焦光 62F 聚集在輸入表面 42 處之具有所要尺寸之光點上, 從而降低可能到達光偵測器系統 130 之雜散光之量。當圖式之平面中之稜鏡橫截面為等腰三角形時, 示例性光點大小介於介面 50 之全長之 1/4 與 2/3 之間。

**【0117】** 使用輸出表面 46 上之光阻擋部分有助於阻擋由稜鏡輸入表面 42 之散射部分 43 產生之不需要之雜散光到達 IR 類比偵測器 110。可選擇經設計以使角分佈之均勻度平滑之靜態擴散表面以在 30-60 個波長之平均間隔下具有表面凸塊或凹陷。若亦需要角分佈之大幅擴展, 則可使用具有廣泛分佈之尺寸及間隔之凸塊及凹陷, 包括由僅僅 4 個波長間隔開之此等特徵結構之很大部分。可藉由噴砂或其他表面粗化技術獲得具有此等特性之擴散表面。

**【0118】** 在本發明之相關態樣中, 光偵測器系統 130 處之雜散光由吸收塗層 49 (見第 5 圖, 該圖圖示示例性吸收塗層之一部分) 藉由塗佈耦合稜鏡 40 之未使用表面中之一或多者 (例如, 除耦合表面 44 及輸入表面 42 及輸出表面 46 之外之表面) 來降低。在實例中, 吸收塗層 49 具有類似於或高於耦合稜鏡 40 之折射率  $n_p$  之折射率  $n_A$ 。在一個實例中, 吸收塗層 49 在操作波長  $\lambda$  下之折射率  $n_A$  滿足  $n_A > n_p - 0.1$ , 同時在另一實例中, 該折射率  $n_A$  滿足  $n_A > n_p - 0.02$ 。此外, 吸收塗層 49 在操作波長  $\lambda$  下具有顯著吸收, 在一個實例中, 顯著吸收大於約 100 dB/mm, 且在另一實例中, 大於約 1000 dB/mm。

【0119】 在實例中，耦合稜鏡 40 由在接近  $\lambda=1550$  nm 下具有約 1.595 之折射率  $n_p$  之 F2 (肖特) 玻璃製成，且未使用側面中之一或多者以光阻劑浸泡塗覆或旋轉塗覆以形成吸收塗層 49。在在耦合稜鏡 40 上沉積吸收塗層 49 前，碳微粒或奈米粒子溶解在光阻劑中以增加吸收。

【0120】 在實例中，碳糊或異丙醇中之碳懸浮液可與光阻劑混合以形成用於吸收塗層 49 之材料。碳糊或懸浮液之體積最佳地大於約光阻劑之體積之 2%。此外，無懸浮液溶劑之碳的質量最佳地小於約光阻劑之質量之 30%。

【0121】 在固化後，基於光阻劑之吸收塗層 49 具有約 1.6 之折射率  $n_A$ ，該折射率  $n_A$  接近耦合稜鏡 40 之折射率  $n_p$ 。示例性光阻劑包括希普利 1800 系列中之任意光阻劑，諸如 S1813 或 S1827，且無懸浮液溶劑之碳的質量約為光阻劑之質量之 5%-10%。

【0122】 現描述系統 10 執行用於測量樣品 20 之頂表面 24 中之雙折射之方法的示例性操作。在實例中，當無樣品 20 時（亦即，當鄰近耦合稜鏡耦合表面 44 存在真空、空氣、氮或其他無反應性氣體時），以照明耦合稜鏡 40 之光源 60 執行校正或參考測量。此舉提供 IR 類比偵測器 110 之光敏表面 112 之部分 112TE 及部分 112TM 之參考讀數。

【0123】 對單一框而言，光偵測器系統 130 在每影像收集時間方面可受限（對框接收器 120 而言，示例性時間為 1/30 秒）。因此，在示例性實施例中，多個框（影像）經收集且然後經平均化以降低斑點及改良訊號雜訊比。示例性框平均值為以每秒 8 個框（fps）之框捕獲率收集之 25 個框。在實例中，框捕獲率由移動光散射元件 70 之速率指定，以確保不同經捕獲之框含有實質上不相關之斑點圖形。

【0124】 在系統 10 之一個示例性配置中，收集光學系統 90 具有焦距

$f=75$  mm，且 IR 類比偵測器 110 之光敏表面 112 在 x 方向上具有 12.7 mm 之寬度，此寬度支援約  $22.9^\circ$  之中心角  $\beta_2$  周圍之約  $9.7^\circ$  之角光譜範圍。對於在 1550 nm 下之耦合稜鏡折射率  $n_p=1.5948$  而言，此出射角範圍對應於在耦合稜鏡 40 之內側上之約  $74.1^\circ$  之中心入射角  $\theta$  周圍之約  $6.1^\circ$  之範圍。

**【0125】** 當僅空氣與耦合稜鏡 40 之耦合表面 44 接觸時，通常在光敏表面 112 上成像之範圍內之所有角度下觀測 TIR。因此，所捕獲之校正（參考）影像表示耦合稜鏡 40 之耦合表面 44 之照明的角分佈。此校正角光譜用於正規化當樣品 20 之頂表面 24 與耦合稜鏡 40 之耦合表面 44 接觸以形成介面 50 時獲得之原始 TE 及 TM 角光譜。此正規化涉及原始 TE 及 TM 角光譜除以「參考」TE 及 TM 角光譜。

**【0126】** 某一量之環境光可經由折射自耦合表面 44 進入耦合稜鏡 40，並到達光偵測器系統 130，從而在參考訊號中貢獻不需要之元件。因此，在示例性實施例中，光源 60 發射實質上比任意環境光更亮之光 62。在另一實施例中，耦合稜鏡 40 包括上述之光阻擋構件 45。

**【0127】** 當樣品 20 及耦合稜鏡 40 適當地介面連接時，光偵測器系統 130 同時記錄 TE 及 TM 角反射/耦合光譜。此舉提供經測量之原始 TE 及 TM 角光譜。如在上述校正步驟，在實施例中，多個捕獲影像（框）經平均，例如以 8 fps 收集之 25 個框。在替代實施例中，TE 及 TM 角光譜可使用在 TE 及 TM 角光譜之每一記錄之間適當地旋轉之單一極化器來順序地記錄。

**【0128】** 歸因於 TE 及 TM 波在稜鏡-樣品（或油-樣品）介面 50 處之不同邊界條件，TE 及 TM 光譜部分地不同；此外，兩個光譜基於與樣品 20 中之表面應力相關聯之雙折射之量彼此偏移。然而，在實踐中，兩個光譜具有（例如）歸因於系統 10 中之雜訊、光敏表面 112 之不同背景雜訊、聚焦光 62F 之不均勻性、反射光 62R（例如在耦合稜鏡 40 之輸出表面 46 處

之) 非均勻反射及在基板 20 中可取決於極化及角度之顯著光散射的附加差異。

【0129】 因此，用於測量樣品 20 中之表面應力之方法之態樣涉及處理 TE 及 TM 角光譜以移除該等角光譜之間之各種差異，以使得該等角光譜在不改變資料之保真的情況下彼此盡可能密切地類似。

【0130】 為此目的，用 TE 及 TM 原始光譜除以對應之參考 TE 及 TM 光譜以產生正規化 TE 及 TM 光譜，亦即正規化影像。若攝影機 110 具有非線性回應，則非線性回應通常藉由由  $(I_2/I_1)^\gamma = V_{s2}/V_{s1}$  界定之參數  $\gamma$  描述，其中  $I_1$  及  $I_2$  為入射在攝影機上之不同光強度位準，且  $V_{s1}$  及  $V_{s2}$  為由攝影機回應於該等入射強度而產生之類比視訊訊號之對應位準。

【0131】 在非線性回應之此等情況下，應用正規化之適當方式係藉由遵循方程式  $IM_N = (IM_{\text{samp}} / IM_{\text{ref}})^{1/\gamma}$ ，其中  $IM_N$  為正規化影像， $IM_{\text{samp}}$  為在樣品 20 存在之情況下採用之影像，且  $IM_{\text{ref}}$  為在無樣品之情況下採用之參考影像。即使當不採用參考影像時，同一公式亦可用於正規化樣品影像，採用形式  $IM_N = IM_{\text{samp}}^{1/\gamma}$ 。第 7 圖為正規化影像  $IM_N$  之示意性表示，該表示分別圖示影像之底部及頂部上之正規化 TE 光譜  $S_{TE}$  及 TM 光譜  $S_{TM}$ 。當使用 IR 類比偵測器 110 時正規化影像  $IM_N$  之示例性尺寸為在一側上為約 19.8 微米之 480 列乘 640 行之方形像素。

【0132】  $IM_N$  之正規化影像在右手邊部分中具有全內反射 TIR 之亮帶，同時在左手邊部分上觀測到部分反射 PR 之暗帶。在其中 IR 類比偵測器 110 繞光軸 A2 旋轉 180° (光軸 A2 連接攝影機及透鏡) 或其中攝影機內光束或邏輯在隨後之影像複製之相反方向上掃描影像之不同配置中，可觀測到相反情況，其中影像之左手邊為亮帶 TIR，且右手邊為部分反射 PR 之暗帶。

【0133】 對正規化 TE 角光譜  $S_{TE}$  及 TM 角光譜  $S_{TM}$  而言，在 TIR/PR 過渡之一般位置  $TL_{TM}$  與  $TL_{TE}$  之間觀測到顯著偏移。TIR/PR 過渡位置之差異之精確測量表示 TE 及 TM 臨界角之間的差異  $\Delta\theta_C = \theta_{C-TE} - \theta_{C-TM}$ ，此允許精確估計樣品 20 中之雙折射。TE 及 TM 光譜之正規化降低或消除原始 TE 及 TM 光譜中之假影，假影可由聚焦/成角分散之光 62F 之照明強度之非均勻角分佈引起。

【0134】 第 7 圖圖示各自正規化 TE 角光譜  $S_{TE}$  及 TM 角光譜  $S_{TM}$  內之子區域或修剪窗  $W_{TE}$  及  $W_{TM}$ 。圖示示例性像素 PX 之近視圖。像素列 PXR 在每一窗內水平延行且像素行 PXC 垂直延行。對正規化 TE 及 TM 角光譜中之每一者而言，將像素列 PXR 加起來（求和）以為每一光譜產生隨後由最大強度正規化之單一訊號。對給定光譜而言，該結果表示平均角分佈，該平均角分佈表示為強度對像素行數。此產生正規化及均勻 TE 及 TM 光譜。

【0135】 即使當參加形成正規化影像  $IM_N$  之捕獲影像由 IR 類比偵測器（攝影機）110 產生時，該等捕獲影像藉由數位化框接收器 120 捕獲並以像素矩陣模式儲存。在第 7 圖之實例中，TE 修剪窗  $W_{TE}$  相對於 TM 修剪窗  $W_{TM}$  向左側偏移 20 個像素以便預先近似補償雙折射之預期量。如此更佳地捕獲每一修剪窗中間之 TIR/PR 過渡位置  $TL_{TM}$  及  $TL_{TE}$ 。

【0136】 第 8A 圖為修剪窗內之總行強度  $I_{CI}$  對像素行 PXC 之繪圖並圖示正規化及平均 TE 及 TM 光譜（分別為虛線及實線）。不考慮 TE 窗  $W_{TE}$  相對於 TM 窗  $W_{TM}$  之偏移。稍後，在重疊兩個經完全處理之強度分佈後將該偏移添加至雙折射之最後計算中。注意，在第 8A 圖及其他圖式中之像素行 PXC 之數目等於單一像素列((line))(列(line))PXR 中之像素 PX 之數目，因為已平均該等列。

【0137】 第 8A 圖之兩個曲線具有顯著不同之形狀，在很大程度上係

歸因於 TE 及 TM 波之不同邊界條件，如上文所提及。存在強散射時，邊界條件之此差異亦可能導致兩個極化之散射光分佈之差異，使兩個曲線另外地且不同地扭曲。

【0138】 預期將列求和及至非樣品強度分佈之正規化之順序交換以保持整體資料處理之能力以提取雙折射及相關聯之表面應力之精確的且可靠的值。詳言之，可為 TE 及 TM 光譜識別求和之區域並將該等區域應用至樣品影像及參考（校正）影像兩者。可在樣品角光譜及參考角光譜中執行求和，且然後可除以窗內之求和之光譜（例如，求和之樣品光譜除以求和之參考光譜）以獲得第 8A 圖之 TM 及 TE 求和之行強度  $I_{CI}$  之分佈。

【0139】 第 8B 圖類似於第 8A 圖並標繪  $I_D$  對像素行 PXC，其中  $I_D$  表示在經低通濾波以降低雜訊及藉由除以該等強度之各別最大值而正規化後之角行強度  $I_{CI}$  之分佈。歸因於 TE 及 TM 波之不同邊界條件之形狀差異保留在該等經平滑及正規化訊號中。繪圖中之實垂直線表示用於判定相互偏移之特定實例中之比較區域之邊界，如下文所解釋。

【0140】 第 8C 圖類似於第 8B 圖並圖示 TM 及 TE 極化之初始對比訊號  $SI_I$ ，該等訊號  $SI_I$  藉由第 8B 圖之經低通濾波及正規化行強度  $I_D$  除以該等訊號之各別角平均值然後減去 1 而獲得，亦即，對比訊號  $SI_I$  等於訊號與平均值之間的差異除以平均值。兩個對比訊號  $SI_I$  可能具有稍微不同之對比範圍，對該等訊號之直接比較而言此係不理想的。注意，若如在第 8C 圖之準備中為每一訊號執行至角平均強度的正規化，則如在先前段落中所述之在第 8B 圖之訊號之準備中正規化至最大強度之步驟在實際訊號處理中可省略。

【0141】 第 8D 圖類似於第 8C 圖並圖示在藉由除以該等訊號之各別總強度範圍而正規化後第 8C 圖之 TE 及 TM 對比訊號。該等訊號標示為  $SI_N$ 。

此時，TE 及 TM 對比訊號兩者皆覆蓋單位尺寸之垂直範圍，但兩個範圍之中心可能相對於彼此稍微垂直地偏移。

【0142】 第 8E 圖類似於第 8D 圖並圖示在偏移至共點後第 8D 圖之正規化對比訊號，在實例中，對每一訊號而言，該共點為在偏移至值 1 時對比訊號之最大強度點。該等正規化及偏移訊號標示為  $SI_{NS}$ 。因此，在本實例中，TE 及 TM 對比訊號兩者共用 0 至 1 之同一範圍，使得更容易比較兩個訊號並因此判定相互角偏移。

【0143】 在已執行上述對比形成及正規化程式後，TE 及 TM 對比訊號幾乎具有相同之形狀，如自第 8E 圖顯而易見。現藉由執行側向偏移直至兩個對比曲線在所選之陡變區域內最佳地對齊來完成雙折射。

【0144】 第 8F 圖圖示在比較區域（在實例中，像素行 100 至 130）內重疊時之 TE 及 TM 極化之正規化及偏移對比訊號  $SI_{NS}$ ，該重疊藉由水平偏移 TE 對比訊號而獲得。選擇比較區域以在強度過渡之陡峭部分中，且更具體地在陡峭部分之上半部中對齊兩個訊號。此區域對應於有效折射率值，該等有效折射率值非常接近表示 TIR 及臨界角之邊緣的值。此區域對應於僅稍微大於 ETIR 之 TIR 角，並當樣品中之折射率分佈之特徵深度實質上大於指數衰減場之穿透深度時與樣品頂表面 24 之表面折射率密切相關。

【0145】 在另一實施例中，TE 與 TM 訊號之間的偏移可由重心法判定，該重心法找到反射率之導數  $dR/d\theta$  之幾何中心。儘管幾何中心不一定位於最大反射率導數之光譜位置（曲線通常係非對稱的，如在第 3B 圖中所示），但幾何中心之偏移不影響最終測量。適用於具有低於臨限值  $x_{thresh}$  之值的像素的重心演算法產生重心值  $C = \sum(i * (x_{thresh} - xi)) / \sum(x_{thresh} - xi)$ ，其中  $xi$  為在像素  $i$  處之導數值， $x_{thresh}$  為由重心輸出之雜訊位準判定之導數之臨限值。較小之臨限值將大體上藉由在計算中包括更多像素而降低重心



雜訊。

【0146】 已認識到，在耦合稜鏡 40 及基板 20 之大基板衰減及折射率範圍內，每一極化之過渡訊號經歷最陡變化之位置臨界角之小於  $0.1^\circ$  內發生，此情況對應於無衰減之情況。此外，已認識到，當忽略散射光之影響時，TM 光之最陡變化之位置僅可忽略地不同於當基板 20 之近表面區域並非雙折射時 TE 光之彼位置。

【0147】 因此，很可能，當比較區域集中在最陡變化之角（例如，過渡訊號之導數之最大絕對值）時，TE 及 TM 訊號之比較將產生雙折射及應力之最準確估計值。若比較區域為正規化對比訊號  $SI_N$  之子集及覆蓋正規化對比垂直範圍之子集，則雙折射及表面應力之精確及準確測量為可能的，在一個實例中，該正規化對比訊號  $SI_N$  之子集位於約 0.15 與約 0.90 之位準之間，且在另一實例中，位於 0.20 與 0.85 之間，且在一個實例中覆蓋正規化對比垂直範圍之子集大於約 0.05 且在另一實例中大於 0.1。亦自第 8F 圖顯而易見，所選比較區域中之最終正規化訊號  $SI_N$  之斜率類似於訊號之最大斜率，且在一個實例中，該斜率為最大斜率之 40% 或更高，且在另一實例中，為最大斜率之約 70% 或更高。

【0148】 找到 1.9 個像素 PX 之偏移以在第 8F 圖所示之比較區域中最佳地對齊 TE 及 TM 正規化對比曲線。對於 21.9 個像素 PX 之總雙折射測量，將此偏移添加至 TE 窗  $W_{TE}$  相對於 TM 窗  $W_{TM}$  之 20 像素初始偏移。以 12.7 mm 寬 IR 類比偵測器獲得之  $640 \times 480$  像素影像之像素寬度為  $19.8 \mu\text{m}$ 。對應於 1 個像素 PX 之有效折射率解析度（方程式（5））為 0.000068，因此計算之雙折射為  $(21.9 \text{ 個像素}) \times (0.0000687) = 0.001505$ 。

【0149】 此測量之表面雙折射藉由該值除以應力光學係數（SOC）而轉換成表面應力。玻璃之 SOC 通常在  $1.5 \times 10^{-6}$  RIU/MPa 與  $3.5 \times 10^{-6}$  RIU/MPa

之間，該等玻璃具有與用於所述實驗中之白玻璃陶瓷之組成類似之組成。本文中所使用之特定玻璃陶瓷之 SOC 藉由首先（使用所述之方法）測量兩個系列之樣品之應力誘導之表面雙折射單獨地測量一次，該等兩個系列之樣品由於該等樣品已在兩種不同離子交換條件下製備而具有兩種實質上不同之表面應力位準。

**【0150】** 然後，該等樣品經歷破壞性的一側蝕刻，且由於歸因於不對稱之應力分佈之受擾力平衡，該等樣品之曲率之測量可用於使用材料之已知楊氏模量計算實際應力曲線。最後，藉由比較雙折射測量結果與自蝕刻測量推斷之應力曲線，判定  $2.5 \times 10^{-6}$  RIU/MPa 之 SOC。使用此 SOC，本實例中所述之樣品 20 之表面應力為 602 MPa。

**【0151】** 基於對經離子交換之白玻璃陶瓷之 12 個標稱相同的樣品 20 之多次測量，估計測量之標準差為約 0.000062 RIU，該偏差稍微小於對應於角光譜影像中之一個像素之寬度之 0.0000687 的折射率解析度。估計之標準差之部分很可能歸因於標稱相同之樣品 20 之間的應力之真實小差異。在不同批次之 10 個樣品 20 中，估計 0.000055 RIU 之標準差。所考慮之不透明白玻璃陶瓷之測量之真正精度可能優於 0.00005 RIU 並可藉由對單一樣品 20 執行大量測量來測量。

**【0152】** 在示例性系統 10 中以系統 10 執行 18 次白玻璃陶瓷之樣品 20 的測量，在示例性系統中控制來自散射及環境光之背景。耦合稜鏡 40 之長度為 25 mm 而不是 15 mm，且聚集透鏡 90 之焦距為 100 mm 而不是 75 mm。 $1.61 \times 10^{-5}$  RIU 之測量標準差在雙折射之測量期間獲得，其中平均值為  $1.21 \times 10^{-3}$  RIU。在此特定情況下，標準差表示 1.3% 之平均值。

**【0153】** 對於在測量波長下具有較低衰減之一些材料，也許可能為甚至更小之標準差。

【0154】 因此，用於測量表面應力之上述示例性方法可由下列步驟概括：

1. 在樣品 20 不存在的情況下經由耦合稜鏡耦合表面 44 捕獲 TE 及 TM 角光譜之一或多個校正/參考影像以獲得校正強度資料。必要時，藉由影像之小幅旋轉校正感測器框與稜鏡輸出表面 46 框之間的小方位角欠對準，此舉可藉由軟體執行。

2. 經由與樣品 20 之頂表面 24 耦合之稜鏡捕獲 TE 及 TM TIR 光譜之一或多個影像。必要時旋轉影像。

3. 藉由在具有樣品之情況下的 TE 及 TM 光譜除以無樣品之情況下的 TE 及 TM 光譜及藉由將比率提高至  $1/\gamma$  之功率來校正攝影機非線性(若存在的話)來將樣品 20 之所測量之 TE 及 TM 角反射光譜正規化至無樣品之情況下的 TIR 光譜。若未使用至參考光譜之正規化，但攝影機 110 具有非線性回應，則 TE 及 TM 光譜之影像可藉由以下方式來正規化：校正攝影機之非線性，從而提高原始影像至  $1/\gamma$  之功率。步驟 1 及步驟 3 並不是絕對必要的，但步驟 1 及步驟 3 通常改良測量精度。

4. 針對 TE 及 TM 光譜選擇界定 TE 及 TM 光譜中之每一者之子集的修剪窗  $W_{TE}$  及修剪窗  $W_{TM}$ 。求和在修剪窗內之影像列。若窗具有不同列數，則求和之訊號可除以列數以比較每列之訊號。一個窗可基於關於雙折射之量的初始推測而相對於其他窗偏移。

5. 低通濾波經求和之光譜及視情況用經濾波光譜除以該等光譜之各別最大值以獲得經濾波的、視情況正規化之 TE 光譜  $LPF_{TE}$  及 TM 光譜  $LPF_{TM}$ 。

6. 計算 TE 光譜  $LPF_{TE}$  及 TM 光譜  $LPF_{TM}$  之平均強度  $I_{ATE}$  及  $I_{ATM}$ 。

7. 計算 TE 對比  $C_{TE}=(LPF_{TE}-I_{ATE})/I_{ATE}$  及 TM 對比

$$C_{TM} = (LPF_{TM} - I_{ATM}) / I_{ATM}。$$

8. 對於每一極化，計算正規化之對比訊號 CN，亦即：

$$CN_{TE} = C_{TE} / (\max(C_{TE}) - \min(C_{TE})) \text{ 及 } CN_{TM} = C_{TM} / (\max(C_{TM}) - \min(C_{TM}))。$$

9. 對於每一極化，為每一正規化對比建立共同最大 CM 或共同最小 Cmin，及為每一極化計算最終正規化對比 CFN，亦即：

$$CFN_{TE} = CN_{TE} + CM - \max(CN_{TE}) \text{ 及 } CFN_{TM} = CN_{TM} + CM - \max(CN_{TM})$$

或者，

$$CFN_{TE} = CN_{TE} + CMin - \min(CN_{TE}) \text{ 及 } CFN_{TM} = CN_{TM} + CMin - \min(CN_{TM})$$

10. 判定最終正規化對比  $CFN_{TE}$  與  $CFN_{TM}$  之間的水平或角偏移，該偏移在高強度至低強度過渡之陡峭部分中提供兩個對比之間的最優（最佳）重疊。在實例中，兩個光譜之比較區域包括每一光譜（CFN訊號）之最大斜率。在實例中，比較區域界定為  $CFN_{TE}$  訊號之斜率大於  $CFN_{TM}$  訊號之最大斜率之 70% 的光譜之彼部分。在另一實例中，該區域界定為  $CFN_{TM}$  訊號之斜率大於  $CFN_{TE}$  訊號之最大斜率之約 50% 的光譜之彼部分。在實例中，選擇包括最大斜率之比較區域以包括對  $CFN_{TE}$  訊號及  $CFN_{TM}$  訊號兩者而言相同之兩個位準之  $CFN$  訊號。當使用公式以折射率單位表達時，最小化最終正規化對比  $CFN_{TE}$  及  $CFN_{TM}$  之差異的偏移為表面雙折射 B 之估計值，該偏移經添加至修剪窗之初始互動水平位移，該公式可專用於用於獲得角反射率光譜之表示的系統。

11. 必要時，應用近似 1（例如在 0.9 與 1.1 之間）的校正因數來將所測量之雙折射轉換成表面雙折射 B 之估計值。

12. 自表面雙折射  $\sigma = B \cdot SOC$  計算應力，其中 SOC 為樣品 20 之應力光學係

數。

**【0155】** 在另一實施例中，用於測量表面應力之方法藉由以下步驟概括，其中前四個步驟（下文未列出）與上述方法中之一致：

1. 低通濾波經求和之光譜以獲得經濾波之、視情況正規化之 $LPF_{TE}$ 及 $LPF_{TM}$ ；
2. 帶通濾波經求和之光譜以獲得經帶通濾波之 $BPF_{TE}$ 及 $BPF_{TM}$ 。
3. 將帶通率引入經低通濾波訊號以用於每一極化；
4. 對於每一極化，減去最小訊號，以使得最小訊號現為零。
5. 對於每一極化，用新訊號除以最大值，因此現在每一經濾波極化之訊號介於0與1之間並經正規化為對比。
6. 相對於其他極化之曲線縱向偏移一個極化之最終對比曲線直至在預選擇窗（通常含高強度至低強度過渡之最陡部分）內獲得在兩個曲線之間的最佳重疊。當使用公式以折射率單位表達時最小化差異之偏移為表面雙折射 $B$ 之估計值，該公式可專用於用於獲得角反射率光譜之表示之系統。
7. 必要時，應用校正因數來將所測量之雙折射轉換成表面雙折射 $B$ 之估計值。
8. 經由  $\sigma=B \cdot SOC$  自表面雙折射  $B$  計算應力，其中  $SOC$  為樣品 20 之應力光學係數。

**【0156】** 在另一實施例中，反射強度之最大導數之位置用於準確地估計表面雙折射  $B$  及應力。前 5 個步驟（下文未列出）與上述兩種方法中之一致。

1. 計算經低通濾波 $TE$ 訊號及 $TM$ 訊號中之每一者之數值導數訊號。

2. 以小於像素間隔之點間隔將兩個數值導數訊號插入密集之單維網上以找到具有子像素精度之導數最大值之位置。或者，對於兩個導數訊號中之每一者，在最大值周圍之窄區域中獲得導數訊號之二次或其他單峰值函數擬合，及計算具有子像素精度之擬合函數之最大值之更精確位置。

3. 找到具有子像素解析度之經擬合或經插入最大值的位置之間的差異。

4. 將TE修剪窗與TM修剪窗之間的相互偏移之值添加至在先前步驟中找到之差異以獲得具有子像素解析度之總偏移。總偏移乘以每像素PX之折射率解析度為表面雙折射B之估計值。每像素PX之折射率解析度可專用於用於獲得角反射率光譜之表示之系統。

5. 必要時，應用校正因數來將所測量之雙折射轉換成表面雙折射B之估計值。

6. 經由  $\sigma = B \cdot \text{SOC}$  自表面雙折射 B 計算應力，其中 SOC 為樣品之應力光學係數。

**【0157】** 強光學衰減對在 ETIR 附近之反射率過渡之銳度的影響可取決於以接近臨界角  $\theta_c$  之 TIR 角樣品 20 內之消逝場之穿透深度及光與有損樣品之相關聯之互動距離。臨界角  $\theta_c$  為對應於 ETIR 之發射角  $\theta = \theta_c$ 。在射線光學近似法中，自耦合稜鏡-樣品介面 50 全內反射之光線經歷平行於介面之縱向偏移，亦即，經歷上述 Goos-Hänchen 偏移。光 62 與樣品 20 之間的互動距離近似此偏移。

**【0158】** 對於接近臨界角  $\theta_c$  之入射角  $\theta > \theta_c$ ，TE 極化之 Goos-Hänchen 偏移由方程式很好地估計：

$$S_{G-H}^{TE} \approx \frac{\lambda}{\pi n_p} \frac{\tan \theta_c}{\sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c}} \quad (6)$$

且 TE 極化光經歷之 Goos-Hänchen 偏移之對應表達為：

$$S_{G-H}^{TM} \approx \frac{2\lambda}{\pi n_p \sin(2\theta_c)} \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c}} \quad (7)$$

**【0159】** 第 9 圖為 Goos-Hänchen 偏移  $S_{G-H}$  之示意性射線光學圖，其中樣品 20 在頂部且耦合稜鏡 40 在底部。對於全內反射，入射角  $\theta$  稍微大於臨界角  $\theta_c$ 。

**【0160】** 第 10 圖為根據方程式 (6) 作為入射角與臨界角  $\theta_c$  之偏差之函數的 TE 極化光之 Goos-Hänchen 偏移  $S_{G-H}$  的繪圖。根據方程式 (6) 及方程式 (7) 可見，Goos-Hänchen 偏移  $S_{G-H}$  與波長成比例。因為光 62 與樣品 20 之間的互動距離可近似射線光學近似法中之 Goos-Hänchen 偏移  $S_{G-H}$ ，故歸因於以大於臨界角  $\theta_c$  之入射角在較短波長下樣品中之顯著衰減產生之反射的降低在較短波長下可與樣品部分偏移降低之互動距離。

**【0161】** 此外，若以近臨界角  $\theta_c$  之總衰減為反射率過渡之擴展的主要原因，然後對於不同耦合稜鏡折射率  $n_p$  及不同操作波長  $\lambda$ ，衰減資料可與 Goos-Hänchen 偏移  $S_{G-H}$  組合以當實驗證明已獲得具有用於在新波長下之雙折射測量之充足效能的系統時界定在該特定波長下具有等價或改良效能之系統 10 之特定配置。

**【0162】** 舉例而言，形成用於具有約 1.535 之折射率  $n_s$  之樣品 20 之在 1550 nm 下操作之具有耦合稜鏡折射率  $n_p=1.595$  的高效能系統 10。IR 類比偵測器 110 之像素寬度為 19.8  $\mu\text{m}$  且收集光學系統 90 之焦距  $f$  為 75 mm。

對於耦合稜鏡角 $\alpha=60^\circ$ ，白玻璃陶瓷在 1550 nm 下之衰減為約 31 dB/mm，每像素 PX 之有效折射率/雙折射解析度為約 0.000069 且  $d\beta_2/dn_{\text{eff}}=3.85$  rad/RIU。

**【0163】** 具有等價效能但在 1060 nm 下操作之系統 10 可藉由考慮衰減、互動長度及靈敏度之差異形成。基於第 3 圖所示之白玻璃陶瓷之衰減資料，在 1060 nm 下以 dB/mm 為單位之衰減可估計為在 1550 nm 下之衰減之約 3.5 倍。

**【0164】** 為補償較大衰減，使用者可選擇耦合稜鏡 40 來提供一偏移，該偏移相較於在 1550 nm 下具有折射率  $n_p=1.595$  結果之耦合稜鏡 40 而言比在  $\lambda=1060$  nm 之操作波長下接近臨界角  $\theta_c$  之 Goos-Hänchen 偏移  $S_{G-H}$  小至少 3.5 倍。此條件藉由具有約 1.75 之折射率  $n_p$  之耦合稜鏡 40 滿足，且實質上藉由折射率  $n_p \approx 1.7$  之耦合稜鏡 40 滿足。對於該等較高折射率耦合稜鏡 40，靈敏度  $d\beta_2/dn_{\text{eff}}$  根據方程式 3 顯著降低。

**【0165】** 然而，靈敏度之此降低可由以下各者中之一或多者補償：a) 藉由使用較高解析度 IR 類比偵測器 110（尤其在新波長短於 1100 nm 時）；b) 藉由提供具有較長焦距  $f$  之收集光學系統 90；c) 若解析度受用於照明或收集之孔徑限制，則藉由增加收集光學系統或聚焦光學系統 80 之數值孔徑；d) 藉由利用在較短波長下改良之基礎光學解析度。

**【0166】** 若系統 10 之效能起初受歸因於強衰減、與系統中之雜訊組合之過渡的大幅擴展限制，則此可能係歸因於過度之光學解析度。因此，可增加焦距以補償降低之靈敏度  $d\beta_2/dn_{\text{eff}}$ 。

**【0167】** 在短於 1100 nm 之波長下具有靈敏度及具有 3  $\mu\text{m}$ -6  $\mu\text{m}$  之範圍中之像素尺寸之 CMOS 及 CCD 攝影機可以比在 1550 nm 下操作之攝影機明顯低之成本購得。因此，若精度受光偵測器系統 130 之解析度限制，



則歸因於使用較高折射率耦合稜鏡之耦合稜鏡 40 之耦合表面 44 在 1060 nm 下之降低的角靈敏度可由在低於 1100 nm 之波長下操作之 CMOS 或 CCD 攝影機之較高像素解析度補償。

【0168】 下文之表 1 顯示出射角  $\beta_2$  對在 1550 nm 下具有約 1.535 之折射率  $n_s$  之樣品 20 中之有效傳播指數  $n_{eff}$  的變化的靈敏度  $d\beta_2/dn_{eff}$ ，該靈敏度針對三個耦合稜鏡 40 及所考慮之紅外波長中之兩個而計算。

表 1		
耦合稜鏡玻璃 類型	$d\beta_2/dn_{eff}$ @ $\lambda=1,060$ nm	$d\beta_2/dn_{eff}$ @ $\lambda=1,550$ nm
F2( $n_p \approx 1.6$ )	3.82	3.85
S-LAL10( $n_p \approx 1.7$ )	2.36	2.36
N-SF11( $n_p \approx 1.75$ )	2.09	2.1

【0169】 表 1 之資料指示，最高折射率耦合稜鏡 40 在 1060 nm 下之靈敏度約為最低折射率耦合稜鏡在 1550 nm 下之靈敏度之 55%。相較於 IR 類比偵測器 110 而言，此可由近紅外 CMOS 或 CCD 攝影機之 3x 至 4x 較大像素密度來補償。在 1060 nm 下之光學解析度將優於在 1550 nm 下之光學解析度，因為光學解析度與波長成比例。

【0170】 因此，示例性系統 10 包括：a) 光源 60，該光源使用在接近 1060 nm 下操作之發光二極體；b) 耦合稜鏡 40，該耦合稜鏡 40 具有  $n_p \approx 1.75$  及  $\alpha = 60^\circ$ ；c) IR 類比偵測器 110，該 IR 類比偵測器 110 為具有在 3-8 微米之範圍中之像素間隔的 CMOS 或 CCD 攝影機之形式；d) 光散射元件 70，

該光散射元件 70 用於改良照明之角均勻度（包括，整合為耦合稜鏡輸入表面 42 上之粗糙度）；e) 附加移動光散射元件 70，該附加移動光散射元件 70 在需要時用於減少斑點；及 e) 控制器 150，該控制器 150 配置為執行上述訊號處理。

**【0171】** 具有 1060 nm 之操作波長  $\lambda$  之此系統 10 可藉由利用在 1060 nm 下可利用之稍微較高功率（5 mW-7 mW）LED 來進一步簡化。穿過高於約 1000 nm 之波長之長通濾波器 66 或具有 20 nm-80 nm 範圍中之頻寬之帶通濾波器 66 可用於限制 1060 nm LED 之頻寬。在此情況下可省略移動光散射元件 70，因為此位準之斑點為可忽略的。當歸因於基板 20 散射之收集影像之背景之變化可忽略時，用於推斷工作 1060 nm 系統之參數之縮放幅度有效。

**【0172】** 第 11A 圖為圖示示例性實施例之系統 10 之部分的近視圖，在示例性實施例中，光偵測器系統 130 包括單獨之單像素光偵測器 132 而不是單一的兩維光偵測器（攝影機）110。此實施例為使用更昂貴長波長兩維光偵測器之有用替代。

**【0173】** 第 11A 圖之系統 10 包括掃描鏡 94，該掃描鏡 94 自收集光學系統 90 引導反射光 62R 穿過分離 TE 及 TM 光元件（標示為 62TE 及 62TM）之極化束分裂裝置（PBSD）102。PBSD 102 可為藉由實例所示之習知束分裂稜鏡，或可為另一束分裂及極化裝置。

**【0174】** TE 光元件 62TE 及 TM 光組件 62TM 穿過各別孔 104 並至各別單像素光偵測器 132。掃描鏡 94 經配置以掃描反射光束 62R，此用於掃描 TE 光元件（光束）62TE 及 TM 光組件（光束）62TM 越過該等組件之各別光偵測器 132。單像素光偵測器 132 作為回應產生電性訊號 STM 及 STE 並將該等訊號發送至控制器 150。在此情況下，角反射光譜與所偵測訊號之

時間依賴性相關。

【0175】 在第 11A 圖中，PBSD 102 示意性地圖示為基於稜鏡之束分裂裝置。然而，PBSD 102 可包含任意形式之極化束分裂裝置，且在一個實例中包含光學功率分配器，諸如矽板及兩個極化器。在實例中，實質上以布魯斯特(Brewster)角安置之矽板(或在測量波長下透明的其他半導體材料)可用於尤其是在兩個平行表面處之兩次反射後產生實質上極化之光，此係歸因於 Si 在大入射角下對 s 極化光之反射率。在此情況下，可能省略極化器，儘管經分離之光束可能不在相互正交之方向上傳播。

【0176】 在實例中，半導體板可鏤入小於 10 度以適應在測量中使用之角範圍。以此方式，若一些光線在板之入口處具有遠離布魯斯特角之入射角，則該角在出口處可能更接近於布魯斯特角。因此，可根據測量之需要在若干度之角範圍內獲得極大的極化度差異。

【0177】 此系統 10 相較於基於雷射之順序掃描系統之主要優勢是消除歸因於 TE 及 TM 光譜之單獨參照之顯著隨機誤差。此外，第 11A 圖之系統可能執行較快速之測量，因兩種極化之資料經同時收集的而非順序收集。

【0178】 為確保將兩個偵測器 132 上之 TIR 過渡之差異適當映射至表面雙折射 B 及應力上，可首先執行具有已知應力位準之一或兩個校正樣品 20 之校正測量。使用具有實質上不同位準之應力之兩個校正樣品 20 可有助於以下兩者：精確地校正歸因於單像素光偵測器 132 在收集透鏡之聚焦平面中之不良定位之比例因數，及消除偵測器相對於偵測器之理想相互對齊之任意測量偏移。

【0179】 詳言之，一個參考樣品 20 可為具有可忽略之表面應力之退火玻璃，在此情況下，TIR 過渡在兩個單像素光偵測器 132 處之位置應相

同，或位置之差異應被認為是用於測量位置之差異之起始（參考）點。

**【0180】** 在類似於第 11A 圖中所示之實施例之替代實施例中，兩個單像素光偵測器 132 可放置在彼此之頂部上，以使得該等光偵測器將同置在第 11A 圖之平面中，且臂 62TE 及壁 62TM 將相同的，兩者皆直行或由在此情況下可為簡單反射鏡之元件 102 偏斜。在此實施例中，該差異在旋轉反射鏡 94 後，經反射光束 62R 垂直分離成兩個部分，該等兩個部分經線性極化成如由稜鏡之耦合介面藉由對應兩個極化元件界定之 TE 及 TM 極化，兩個極化元件在不同方向上極化。

**【0181】** 在類似實施例中，安置單一線性光偵測器，以使得線性像素陣列正交於圖式之平面拉伸，且陣列之兩個或兩個以上部分用於偵測對應於如上所述之極化器準備之 TE 或 TM 光。此變體與在第 1 圖中所示之實施例中所描述之二維陣列類似，但在尺寸中之一個尺寸方面，行之集合藉由時間掃描替代。然後，對應於 1 維陣列之 TE 或 TM 部分中之特定時間的訊號可藉由在彼時刻求和彼部分中之所選子集之像素的訊號來獲得。然後，可比較作為時間之函數的經求和 TE 及 TM 訊號以使用本文中所述之三個資料處理實施例之方法獲得雙折射估計值。詳言之，通常對應於位置  $x$  之行現對應於不同時刻  $t$ 。

**【0182】** 在所述掃描實施例中，若旋轉鏡 94 與兩個偵測器中之每一者之間的光學路徑長度近似等於  $b$ ，同時自收集系統或透鏡 90 至兩個偵測器中之每一者之光學路徑長度為約  $f$ ，則以下近似轉換公式可用於使 TE 訊號與 TM 訊號之間的所測量的時間延遲  $\Delta t_{TE-TM}$  與對應之雙折射相關：

$$\Delta n_{TE-TM} \approx \frac{2\omega b}{f \frac{d\beta_2}{dn_{eff}}} \Delta t_{TE-TM}$$

其中  $\omega$  為反射鏡 94 之旋轉之角頻率，且先前描述出射角  $\beta_2$  對有效折射率之靈敏度。

【0183】 第 11B 圖類似於第 11A 圖，除了單像素光偵測器 132 以線性陣列 ( $1 \times N$ ) 或 (幾個像素  $\times N$ ) 個光偵測器 134 來替代，移除孔 104，且掃描鏡 94 成為固定式折疊鏡或甚至在 PBS 102 放置到位時可省略掃描鏡 94，且線性陣列光偵測器沿所得之 TE 及 TM 波之路徑適當地放置。然後，TE 光譜  $S_{TE}$  及 TM 光譜  $S_{TM}$  可在不需要掃描的情況下以單發獲得。現在，訊號  $S_{TE}$  及  $S_{TM}$  包括基於幾列影像中之單列而非基於實質上二維影像之整個 (原始) TE 及 TM 光譜。

【0184】 正如第 11A 圖之實施例，執行具有已知表面雙折射/應力之一或兩個樣品 20 之一或兩次校正測量實質上可改良使用此實施例之測量之準確度。在此實施例中，PBS 102 可為功率分配器及一對極化器或在近布魯斯特角入射率下之高折射率 (半導體) 板或楔形物之形式。在此實施例中，參考後在 TE 及 TM 訊號之間的過渡位移與對應雙折射之間的關係與針對第 1 圖之系統組態所判定之關係相同。

【0185】 本文中所揭示之方法及系統可適用於具有負階之深區之一些負階折射率曲線 (通常大於  $30\lambda/n_s$ )，以及可適用於具有折射率之平滑連續變化之單調曲線，諸如由擴散產生之曲線。此等曲線之實例包括：

$$n(z) = n_s + \Delta n * \operatorname{erfc}(z/z_0);$$

$$n(z) = n_s + \Delta n * \exp(z/z_0);$$

$$\text{針對 } z < \text{DOL}, n(z) = n_s + \Delta n * (1 - z/\text{DOL}) \text{ 及針對 } z \geq \text{DOL}, n(z) = n_s;$$

及

其中  $-0.14 < \Delta n/n_s < 0$  及  $0 < z_0 < (80) \cdot \lambda/n_s$  或  $0 < \text{DOL} < (120) \cdot \lambda/n_s$ ,

其中  $z$ =進入樣品 20 之深度及  $n(z)$ =折射率曲線； $z/z_0$  為正規化深度座標；

DOL=層深度；及  $\Delta n = n_0 - n_s$ ，其中  $n_0$  為表面折射率，亦即  $n(0)$ 。

【0186】 對具有大幅衰減之玻璃及玻璃陶瓷而言，TIR/PR 過渡經擴展，以致習知測量系統不能識別臨界角  $\theta_c$  之位置。在實例中，系統 10 具有 5% 或更小之測量誤差。然而，例如，對玻璃陶瓷而言，TIR/PR 過渡之寬度比此測量誤差大約 30 倍。

【0187】 若忽略由導致測量角光譜中之非均勻背景之散射光引起之複雜性，則耦合光譜之擴展近似為：

$$\kappa[\text{RIU}] = \frac{\alpha_s \lambda}{4\pi} \equiv 1.83 \times 10^{-5} \alpha_s \left[ \frac{\text{dB}}{\text{mm}} \right] \lambda[\mu\text{m}]$$

其中  $\alpha_s$  為通常以  $\text{cm}^{-1}$  為單位或在後一版本之公式中以  $\text{dB/mm}$  為單位測量之衰減係數。此擴展源於將每一模式視為諧波振盪器，其中傳播常數為：

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}} + i\kappa)$$

【0188】 系統 10 之實例具有為 TIR/PR 過渡之典型寬度之約 1/30 的精度。對應力誘導之表面雙折射  $B$  而言，為達到低於  $\sigma$  之測量標準差，TIR/PR 過渡之寬度大體上應為約  $30\sigma$  或更小。因此，典型諧振之全寬度需為  $2\kappa \leq 30\sigma$ 。

【0189】 因此，本揭示案之實施例中之衰減係數為：

$$\alpha[\text{cm}^{-1}] \equiv \frac{4\pi\kappa[\text{RIU}]}{\lambda[\text{cm}]} \leq \frac{60\pi\sigma[\text{RIU}]}{\lambda[\text{cm}]}$$

$$\alpha[\text{dB/mm}] \equiv \frac{\kappa * 10^5}{1.83\lambda[\mu\text{m}]} \leq \frac{8.2 * 10^5 \sigma[\text{RIU}]}{\lambda[\mu\text{m}]}$$

【0190】 對衰減  $\alpha=31 \text{ dB/mm}$  之樣品 20 而言，示例性系統 10 可在 1.550 微米之波長下以約  $6 \times 10^{-5}$  之標準差測量表面雙折射  $B$ 。示例性系統 10 使用滿足用於衰減與所測量表面雙折射  $B$  之所需標準差之間的關係之上述

準則的波長。

【0191】 自 12 個標稱相同之經離子交換之玻璃陶瓷樣品 20 之測量結果獲得  $6.2 \times 10^{-5}$  RIU 之標準差。此外，自在一不同浴中交換之 10 個標稱相同之樣品 20 之測量獲得  $5.5 \times 10^{-5}$  RIU 之標準差。在兩種情況下，離子交換以樣品 20 之表面層中之 Li 離子替代 Na 離子。所觀測之標準差不僅反映歸因於測量設備之瑕疵之誤差，而且亦可能反映標稱相同之樣品 20 之間的微小差異。據估計，考慮標稱相同之樣品 20 之間的微小差異導致乘積  $\alpha\lambda$  可高達  $80\pi\sigma$  之準則。

【0192】 在另一實施例中，選擇操作波長，以使得：

$$\alpha[cm^{-1}] \leq \frac{80\pi\sigma[RIU]}{\lambda[cm]}$$

或以 dB/mm 為單位：

$$\alpha[dB/mm] \leq \frac{1.1 \times 10^6 \sigma[RIU]}{\lambda[\mu m]}$$

【0193】 另一實施例中，系統光學及資料處理演算法中之微小改良及偵測器雜訊及光學背景雜訊之小幅減少導致可能獲得標準差，以使得  $\alpha\lambda$  可高達  $130\pi\sigma$ 。在彼情況下，衰減選擇之準則變為：

$$\alpha[cm^{-1}] \leq \frac{130\pi\sigma[RIU]}{\lambda[cm]}$$

或以 dB/mm 為單位：

$$\alpha[dB/mm] \leq \frac{1.8 \times 10^6 \sigma[RIU]}{\lambda[\mu m]}。$$

【0194】 最後，在一些情況下，作為角度之函數的反射率之最大導數實質上大於所述之實驗實例。在此等情況下，標準差可實質上歸因於測量對光學及偵測器雜訊之降低的靈敏度而降低。詳言之，當衰減略低時，且尤其當散射較低時此等情況可發生。

【0195】 即使在具有相對大散射之白玻璃陶瓷之測量中，良好地抑制來自散射之環境雜訊及背景的經良好最佳化之系統 10 達到如上所揭示之  $1.61 \times 10^{-5}$  RIU 之標準差。在此情況下，乘積  $\alpha\lambda$  為約  $200\pi\sigma$ 。在僅歸因於光學衰減而受擴展限制及在吸收與散射之間存在良好平衡之一些經極良好最佳化之系統中，乘積  $\alpha\lambda$  可高達  $250\pi\sigma$ 。在本揭示案之實施例中，選擇操作波長，以使得：

$$\alpha[\text{cm}^{-1}] \leq \frac{250\pi\sigma[\text{RIU}]}{\lambda[\text{cm}]}$$

或以 dB/mm 為單位：

$$\alpha[\text{dB/mm}] \leq \frac{3.5 \times 10^6 \sigma[\text{RIU}]}{\lambda[\mu\text{m}]}$$

【0196】 如先前所提及，在實例中，所測量之材料之光學衰減實質上大體上大於 1 dB/cm，且在多數情況下大於約 1 dB/mm。

【0197】 示例性方法包括以下步驟：測量作為波長之函數的衰減係數  $\alpha$ 。此可（例如）使用極薄之樣品材料板完成以避免擴散輔助之光傳播區。該方法隨後包括以下步驟：繪製作為  $\lambda$  之函數的  $\alpha \cdot \lambda$  及尋求波長區域，其中  $\alpha \cdot \lambda < 250 \pi\sigma[\text{RIU}]$ 、 $200 \pi\sigma[\text{RIU}]$ 、 $130 \pi\sigma[\text{RIU}]$ 、 $80\pi\sigma[\text{RIU}]$  或  $60 \pi\sigma[\text{RIU}]$ 。因此，該方法包括以下步驟：在波長  $\lambda$  下操作系統 10 以使得在彼波長下之衰減滿足上述不等式中之一者。

【0198】 本文中所揭示之示例性系統 10 意欲特徵化在近紅外光下具有約 1 dB/mm 至約 105 dB/mm 之範圍中及在可見光下至大於 120 dB/mm 之範圍中之衰減  $\alpha$  的樣品 20 的表面雙折射 B。在不執行測量之一些紅外區域中（除了近紅外（800 nm-1100 nm）區域外，其中即使在高達約 180 dB/mm 之衰減位準下一些樣品之測量亦為可能的），樣品 20 可具有大於 105 dB/mm 之衰減。



【0199】 系統 10 可具有除藉由第 1 圖中之實例所示之配置外之不同配置。可能需要改變用於處理角光譜之一些步驟以適應不同配置。舉例而言，列求和可能取決於特定配置及光偵測器系統 130 為一維的還是二維的。

【0200】 在系統 10 之特定實施例中，出射角之變化與基板之對應傳播模式之有效折射率之變化之間的關係可為不同的。然而，此情形不影響資料處理，而僅影響用於將像素間隔轉換為雙折射之方程式。

【0201】 因此，本揭示案之一般實施例係針對處理原始資料，該原始資料表示作為適用於兩種不同極化狀態之像素、角度或時間（在掃描系統之情況下）的函數的反射強度。然後可應用如上所述之合適資料處理演算法以獲得表面雙折射或應力值。

【0202】 原始資料以使像素/行距、角距或時間差異與折射率變化或雙折射相關之系統專用公式獲得。用於獲得雙折射之精確估計值之資料處理步驟與所應用之公式無關。

【0203】 第 12A 圖為系統 10 之示例性實施例，其中耦合稜鏡 40 具有彎曲表面。稜鏡表面之彎曲部分在一個實例中幾何地表示為界定輸入表面 42 及輸出表面 46 之圓柱表面之部分。彎曲表面 42 及 46 分別組成聚焦光學系統 80 及收集光學系統 90 之一部分或整體。

【0204】 彎曲表面在空氣側上之焦距  $f_a$  由方程式給定：

$$f_a = \frac{R}{n_p - 1}$$

其中 R 為圓柱表面之曲率半徑。光偵測器系統 130 沿光學路徑距彎曲輸出表面 46 約距離  $f_a$  放置。

【0205】 在替代實施例中，耦合稜鏡 40 為半球形的。在又一實施例中，獨立聚焦透鏡 80 可插入在光源 60 與彎曲耦合稜鏡 40 之間，或獨立收

集透鏡 90 可插入在彎曲稜鏡與光偵測器系統 130 之間，或兩者皆可。在此配置中，光源 60 與耦合稜鏡 40 之間的距離可能需要變化以用於最佳照明。此外，耦合稜鏡 40 與光偵測器系統 130 之間的距離可能需要變化，以使得在耦合稜鏡內傳播之平面波聚焦在光偵測器系統 130 處之線或點中。光阻擋元件 45 可用於界定用於傳遞光聚焦光 62F 及反射光 62R 之更多開口。

**【0206】** 在第 12A 圖中，光源 60 照明光散射元件 70（諸如擴散器），該光散射元件在操作波長  $\lambda$  下最佳地強烈散射。光散射元件 70 實質上距耦合稜鏡 40 之彎曲輸入表面 42 距離  $f_a$ 。相較於第 1 圖之系統 10 之光學解析度，第 12A 圖之系統 10 可具有降低的光學解析度，此係歸因於可源於耦合稜鏡 40 之彎曲表面之更顯著之球面及其他像差。然而，當用於測量具有大量衰減之樣品 20 時，此可相對良好地執行，其中臨界角周圍之反射率之過渡顯著寬於低衰減樣品之反射率的過渡。在實例中，彎曲耦合稜鏡 40 之曲率半徑  $R$  為約 40 mm， $n_p$  為約 1.6，基板之折射率  $n_s=1.536$ ，且因此焦距  $f_a$  為約 33.3 mm。

**【0207】** 在第 12A 圖之實施例中，臨界角之空間偏移  $\Delta x$  與對應雙折射  $\Delta n_{TE-TM}$  之間的關係比第 1 圖之系統 10 之情況更簡單，並由運算式給定：

$$\frac{\Delta n_{TE-TM}}{\Delta x} = \frac{dn_{eff}}{d\theta} \frac{d\theta}{dx} \approx n_p \cos\theta \frac{1}{f_a} = \sqrt{n_p^2 - n_{eff}^2} \frac{n_p - 1}{R}$$

當涉及測量之在臨界角附近之角範圍內的  $n_{eff}$  之變化顯著小於  $n_p$  與  $n_{eff}$  之間的差異時， $n_{eff}$  之平均  $n_{eff}^{av}$  值可用於將 TIR 過渡之偏移轉化為雙折射之測量：

$$\Delta n_{TE-TM} \approx \Delta x \sqrt{n_p^2 - n_{eff}^{av 2}} \frac{n_p - 1}{R}$$

**【0208】** 在實例中，若由應力或大體上由離子交換引起之折射率變化顯著小於差異  $n_p - n_s$ ，則基板折射率  $n_s$  可以被平均有效折射率替代：

$$\Delta n_{TE-TM} \approx \Delta x \sqrt{n_p^2 - n_s^2} \frac{n_p - 1}{R}$$

【0209】 或者，可使用平均入射角 $\theta_{av}$ 或臨界角之近似估計值：

$$\Delta n_{TE-TM} = \Delta x \cos \theta_{av} \frac{n_p - 1}{R}$$

【0210】 角靈敏度  $d\theta/dn_{eff}$  可與第 1 圖之系統 10 之實施例之角靈敏度  $d\beta_2/dn_{eff}$  相比較。具有適度尺寸之彎曲耦合稜鏡之相對短焦距意謂線性偏移  $\Delta x$  對有效折射率之偏移之靈敏度可比具有示例性焦距  $f=75\text{mm}$  的第 1 圖之系統 10 之靈敏度小若干倍。

【0211】 參考第 12B 圖，為提高靈敏度，需要使用鄰近耦合稜鏡 40 之輸出表面 46 之收集透鏡 90。在實例中，收集透鏡 90 具有負光學功率，諸如平凹、雙凹或凸凹透鏡。負功率收集透鏡 90 用於增加含有彎曲輸出表面 46 及經附接或獨立收集透鏡 90 之組合系統之有效焦距。

【0212】 在此情況下，光偵測器系統 130 之光敏表面 112 可定位在具有有效焦距  $f_{eff}$  之組合系統之聚焦平面處，如在第 12B 圖中所示。詳言之，當透鏡 90 附接至或非常接近出射表面 46，總有效焦距  $f_{eff}$  可由下式得出：

$$\frac{1}{f_{eff}} \approx \frac{1}{f_a} + \frac{1}{f_l}$$

其中  $f_l$  為負收集透鏡 90 之焦距， $f_l$  在上述方程式中具有負值，導致  $f_{eff} > f_a$ 。

【0213】 因此，偵測器之感測器平面 112 距薄負收集透鏡 90 約  $f_{eff}$  距離定位，該薄負收集透鏡 90 接近輸出表面 46 定位。在實例中， $R=15\text{ mm}$  及  $n_p=1.6$ ，以使得  $f_a=25\text{ mm}$  及  $f_l=-30\text{ mm}$ 。此導致  $150\text{ mm}$  之有效焦距  $f_{eff}$ ，及

$$\frac{\Delta n_{TE-TM}}{\Delta x} \approx \frac{\sqrt{n_p^2 - n_s^2}}{f_{eff}} = \sqrt{n_p^2 - n_s^2} \left( \frac{n_p - 1}{R} + \frac{1}{f_l} \right) = \sqrt{n_p^2 - n_s^2} \left( \frac{n_p - 1}{R} - \frac{1}{|f_l|} \right)$$

在  $2.99 \times 10^{-6}\text{ RIU}/\mu\text{m}$  下評估。若有效感測器像素尺寸為  $19.8\ \mu\text{m}$ ，則對應於 1 個像素之雙折射解析度為：

$$\delta n_{pix} = 5.9 \times 10^{-5} RIU/pix$$

【0214】 第 12C 圖圖示類似於第 12A 圖之系統 10 之示例性實施例，但其中散射元件 43 併入輸入表面 42 中。此實施例可用於提供更均勻之照明角分佈。

【0215】 另一替代實施例可藉由組合第 12B 圖及第 12C 圖之實施例而獲得，其中散射元件 43 併在輸入表面 42 上，且收集透鏡 90 接近輸出表面 46 而添加以用於藉由增加有效焦距而提高線性靈敏度  $\Delta x/\Delta n_{eff}$ 。

【0216】 系統 10 之不同實施例可藉由組合第 1 圖及第 12A 圖至第 12C 圖之系統之特徵來形成。舉例而言，耦合稜鏡 40 之輸入表面 42 可為彎曲的（例如，圓柱形的，橢圓形的或球形的），同時輸出表面 46 可為平坦的。在此等情況下，關於第 1 圖之方程式一方面描述雙折射 B 之間的關係，另一方面描述像素或角距。

【0217】 在另一實例中，耦合稜鏡 40 之輸入表面 42 在具有或不具有散射表面 43 為平坦的，同時輸出表面 46 為彎曲的。

【0218】 對熟習此項技術者而言將顯而易見的是，在不脫離在附隨申請專利範圍中界定之本發明之精神及範疇的情況下，可對本文中所述之本揭示案之較佳實施例執行各種修改。因此，若修改及變化在所附申請專利範圍及申請專利範圍之等價物之範疇內，則本發明涵蓋該等修改及變化。

### 【符號說明】

#### 【0219】

- 10 近表面雙折射/應力測量系統
- 20 樣品
- 24 頂表面
- 26 主體或整體部分

- 30 樣品保持器
- 40 耦合稜鏡
- 42 輸入表面
- 43 光散射部分
- 44 耦合表面
- 45 光阻擋構件
- 46 輸出表面
- 49 吸收塗層
- 50 介面
- 52 折射率匹配流體
- 60 光源
- 62 光
- 62R 反射光
- 62S 散射光
- 62F 聚焦光
- 62TE TE 光組件
- 62TM TM 光組件
- 66 濾光器
- 70 光散射元件
- 72 驅動單元
- 80 聚焦光學系統
- 90 收集光學系統
- 92 焦平面
- 94 掃描鏡

100 TE/TM 極化器

100TE TE 極化器部分

100TM TM 極化器部分

102 極化束分裂裝置

104 孔

110 IP 類比偵測器

112 光敏表面

112TE TE 部分

112TM TM 部分

120 框接收器

130 光偵測器系統

132 單像素光偵測器

134 光偵測器

150 控制器

152 處理器

154 記憶體單元

**【生物材料寄存】**

國內寄存資訊【請依寄存機構、日期、號碼順序註記】

無

國外寄存資訊【請依寄存國家、機構、日期、號碼順序註記】

無

**【序列表】**(請換頁單獨記載)

無

## 申請專利範圍

1. 一種用於光學測量一樣品之一表面中之雙折射  $B$  之一量的方法，該方法包含以下步驟：

a) 數位捕獲該樣品之強度對像素數量之 TE 及 TM 角光譜，其中該數位捕獲由具有一折射率解析度之像素界定；

b) 處理該等 TE 及 TM 角光譜以最小化該等 TE 及 TM 角光譜之各別區域之間的差異，其中該等各別區域包括強度隨著角度之一變化率，該變化率為強度隨著角度之一最大變化率之至少 40%；

c) 判定最好地重疊該等經處理之 TE 及 TM 光譜之像素的一偏移量；及

d) 藉由該像素偏移乘以該折射率解析度判定雙折射  $B$  之該量。

2. 如請求項 1 所述之方法，其中該變化率為該最大變化率之至少 70%。

3. 如請求項 1 所述之方法，該方法進一步包括以下步驟：捕獲多個 TE 光譜影像及 TM 光譜影像及平均該等多個影像以減少斑點。

4. 如請求項 1 所述之方法，其中數位捕獲之該等 TE 及 TM 光譜構成原始 TE 及 TM 光譜，且該方法進一步包含以下步驟：  
在缺少該樣品之情況下捕獲參考 TE 及 TM 角光譜；

由該等參考 TE 及 TM 角光譜正規化該等原始 TE 及 TM 角光譜；及

每動作 b) 至 d) 處理該等經正規化之 TE 及 TM 角光譜。

5. 如請求項 4 所述之方法，該方法進一步包含以下步驟：  
校正一非線性偵測器回應以獲得經正規化之 TE 及 TM 角光譜。

6. 如請求項 3 所述之方法，其中執行該等 TE 及 TM 角光譜之該數位捕獲，以使得：

a) 該等 TE 及 TM 角光譜經同時捕獲作為一光偵測器之各別 TE 及 TM 部分上之 TE 及 TM 影像；或

b) 該等 TE 及 TM 角光譜經順序地捕獲作為一或多個光偵測器上之 TE 及 TM 影像。

7. 如請求項 6 所述之方法，其中該光偵測器包含捕獲 TE 及 TM 影像之一紅外類比偵測器，且其中該數位捕獲包括：以一框接收器處理該等 TE 及 TM 影像。

8. 如請求項 1 所述之方法，其中該樣品具有一應力光學係數 SOC，且該方法進一步包含以下步驟：

根據該雙折射 B 經由關係  $\sigma = B \cdot \text{SOC}$  來計算一表面應力量  $\sigma$ 。



9. 如請求項 1 所述之方法，其中該數位捕獲包括：接收單獨光偵測器上之該等 TE 及 TM 光譜。

10. 如請求項 1 所述之方法，其中該數位捕獲包括：掃描該等 TE 及 TM 光譜經過：

- a) 兩個單一光二極體；或
- b) 光感測元件之一線性陣列。

11. 如請求項 1 所述之方法，該方法進一步包含以下步驟：  
將來自一光源之光引導至光學耦合至該樣品之一頂表面之一耦合稜鏡。

12. 如請求項 11 所述之方法，該方法進一步包含以下步驟：  
使該光穿過安置於該光源與該耦合稜鏡之一耦合表面之間的至少一個光散射元件。

13. 如請求項 1 所述之方法，其中處理該等 TE 及 TM 角光譜之步驟包括以下步驟：

- 求多個 TE 光譜之和以獲得一總 TE 光譜；
- 求多個 TM 光譜之和以獲得一總 TM 光譜；
- 低通濾波該等總 TE 光譜及 TM 光譜；
- 帶通濾波該等經低通濾波之總 TE 及 TM 光譜；及
- 正規化該等經帶通濾波及低通濾波之 TE 及 TM 光譜，以使得該等 TE 及 TM 光譜中之每一者具有 0 至 1 之一範圍。

14. 如請求項 1 所述之方法，其中該樣品包含具有一衰減  $\alpha_s$  之一玻璃或一玻璃陶瓷，其中該雙折射具有測量誤差  $\sigma$ ，且其中該操作波長為滿足條件  $\alpha_s \lambda < 250\pi\sigma$  之一紅外波長。

15. 一種用於光學測量由經離子交換之玻璃或一玻璃陶瓷形成之一樣品之一表面中之雙折射  $B$  之一量的方法，該方法包含以下步驟：

a) 數位捕獲該樣品之強度對像素數量之 TE 及 TM 角光譜，其中該數位捕獲由具有一折射率解析度之像素界定；

b) 視情況正規化該等 TE 及 TM 角光譜至在無樣品之情況下獲得之一總反射率光譜，該總反射率光譜表示一照明系統之一角分佈；

c) 處理該等 TE 及 TM 角光譜或該等經視情況正規化之 TE 及 TM 角光譜以獲得經濾波之 TE 及 TM 光譜；

d) 計算該等經濾波之 TE 及 TM 光譜之各別導數；

e) 判定該等各別導數之各別最大值之該等角位置；及

f) 藉由該各別導數最大值之該角距判定該偏移。

16. 一種用於光學測量由經離子交換之玻璃或一玻璃陶瓷形成之一樣品之一表面中之雙折射  $B$  之一量的系統，該系統包含：

一稜鏡，該稜鏡在一耦合表面處光學耦合至該樣品表面並具有一輸入表面及一輸出表面；

一光源，該光源發射具有該紅外範圍中之一操作波長之光，其中該光源經由該輸入表面及經由一第一光學路徑光學耦合至該稜鏡耦合表面；

一光偵測器系統，該光偵測器系統經由一第二光學路徑經由該輸出表面光學耦合至該稜鏡耦合表面，且該光偵測器系統經配置以接收表示該樣品之 TE 及 TM 角光譜之 TE 及 TM 光，其中該光偵測器系統包括具有一折射率解析度之一或多個像素；及

一控制器，該控制器電性連接至該光偵測器系統並經佈置以接收該等 TE 及 TM 影像，該控制器配置有指令，該等指令在一電腦可讀媒體中體現以處理該等 TE 及 TM 影像以最小化該等 TE 及 TM 角光譜之各別區域之間的差異，其中該等各別區域包括強度隨著角度之一變化率，該變化率為強度隨著角度之一最大變化率之至少 40%，該控制器經配置以判定最好地重疊該等各別區域中之該等經處理之 TE 及 TM 光譜的像素偏移的一量並藉由該像素偏移乘以該折射率解析度來判定雙折射 B 的該量。

17. 如請求項 16 所述之系統，其中強度隨著角度之該變化率為至少 70%。

18. 如請求項 16 所述之系統，其中該光偵測器系統包含電性連接至一框接收器之一 IR 類比偵測器，且其中一 TE/TM 極化器安置於該 IR 類比偵測器前面，該 TE/TM 極化器包括界

定該 IR 類比偵測器之對應之至少一個 TE 區域及至少一個 TM 區域之至少一個 TE 部分及至少一個 TM 部分。

19. 如請求項 16 所述之系統，其中該樣品具有一衰減  $\alpha_s$ ，該系統具有一雙折射測量誤差  $\sigma$ ，且其中該操作波長為滿足條件  $\alpha_s \lambda < 250\pi\sigma$  之一紅外波長。

20. 如請求項 16 所述之系統，該系統進一步包含安置於該光源與該稜鏡耦合表面之間的至少一個光散射元件。

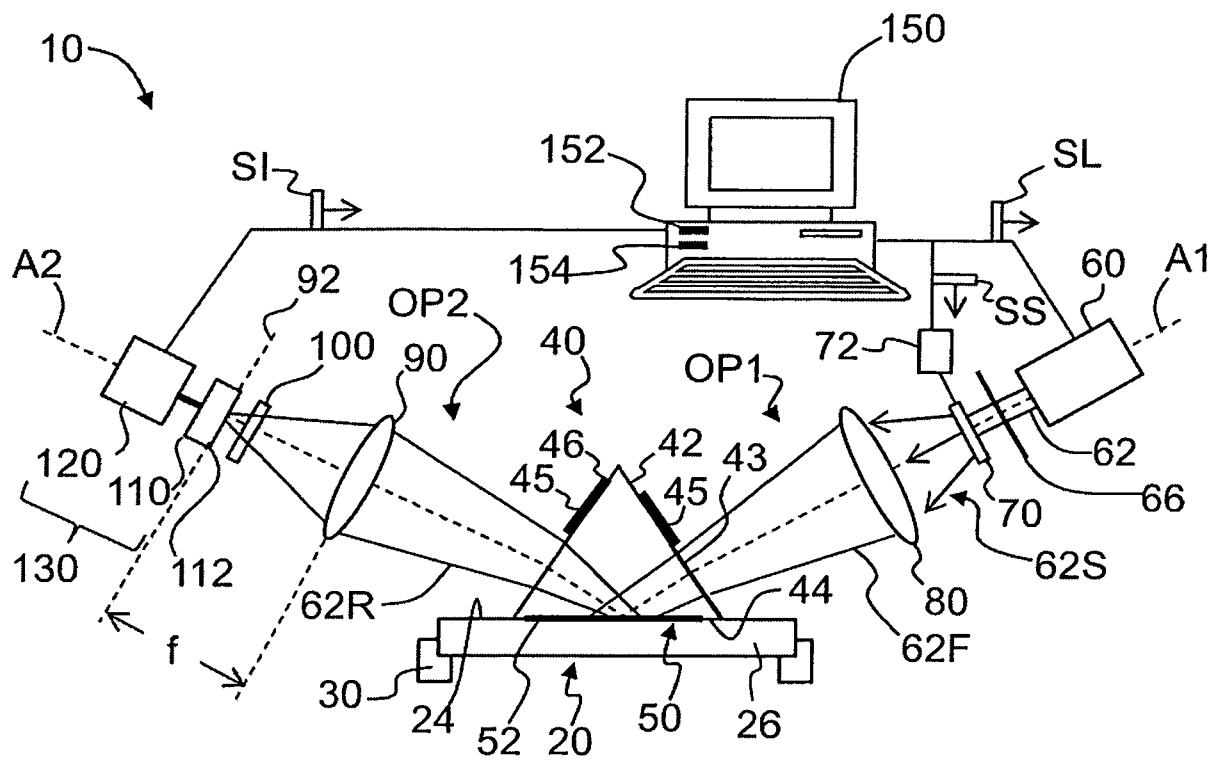
21. 如請求項 16 所述之系統，其中該光偵測器系統包括：

a) 第一單像素偵測器及第二單像素偵測器，該等偵測器藉由安置於該第二光學路徑中之一極化束分裂裝置光學分離；或

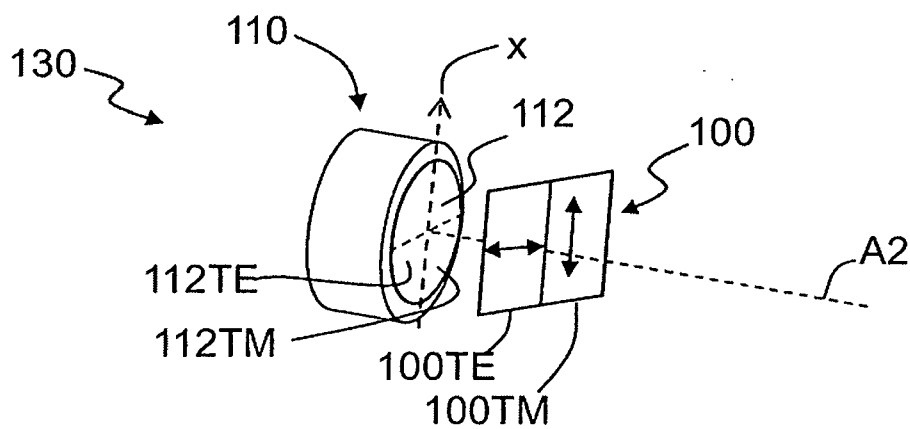
b) 第一線性偵測器及第二線性偵測器，該等偵測器藉由安置於該第二光學路徑中之一極化束分裂裝置光學分離；或

c) 一個線性偵測器，該線性偵測器具有藉由安置於該第二光學路徑中之一極化束分裂裝置光學分離之一 TM 部分及一 TE 部分。

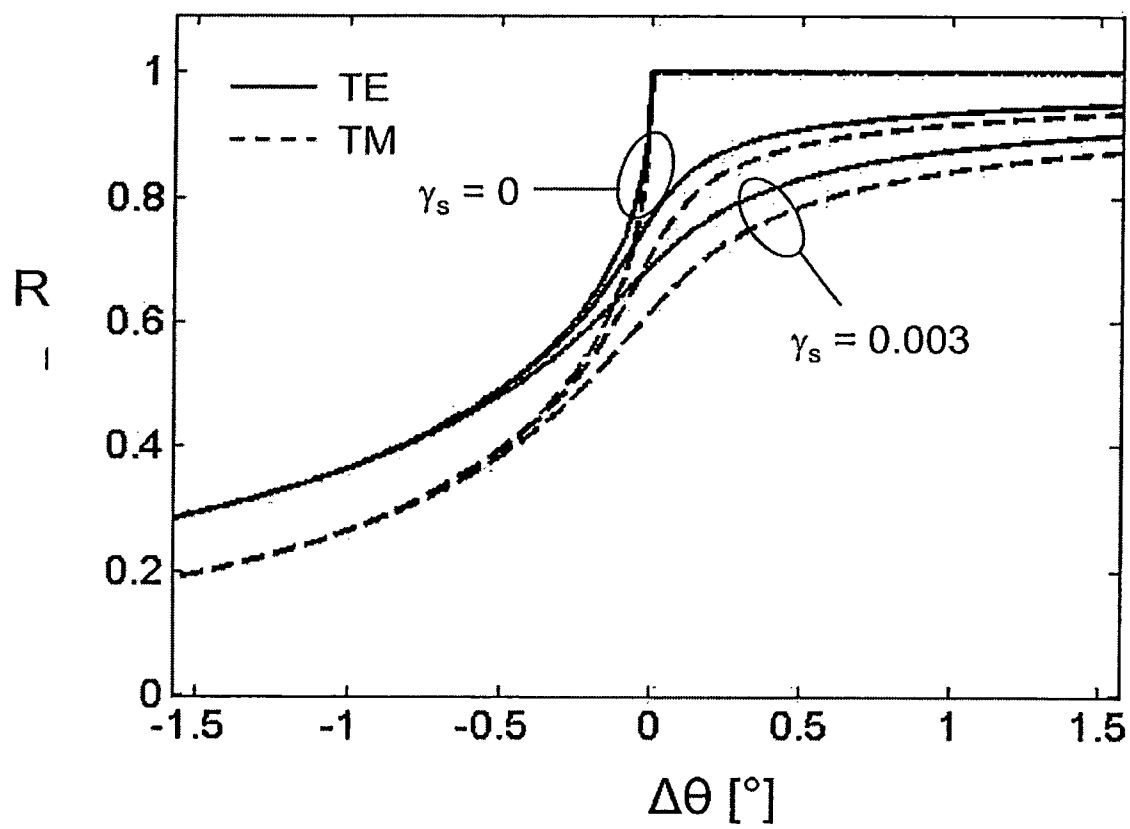
圖式



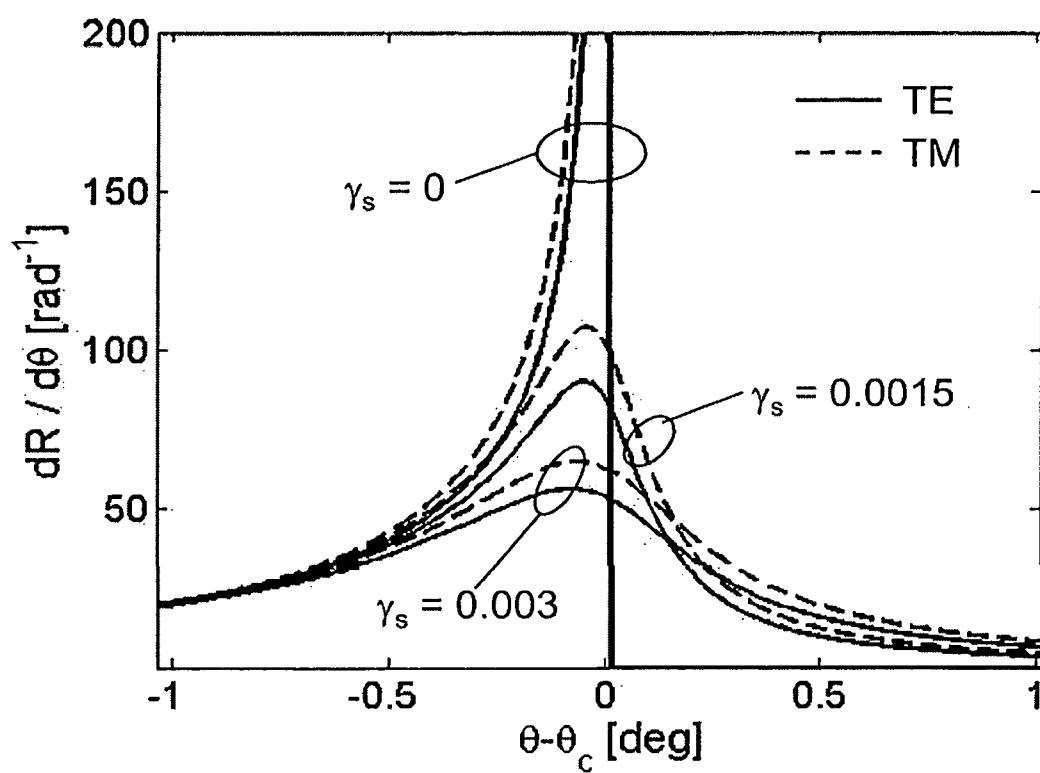
第1圖



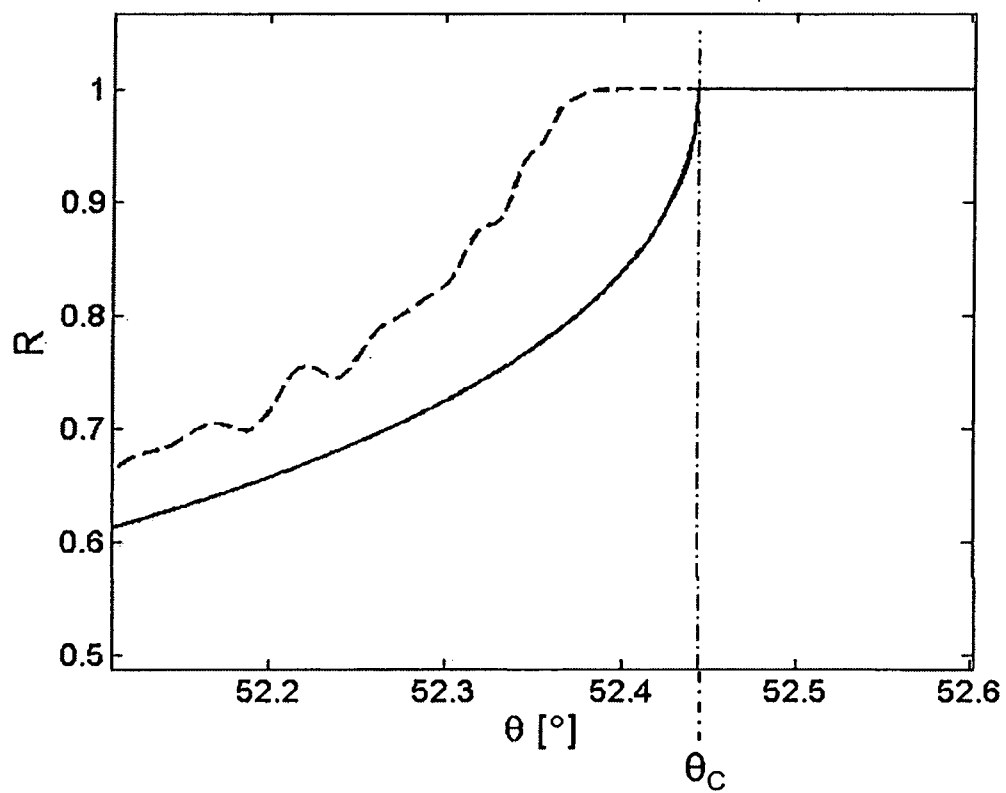
第2圖



第3A圖

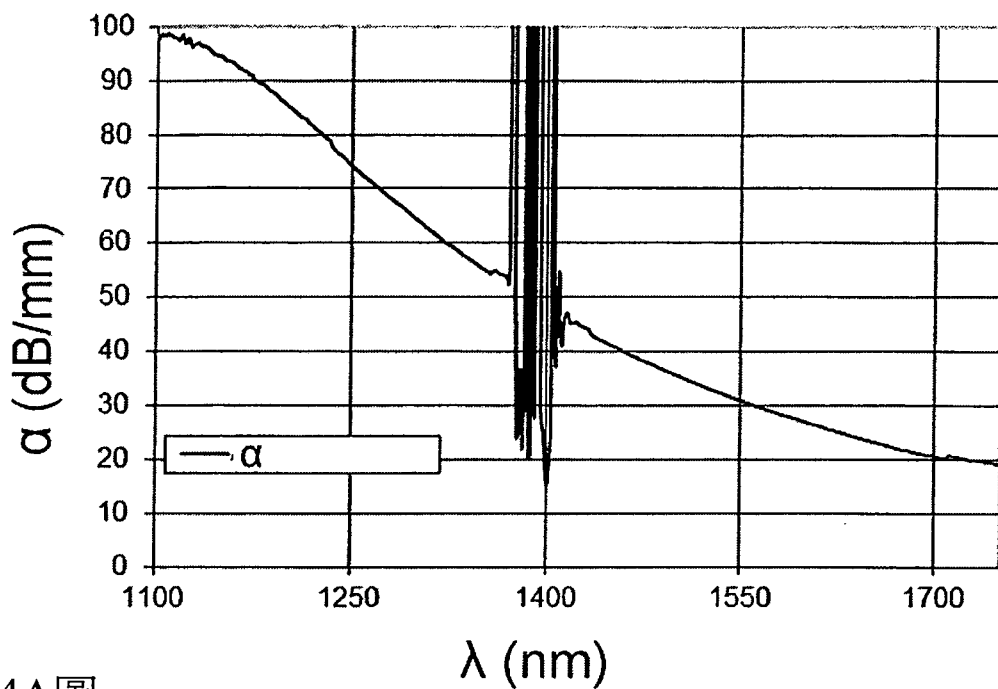


第3B圖

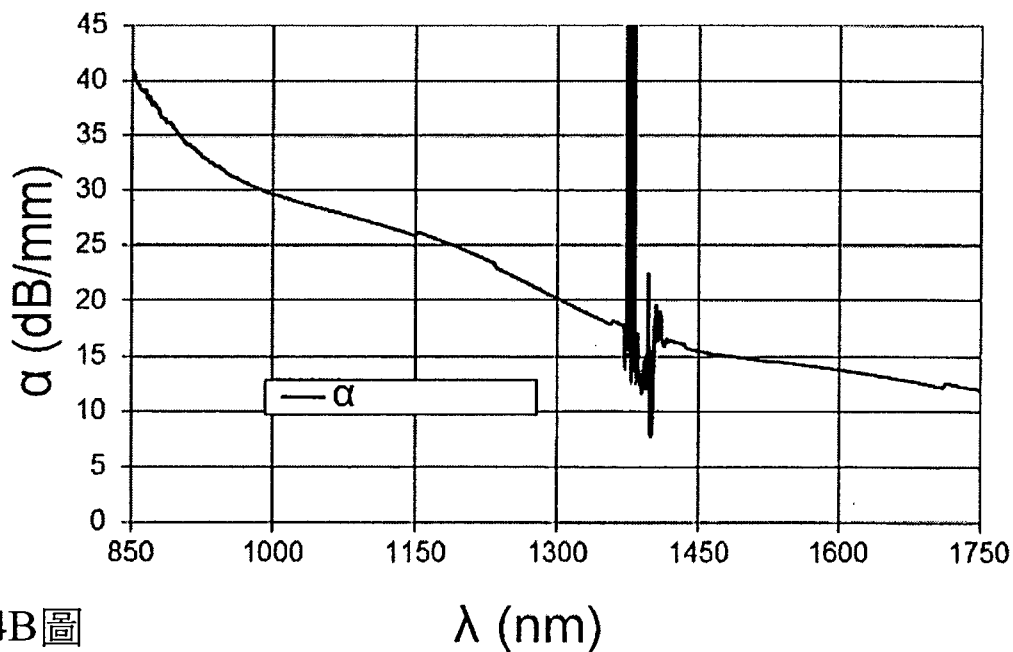


第3C圖

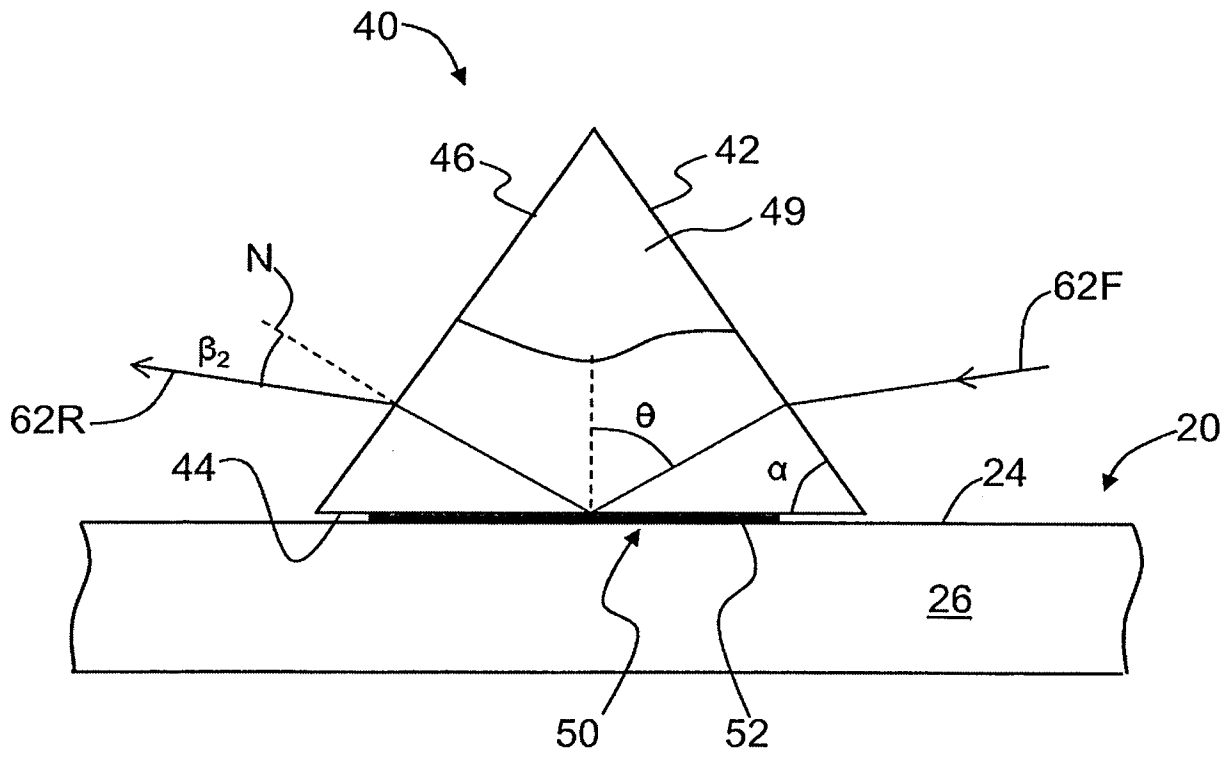




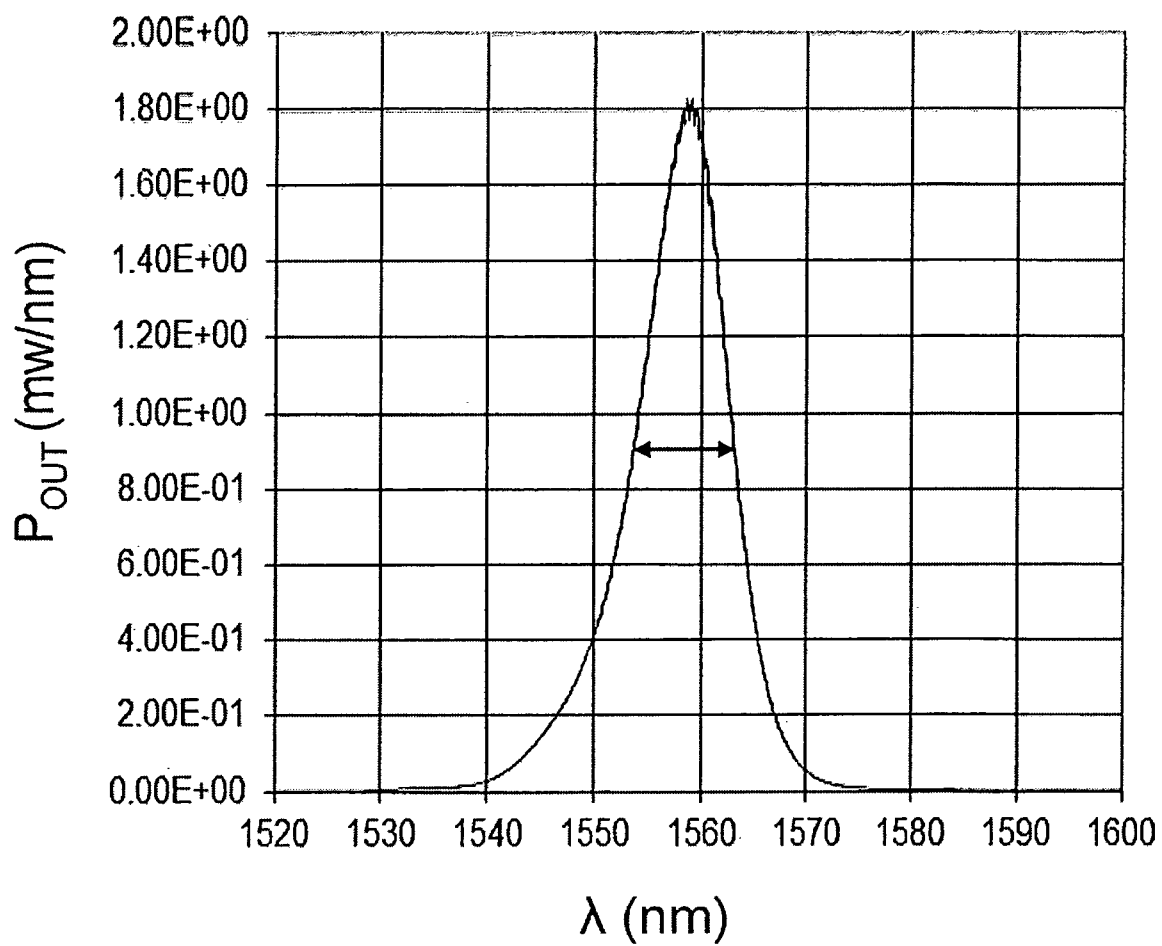
第4A圖



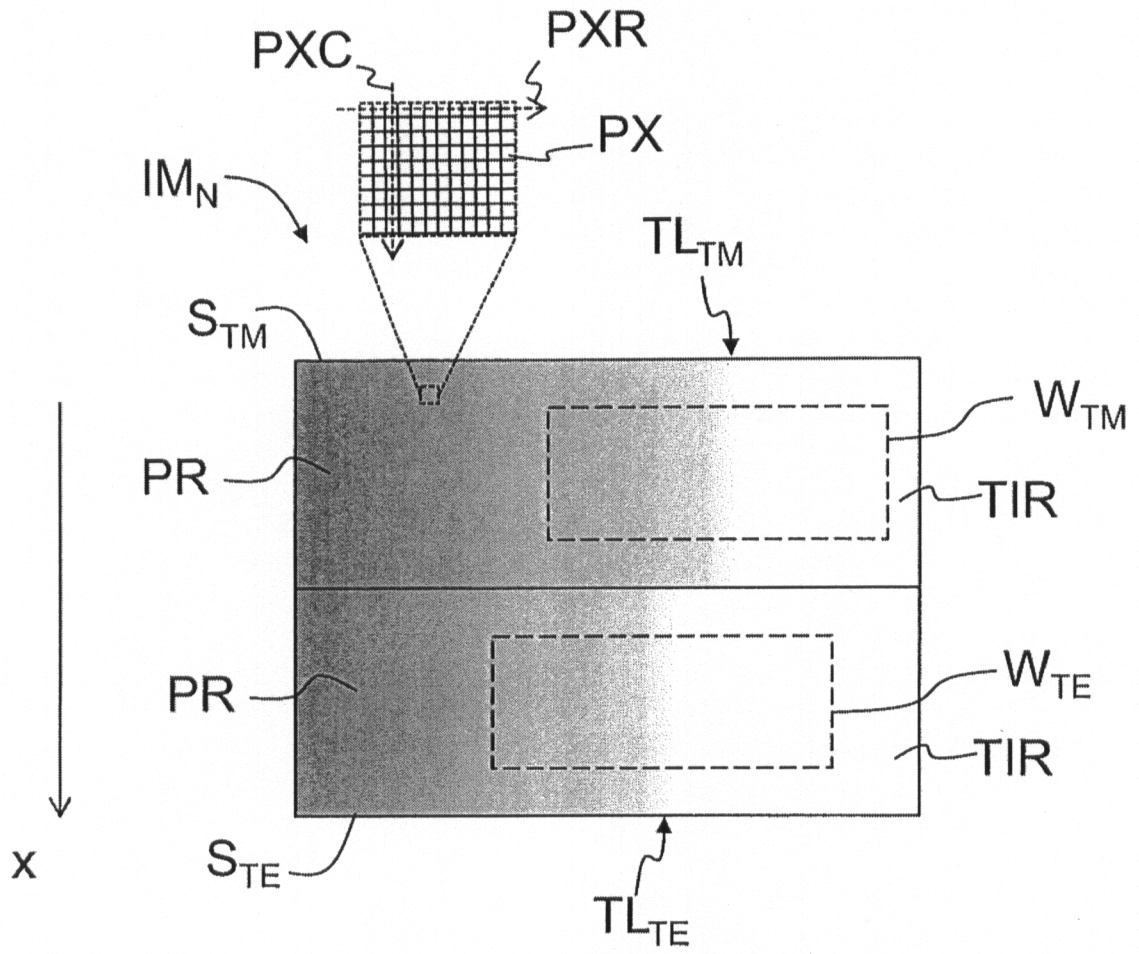
第4B圖



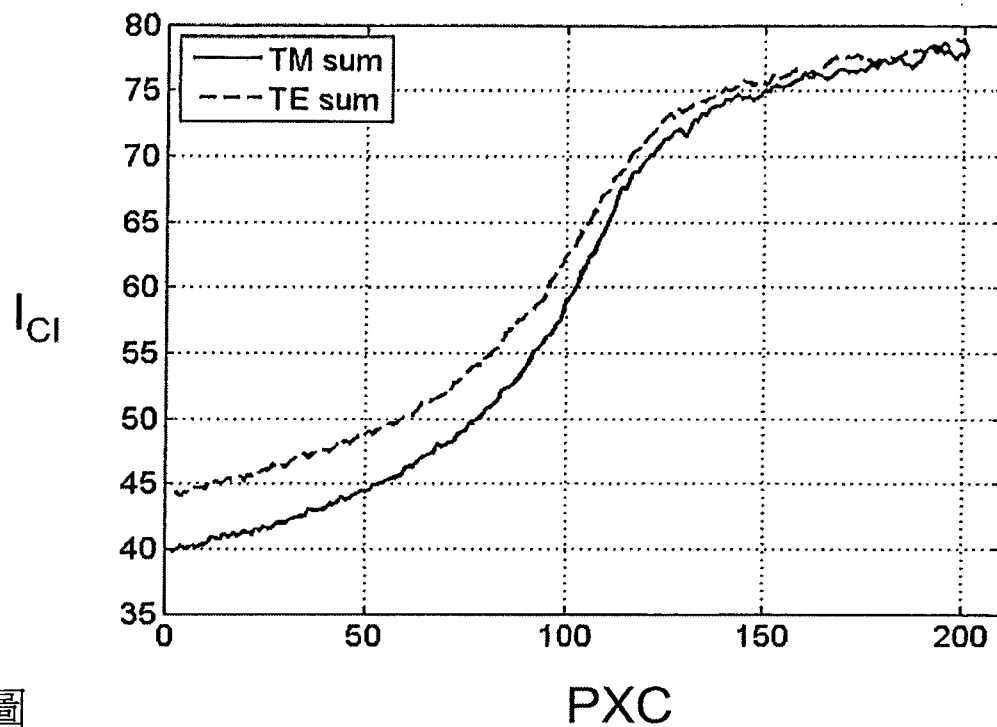
第5圖



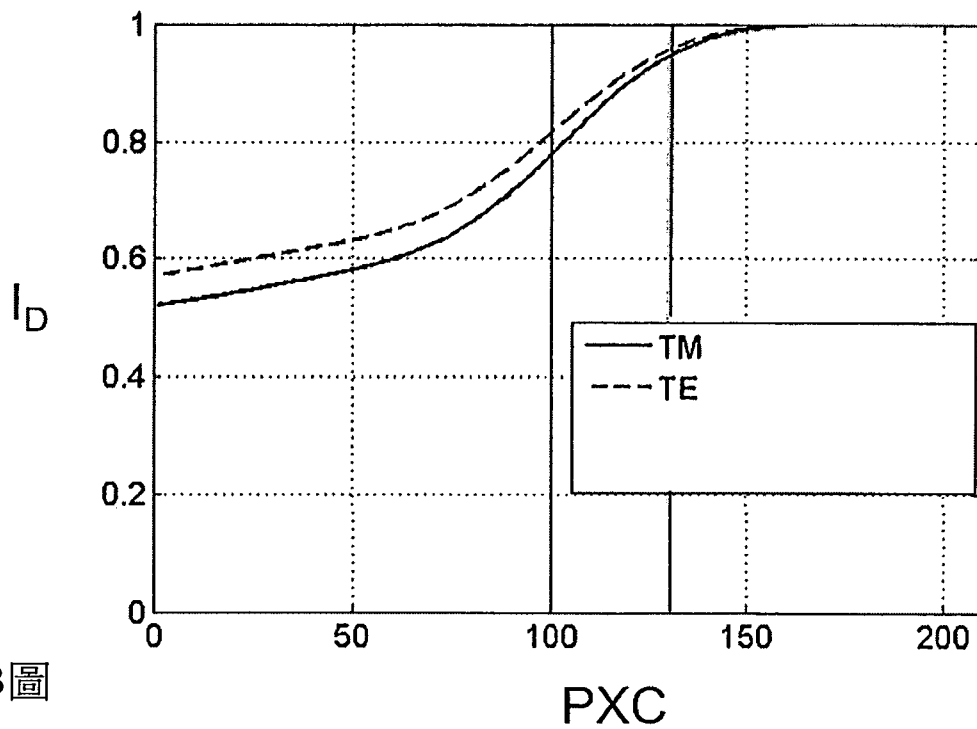
第6圖



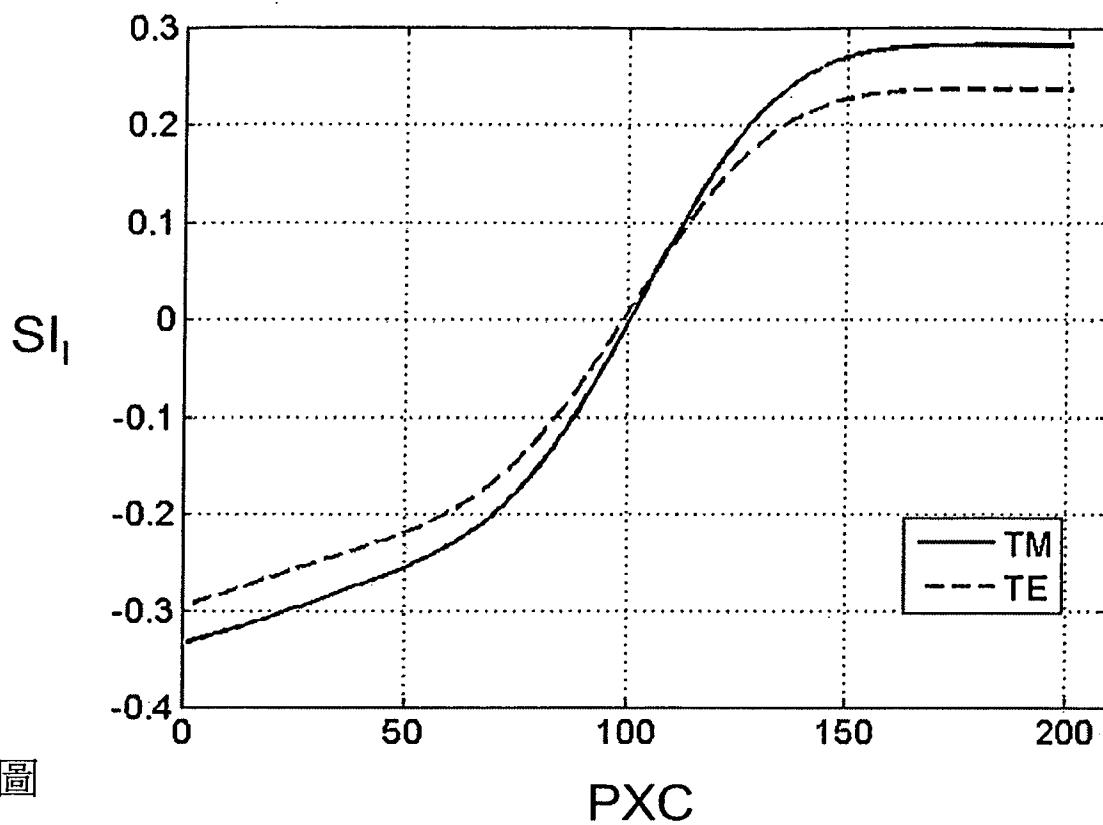
第7圖



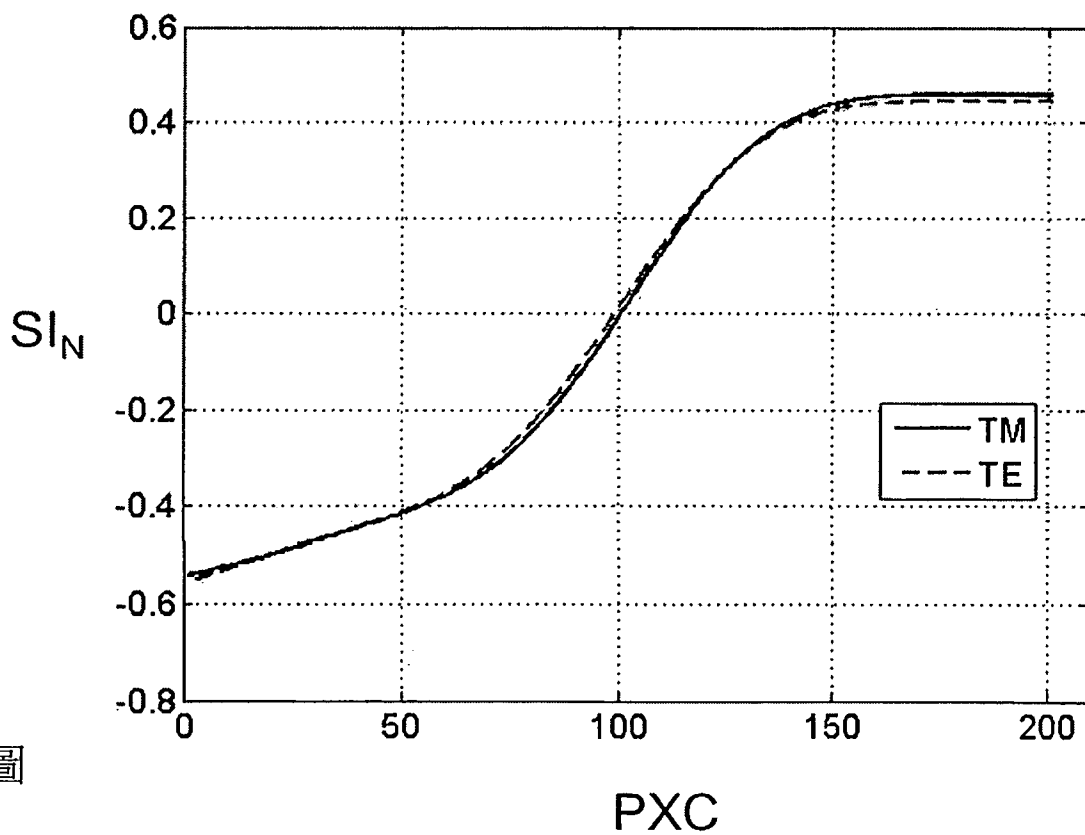
第8A圖



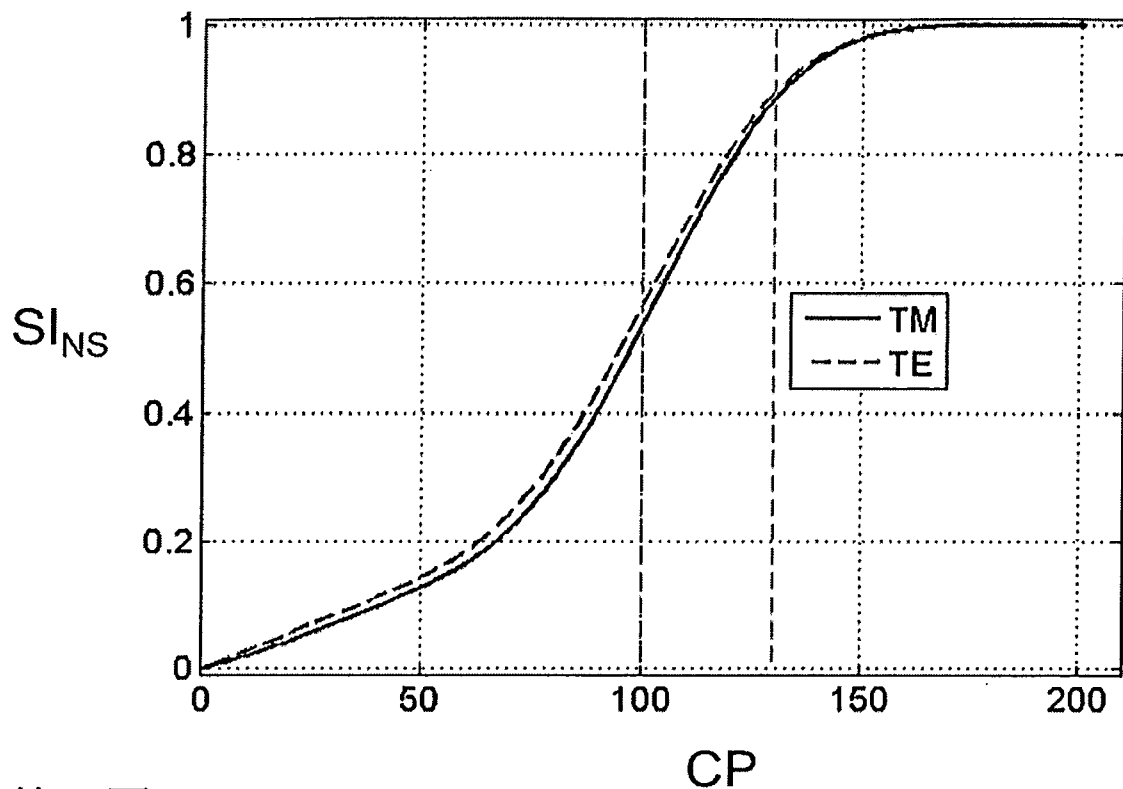
第8B圖



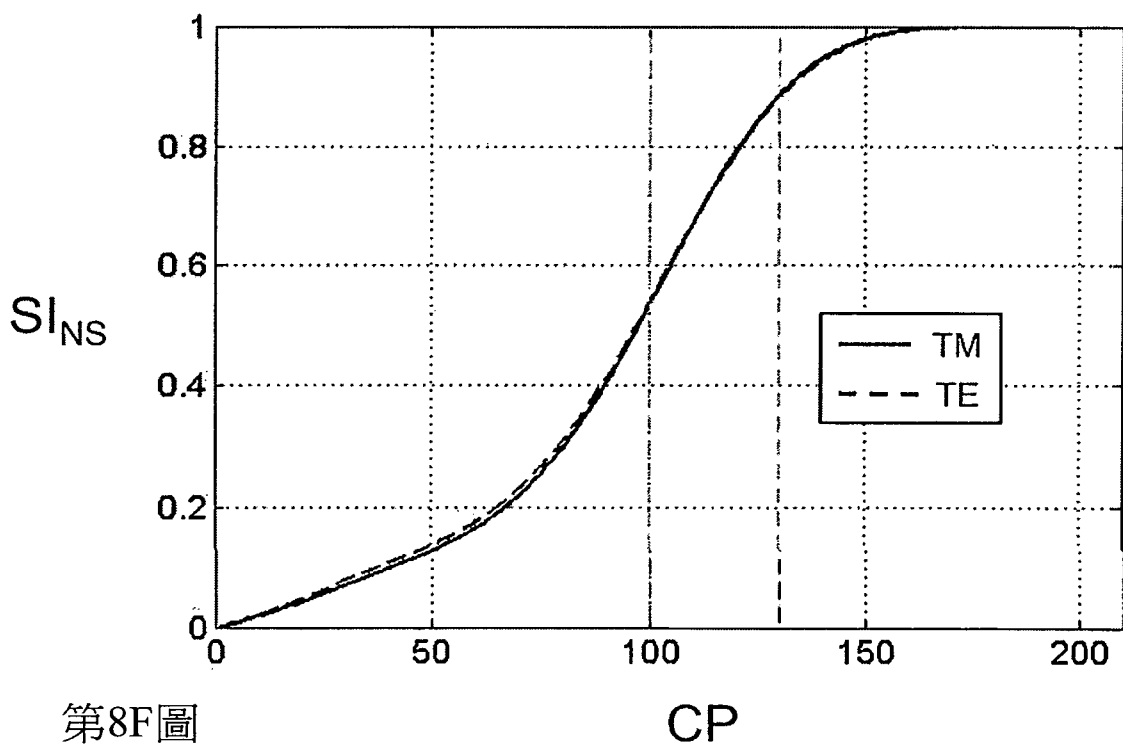
第8C圖



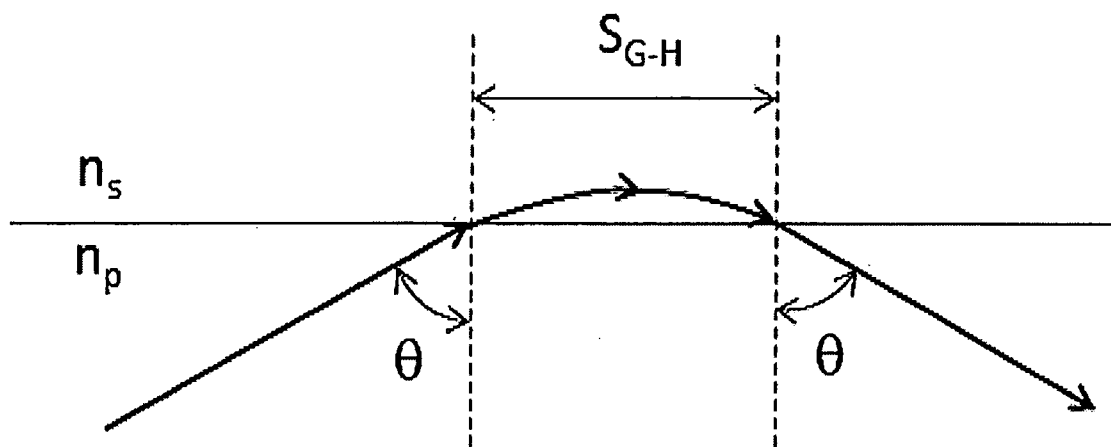
第8D圖



第8E圖

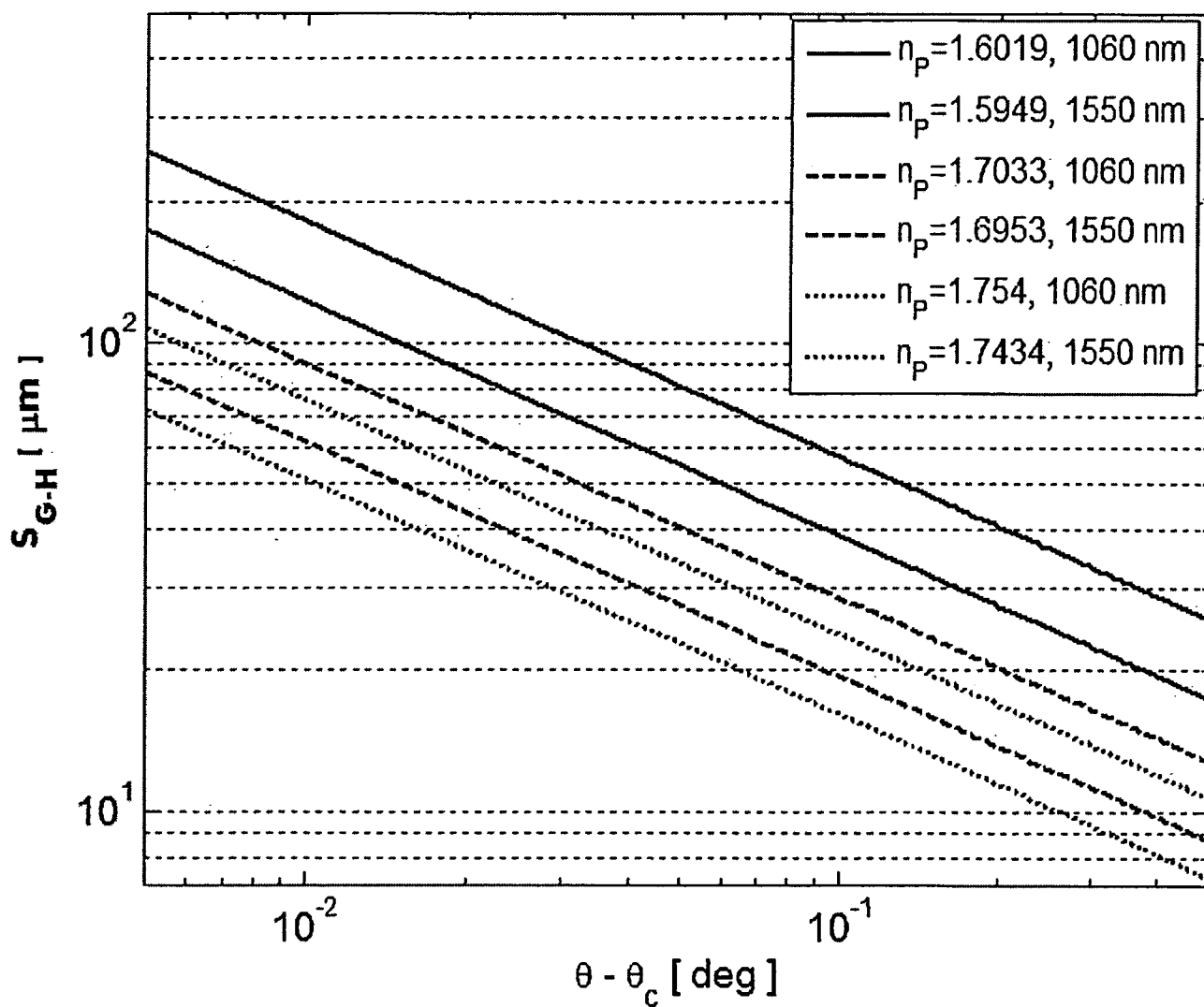


第8F圖

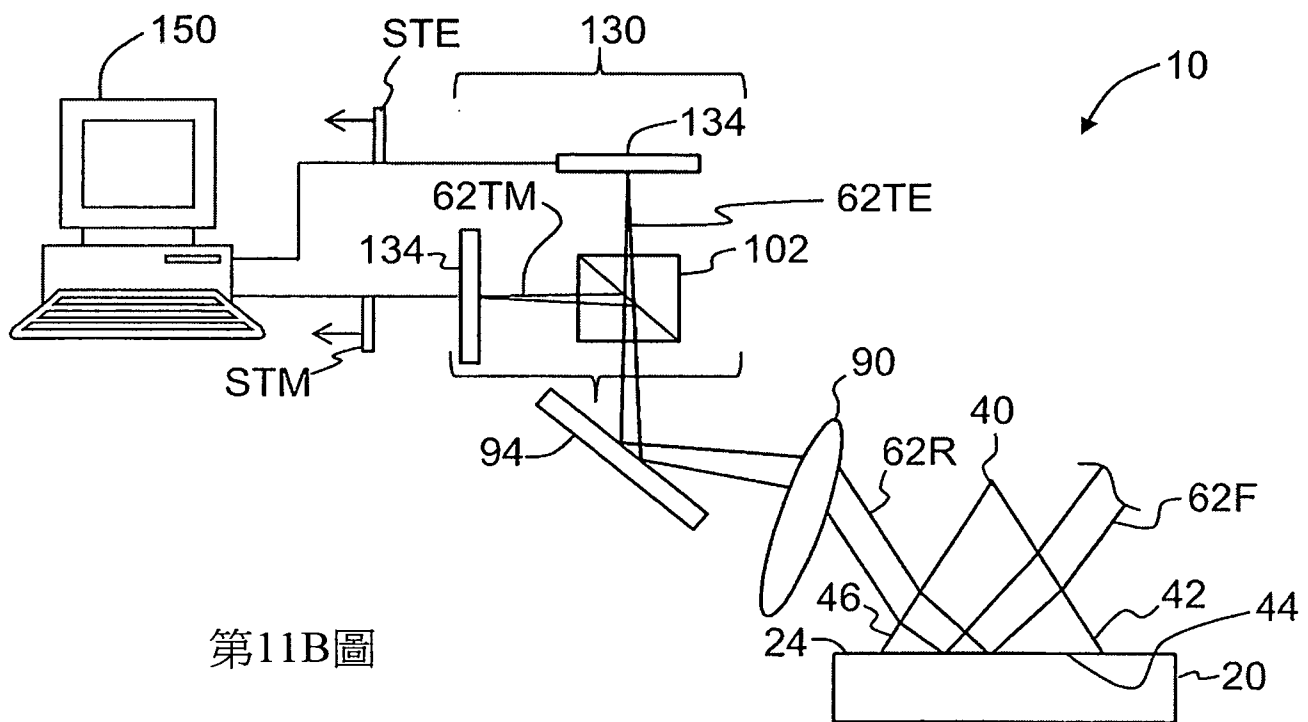
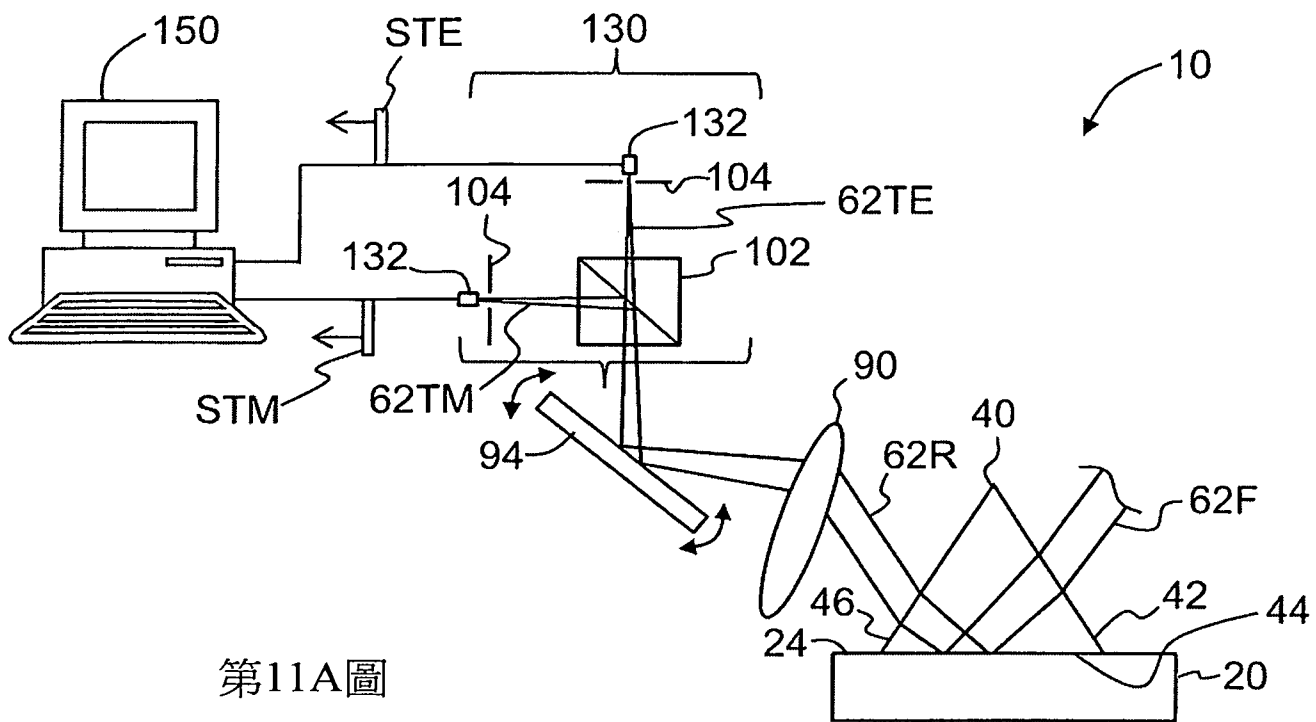


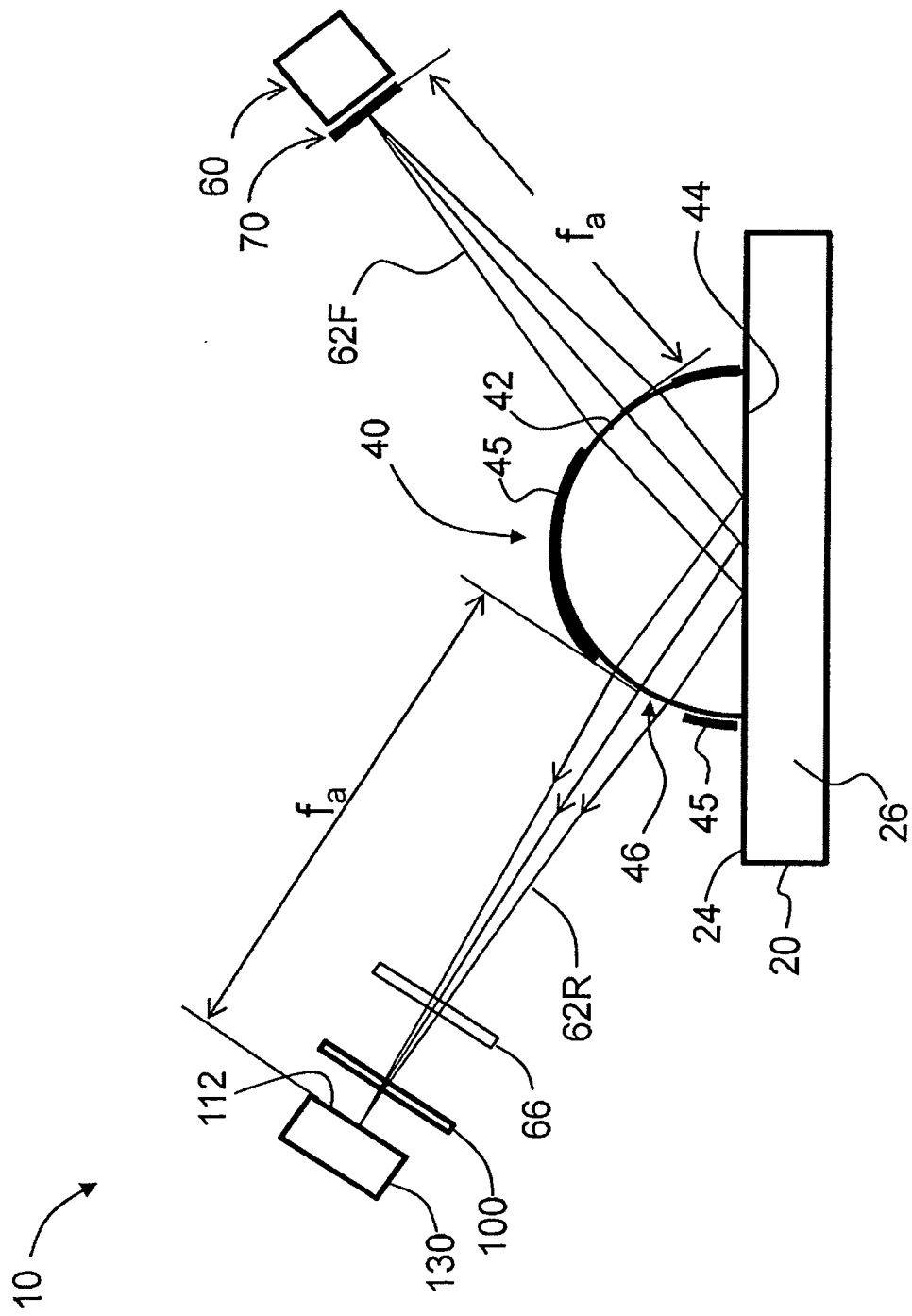
第9圖





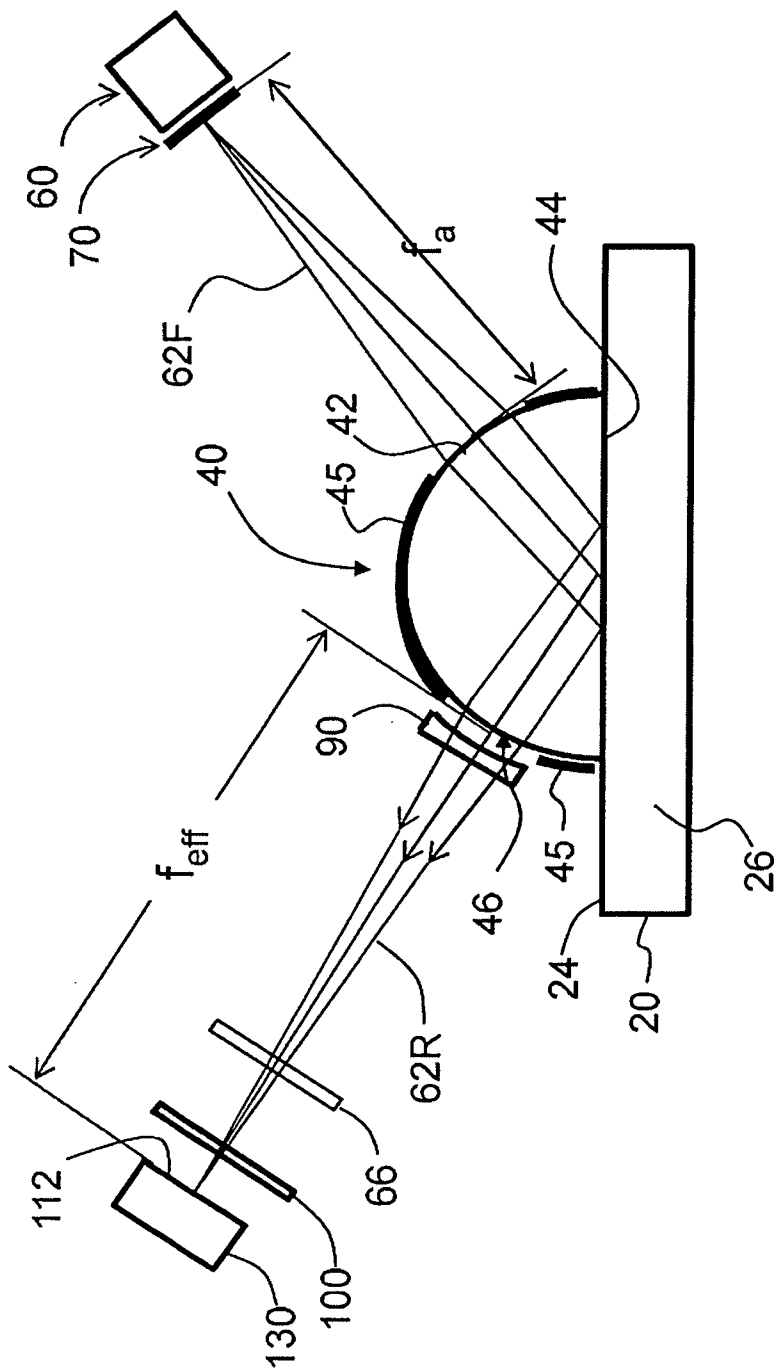
第10圖





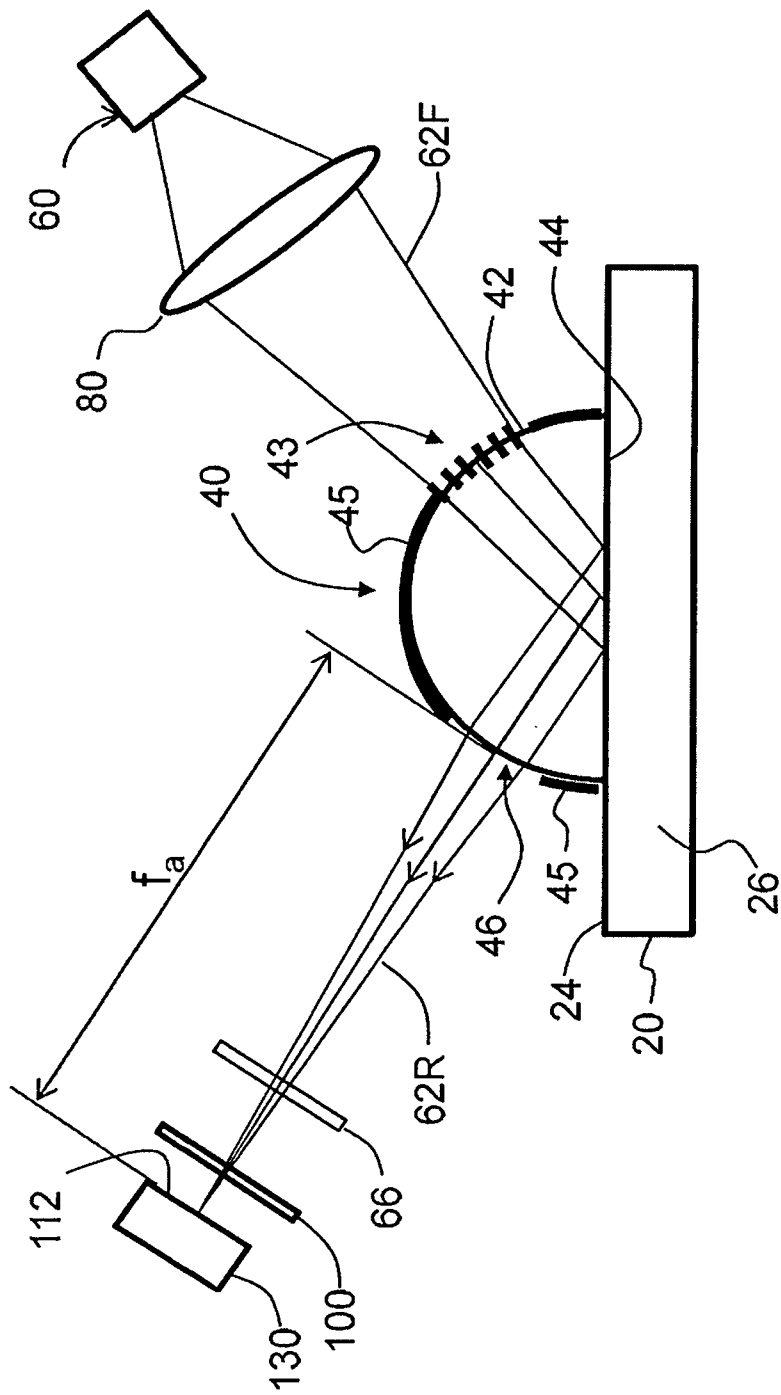
第12A圖

10



第12B圖

10



第12C圖