



(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2016/195693**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 006 387.0**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2015/034265**
(86) PCT-Anmeldetag: **04.06.2015**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **08.12.2016**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **04.01.2018**

(51) Int Cl.: **G01N 21/01** (2006.01)
E21B 47/00 (2012.01)
E21B 49/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Halliburton Energy Services, Inc., Houston, Tex.,
US**

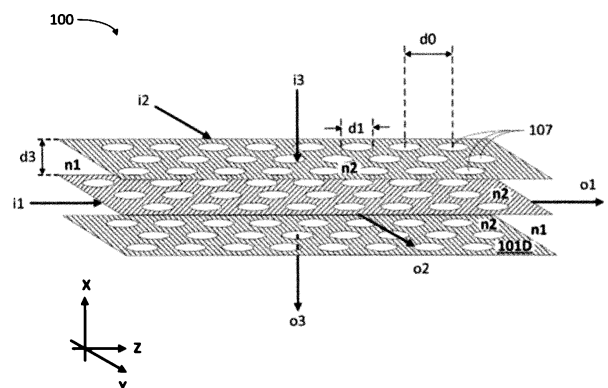
(72) Erfinder:
**Nayak, Aditya B., Houston, Tex., US; Perkins,
David L., The Woodlands, Tex., US; Price, James
M., Cypress, Tex., US**

(74) Vertreter:
**Fleuchaus & Gallo Partnerschaft mbB, 81369
München, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Systeme, die integrierte Rechenelemente auf Basis von photonischem Kristall verwenden**

(57) Zusammenfassung: Bereitgestellt wird ein Verfahren zum Herstellen einer optischen Rechenvorrichtung mithilfe eines integrierten Rechenelements auf Basis von photonischem Kristall. Das Verfahren beinhaltet Auswählen einer photonischen Kristallstruktur mit einer Auslegungssammlung, die in einem nicht transitorischen, computerlesbaren Medium gespeichert ist, und Erlangen eines Durchlässigkeitsspektrums für den ausgewählten photonischen Kristall. Ferner beinhaltet das Verfahren das Bestimmen einer Vorhersageleistung eines integrierten Rechenelements auf Basis von photonischem Kristall für eine Charakteristik einer Probe mithilfe des Durchlässigkeitsspektrums und einer spektralen Datenbank. Und das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern einer Vorhersageleistung des integrierten Rechenelements auf Basis von photonischem Kristall zum Messen einer Charakteristik einer analysierten Probe. Auch das Herstellen der photonischen Kristallstruktur für das integrierte Rechenelement auf Basis von photonischem Kristall, wenn die Vorhersageleistung einen im Voraus ausgewählten Schwellenwert überschreitet.



Beschreibung

ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK

[0001] Optische Rechenvorrichtungen, häufig auch als „optisch-analytische Vorrichtungen“ bezeichnet, können zum Analysieren und Überwachen der Eigenschaften eines Stoffs in Echtzeit verwendet werden. Diese optischen Rechenvorrichtungen nutzen häufig ein Verarbeitungselement, das optisch mit dem Stoff interagiert, um quantitative und/oder qualitative Werte von einer oder mehreren physikalischen oder chemischen Eigenschaften des Stoffs zu bestimmen. Das Verarbeitungselement kann mehrschichtige Interferenzelemente beinhalten, die dazu ausgelegt sind, über ein Wellenlängenkontinuum im elektromagnetischen Spektrum vom UV- bis zum mittleren Infrarot(MIR)-Bereich oder eine Untermenge dieser Region hinweg zu arbeiten. Eine Art von Verarbeitungselement ist ein integriertes Rechenelement (integrated computational element, ICE), auch bekannt als multivariates optisches Element (MOE). Elektromagnetische Strahlung, die optisch mit dem ICE interagiert, wird modifiziert, damit sie von einem Detektor lesbar ist, derart, dass eine Ausgabe des Detektors mit einer bestimmten physikalischen oder chemischen Charakteristik des analysierten Stoffs korreliert werden kann.

[0002] Mehrschichtige, auf optischer Interferenz beruhende Elemente können bei der optischen Übertragung bei interessierenden Wellenlängen Ineffizienzen aufweisen. Auch können mehrschichtige, auf optischer Interferenz beruhende Elemente eine Übertragung bei Wellenlängen aufweisen, bei denen eine vollständige Blockierung (Nullübertragung) wünschenswert ist. Ferner kann die spektrale Auflösung mehrschichtiger, auf optischer Interferenz beruhender Elemente aufgrund von Unregelmäßigkeiten an den Grenzen zwischen benachbarten Schichten und Schichtdickenfertigungsfehlern weniger optimal sein. Diese nachteiligen Faktoren führen kombiniert zu einer reduzierten Genauigkeit und Vorhersageleistung des ICE, die sich aus dem mehrschichtigen, auf optischer Interferenz beruhenden Element ergibt.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0003] Die folgenden Figuren sollen bestimmte Aspekte der vorliegenden Offenbarung veranschaulichen und sind nicht als ausschließliche Ausführungsformen zu betrachten. Der offenbarte Gegenstand kann beträchtlichen Modifikationen, Abänderungen und Äquivalenten in Form und Funktion unterliegen, die für Fachleute mit dem Vorteil dieser Offenbarung auf der Hand liegen werden.

[0004] Fig. 1A stellt eine photonische Kristallstruktur mit einem 3D-Substrat zur Verwendung als ein integriertes Rechenelement (ICE) dar.

[0005] Fig. 1B stellt eine photonische Kristallstruktur mit einem 3D-Substrat zur Verwendung als ein ICE dar.

[0006] Fig. 1C stellt eine photonische Kristallstruktur mit einem 2D-Substrat zur Verwendung als ein ICE dar.

[0007] Fig. 1D stellt eine optische Konfiguration für eine photonische Kristallstruktur mit einem 3D-Substrat zur Verwendung als ein ICE dar.

[0008] Fig. 2 stellt eine optische Rechenvorrichtung mit einem ICE dar, das eine photonische Kristallstruktur aufweist.

[0009] Fig. 3A stellt ein Durchlässigkeitsspektrum in einem Verfahren zum Herstellen eines ICE auf Basis von photonischem Kristall dar.

[0010] Fig. 3B stellt ein Durchlässigkeitsspektrum in einem Verfahren zum Herstellen eines ICE auf Basis von photonischem Kristall dar.

[0011] Fig. 3C stellt ein Durchlässigkeitsspektrum in einem Verfahren zum Herstellen eines ICE auf Basis von photonischem Kristall dar.

[0012] Fig. 4A stellt ein Durchlässigkeitsspektrum mit zwei Durchlässigkeitsspitzen in einem Verfahren zum Herstellen eines ICE auf Basis von photonischem Kristall dar.

[0013] Fig. 4B stellt ein Durchlässigkeitsspektrum mit zwei Durchlässigkeitsspitzen in einem Verfahren zum Herstellen eines ICE auf Basis von photonischem Kristall dar.

[0014] Fig. 5 stellt ein Diagramm mit einem Durchlässigkeitsspektrum von einem ICE auf Basis von photonischem Kristall und einem mehrschichtigen Interferenzelement dar.

[0015] Fig. 6 stellt ein Ablaufdiagramm mit Schritten in einem Verfahren zum Herstellen einer optischen Rechenvorrichtung dar, die ein ICE auf Basis von photonischem Kristall beinhaltet.

[0016] Fig. 7 stellt ein Ablaufdiagramm mit Schritten in einem Verfahren zum Herstellen einer optischen Rechenvorrichtung dar, die ein ICE auf Basis von photonischem Kristall beinhaltet.

[0017] Fig. 8 ist ein Bohrsystem, das dazu konfiguriert ist, einen optischen Sensor zum Modifizieren eines Bohrparameters oder einer Konfiguration in einem MWD(measurement-while-drilling, Vermessen während des Bohrens)- und einem LWD(logging-while-drilling, Messen während des Bohrens)-Vorgang zu verwenden.

[0018] Fig. 9 ist ein Wireline-System, das dazu konfiguriert ist, bei Formationsprüfung und Probenahme einen optischen Sensor zu verwenden.

[0019] In den Figuren bezeichnen Elemente mit denselben oder ähnlichen Bezugszeichen dieselbe oder eine ähnliche Funktion bzw. denselben oder einen ähnlichen Schritt, soweit nicht anders angegeben.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0020] Die vorliegende Offenbarung betrifft die Herstellung und Verwendung von optischen Rechenvorrichtungen und, insbesondere, die Herstellung und Verwendung von photonischen Kristallstrukturen zum Erzeugen genauerer optischer Elemente zur Verwendung in optischen Rechenvorrichtungen. Die vorliegende Offenbarung ermöglicht die Auslegung, Herstellung und Lieferung genauer optischer Rechenvorrichtungen, die auf photonischem Kristall (PhK) basierende integrierte Rechenelemente (ICE) beinhalten. In einigen Ausführungsformen, die mit der vorliegenden Offenbarung übereinstimmen, kann ein ICE auch als ein multivariates optisches Rechenelement (MOE) bezeichnet werden. PhK-basierte ICEs im Sinne der Offenbarung arbeiten mit höherer Vorhersageleistung als Vorrichtungen, die nur mehrschichtige Interferenzelemente beinhalten.

[0021] Die Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE kann durch Messen oder Schätzen eines Standardkalibrierungsfehlers (SKF) bestimmt werden, wobei mit dem PhK-basierten ICE erlangte Werte mit wahren Werten in einem kalibrierten Probenatz verglichen werden. Je niedriger der SKF, desto höher ist somit die Vorhersageleistung des PhK-basierten ICE. In einigen Ausführungsformen wird die Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE durch Messen der Empfindlichkeit des PhK-basierten ICE bestimmt. Die Empfindlichkeit kann proportional zu einer Flanke in einer Messkurve sein. In einigen Ausführungsformen setzt die Messkurve eine Amplitude der Charakteristik, die gemessen werden soll, in Beziehung zu einem Signal, das von dem PhK-basierten ICE erlangt wird. Eine höhere Empfindlichkeit steht allgemein mit einer höheren Vorhersageleistung des PhK-basierten ICE in Verbindung. In einigen Ausführungsformen kann die Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE proportional zum Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) des von dem PhK-basierten ICE erlangten Signals sein. Entsprechend kann ein höheres SRV allgemein mit einer höheren Vorhersageleistung des PhK-basierten ICE in Verbindung stehen. Allgemeiner können Ausführungsformen in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung eine Gütefunktion einbeziehen, die einen SKF, Empfindlichkeit und SRV als Anzeige der Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE kombiniert.

[0022] Ausführungsformen in dieser Offenbarung unterscheiden sich von zuvor offenbarten Versuchen der Auslegung eines ICE, indem sie einen zweidimensionalen oder höheren (z. B. dreidimensionalen) photonischen Kristall verwenden. Ein zweidimensionaler oder höherer photonischer Kristall weist einen vollständigen photonischen Bandabstand, wobei bestimmte Wellenlängen von Licht nicht durchgelassen werden, und weist auch Resonanzmodi, d. h. Schmalbandübertragungsspitzen, auf. Diese Art der Auslegung kann sehr hohe Empfindlichkeiten erzielen, da sie unnötige Signale vollständig blockieren und nur relevante analytbezogene Informationen übertragen kann, die in mehreren schmalen Wellenlängenbändern über den interessierenden Wellenlängenbereich hinweg enthalten sein können.

[0023] Im hier verwendeten Sinne bezeichnet der Begriff „Charakteristik“ eine chemische, mechanische oder physikalische Eigenschaft des Stoffs. Eine Charakteristik des Stoffs kann einen quantitativen oder qualitativen Wert von einem oder mehreren chemischen Bestandteilen oder einer oder mehreren chemischen Verbindungen beinhalten, die darin vorkommen, oder eine beliebige andere zugehörige physikalische Eigenschaft. Diese chemischen Bestandteile und Verbindungen können hier als „Analyte“ bezeichnet werden. Veranschaulichende Eigenschaften eines Stoffs, die mit den hier offenbarten optischen Rechenvorrichtungen überwacht werden können, beinhalten beispielsweise chemische Zusammensetzung (z. B. Identität und Konzentration insgesamt oder von einzelnen Komponenten oder Verbindungen), Phasenpräsenz (z. B. Gas, Öl, Wasser usw.), Gehalt an Verunreinigungen, pH, Alkalinität, Viskosität, Dichte, Ionenstärke, Gesamtmenge gelöster Feststoffe, Salzgehalt (z. B. Salinität), Porosität, Transparenz, Bakteriengehalt, Gesamthärte, Kombinationen davon, Aggregatzustand (Feststoff, Flüssigkeit, Gas, Emulsion, Gemische usw.) und dergleichen.

[0024] Im hier verwendeten Sinne bezeichnet der Begriff „elektromagnetische Strahlung“ Hochfrequenzwellen, Mikrowellenstrahlung, Infrarot- und Nahinfrarotstrahlung, sichtbares Licht, Ultraviolettlicht, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung.

[0025] Im hier verwendeten Sinne bezeichnet der Begriff „optische Rechenvorrichtung“ eine optische Vorrichtung oder einen optischen Sensor, die bzw. der dazu konfiguriert ist, einen Eingang elektromagnetischer Strahlung im Zusammenhang mit einem Stoff zu empfangen und einen Ausgang elektromagnetischer Strahlung von einem Verarbeitungselement zu erzeugen, das in der optischen Rechenvorrichtung angeordnet ist. Bei dem Verarbeitungselement kann es sich beispielsweise um ein integriertes Rechenelement (ICE), auch als multivariates optisches Element (MOE) bekannt, handeln. Die elek-

tromagnetische Strahlung, die optisch mit dem Verarbeitungselement interagiert, wird derart geändert, dass sie von einem Detektor lesbar ist, derart, dass eine Ausgabe des Detektors mit einer bestimmten Charakteristik des Stoffs korreliert wird. Der Ausgang elektromagnetischer Strahlung des Verarbeitungselements kann reflektierte, durchgelassene und/oder gestreute elektromagnetische Strahlung sein. Ob der Detektor reflektierte, durchgelassene oder gestreute elektromagnetische Strahlung analysiert, kann von den Strukturparametern der optischen Rechenvorrichtung sowie anderen Aspekten bestimmt werden, die einschlägigen Fachleuten bekannt sind. Außerdem kann auch die Emission und/oder Streuung des Fluids, beispielsweise mittels Fluoreszenz, Lumineszenz, Raman-, Mie- und/oder Raleigh-Streuung, von optischen Rechenvorrichtungen überwacht werden.

[0026] Im hier verwendeten Sinne bezeichnet der Begriff „optisch interagieren“ oder seine Abwandlungen das Reflektieren, Durchlassen, Streuen, Brechen oder Absorbieren von elektromagnetischer Strahlung an, durch oder von einem oder mehreren Verarbeitungselementen (d. h. ICE- oder MOE-Komponenten) oder einem Stoff, der von den Verarbeitungselementen analysiert wird. Entsprechend bezeichnet Licht mit optischer Interaktion elektromagnetische Strahlung, die beispielsweise mithilfe eines Verarbeitungselements reflektiert, durchgelassen, gestreut, gebrochen oder absorbiert, abgegeben oder erneut abgestrahlt wurde, kann sich jedoch auch auf Interaktion mit einem Stoff beziehen.

[0027] Hier offenbarte Ausführungsformen beinhalten Verfahren zum Herstellen einer zweidimensionalen (2D) oder einer dreidimensionalen (3D) photonischen Kristallstruktur, die eine wünschenswerte Spektralmusterantwort bereitstellt, zum Messen einer physikalischen oder chemischen Eigenschaft (d. h. einer Charakteristik) eines analysierten Stoffs. In einigen Ausführungsformen stellen Schritte in einer Ausgestaltungsphase ein geeignetes ICE bereit, das gemäß einer Schätzung seiner Vorhersageleistung ausgewählt wird. Einige Ausführungsformen beinhalten eine gewünschte Spektralmusterantwort für das ICE und das Bestimmen einer ausgewählten photonischen Kristallstruktur, die die gewünschte Spektralmusterantwort bereitstellt.

[0028] Hier offenbarte Systeme und Verfahren können zum Auslegen und Herstellen von ICE-Komponenten zur Verwendung in der Öl- und Gasindustrie geeignet sein. Es versteht sich jedoch, dass die verschiedenen offenbarten Systeme und Verfahren ebenso für das Auslegen und Herstellen von ICE-Komponenten zur Verwendung in anderen technischen Gebieten gelten, darunter, ohne Beschränkung, die Lebensmittel- und Arzneimittelindustrie, industrielle Anwendungen, Bergbauindustrien oder ein beliebiges anderes Feld, auf dem es von Vorteil sein

kann, eine Charakteristik eines spezifischen Stoffs in Echtzeit oder nahezu in Echtzeit zu bestimmen.

[0029] Es wurde festgestellt, dass die Vorhersageleistung eines ICE hinsichtlich seiner Genauigkeit beim Bestimmen einer interessierenden physikalischen oder chemischen Eigenschaft von der Fähigkeit des ICE abhängt, einen ausgewählten Teil des Spektrums zu blockieren und einen anderen Teil des Spektrums wirksam durchzulassen. Der Übertragungsbereich, der die höchste Durchlassrate („tm“) und die niedrigste Durchlassrate („to“) einschließt, bildet den „Dynamikbereich“ der Übertragung des ICE. Andere relevante Parameter für die Vorhersageleistung des ICE beinhalten seine spektrale Auflösung. Die spektrale Auflösung kann von der Spektralbreite eines schmalen Durchlassbereichs des ICE-Durchlässigkeitsspektrums bestimmt werden. Obwohl das gesamte ICE-Durchlässigkeitsspektrum in wenigstens in einem Teil des Spektrums einen breiten Bereich von einer Wellenlänge „lo“ bis zu einer Wellenlänge „lm“ beinhalten kann, kann ein ICE auf Basis von photonischem Kristall wie hier offenbart wünschenswerterweise einen sehr schmalen Durchlassbereich aufweisen. In einigen Ausführungsformen kann lo am unteren Ende der Nahinfrarot(NIR)-Region (750 bis 800 nm) liegen, und lm kann am höheren Ende der NIR-Region (2000 bis 2500 nm) liegen, und ein schmaler Durchlassbereich, der von einem ICE auf Basis von photonischem Kristall erzeugt wird, kann bloße 1 nm oder sogar weniger (0,5 nm oder weniger) betragen.

[0030] In einigen Ausführungsformen können beispielsweise PhK-basierte ICE mit einem SKF von 10 % oder weniger auf einer Skala, auf der ein SKF von 100 % vollkommen „unprädiktiv“ ist und ein SKF von 0 % vollkommen prädiktiv ist, als „prädiktiv“ gelten. Ebenso können ICE auf Basis von photonischem Kristalls mit einem SKF von über 2,00 als „nicht prädiktiv“ gelten. In anderen Ausführungsformen können resultierende SKF-Werte, die bestimmen, ob ein PhK-basiertes ICE prädiktiv oder nicht, größer oder kleiner als 2,00 sein, ohne vom Umfang der Offenbarung abzuweichen. Diejenigen PhK-basierten ICE, die für nicht prädiktiv befunden werden, können vom Bediener oder durch Softwareanweisungen, die von einer Auslegungssammlung ausgeführt werden, die Software umfasst, die auf einem computerlesbaren Medium gespeichert ist, das Programmanweisungen enthält, die dazu konfiguriert sind, von einem oder mehreren Prozessoren eines Computersystems ausgeführt zu werden ausgeschlossen werden.

[0031] Eine Herstellungscomputerprogrammsoftware kann auch auf einem computerlesbaren Medium gespeichert sein, das Programmanweisungen enthält, die dazu konfiguriert sind, von einem oder mehreren Prozessoren eines Computersystems ausgeführt zu werden. Das Herstellungscomputerpro-

gramm kann dazu konfiguriert sein, die Spezifikationen für ein ausgewähltes ICE auf Basis von photonischem Kristall, wie sie von einer Auslegungssammlung erzeugt werden, zu empfangen oder in anderer Weise herunterzuladen und ein entsprechendes PhK-basiertes ICE physisch zu erzeugen. In einigen Ausführungsformen kann das Herstellungscomputerprogramm auch einen Teil desjenigen Codes enthalten, der von der Auslegungssammlung verwendet wird, derart, dass es fähig sein kann, Durchlässigkeitsspektrumssignale der Herstellungsschritte zu messen und zu berichten, die noch nicht durchgeführt wurden, um etwaige Herstellungsfehler zu kompensieren.

[0032] In einigen Ausführungsformen beinhaltet ein Verfahren das Auswählen einer PhK-Struktur mit einer Auslegungssammlung, die auf einem nicht transitorischen, computerlesbaren Medium gespeichert sind, Erlangen eines Durchlässigkeitsspektrums für den ausgewählten PhK, und Bestimmen einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE für eine Charakteristik einer Probe mit dem Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank mit Spektren für kalibrierte Proben. Das Verfahren kann ferner das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE und das Herstellen der PhK-Struktur zur Einbeziehung in das PhK-basierten ICE beinhalten, wenn die Vorhersageleistung über einem im Voraus ausgewählten Schwellenwert liegt.

[0033] In weiteren Ausführungsformen beinhaltet ein Verfahren das Auswählen eines gewünschten Durchlässigkeitsspektrums für ein ICE, Identifizieren einer PhK-Struktur mit einem Durchlässigkeitsspektrum, der mit dem gewünschten Durchlässigkeitsspektrum vergleichbar ist, und Bestimmen einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE für eine Charakteristik einer Probe mit dem Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank mit Spektren für kalibrierte Proben. Das Verfahren kann ferner das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums der PhK-Struktur zum Verbessern der Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE und das Herstellen der PhK-Struktur für das PhK-basierte ICE beinhalten, wenn die Vorhersageleistung über einem im Voraus ausgewählten Schwellenwert liegt.

[0034] In wieder anderen Ausführungsformen beinhaltet das ICE eine PhK-Struktur mit einer optischen Eingangsseite, die dazu konfiguriert ist, Licht mit Interaktion zu empfangen, und einer optischen Ausgangsseite, die dazu konfiguriert ist, einen optischen Ausgang zu empfangen. Der PhK beinhaltet ein Medium mit einem ersten Brechungsindex und ein Substrat, das in das Medium eingebettet ist, wobei das Substrat einen zweiten Brechungsindex und wenigstens ein geometrisches Merkmal aufweist. In einigen Ausführungsformen wird das wenigstens ei-

ne geometrische Merkmal auf Grundlage eines Ausgangsspektrums ausgewählt, das sich aus der optischen Ausgangsseite ergibt. Ferner weist der optische Ausgang gemäß einigen Ausführungsformen eine Amplitude auf, die proportional zu einem Skalarprodukt des Lichts mit Interaktion und einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe ist.

[0035] Die Merkmale und Vorteile der vorliegenden Offenbarung werden für einschlägige Fachleute nach einer Lektüre der nachfolgenden Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen deutlich werden.

[0036] Fig. 1A–Fig. 1D stellen verschiedene Konfigurationen einer PhK-Struktur gemäß Ausführungsformen in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung dar. Die PhK-Struktur gemäß einigen Ausführungsformen kann einen PhK mit einer Dimensionalität von höher als eins, etwa einer zweidimensionalen (2D) Struktur oder einer dreidimensionalen (3D) Struktur, beinhalten. Ein PhK arbeitet als die optische Entsprechung eines Halbleitermaterials, das elektrisch leitet. Atome und Moleküle in einem Halbleitermaterial werden durch geometrische Merkmale ersetzt, die durch Materialien mit ausgewählten Dielektrizitätskonstanten (komplexer Brechungsindex des Materials) gebildet sind. In PhK-Strukturen wird das periodische Potenzial eines Halbleiterkristalls durch eine periodische dielektrische Funktion an einer ausgewählten Geometrie ersetzt. Die Lichtbrechung an den verschiedenen Grenzflächen der ausgewählten Geometrie innerhalb des PhK erzeugt einen photonischen Durchlassbereich für Lichtausbreitungsmodi, so wie in einem Halbleiter ein Leitungsdurchlassbereich für Ladungsträger gebildet ist. Ein photonischer Durchlassbereich verhindert, dass sich bestimmte Lichtfrequenzen in bestimmte Richtungen ausbreiten. Beispiele eines photonischen 3D-Kristalls sind in Fig. 1A–Fig. 1D gezeigt und werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

[0037] Ein PhK-basiertes ICE in Übereinstimmung mit Ausführungsformen, das in Fig. 1A–Fig. 1D dargestellt ist, beinhaltet eine PhK-Struktur mit wenigstens einer optischen Eingangsseite, die dazu konfiguriert ist, einen optischen Eingang (z. B. i_1 , i_2 , i_3) zu empfangen, wie in Fig. 1B gezeigt, und wenigstens einer optischen Ausgangsseite, die dazu konfiguriert ist, einen optischen Ausgang (z. B. o_1 , o_2 , o_3) zu empfangen, wie ebenfalls in Fig. 1B gezeigt ist. Der optische Eingang i_1 ist der Eingang einfallender elektromagnetischer Strahlung, und der optische Ausgang o_1 ist der Ausgang der durchgelassenen elektromagnetischen Strahlung, die i_1 entspricht. Die optischen Eingänge i_2 und i_3 und optischen Ausgänge o_2 und o_3 stehen ebenso miteinander in Beziehung.

[0038] Wie in **Fig. 1B–Fig. 1D** gezeigt, kann die PhK-Struktur ein Medium mit einem ersten Brechungsindex (n_1) und ein Substrat beinhalten, das in das Medium eingebettet ist, wobei das Substrat einen zweiten Brechungsindex (n_2) und wenigstens ein geometrisches Merkmal aufweist. Das wenigstens eine geometrische Merkmal wird auf Grundlage eines Ausgangsspektrums ausgewählt, das sich aus der optischen Ausgangsseite ergibt. Beispielsweise ist das Ausgangsspektrum in einigen Ausführungsformen derart, dass der optische Ausgang eine Amplitude aufweist, die proportional zu einem Skalarprodukt des Lichts mit Interaktion und einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe ist. In dieser Hinsicht kann das Skalarprodukt eine Spektralmusteramplitude und Ausbreitungsrichtung des Lichts mit Interaktion entlang der PhK-Struktur beinhalten (siehe auch **Fig. 1A**). Das Skalarprodukt kann einen Vektor beinhalten, der mit der spektralen Zusammensetzung des Lichts mit Interaktion und dem Regressionsvektor gebildet ist. Allgemeiner ist das Ausgangsspektrum ein Durchlässigkeitspektrum von einer elektromagnetischen Strahlung, die von der optischen Eingangsseite zur optischen Ausgangsseite durchgelassen wird, und kann von der Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Strahlung an der PhK-Struktur abhängen. In einigen Ausführungsformen ist das Ausgangsspektrum für eine vorgegebene Ausbreitungsrichtung der Strahlung mit Interaktion in der PhK-Struktur derart, dass der optische Ausgang eine Amplitude proportional zu einem Skalarprodukt des Lichts mit Interaktion (das sich in der vorgegebenen Richtung ausbreitet) und einem Regressionsvektor für die Charakteristik der analysierten Probe aufweist.

[0039] **Fig. 1A** stellt eine optischen Konfiguration **150** für eine PhK-Struktur mit einem 3D-Substrat **101A** zur Verwendung in einem ICE dar. In **Fig. 1A** ist ausschließlich zur Veranschaulichung auch ein kartesisches Koordinatensystem mit drei zueinander orthogonalen Achsen X, Y und Z gezeigt. Aus der spezifischen Auswahl der Bezugsachsen X, Y und Z sind keine Einschränkungen des Umfangs der vorliegenden Offenbarung herzuleiten. In der gesamten Offenbarung wird, soweit nicht anders angegeben, dieselbe Orientierung des Bezugsrahmens angenommen. Die optische Konfiguration **150** beinhaltet den optischen Eingang **106** und einen beliebigen der optischen Ausgänge **110a**, **110b**, **110c** und **110d** (im Folgenden gemeinsam als optische Ausgänge **110** bezeichnet). Entsprechend kann die optische Eingangsseite in 3D-Substrat **101A** gegenüber der optischen Ausgangsseite (optischer Ausgang **110a**) oder orthogonal zur optischen Ausgangsseite (optische Ausgänge **110b** und **110c**) liegen. In einigen Ausführungsformen können die optische Eingangsseite und die optische Ausgangsseite des PhK gleich sein (d. h. für den optischen Ausgang **110d**). Obwohl der optische Ausgang **110d** in einem Winkel relativ zum op-

tischen Eingang **106** dargestellt ist, versteht es sich, dass der optische Ausgang **110d** parallel zum optischen Eingang **106** (aber in entgegengesetzter Richtung) sein. Entsprechend kann der optische Ausgang **110d** einen beliebigen spitzen Winkel relativ zur Richtung des optischen Eingangs **106** bilden.

[0040] Ein PhK-basiertes ICE, wie es in den hier offenbarten Ausführungsformen verwendet wird, kann ein, zwei oder mehr als zwei optische Ausgänge **110a**, **110b**, **110c** und **110d** beinhalten. In dieser Hinsicht kann das PhK-Substrat **101A** dazu konfiguriert sein, optische Ausgänge **110a**, **110b**, **110c** und **110d** bereitzustellen, die jeweils unterschiedliche spektrale Eigenschaften aufweisen.

[0041] **Fig. 1B** stellt die PhK-Struktur **100** mit einem 3D-Substrat **101B** zur Verwendung in einem PhK-basierten ICE wie hier offenbart dar. Das Substrat **101B** beinhaltet eine Vielzahl von Blöcke aus dielektrischem Material, die in einer dreidimensionalen (3D) Struktur mit einer Symmetrieachse an zwei im Wesentlichen orthogonalen Achsen (z. B. Y und Z) angeordnet sind. Die dielektrischen Blöcke im Substrat **101B** weisen einen Blockdurchmesser „ w_0 “ auf und sind parallel mit einem Abstand „ l_1 “ voneinander entfernt angeordnet. Gemäß einigen Ausführungsformen ist ein zweites Array paralleler dielektrischer Blöcke auf das erste Array paralleler dielektrischer Blöcke gestapelt, wobei das zweite Array dielektrischer Blöcke im Wesentlichen senkrecht zum ersten Array dielektrischer Blöcke ist. Entsprechen kann diese Konfiguration an der X-Achse bis zu einer gewünschten Dicke gestapelt werden.

[0042] **Fig. 1C** stellt die PhK-Struktur **100** mit einem 2D-Substrat **101C** zur Verwendung in einem PhK-basierten ICE wie hier offenbart dar. Das Substrat **101C** kann eine Vielzahl von Öffnungen **107** und **108** definieren oder in anderer Weise beinhalten. Entsprechend beinhalten die geometrischen Merkmale im Substrat **101C** einen Mittenabstand zwischen wenigstens zwei Öffnungen **107** (d_0), einen Durchmesser (d_1) einer Öffnung **107**, die aus der Vielzahl von Öffnungen ausgewählt ist, und einen zweiten Durchmesser (d_2) der Öffnung **108**. Außerdem können die geometrischen Merkmale im Substrat **101C** einen Mittenabstand (d_{12}) zwischen einer benachbarten Öffnung **107** und Öffnung **108** beinhalten. In einigen Ausführungsformen kann eine Dicke (t , an der Z-Achse und nicht in **Fig. 1C** gezeigt) des 2D-Substrats **101C** ein geometrisches Merkmal sein, das gemäß hier offenbarten Ausführungsformen ausgewählt wird.

[0043] Obwohl die genaue Form der Öffnungen **107** und **108** nicht einschränkend ist, beinhaltet das Substrat **101C** kreisförmige Öffnungen, die in einer praktischen Anwendung leicht zu formen sein können. Außerdem kann die Öffnung **108** gemäß einigen Aus-

führungsformen einen dritten Brechungsindex (n_3) für das Material beinhalten, das einen Innenabschnitt der Öffnung **108** bildet.

[0044] Fig. 1D stellt die PhK-Struktur **100** mit einem 3D-Substrat **101D** zur Verwendung in einem PhK-basierten ICE wie hier offenbart dar. Das Substrat **101D** beinhaltet eine Vielzahl von Materialschichten, die benachbart zueinander gestapelt sind, und jede der Vielzahl von Materialschichten beinhaltet eine Vielzahl von Öffnungen **107**, die in dem Substrat gebildet ist. Die Vielzahl von Öffnungen **107** für jede Schicht weist im Wesentlichen das gleiche geometrische Merkmal (z. B. Mittenabstand d_0 und Durchmesser d_1) in der Ebene der Schicht zwischen benachbarten Schichten (z. B. der Y-Z-Ebene) versetzt auf. Im Substrat **101D** beinhaltet das wenigstens eine geometrische Merkmal einen Abstand (d_3) zwischen benachbarten Schichten.

[0045] Fig. 2 stellt eine optischen Rechenvorrichtung **200** mit einem PhK-basierten ICE **209** dar. Die optische Rechenvorrichtung **200** kann elektromagnetische Strahlung im Zusammenhang mit einer Charakteristik einer Probe **202** von anderer elektromagnetischer Strahlung unterscheiden. Wie in Fig. 2 strahlt eine elektromagnetische Strahlungsquelle **201** elektromagnetische Strahlung **204** ab oder erzeugt sie in anderer Weise. Die elektromagnetische Strahlungsquelle **201** kann eine beliebige Vorrichtung sein, die elektromagnetische Strahlung wie hier definiert abstrahlen oder erzeugen kann. In einigen Ausführungsformen ist die elektromagnetische Strahlungsquelle **201** eine Glühbirne, eine Leuchtdiode (LED), ein Laser, ein Schwarzkörper, ein photonischer Kristalllaser, eine Röntgenquelle oder dergleichen. Elektromagnetisch Strahlung **204** wird auf eine Probe **202** gerichtet, die einen interessierenden Analyten oder eine interessierende Charakteristik enthält, der bzw. die bestimmt werden soll. Die elektromagnetisch Strahlung **204** interagiert optisch mit der Probe **202** und erzeugt Strahlung mit optischer Interaktion **206** (z. B. Probenlicht mit Interaktion), von dem ein Teil elektromagnetische Strahlung, die der interessierenden Charakteristik oder dem interessierenden Analyten entspricht, und von dem ein Teil elektromagnetische Hintergrundstrahlung sein kann, die anderen Komponenten oder Charakteristiken der Probe **202** entspricht.

[0046] Obwohl Fig. 2 zeigt, dass die elektromagnetische Strahlung **204** durch die Probe **202** tritt, um Strahlung mit optischer Interaktion **206** zu erzeugen, ist hier auch vorgesehen, die elektromagnetisch Strahlung **204** von der Probe **202** zu reflektieren, wie es etwa erforderlich sein kann, wenn die Probe **202** durchscheinend, lichtundurchlässig oder massiv ist. Das Reflektieren der elektromagnetischen Strahlung **204** von der Probe **202** erzeugt ebenfalls optisch Strahlung mit Interaktion **206**. In einigen Ausführungs-

formen kann die optische Rechenvorrichtung **200** ganz ohne die elektromagnetische Strahlungsquelle **201** auskommen, und einfallende elektromagnetische Strahlung kann von der Probe **202** bezogen werden. Beispielsweise strahlen verschiedene Stoffe elektromagnetische Strahlung auf natürliche Weise ab. Zum Beispiel kann es sich bei der Probe **202** um einen strahlenden Schwarzkörperstoff handeln, der dazu konfiguriert ist, elektromagnetische Strahlung in der Form von Wärme abzustrahlen. In anderen Ausführungsformen kann die Probe **202** radioaktiv oder chemolumineszent sein und daher elektromagnetische Strahlung abstrahlen. In einigen Ausführungsformen kann die Probe **202** ein strahlendes Plasmalicht sein, etwa eine Fackel oder eine Flamme, die aufgrund der Verbrennung von Kohlenwasserstoff entsteht. In wieder anderen Ausführungsformen kann die erforderliche elektromagnetische Strahlung aus der Probe **202** induziert werden, indem mechanisch, magnetisch, elektrisch, mit Kombinationen davon oder dergleichen darauf eingewirkt wird.

[0047] Strahlung mit optischer Interaktion **206** fällt auf die optischen Rechenvorrichtung **200**, die beispielsweise einen Strahlenteiler **208** enthalten kann. Der Strahlenteiler **208** kann dazu konfiguriert sein, die Strahlung mit optischer Interaktion **206** in einen ersten Lichtstrahl **206a**, der in einen ersten Kanal A gelenkt wird, und einen zweiten Lichtstrahl **206b** zu teilen, der in einen zweiten Kanal B gelenkt wird. Im hier verwendeten Sinne bezeichnet der Begriff „Kanal“ allgemein einen optischen Weg oder eine Linsenbaugruppe, wie im Stand der Technik bekannt. Der erste Kanal A ist dazu konfiguriert, den ersten Lichtstrahl **206a** zum PhK-basierten ICE **209** zu lenken, weshalb der erste Kanal A als ein „primärer“ Kanal charakterisiert oder in anderer Weise bezeichnet werden kann. Das PhK-basierte ICE **209** beinhaltet eine PhK-Struktur **100** mit einem Substrat **101**, wie oben unter Bezugnahme auf Fig. 1A–Fig. 1C beschrieben (z. B. Substrat **101a**, **101b** und **101c**). Das PhK-basierte ICE **209** kann dazu konfiguriert sein, modifizierte elektromagnetische Strahlung **210** zu erzeugen, die der interessierenden Charakteristik oder dem interessierenden Analyten entspricht. Insbesondere kann das PhK-basierte ICE so konfiguriert sein, dass die modifizierte elektromagnetisch Strahlung **210** eine Amplitude und Richtung aufweist, die proportional zu einem Skalarprodukt (z. B. einem Punktprodukt) zwischen dem Spektrum der Strahlung mit Interaktion **206** und einem Regressionsvektor ist, der der interessierenden Charakteristik in der analysierten Probe **202** entspricht.

[0048] In dem primären Kanal A wird die modifizierte elektromagnetische Strahlung **210** anschließend zur Quantifizierung an einen Detektor **212** geleitet. Der Detektor **212** kann eine beliebige Vorrichtung sein, die elektromagnetische Strahlung erken-

nen kann, und kann allgemein als ein optischer Messwandler charakterisiert werden. Beispielsweise kann der Detektor **212**, ohne darauf beschränkt zu sein, ein Wärmedetektor wie etwa eine Thermosäule oder ein fotoakustischer Detektor, ein Halbleiterdetektor, ein piezoelektrischer Detektor, ein Detektor mit ladungsgekoppelter Vorrichtung (CCD), ein Video- oder Array-Detektor, ein geteilter Detektor, ein Photonendetektor (etwa ein Photoelektronenvervielfacher), Fotodioden und/oder Kombinationen davon oder dergleichen oder andere Detektoren sein, die einschlägigen Fachleuten bekannt sind.

[0049] In einigen Ausführungsformen ist der Detektor **212** dazu konfiguriert, ein Ausgangssignal **213** in der Form einer Spannung (oder eines Stroms) zu erzeugen, das der bestimmten Charakteristik in der Probe **202** entspricht. In wenigstens einer Ausführungsform können das Ausgangssignal **213** und eine Amplitude der Charakteristik der Probe **202** direkt proportional sein. Allgemeiner kann die Beziehung zwischen dem Ausgangssignal **213** und der Amplitude der Charakteristik der Probe **202** einer ganzrationalen Funktion, einer Exponentialfunktion und/oder einer logarithmischen Funktion oder einer Kombination entsprechen.

[0050] Ein zweiter Lichtstrahl **206b** kann im zweiten Kanal B zu einem zweiten Detektor **216** gelenkt werden. Der zweite Detektor **216** kann dem ersten Detektor **212** gleichen, indem es sich dabei um eine beliebige Vorrichtung handeln kann, die elektromagnetische Strahlung erkennen kann. Ohne Einschränkung kann der zweite Detektor **216** verwendet werden, um Strahlungsabweichungen zu erkennen, die von der elektromagnetischen Strahlungsquelle **201** stammen, oder anderen Faktoren in elektromagnetischer Strahlung **204**, die nicht mit der interessierenden Charakteristik zusammenhängt, die die Probe **202** oder den optischen Weg beeinflussen. Nicht wünschenswerte Strahlungsabweichungen können aus zahlreichen Gründen in der Stärke des Licht im primären Kanal A auftreten und verschiedene negative Auswirkungen haben. Diese negativen Auswirkungen können besonders für Messungen über Zeiträume hinweg nachteilig sein. Zu Strahlungsabweichungen können, ohne darauf beschränkt zu sein, Lichtstärkeschwankungen der elektromagnetischen Strahlung **204** gehören. Sie können auch Interferenzschwankungen beinhalten, die Licht von der Probe **202** streuen oder absorbieren können, während es sich durch den Interaktionsraum bewegt, wie es auch geschehen kann, wenn ein Fremdstoff wie etwa Schmutz oder Staub von der Probe **202** mitgeführt wird oder in anderer Weise die Vorderseite der elektromagnetischen Strahlungsquelle **201** passiert. Strahlungsabweichungen können auch einen Film aus angesammeltem Material an Fenstern des Befragungsraums beinhalten, der die Menge des Lichts reduziert, das den Detektor **216** erreicht. Ohne

angemessene Korrektur können diese Strahlungsabweichungen zu falschen Messwerten aus dem primären Kanal A führen, und das Ausgangssignal **213** stünde dann nicht mehr primär mit der interessierenden Charakteristik in Beziehung.

[0051] Entsprechend kompensieren Ausführungsformen in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung Strahlungsabweichungen in der Strahlung mit optischer Interaktion **206**, die nicht mit der interessierenden Charakteristik in der Probe **202** zusammenhängen. Um dies zu erreichen, ist der zweite Detektor **216** dazu konfiguriert, ein Kompensationssignal **218** zu erzeugen. Das Kompensationssignal **218** zeigt allgemein Strahlungsabweichungen der elektromagnetischen Strahlungsquelle **201** an und kann zum Normieren des Ausgangssignals **213** verwendet werden. Entsprechend wird der zweite Kanal B im Stand der Technik in der Regel als „Referenz“-Kanal charakterisiert oder in anderer Weise bezeichnet. In einigen Anwendungen können das Kompensationssignal **218** und das Ausgangssignal **213** an eine Signalverarbeitungseinheit **220**, die kommunizierend an die Detektoren **212** und **216** gekoppelt ist, übertragen oder in anderer Weise davon empfangen werden. Bei der Signalverarbeitungseinheit **220** kann es sich um einen Computer mit einem nicht transitorischen maschinelesbaren Medium handeln, und er kann dazu konfiguriert sein, das Kompensationssignal **218** rechnerisch mit dem Ausgangssignal **213** zu kombinieren, um das Ausgangssignal **213** im Falle der Erkennung von Strahlungsabweichungen durch den zweiten Detektor **216** zu normieren. In einigen Ausführungsformen kann das rechnerische Kombinieren des Ausgangs- und des Kompensationssignals **213**, **218** das Berechnen eines Verhältnisses der zwei Signale **213**, **218** mit sich bringen, wodurch letztlich ein Verhältnis des primären und des Bezugskanals A und B (z. B. A/B) berechnet wird.

[0052] In einigen Ausführungsformen beinhaltet der Bezugskanal B das Erkennen eines Teils der Strahlung mit Interaktion **206**, bevor dieser auf das PhK-basierte ICE **209** trifft. Einige Ausführungsformen beinhalten spektral neutrale Elemente (z. B. Elemente, deren optische Durchlässigkeit, Absorptionsvermögen und/oder Reflexionsvermögen nicht wesentlich mit der Wellenlänge variiert) im optischen Weg des Bezugskanals B. Spektral neutrale Elemente, die für den Bezugskanal B verwendet werden können, beinhalten neutrale Dichtefilter und Strahlenteiler, teilweise transparente Masken, Vorderflächen-Fresnel-Reflexionen, Kombinationen davon oder ähnliche Komponenten.

[0053] In einigen Ausführungsformen kann die Konzentration jedes Analyten oder die Größe jeder Charakteristik, die mit der optische Rechenvorrichtung **200** bestimmt wurde, in einen Algorithmus eingespeist werden, der von der Signalverarbeitungsein-

heit **220** ausgeführt wird. Der Algorithmus kann dazu konfiguriert sein, Vorhersagen dazu zu treffen, wie die Charakteristiken der Probe **202** sich verändern, wenn die Konzentrationen der Analyten relativ zueinander geändert werden. In einigen Ausführungsformen erzeugt der Algorithmus eine Ausgabe, die von einem Bediener lesbar ist, der die Ergebnisse auswertet und bei Bedarf auf Grundlage der Ausgabe geeignete Anpassungen oder notwendige Maßnahmen vornehmen kann.

[0054] Fig. 3A stellt ein Durchlässigkeitsspektrum **300A** in einem Verfahren zum Herstellen eines PhK-basierten ICE dar. Das Durchlässigkeitsspektrum **300A** beinhaltet eine Abszisse, die eine Wellenlänge darstellt, die einen Bereich von λ_0 bis λ_m überspannt. Die Ordinate im Durchlässigkeitsspektrum **300A** stellt einen Durchlasswert von einem Minimalwert „ t_0 “ (z. B. 0 %) bis zu einem Maximalwert „ t_m “ (z. B. 100 %) dar. Der Dynamikbereich einer PhK-Struktur mit einem Durchlässigkeitsspektrum **300A** wird von t_0 und t_m bestimmt. In Ausführungsformen in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung ist es wünschenswert, dass der Dynamikbereich so hoch wie möglich ist, was bedeutet, dass ein Verhältnis t_m/t_0 möglichst höher sein sollte.

[0055] Das Durchlässigkeitsspektrum **300A** kann ein Ausgangspunkt für den Umgang mit einem interessierenden Analyten in der Probe sein. Das Durchlässigkeitsspektrum **300A** beinhaltet ein spektrales Merkmal **302** (z. B. ein Durchlassbereichsmerkmal) mit einer Zentralwellenlänge, λ_c , und einer Bandbreite, λ_c . Entsprechend beinhaltet das Durchlässigkeitsspektrum **300A** auch ein „Stoppband“ **301**. Das Stoppband **301** beinhaltet Wellenlängen, bei denen der Lichtdurchlass nahe dem Minimalwert t_0 ist. In einigen Ausführungsformen kann sich das Durchlässigkeitsspektrum **300A** aus einem 2D-PhK mit einer Reihe acht kreisförmiger Öffnungen ergeben, ähnlich wie Substrat **101B** in Fig. 1B.

[0056] Fig. 3B stellt ein Durchlässigkeitsspektrum **300B** in einem weiteren Verfahren zum Herstellen eines PhK-basierten ICE dar. In Spektrum **300B** können ein Durchlassdynamikbereich **306** und eine Zentralwellenlänge **304** im spektralen Merkmal **302** beliebig angepasst werden, um eine Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE in einer Datenbank kalibrierter Proben zu verbessern. Der SKF, die Empfindlichkeit und das SRV, die dem Durchlässigkeitsspektrum **300B** entsprechen, werden dann mithilfe der Datenbank kalibrierter Proben berechnet. In dieser Hinsicht kann die Datenbank kalibrierter Proben ein Durchlässigkeitsspektrum für jede der kalibrierten Proben beinhalten, die einem „wahren“ Wert für die Amplitude der Charakteristik der entsprechenden Probe zugeordnet ist.

[0057] Fig. 3C stellt ein Durchlässigkeitsspektrum **300C** in einem weiteren Verfahren zum Herstellen eines PhK-basierten ICE dar. Wenn die mit dem Spektrum **300B** geschätzte Vorhersageleistung zunimmt (wie von der Gütefunktion bestimmt), wird ein neues Durchlässigkeitsspektrum **300C** ausgewählt. In einigen Ausführungsformen wird das Durchlässigkeitsspektrum **300C** derart ausgewählt, dass eine geringfügige Anpassung des Durchlassdynamikbereichs der Bandbreite λ_f oder der Zentralwellenlänge λ_f die Vorhersageleistung reduzieren kann. Ein Computeralgorithmus mit einem Finite-Difference-Time-Domain (Finite Differenzen im Zeitbereich, FDTD) -Verfahren dient dazu, Maxwell-Gleichungen für individuelle „Zellen“ in einem Teilbereich der PhK-Struktur zu lösen. Das FDTD-Verfahren stimmt die Grenzbedingungen für das elektromagnetische Feld für die Zellen ab. Die Ausgabe des FDTD beinhaltet eine Durchlassfunktion des Lichts, das sich durch den PhK ausbreitet. Das Durchlässigkeitsspektrum **300C** wird in einen Electromagnetic-Equation-Propagation-FDTD-Algorithmus eingegeben. Das Durchlässigkeitsspektrum **300C** dient dem FDTD-Algorithmus als Ziel, und er modifiziert iterativ die geometrischen Charakteristiken des PhK, um eine Struktur zu ermitteln, die ein mit **300C** vergleichbares Durchlässigkeitsspektrum innerhalb eines ausgewählten Toleranzwerts erzeugt.

[0058] Einige Ausführungsformen verwenden anstelle eines FDTD-Verfahrens oder zusätzlich dazu ein Differenzgleichungsverfahren zum Modifizieren und Simulieren einer PhK-Struktur. Andere Verfahren, die gemäß hier offenbarten Ausführungsformen verwendet werden können, beinhalten ein Transfermatrixverfahren, ein Verfahren der Expansion ebener Wellen, ein Bloch-Wellenverfahren und dergleichen.

[0059] Entsprechend können zu einigen Parametern, die der FDTD-Algorithmus modifizieren kann, ohne Einschränkung die Anzahl der Öffnungen in einem Substrat, der Durchmesser der Öffnungen im Substrat, der Abstand zwischen den Öffnungen im Substrat und dergleichen gehören (z. B. jeweils w_0 , l_1 , d_1 , d_2 und d_3 in den Substraten **101B–C** aus Fig. 1B–Fig. 1C). Ferner kann der FDTD-Algorithmus den Brechungsindex des Substrats und den Brechungsindex des Mediums anpassen (z. B. n_0 , n_1 , und n_2 in Fig. 1B–Fig. 1D). Die resultierende PhK-Struktur kann eine erste Folge von Löchern mit einem ersten Durchmesser und einer Lücke in der Folge und eine zweite Folge von Löchern mit einem zweiten Durchmesser (z. B. kleiner) mit einer zweiten Lücke beinhalten. In einigen Ausführungsformen kann ein einzelnes spektrales Merkmal **308**, wie in Fig. 3C gezeigt, ein ausreichend prädiktives PhK-basierten ICE bereitstellen, das einfach herzustellen ist. In einigen Ausführungsformen kann es jedoch wünschenswert sein, neue spektrale Merkmale in das Durchlässig-

sigkeitsspektrum einzubringen, um eine verbesserte Vorhersageleistung des PhK-basierten ICE zu erlangen.

[0060] Fig. 4A stellt ein Durchlässigkeitsspektrum **400A** mit Durchlassspitzen **308** und **402** in einem Verfahren zum Herstellen eines PhK-basierten ICE dar. Gemäß einigen Ausführungsformen kann die Durchlassspitze **402** in das Durchlässigkeitsspektrum **400A** eingebracht werden, um die Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE weiter zu verbessern. Wenn eine Zentralwellenlänge (λ_f) und eine Bandbreite (Δf) der Durchlassspitze **308** bestimmt wurden, verbessert in einigen Ausführungsformen die zweite Durchlassspitze **402** die Vorhersageleistung des PhK-basierten ICE weiter. Entsprechend beinhalten Verfahren in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung Schritte zum Anpassen des Durchlassdynamikbereichs **406** relativ zum Stoppband **401**. Außerdem beinhalten Verfahren in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung das Verlagern einer Zentralwellenlänge **404** der zweiten Durchlassspitze **402**, um ein Durchlässigkeitsspektrum **400B** mit einer verbesserten Vorhersageleistung zu erlangen. Ferner beinhalten gemäß einigen Ausführungsformen Verfahren in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung Schritte zum Anpassen der Bandbreite der Durchlassspitze **402**.

[0061] Fig. 4B stellt ein Durchlässigkeitsspektrum **400B** mit Durchlassspitzen **308** und **408** in einem Verfahren zum Herstellen eines PhK-basierten ICE dar. In einigen Ausführungsformen erhöht das Einbringen des zweiten spektralen Merkmals **402** in das Modell die Vorhersageleistung des resultierenden PhK-basierten ICE drastisch. Entsprechend kann das zweite spektrale Merkmal **402** ergeben, dass eine Zentralwellenlänge λ_b und eine Bandbreite Δb für ein Durchlässigkeitsspektrum **400B** eine Vorhersageleistung für das PhK-basierten ICE bereitstellen. Beispielsweise kann ein Empfindlichkeitswert im Vergleich zu einem Durchlässigkeitsspektrum mit einem einzelnen spektralen Merkmal **308** wesentlich erhöht werden.

[0062] Fig. 5 stellt ein Diagramm **500** mit einem Durchlässigkeitsspektrum **502** von einem PhK-basierten ICE und einem Durchlässigkeitsspektrum **504** von einem mehrschichtigen Interferenzelement dar. Die Durchlässigkeitsspektren **502** und **504** werden gemäß den spektralen Eigenschaften einer bestimmten physikalischen oder chemischen Charakteristik eines analysierten Stoffs ausgewählt. In einigen Ausführungsformen werden die Durchlässigkeitsspektren **502** und **504** derart ausgewählt, dass ein Detektorsignal proportional zu einem Skalarprodukt (z. B. einem Punktprodukt) zwischen einem Spektralvektor eines Lichts mit Interaktion und einem linearen Regressionsvektor im Zusammenhang mit der Charakteristik der analysierten Probe ist (z. B. Licht mit In-

teraktion **206**, Signal **213** und Detektor **212**, siehe Fig. 2). In dieser Hinsicht können die Durchlässigkeitsspektren **502** und **504** aus einer multivariaten Regressionsanalyse mit einer Vielzahl von kalibrierten Proben in einer Datenbank erlangt werden. Entsprechend können die Durchlässigkeitsspektren **502** und **504** eine Approximation an ein theoretisches berechnetes Spektrum sein, das mithilfe multivariater Regressionsalgorithmen erlangt wird.

[0063] Während das Durchlässigkeitsspektrum **504** einem ICE mit einer Vorhersageleistung entsprechen kann, kann das Durchlässigkeitsspektrum **502** einem PhK-basierten ICE mit einer noch besseren Vorhersageleistung entsprechen. Beispielsweise weist das spektrale Merkmal **512** in Durchlässigkeitsspektrum **502** einen höheren Durchlassdynamikbereich **532** und eine schmalere Bandbreite **522** als der Durchlassdynamikbereich **534** und die Bandbreite **524** des spektralen Merkmals **514** vom Durchlässigkeitsspektrum **504** auf. Wie oben erörtert, stehen diese Faktoren in der Regel mit einer höheren Vorhersageleistung für eine jeweilige multivariate Regressionsanalyse in Zusammenhang.

[0064] Fig. 6 stellt ein Ablaufdiagramm mit Schritten in einem Verfahren **600** zum Herstellen einer optischen Rechenvorrichtung dar, die ein PhK-basiertes ICE wie hier offenbart beinhaltet. Das PhK-basierte ICE in Verfahren **600** kann eine PhK-Struktur mit einer optischen Eingangsseite, die zum Aufnehmen von Licht mit Interaktion konfiguriert ist, und einer optischen Ausgangsseite beinhalten, die zum Empfangen eines optischen Ausgangs beinhalten (z. B. PhK-Strukturen **101A–D**, siehe Fig. 1A–D). Der PhK kann ferner ein Medium mit einem ersten Brechungsindex; und ein Substrat beinhalten, das in das Medium eingebettet ist, wobei das Substrat einen zweiten Brechungsindex und wenigstens ein geometrisches Merkmal aufweist (z. B. Brechungsindizes n_1 , n_2 , n_3 , geometrische Merkmale w_0 , l_1 , d_0 , d_1 , d_2 , d_{12} und d_3 , siehe Fig. 1B–Fig. 1D, und Dicke t). Ferner wird das wenigstens eine geometrische Merkmal in einigen Ausführungsformen auf Grundlage eines Ausgangsspektrums ausgewählt, das sich aus der optischen Ausgangsseite ergibt (z. B. Durchlässigkeitsspektren **300C**, **400B** und **502**, siehe Fig. 3C, Fig. 4B und Fig. 5). Entsprechend kann das Durchlässigkeitsspektrum ein Durchlassbereichsmerkmal beinhalten (z. B. Durchlassbereichsmerkmale **302**, **402** und **512**, siehe Fig. 3C und Fig. 4B und Fig. 5). Der optische Ausgang weist in einigen Ausführungsformen eine Amplitude auf, die proportional zu einem Skalarprodukt des Lichts mit Interaktion und einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe ist.

[0065] Schritte in Verfahren **600** können wenigstens von einem Computer mit einer Prozessorschaltung durchgeführt werden, die Befehle ausführt, die in ei-

ner Speicherschaltung gespeichert sind. Wenn die Prozessorschaltung die Befehle ausführt, veranlasst sie den Computer, wenigstens einige der Schritte in Verfahren **600** teilweise oder ganz auszuführen. Darüber hinaus können Ausführungsformen in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung wenigstens einen, aber nicht alle Schritte beinhalten, die in **Fig. 6** dargestellt sind. Ferner kann in einigen Ausführungsformen im Umfang vorliegenden Offenbarung ein Verfahren wenigstens einige der Schritte in **Fig. 6** beinhalten, die in einer anderen Reihenfolge oder sogar teilweise oder vollständig zeitlich überlappend durchgeführt werden.

[0066] Schritt **602** beinhaltet das Auswählen einer PhK-Struktur. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **602** das Auswählen einer optischen Eingangsseite und einer optischen Ausgangsseite der PhK-Struktur und das Auswählen eines PhK-Mediums mit einem ersten Brechungsindex. Ferner beinhaltet Schritt **602** in einigen Ausführungsformen das Auswählen wenigstens eines geometrischen Merkmals im PhK-Substrat, das in das Medium eingebettet ist, wobei das PhK-Substrat einen zweiten Brechungsindex aufweisen kann. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **602** das Vergleichen eines Ausgangsspektrums, das sich an der optischen Ausgangsseite des PhK ergibt, mit einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe.

[0067] Schritt **604** beinhaltet das Erlangen eines Durchlässigkeitsspektrums für den ausgewählten PhK. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **604** das Verwenden eines Electromagnetic-Equation-Propagation-FDTD-Algorithmus zum Bestimmen des Durchlässigkeitsspektrums von einfallender elektromagnetischer Strahlung, die auf eine optische Eingangsseite der PhK-Struktur trifft.

[0068] Schritt **606** beinhaltet das Bestimmen einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE für eine Charakteristik der Probe mit dem Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank von Spektren für kalibrierte Proben. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **606** das Durchführen einer multivariaten Regressionsanalyse von Durchlässigkeitsspektren für kalibrierte Proben, die in der Datenbank gespeichert sind, mithilfe des erlangten Durchlässigkeitsspektrums der PhK-Struktur. Schritt **606** kann auch einen beliebigen der Schritte des Ermitteln eines SKF, Ermitteln einer Empfindlichkeit und Ermitteln eines SRV mithilfe der multivariaten Regressionsanalyse beinhalten. Schritt **606** kann ferner das Sortieren einer Vielzahl von PhK-Strukturen, die von einer Auslegungssammlung erzeugt wurden, auf Grundlage von Vorhersagefehler und Signal beinhalten. In einigen Ausführungsformen kann die Vielzahl von PhK-Strukturen auf Grundlage ihres SKF, geprüft im Abgleich mit bekannten Werten für die interessie-

rende Charakteristik oder den interessierenden Analyten, sortiert werden. Beispielsweise kann der SKF für jede photonische Kristallstruktur berechnet werden, indem die Quadratwurzel der Summe der Quadrate zwischen bekannten Werten für den interessierenden Analyten und vorhergesagten Werten, hergeleitet aus dem Durchlässigkeitsspektrum der jeweiligen photonischen Kristallstruktur, ermittelt wird.

[0069] Schritt **608** beinhaltet das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE mit der Datenbank. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **608** das Reduzieren eines Vorhersagefehlers oder Reduzieren eines Standardkalibrierungsfehlers. Ferner beinhaltet Schritt **608** in einigen Ausführungsformen das Reduzieren eines Standardvorhersagefehlers, Erhöhen einer Empfindlichkeit oder Erhöhen einer Flanke einer Kalibrierungskurve. Darüber hinaus beinhaltet Schritt **608** in einigen Ausführungsformen auch das Erhöhen eines SRV und Erhöhen eines mittleren optischen Durchlasswerts, geprüft anhand eines bekannten Werts für die interessierende Charakteristik. Insbesondere kann Schritt **608** das Verlagern einer Zentralwellenlänge des Durchlassbereichs einer elektromagnetischen Strahlung, die durch den PhK durchgelassen wird, Erhöhen eines Durchlassdynamikbereichs des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung, die durch den PhK durchgelassen wird, und Anpassen der Bandbreite des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung, die durch den PhK durchgelassen wird beinhalten.

[0070] Schritt **610** beinhaltet das Bestimmen des PhK, der das angepasste Durchlässigkeitsspektrum erzeugt. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **610** das Verwenden eines rekursiven Algorithmus zusammen mit dem Electromagnetic-Equation-Propagation-FDTD-Algorithmus, um die PhK-Struktur aus einem Durchlässigkeitsspektrum „zurückzubauen“. Schritt **610** kann das Verwenden einer Auslegungssammlung beinhalten, die dazu konfiguriert ist, eine photonische Kristallstruktur auf Grundlage mehrerer „Gütezahlen“ oder Leistungskriterien für das ICE zu verarbeiten und/oder zu optimieren. Diese Leistungskriterien können, ohne darauf beschränkt zu sein, einen minimalen Vorhersagefehler, SKF, Standardleistungsfehler (SLF), Empfindlichkeit, Flanke der Kalibrierungskurve, SRV und mittleren Durchlasswert beinhalten, die der jeweiligen interessierenden Charakteristik oder dem jeweiligen interessierenden Analyten entsprechen. Entsprechend kann Schritt **610** das Variieren physikalischer Parameter in der PhK-Struktur wie Lochmittenabstand oder Lochdurchmesser, oder eine Kombination der zwei, beinhalten, bis eine oder mehrere PhK-Strukturen ein oder mehrere Mindestkriterien zum Vorhersagen eines interessierenden Analyten erfüllen. Tatsächlich kann eine Vielzahl von photonischen Kristallstruktu-

ren gemäß dem Vorstehenden auf einer ersten Stufe ausgewählt werden.

[0071] Schritt **612** beinhaltet das Bestimmen, ob die Vorhersageleistung der modifizierten PhK-Auslegung für die Zwecke des Messens der physikalischen oder chemischen Charakteristik des analysierten Stoffs ausreicht. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **612** das Bestimmen, ob die vorhergesagte Leistung mit der bis zu diesem Punkt verwendeten Anzahl spektraler Merkmale (z. B. ein spektrales Merkmal in einer ersten Iteration des Verfahrens **600**) ein Maximum erreicht hat. Ein spektrales Merkmal kann in einem Verfahren in Übereinstimmung mit Verfahren **600** ein Durchlassbereichsmerkmal wie hier offenbart beinhalten. Wenn die Vorhersageleistung gemäß Schritt **612** ausreichend ist, beinhaltet Schritt **614** das Bereitstellen der PhK-Struktur gemäß der Auslegung. Entsprechend beinhaltet Schritt **614** in einigen Ausführungsformen das Bilden einer 2D- oder einer 3D-PhK-Struktur, wie etwa der Strukturen **101A**, **101B** und **101C** aus Fig. 1A–Fig. 1C.

[0072] Wenn die Vorhersageleistung gemäß Schritt **612** nicht ausreichend ist, beinhaltet Schritt **616** das Einbringen eines neuen spektralen Merkmals in das Durchlassigkeitsspektrum (z. B. ein neues Durchlassbereichsmerkmal oder eine neue schmale Durchlassspitze im interessierenden Wellenlängenbereich). In einigen Ausführungsformen wird das Verfahren **600** ab Schritt **606** erneut wiederholt, bis die Antwort in Schritt **612** „Ja“ lautet und Schritt **614** erreicht wird. Sobald eine einzelne Spitzendurchlassfunktion (wie in Fig. 3C gezeigt) ermittelt wurde, wird eine zweite Spitze kombiniert mit der ersten Spitze als eine neue Durchlassfunktion (gezeigt in Fig. 4B) in den FDTD-Algorithmus eingegeben. Eine neue photonische Kristallstruktur, deren Durchlassfunktion mit der eingegebenen Durchlassfunktion (mit zwei Spitzen) übereinstimmt, wird ermittelt. Die zweite Spitze wird dann schrittweise in beide Richtungen im Wellenlängenraum verschoben, wie in Fig. 4B gezeigt. Der SKF, die Empfindlichkeit und das SRV werden dann durch Projizieren der neuen Durchlassfunktion auf die Kalibrierungsdatenbank berechnet. Wenn eine Verbesserung von SKF, Empfindlichkeit und SRV (wie von einer Gütefunktion definiert) erkannt wird, wird die Durchlassfunktion (mit zwei oder mehr Spitzen) in den FDTD-Algorithmus eingegeben und die Schritte **606** bis **612** werden wiederholt, wodurch eine neue PhK-Struktur ermittelt wird, deren Durchlassfunktion mit der eingegebenen Durchlassfunktion übereinstimmt.

[0073] In einigen Ausführungsformen setzen sich die Schritte **606** bis **616** für mehrere Spitzen fort, bis ein globales Minimum für eine Gütefunktion ermittelt wurde. Die Gütefunktion kann SKF, Empfindlichkeit, SRV oder eine Kombination von allen sein. Die Auslegung,

die sich in Schritt **614** ergibt, kann eine beliebige Anzahl von Spitzen (oder Resonanzmodi) und eine beliebige Anzahl von Stoppbändern (oder photonischen Durchlassbereichen) beinhalten. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **614** das Konfigurieren eines PhK-basierten ICE mit der PhK-Struktur für einen Sensor in einem von einem Measurement-while-Drilling-Werkzeug oder einem Logging-while-Drilling-Werkzeug. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **614** das Konfigurieren des PhK-basierten ICE mit der PhK-Struktur für einen Sensor in einem Wireline-Werkzeug.

[0074] In einigen Ausführungsformen kann ein „Vorwärtsauslegungsprozess“ wenigstens einen oder mehrere der Schritte beinhalten, die unter Bezugnahme auf das Verfahren **600** ausführlich beschrieben wurden. Ein Vorwärtsauslegungsprozess definiert eine Vielzahl von PhK-Strukturen (2D und höherer Ordnung), die annehmbare Gütefunktionswerte bereitstellen. Allgemeiner können Durchlassfunktionen gemäß hier offenbarten Ausführungsformen Breitband sein (z. B. Durchlässigkeitsspektrum **502**, siehe Fig. 5). Der Vorwärtsauslegungsprozess kann dabei das Ändern der PhK-Geometrie beinhalten, wie etwa die Anzahl von Öffnungen, den Durchmesser von Öffnungen und den Mittenabstand der Öffnungen, um die Durchlassfunktion zu bestimmen. Die Leistung des PhK-basierten ICE wird mithilfe der resultierenden Durchlassfunktion gemessen. Das Verfahren bestimmt dann, ob eine Leistungsverbesserung vorliegt (z. B. ein leistungsfähigeres prädiktives PhK-basiertes ICE).

[0075] In einigen Ausführungsformen kann ein „Rückwärtsauslegungsprozess“ verwendet werden, in dem zunächst eine optimale oder nahezu optimale Durchlassfunktion bestimmt wird. Dann ermittelt der Rückwärtsauslegungsprozess die PhK-Struktur, die die optimale oder nahezu optimale Durchlassfunktion erzeugt. Ausführungsformen eines Rückwärtsauslegungsprozesses können ein Verfahren **700** beinhalten, das unten unter Bezugnahme auf Fig. 7 ausführlich beschrieben wird.

[0076] Fig. 7 stellt ein Ablaufdiagramm mit Schritten in einem Verfahren **700** zum Herstellen einer optischen Rechenvorrichtung dar, die ein PhK-basiertes ICE beinhaltet. Das PhK-basierte ICE in Verfahren **700** kann eine PhK-Struktur mit einer optischen Eingangsseite, die zum Aufnehmen von Licht mit Interaktion konfiguriert ist, und einer optischen Ausgangsseite beinhalten, die zum Empfangen eines optischen Ausgangs beinhalten (z. B. PhK-Strukturen **101A–D**, siehe Fig. 1A–D). Der PhK kann ferner ein Medium mit einem ersten Brechungsindex; und ein Substrat beinhalten, das in das Medium eingebettet ist, wobei das Substrat einen zweiten Brechungsindex und wenigstens ein geometrisches Merkmal aufweist (z. B. Brechungsindizes

n_1 , n_2 , n_3 , geometrische Merkmale w_0 , l_1 , d_0 , d_1 , d_2 , d_{12} und d_3 , siehe **Fig. 1B–Fig. 1D**, und Dicke t). Ferner wird das wenigstens eine geometrische Merkmal in einigen Ausführungsformen auf Grundlage eines Ausgangsspektrums ausgewählt, das sich aus der optischen Ausgangsseite ergibt (z. B. Durchlässigkeitsspektren **300C**, **400B** und **502**, siehe **Fig. 3C**, **Fig. 4B** und **Fig. 5**). Entsprechend kann das Durchlässigkeitsspektrum ein Durchlassbereichsmerkmal oder Schmalbanddurchlassspitzen beinhalten (z. B. Durchlassbereichsmerkmale **302** und **402**, siehe **Fig. 3A–Fig. 3C** und **Fig. 4A–Fig. 4B**). Der optische Ausgang weist in einigen Ausführungsformen eine Amplitude auf, die proportional zu einem Skalarprodukt des Lichts mit Interaktion und einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe ist.

[0077] Schritte in Verfahren **700** können wenigstens von einem Computer mit einer Prozessorschaltung durchgeführt werden, die Befehle ausführt, die in einer Speicherschaltung gespeichert sind. Wenn die Prozessorschaltung die Befehle ausführt, veranlasst sie den Computer, wenigstens einige der Schritte in Verfahren **600** teilweise oder ganz auszuführen. Darüber hinaus können Ausführungsformen in Übereinstimmung mit der vorliegenden Offenbarung wenigstens einen, aber nicht alle Schritte beinhalten, die in **Fig. 7** dargestellt sind. Ferner kann in einigen Ausführungsformen im Umfang vorliegenden Offenbarung ein Verfahren wenigstens einige der Schritte in **Fig. 7** beinhalten, die in einer anderen Reihenfolge oder sogar teilweise oder vollständig zeitlich überlappend durchgeführt werden.

[0078] Schritt **702** beinhaltet das Auswählen eines gewünschten Durchlässigkeitsspektrums. Entsprechend kann Schritt **702** in einigen Ausführungsformen das Lösen einer multivariaten Regressionsanalyse für eine Vielzahl von Durchlässigkeitsspektren beinhalten, die in einer Datenbank kalibrierter Proben gespeichert sind. Das Ergebnis von Schritt **702** kann ein stark verfeinertes Durchlässigkeitsspektrum beinhalten (z. B. Durchlässigkeitsspektrum **502**, siehe **Fig. 5**). Beispielsweise kann das Durchlässigkeitsspektrum Durchlassbereichsmerkmale mit einem hohen Durchlassdynamikbereich, einer schmalen Bandbreite und einer präzise definierten Zentralwellenlänge beinhalten.

[0079] Schritt **704** beinhaltet das Identifizieren eines PhK mit einem Durchlässigkeitsspektrum, das mit dem gewünschten Durchlässigkeitsspektrum vergleichbar ist. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **610** das Verwenden eines rekursiven Algorithmus zusammen mit dem Electromagnetic-Equation-Propagation-FDTD-Algorithmus, um die PhK-Struktur aus dem gewünschten Durchlässigkeitsspektrum „zurückzubauen“.

[0080] Schritt **706** beinhaltet das Erlangen eines Durchlässigkeitsspektrums für den identifizierten PhK. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **706** das Verwenden eines Electromagnetic-Equation-Propagation-FDTD-Algorithmus zum Bestimmen des Durchlässigkeitsspektrums von einfallender elektromagnetischer Strahlung, die auf eine optische Eingangsseite der PhK-Struktur trifft.

[0081] Schritt **708** beinhaltet das Bestimmen einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE für eine Charakteristik der Probe mit dem Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank von Spektren für kalibrierte Proben. Entsprechend kann Schritt **708** das Lösen eines multivariaten Regressionsproblems mithilfe von Durchlässigkeitsspektren einer Vielzahl von kalibrierten Proben in der Datenbank beinhalten. Darüber hinaus kann Schritt **708** das Bestimmen von Leistungskriterien für das erlangte Durchlässigkeitsspektrum beinhalten. Diese Leistungskriterien können, ohne darauf beschränkt zu sein, einen minimalen Vorhersagefehler, SKF, SLF, Empfindlichkeit, Flanke der Kalibrierungskurve, SRV und mittleren Durchlasswert beinhalten, die der jeweiligen interessierenden Charakteristik oder dem jeweiligen interessierenden Analyten entsprechen.

[0082] Schritt **710** beinhaltet das Anpassen des erlangten Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE gemäß der Datenbank. Entsprechend kann Schritt **710** das Verlagern einer Zentralwellenlänge des Durchlassbereichs einer einfallenden elektromagnetischen Strahlung, Erhöhen eines Durchlassdynamikbereichs des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung, und Anpassen der Bandbreite des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung beinhalten.

[0083] Schritt **712** beinhaltet das Modifizieren der PhK-Auslegung in Anpassung an das Durchlässigkeitsspektrum. Entsprechend kann Schritt **712** das Variieren physikalischer Parameter in der PhK-Struktur wie Lochmittenabstand oder Lochdurchmesser, oder eine Kombination der zwei, beinhalten, bis eine oder mehrere PhK-Strukturen ein oder mehrere Leistungskriterien zum Vorhersagen eines interessierenden Analyten erfüllen. Tatsächlich kann eine Vielzahl von PhK-Strukturen gemäß dem Vorstehenden auf einer ersten Stufe ausgewählt werden.

[0084] Schritt **714** beinhaltet das Bereitstellen einer PhK-Struktur gemäß der modifizierten PhK-Auslegung. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **714** das Konfigurieren eines PhK-basierten ICE mit der PhK-Struktur für einen Sensor in einem von einem Measurement-while-Drilling-Werkzeug oder einem Logging-while-Drilling-Werkzeug. In einigen Ausführungsformen beinhaltet Schritt **714** das Konfigurieren des PhK-basierten ICE mit der

PhK-Struktur für einen Sensor in einem Wireline-Werkzeug.

[0085] Fig. 8 ist ein Bohrsystem **800**, das dazu konfiguriert ist, einen optischen Sensor zum Modifizieren eines Bohrparameters oder einer Konfiguration in einem MWD(measurement-while-drilling)- und einem LWD(logging-while-drilling)-Vorgang zu verwenden. Bohrlöcher können durch Bohren in die Erde **802** mithilfe des Bohrsystems **800** erzeugt werden. Das Bohrsystem **800** kann dazu konfiguriert sein, eine Bohrgarnitur (BG) **804**, die an der Unterseite eines Bohrstrangs **806** positioniert oder anderweitig angeordnet ist, der sich von einem Bohrturm **808** an der Oberfläche **810** in die Erde **802** erstreckt, anzutreiben. Der Bohrturm **808** beinhaltet eine Mitnehmerstange **812** und einen Kranblock **813** zum Absenken und Anheben der Mitnehmerstange **812** und des Bohrstrangs **806**.

[0086] Die BG **804** kann einen Bohrmeißel **814** beinhalten, der betriebsfähig an einen Werkzeugstrang **816** gekoppelt ist, der axial in einem gebohrten Bohrloch **818** bewegt werden kann, wenn er an dem Bohrstrang **806** angebracht ist. Während des Betriebs dringt der Bohrmeißel **814** in die Erde **802** ein und erzeugt dadurch das Bohrloch **818**. Die BG **804** stellt eine Richtungssteuerung des Bohrmeißels **814** bereit, während dieser in die Erde **802** vordringt. Der Werkzeugstrang **816** kann semipermanent mit verschiedenen Messwerkzeugen (nicht dargestellt) bestückt sein, wie etwa, ohne darauf beschränkt zu sein, Measurement-while-Drilling(MWD) - und Logging-while-Drilling(LWD)-Werkzeugen, die dazu konfiguriert sein können, Untertagemessungen der Bohrbedingungen vorzunehmen. In anderen Ausführungsformen können die Messwerkzeuge unabhängig im Werkzeugstrang **816** vorliegen, wie in Fig. 8 gezeigt.

[0087] Fluid oder „Schlamm“ aus einem Schlamm-tank **820** kann mithilfe einer Schlamm-pumpe **822**, die durch eine benachbarte Leistungsquelle wie etwa einen Hauptantrieb oder Motor **824** angetrieben wird, untertage gepumpt werden. Der Schlamm kann aus dem Schlamm-tank **820** durch ein Stehrohr **826** gepumpt werden, das den Schlamm in den Bohrstrang **806** speist und ihn zum Bohrmeißel **814** befördert. Der Schlamm tritt aus einer oder mehreren Düsen aus, die im Bohrmeißel **814** angeordnet sind, und kühlt dabei den Bohrmeißel **814**. Wenn der Schlamm aus dem Bohrmeißel **814** ausgetreten ist, zirkuliert er durch den Ringraum, der zwischen dem Bohrloch **818** und dem Bohrstrang **806** definiert ist, zurück zur Oberfläche **810**, und bringt dabei Bohrklein und Trümmer an die Oberfläche mit. Das Gemisch aus Bohrklein und Schlamm tritt durch eine Strömungsleitung **828** und wird verarbeitet, so dass ein gereinigter Schlamm durch das Standrohr **826** zurück ins Bohrloch geleitet wird.

[0088] Die BG **804** kann ferner ein Untertagewerkzeug **830** beinhalten, das dem hier beschriebenen Untertagewerkzeugs gleicht. Insbesondere kann das Untertagewerkzeug **830** einen Sensor mit einem optischen Rechensystem aufweisen, wie es hier offenbart ist (z. B. das optische Rechensystem **200**, siehe Fig. 2). Entsprechend kann das optische Rechensystem in Werkzeug **830** ein PhK-basiertes ICE beinhalten, das optimiert ist, um eine verbesserte Vorhersageleistung zu ermitteln.

[0089] Fig. 9 ist ein Wireline-System **900**, das dazu konfiguriert ist, bei Formationsprüfung und Probenahme einen optischen Sensor zu verwenden. In einigen Ausführungsformen kann das Wireline-System **900**, das dazu konfiguriert ist, bei Formationsprüfung und Probenahme einen kalibrierten optischen Sensor zu verwenden. Wenn das Bohren des Bohrlochs **818** abgeschlossen ist, kann es wünschenswert sein, durch Probenahme mithilfe eines Wireline-Formationsprüfgeräts weitere Details zur Art von Formationsfluiden und den zugeordneten Charakteristiken zu erfahren. Das System **900** kann ein Untertagewerkzeug **902** beinhalten, das einen Teil eines Wireline-Vermessungsvorgangs bildet und einen oder mehreren optischen Sensoren **904**, wie hier beschrieben, als Teil eines Untertagemesswerkzeugs beinhalten kann. Das System **900** kann einen Bohrturm **808** beinhalten, der den Kranblock **813** trägt. Ein Wireline-Vermessungswerkzeug **902**, wie etwa eine Sonde, kann mittels Wireline oder Vermessungskabel **906** in das Bohrloch **818** abgesenkt werden. Das Werkzeug **902** kann an den Boden der interessierenden Region abgesenkt und dann bei einer im Wesentlichen konstanten Geschwindigkeit wieder nach oben gezogen werden. Das Werkzeug **902** kann dazu konfiguriert sein, die Fluideigenschaften der Bohrlochfluide zu messen, und Messdaten, die von dem Untertagewerkzeug **902** und seinen zugehörigen optischen Sensoren **904** erzeugt werden, können zur Speicherung, Verarbeitung und/oder Analyse an eine Oberflächenvermessungsanlage **908** übermittelt werden. Beliebige der optischen Sensoren **904** können ein optisches Rechensystem mit einem PhK-basierten ICE für verbesserte Vorhersageleistung gemäß hier offenbarten Ausführungsformen beinhalten (z. B. das optische Rechensystem **200**, siehe Fig. 2). Die Vermessungsanlage **908** kann mit elektronischer Ausrüstung **910** versehen sein, einschließlich Prozessoren für verschiedene Arten der Signalverarbeitung.

[0090] Einschlägige Fachleute werden ohne Weiteres verstehen, dass die hier beschriebenen Verfahren, oder große Teile davon, ab einem Punkt automatisiert werden können, derart, dass ein computerisiertes System programmiert werden kann, um PhK-basierte ICEs mit höherer Vorhersageleistung ausulegen, vorherzusagen und herzustellen. Computerhardware, die zum Implementieren der verschiedenen Verfahren und Algorithmen verwendet wird, kann

einen Prozessor beinhalten, der dazu konfiguriert ist, eine oder mehrere Sequenzen von Anweisungen, Programmierungsstandpunkte oder Code auszuführen, die bzw. der auf einem nicht transitorischen, computerlesbaren Medium gespeichert sind bzw. ist. Der Prozessor kann beispielsweise ein allgemeiner Mikroprozessor, ein Mikrocontroller, eine digitale Signalverarbeitungseinheit, eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung, ein feldprogrammierbares Gate-Array, eine programmierbare Logikvorrichtung, ein Controller, eine Zustandsmaschine, eine Gate-Logik, separate Hardwarekomponenten, ein künstliches neuronales Netz oder beliebige ähnliche geeignete Einheiten sein, die Berechnungen oder andere Verarbeitungen von Daten durchführen können. In einigen Ausführungsformen kann Computerhardware ferner Elemente wie beispielsweise einen Speicher (z. B. Schreib-/Lesespeicher (RAM), Flash-Speicher, Lesespeicher (ROM), programmierbaren Lesespeicher (PROM), elektrisch löschbaren programmierbaren Lesespeicher (EEPROM)), Register, Festplatten, Wechseldatenträger, CD-ROMs, DVDs oder eine beliebige andere ähnliche geeignete Speichervorrichtung oder ein beliebiges anderes ähnliches geeignetes Speichermedium beinhalten.

[0091] Hier beschriebene ausführbare Sequenzen können mit einer oder mehreren Codesequenzen implementiert werden, die in einem Speicher enthalten sind. In einigen Ausführungsformen kann dieser Code von einem anderen maschinenlesbaren Medium in den Speicher eingelesen werden. Die Ausführung der Sequenzen von Anweisungen, die im Speicher enthalten sind, kann einen Prozessor veranlassen, die hier beschriebenen Prozessschritte auszuführen. Ein oder mehrere Prozessoren in einer Multiprozessoranordnung können ebenfalls verwendet werden, um Anweisungssequenzen im Speicher auszuführen. Außerdem können fest verdrahtete Schaltungen anstelle von oder in Kombination mit Softwareanweisungen verwendet werden, um verschiedene hier beschriebene Ausführungsformen zu implementieren. Somit sind die vorliegenden Ausführungsformen nicht auf eine spezifische Kombination von Hardware und/oder Software beschränkt.

[0092] Im hier verwendeten Sinne bezeichnet ein maschinenlesbares Medium ein beliebiges Medium, das direkt oder indirekt Anweisungen zur Ausführung an einen Prozessor bereitstellt. Ein maschinenlesbares Medium kann viele Formen annehmen, darunter beispielsweise nicht flüchtige Medien, flüchtige Medien und Übertragungsmedien. Nicht flüchtige Medien können beispielsweise optische und magnetische Disks beinhalten. Flüchtige Medien können beispielsweise dynamischen Speicher beinhalten. Übertragungsmedien können beispielsweise Koaxialkabel, Draht, Glasfaser und Drähte beinhalten, die einen Datenbus bilden. Häufige Formen maschinenlesbarer Medien können beispielsweise Disket-

ten, flexible Disks, Festplatten, Magnetbänder, andere ähnliche magnetische Medien, CD-ROMs, DVDs, andere ähnliche optische Medien, Lochkarten, Papierbänder und ähnliche physische Medien mit strukturierter Lochung, RAM, ROM, PROM, EPROM und Flash-EPROM beinhalten.

[0093] Offenbarte Ausführungsformen beinhalten:

A. Ein Verfahren, das Auswählen einer photonischen Kristall(PhK)-Struktur mit einer Auslegungssammlung, die in einem nicht transitorischen, computerlesbaren Medium gespeichert ist, Erlangen eines Durchlässigkeitsspektrums für die PhK-Struktur, Bestimmen der Vorhersageleistung eines PhK-basierten integrierten Rechenelements (ICE) für eine Charakteristik einer Probe mit dem Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank von Spektren für kalibrierte Proben, Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung und Herstellen der PhK-Struktur für das PhK-basierte ICE, wenn die Vorhersageleistung einen im Voraus ausgewählten Schwellenwert überschreitet.

B. Ein Verfahren, das Auswählen eines gewünschten Durchlässigkeitsspektrums für ein integriertes Rechenelement (ICE), Identifizieren einer photonischen Kristall(PhK)-Struktur mit einem Durchlässigkeitsspektrum, das mit dem gewünschten Durchlässigkeitsspektrum vergleichbar ist, Erlangen des Durchlässigkeitsspektrums für die PhK-Struktur, Bestimmen einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE für eine Charakteristik einer Probe mit dem erlangten Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank von Spektren für kalibrierte Proben, Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums der PhK-Struktur zum Verbessern der Vorhersageleistung des PhK-basierten ICE und Herstellen der PhK-Struktur für das PhK-basierte ICE, wenn die Vorhersageleistung einen im Voraus ausgewählten Schwellenwert überschreitet.

C. Ein integriertes Rechenelement (ICE), das eine photonische Kristall(PhK)-Struktur mit einer optischen Eingangsseite, die dazu konfiguriert ist, Licht mit Interaktion aufzunehmen, und einer optischen Ausgangsseite beinhaltet, die dazu konfiguriert ist, einen optischen Ausgang zu empfangen, wobei der PhK ein Medium mit einem ersten Brechungsindex und ein Substrat aufweist, das in das Medium eingebettet ist, wobei das Substrat einen zweiten Brechungsindex und wenigstens ein geometrisches Merkmal aufweist, wobei das wenigstens eine geometrische Merkmal auf Grundlage eines Ausgangsspektrums ausgewählt wird, das sich aus der optischen Ausgangsseite ergibt, und wobei der optische Ausgang eine Amplitude proportional zu einem Skalarprodukt des Lichts mit Interaktion und einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe aufweist.

[0094] Jede der Ausführungsformen A, B und C kann eines oder mehrere der folgenden Elemente in beliebiger Kombination aufweisen: Element 1: wobei das Herstellen der PhK-Struktur ferner Ermitteln einer PhK-Struktur mit einer Durchlassfunktion ähnlich der angepassten Durchlassfunktion umfasst. Element 2: wobei das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung eins von dem Reduzieren eines Vorhersagefehlers, Reduzieren eines Standardkalibrierungsfehlers, Reduzieren eines Standardvorhersagefehlers, Erhöhen einer Empfindlichkeit, Erhöhen einer Flanke einer Kalibrierungskurve, Erhöhen eines Signal-Rausch-Verhältnisses und Erhöhen eines mittleren optischen Durchlasswerts, geprüft anhand eines bekannten Werts für die Charakteristik der Probe umfasst. Element 3: wobei das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung eins von dem Verlagern einer Zentralwellenlänge des Durchlassbereichs einer elektromagnetischen Strahlung, die durch die PhK-Struktur durchgelassen wird, Erhöhen eines Durchlassdynamikbereichs des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung, die durch die PhK-Struktur durchgelassen wird, und Anpassen der Bandbreite des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung, die durch die PhK-Struktur durchgelassen wird, umfasst. Element 4: wobei das Auswählen einer PhK-Struktur ferner Auswählen einer optischen Eingangsseite und einer optischen Ausgangsseite der PhK-Struktur, Auswählen eines PhK-Mediums mit einem ersten Brechungsindex und Auswählen wenigstens eines geometrischen Merkmals in einem PhK-Substrat, das in dem Medium eingebettet ist, umfasst, wobei das PhK-Substrat einen zweiten Brechungsindex aufweist, wobei das Auswählen wenigstens eines geometrischen Merkmals Vergleichen eines Ausgangsspektrums, das sich an der optischen Ausgangsseite des PhK ergibt, mit einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe umfasst. Element 5: wobei der zweite Brechungsindex sich vom ersten Brechungsindex unterscheidet. Element 6: ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem von einem Measurement-while-Drilling-Werkzeug oder einem Logging-while-Drilling-Werkzeug. Element 7: ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem Wireline-Werkzeug.

[0095] Element 8: wobei das Herstellen der PhK-Struktur ferner Ermitteln einer PhK-Struktur mit einer Durchlassfunktion ähnlich der angepassten Durchlassfunktion umfasst. Element 9: wobei das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums der PhK-Struktur wenigstens eins von dem Modifizieren eines geometrischen Merkmals der PhK-Struktur, Modifizieren eines Brechungsindex eines Mediums in der PhK-Struktur, und Modifizieren eines Brechungsindex eines Substrats in der PhK-Struktur umfasst. Element 10: wobei die PhK-Struktur ein 2D-Substrat umfasst,

wobei das Verfahren ferner Auswählen eines Mittenabstands in einer Vielzahl von Öffnungen an dem 2D-Substrat auf Grundlage der entsprechenden Vorhersageleistung umfasst. Element 11: ferner umfassend Schätzen eines Detektorsignals aus einem Licht mit Interaktion, das von der PhK-Struktur durchgelassen wird, wobei das Auswählen eines gewünschten Durchlässigkeitsspektrums das Bestimmen umfasst, dass das Detektorsignal proportional zu einem Skalarprodukt zwischen dem Licht mit Interaktion und einem linearen Regressionsvektor im Zusammenhang mit der Charakteristik der analysierten Probe ist. Element 12: wobei das Herstellen der PhK-Struktur für das PhK-basierte ICE Auswählen wenigstens eines geometrischen Merkmals in einem PhK-Substrat, das in einem Medium eingebettet ist, auf Grundlage eines Vergleichs eines Ausgangsspektrums, das sich an einer optischen Ausgangsseite des PhK ergibt, mit einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe umfasst. Element 13: wobei das Auswählen des wenigstens einen geometrischen Merkmals Auswählen eines Durchmessers für eine Öffnung in einer Vielzahl von Öffnungen umfasst, die an dem PhK-Substrat gebildet sind. Element 14: ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem von einem Measurement-while-Drilling-Werkzeug oder einem Logging-while-Drilling-Werkzeug. Element 15: ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem Wireline-Werkzeug.

[0096] Element 16: wobei das Ausgangsspektrum ein Durchlässigkeitsspektrum von einer elektromagnetischen Strahlung ist, die von der optischen Eingangsseite zur optischen Ausgangsseite durchgelassen wird. Element 17: wobei das wenigstens eine geometrische Merkmal eins von einem Mittenabstand zwischen wenigstens zwei Öffnungen aus einer Vielzahl von Öffnungen, die in dem Substrat gebildet ist, einem ersten Durchmesser einer ersten Öffnung, die aus der Vielzahl von Öffnungen ausgewählt wird, und einem zweiten Durchmesser einer zweiten Öffnung, die aus der Vielzahl von Öffnungen ausgewählt wird, umfasst. Element 18: wobei das Substrat eine Vielzahl von Blöcken aus dielektrischem Material umfasst, die in einer dreidimensionalen (3D) Struktur mit einer Symmetrie an zwei im Wesentlichen orthogonalen Achsen angeordnet sind, und wobei das wenigstens eine geometrische Merkmal ein Blockdurchmesser ist. Element 19: wobei das Substrat eine Vielzahl von Materialschichten umfasst, die benachbart zueinander gestapelt sind, und jede der Vielzahl von Materialschichten eine Vielzahl von Öffnungen umfasst, die in dem Substrat gebildet ist, wobei die Vielzahl von Öffnungen in dem Substrat bei jeder Schicht im Wesentlichen das gleiche eine geometrische Merkmal ist, das zwischen benachbarten Schichten an einer Ebene der Schicht verlagert wurde. Element 20: wobei die Öffnungen kreisförmig sind und wobei ferner das wenigstens eine geometrische Merkmal ei-

nen Abstand zwischen benachbarten Schichten umfasst.

[0097] Als nicht einschränkendes Beispiel beinhalten beispielhafte Kombinationen für A, B und C: Element 4 mit Element 5; Element 12 mit Element 13; und Element 19 mit Element 20.

[0098] Daher eignet sich die vorliegende Offenbarung gut, um die genannten sowie darin inhärenten Ziele und Vorteile zu erreichen. Die jeweiligen offenbarten Ausführungsformen sind nur veranschaulichend, und die vorliegende Offenbarung kann in unterschiedlicher, aber äquivalenter Weise abgewandelt und ausgeübt werden, wie es für einschlägige Fachleute mit dem Vorteil der vorliegenden Lehren auf der Hand liegen wird. Darüber hinaus sind hinsichtlich der Einzelheiten der hier gezeigten Konstruktion oder Auslegung keine anderen Einschränkungen als die in den nachfolgenden Ansprüchen beschriebenen vorgesehen. Es ist somit deutlich, dass die oben offenbarten jeweiligen veranschaulichenden Ausführungsformen geändert, kombiniert oder abgewandelt werden können und dass alle derartigen Variationen als in den Umfang und Geist der vorliegenden Offenbarung fallend betrachtet werden. Die hier veranschaulichend offenbarte Offenbarung kann in geeigneter Weise unter Weglassung beliebiger Elemente, die hier nicht spezifisch offenbart wurden, und/oder beliebiger hier offenbarter fakultativer Elemente ausgeübt werden. Obwohl Zusammenstellungen und Verfahren als verschiedene Komponenten oder Schritte „umfassend“, „enthaltend“ oder „beinhaltend“ beschrieben wurden, können die Zusammenstellungen und Verfahren auch aus den verschiedenen Komponenten und Schritte „im Wesentlichen bestehen“ oder „bestehen“. Alle oben offenbarten Zahlen und Bereiche können um eine gewisse Menge variieren. Immer wenn ein numerischer Bereich mit einem unteren Grenzwert und einem oberen Grenzwert offenbart ist, ist auch jede Zahl und jeder darin enthaltene Bereich, die bzw. der in diesen Bereich fällt, ausdrücklich offenbart. Insbesondere gilt jeder hier offenbarte Wertebereich (der Form „von etwa a bis etwa b“ oder äquivalent „von ungefähr a bis b“ oder äquivalent „von ungefähr a–b“) als jede Zahl und jeden Bereich aufführend, die bzw. der in den breiter gefassten Wertebereich fällt. Außerdem tragen die Begriffe in den Ansprüchen ihre einfache, gewöhnliche Bedeutung, sowie nicht durch den Patentinhaber ausdrücklich und deutlich anders definiert. Die unbestimmten Artikel „ein“, „eine“, „einer“, „eines“, „einem“ in den Ansprüchen sind dabei derart definiert, dass sie ein oder mehr als eines der Elemente bezeichnen, denen sie vorangestellt sind. Falls ein Widerspruch in der Verwendung eines Worts oder Begriffs in dieser Beschreibung und einem oder mehreren Patent- oder anderen Dokumenten auftritt, die durch Querverweis einbezogen wurden, sind die

Definitionen in Übereinstimmung mit dieser Beschreibung anzuwenden.

Patentansprüche

1. Verfahren, umfassend:

Auswählen einer photonischen Kristall(PhK)-Struktur mit einer Auslegungssammlung, die in einem nicht transitorischen, computerlesbaren Medium gespeichert ist;
Erlangen eines Durchlässigkeitsspektrums für die PhK-Struktur;
Bestimmen einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten integrierten Rechenelements (ICE) für eine Charakteristik einer Probe mit dem Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank von Spektren für kalibrierte Proben;
Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung; und
Herstellen der PhK-Struktur für das PhK-basierte ICE, wenn die Vorhersageleistung einen im Voraus ausgewählten Schwellenwert überschreitet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Herstellen der PhK-Struktur ferner Ermitteln einer PhK-Struktur mit einer Durchlassfunktion ähnlich der angepassten Durchlassfunktion umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung eins von dem Reduzieren eines Vorhersagefehlers, Reduzieren eines Standardkalibrierungsfehlers, Reduzieren eines Standardvorhersagefehlers, Erhöhen einer Empfindlichkeit, Erhöhen einer Flanke einer Kalibrierungskurve, Erhöhen eines Signal-Rausch-Verhältnisses und Erhöhen eines mittleren optischen Durchlasswerts, geprüft anhand eines bekannten Werts für die Charakteristik der Probe umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums zum Verbessern der Vorhersageleistung eins von dem Verlagern einer Zentralwellenlänge eines Durchlassbereichs einer elektromagnetischen Strahlung, die durch die PhK-Struktur durchgelassen wird, Erhöhen eines Durchlassdynamikbereichs des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung, die durch die PhK-Struktur durchgelassen wird, und Anpassen der Bandbreite des Durchlassbereichs der elektromagnetischen Strahlung, die durch die PhK-Struktur durchgelassen wird, umfasst.

5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Auswählen einer PhK-Struktur ferner Folgendes umfasst:
Auswählen einer optischen Eingangsseite und einer optischen Ausgangsseite der PhK-Struktur;
Auswählen eines PhK-Mediums mit einem ersten Brechungsindex; und

Auswählen wenigstens eines geometrischen Merkmals in einem PhK-Substrat, das in dem Medium eingebettet ist, wobei das PhK-Substrat einen zweiten Brechungsindex aufweist, wobei das Auswählen wenigstens eines geometrischen Merkmals Vergleichen eines Ausgangsspektrums, das sich an der optischen Ausgangsseite des PhK ergibt, mit einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe umfasst.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der zweite Brechungsindex sich vom ersten Brechungsindex unterscheidet.

7. Verfahren nach Anspruch 1, ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem von einem Measurement-while-Drilling-Werkzeug oder einem Logging-while-Drilling-Werkzeug.

8. Verfahren nach Anspruch 1, ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem Wireline-Werkzeug.

9. Verfahren, umfassend:

Auswählen eines gewünschten Durchlässigkeitsspektrums für ein integriertes Rechenelement (ICE); Identifizieren einer photonischen Kristall(PhK)-Struktur mit einem Durchlässigkeitsspektrum, das mit dem gewünschten Durchlässigkeitsspektrum vergleichbar ist;

Erlangen des Durchlässigkeitsspektrums für die PhK-Struktur;

Bestimmen einer Vorhersageleistung eines PhK-basierten ICE für eine Charakteristik einer Probe mit dem erlangten Durchlässigkeitsspektrum und einer Datenbank von Spektren für kalibrierte Proben;

Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums der PhK-Struktur zum Verbessern der Vorhersageleistung des PhK-basierten ICE; und

Herstellen der PhK-Struktur für das PhK-basierte ICE, wenn die Vorhersageleistung einen im Voraus ausgewählten Schwellenwert überschreitet.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei das Herstellen der PhK-Struktur ferner Ermitteln einer PhK-Struktur mit einer Durchlassfunktion ähnlich der angepassten Durchlassfunktion umfasst.

11. Verfahren nach Anspruch 9, wobei das Anpassen des Durchlässigkeitsspektrums der PhK-Struktur wenigstens eins von dem Modifizieren eines geometrischen Merkmals der PhK-Struktur, Modifizieren eines Brechungsindex eines Mediums in der PhK-Struktur und Modifizieren eines Brechungsindex eines Substrats in der PhK-Struktur umfasst.

12. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die PhK-Struktur ein 2D-Substrat umfasst, wobei das Verfahren ferner Auswählen eines Mittenabstands in ei-

ner Vielzahl von Öffnungen an dem 2D-Substrat auf Grundlage der entsprechenden Vorhersageleistung umfasst.

13. Verfahren nach Anspruch 9, ferner umfassend Schätzen eines Detektorsignals aus einem Licht mit Interaktion, das von der PhK-Struktur durchgelassen wird, wobei das Auswählen eines gewünschten Durchlässigkeitsspektrums das Bestimmen umfasst, dass das Detektorsignal proportional zu einem Skalarprodukt zwischen dem Licht mit Interaktion und einem linearen Regressionsvektor im Zusammenhang mit der Charakteristik der analysierten Probe ist.

14. Verfahren nach Anspruch 9, wobei das Herstellen der PhK-Struktur für das PhK-basierte ICE Auswählen wenigstens eines geometrischen Merkmals in einem PhK-Substrat, das in einem Medium eingebettet ist, auf Grundlage eines Vergleichs eines Ausgangsspektrums, das sich an einer optischen Ausgangsseite des PhK ergibt, mit einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe umfasst.

15. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Auswählen des wenigstens einen geometrischen Merkmals Auswählen eines Durchmessers für eine Öffnung in einer Vielzahl von Öffnungen umfasst, die an dem PhK-Substrat gebildet sind.

16. Verfahren nach Anspruch 9, ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem von einem Measurement-while-Drilling-Werkzeug oder einem Logging-while-Drilling-Werkzeug.

17. Verfahren nach Anspruch 9, ferner umfassend Konfigurieren des PhK-basierten ICE für einen Sensor in einem Wireline-Werkzeug.

18. Integriertes Rechenelement (ICE), umfassend: eine photonischen Kristall(PhK)-Struktur mit einer optischen Eingangsseite, die dazu konfiguriert ist, Licht mit Interaktion aufzunehmen, und einer optischen Ausgangsseite, die dazu konfiguriert ist, einen optischen Ausgang zu empfangen, wobei der PhK Folgendes umfasst:

ein Medium mit einem ersten Brechungsindex; und ein Substrat, das in das Medium eingebettet ist, wobei das Substrat einen zweiten Brechungsindex und wenigstens ein geometrisches Merkmal aufweist, wobei

das wenigstens eine geometrische Merkmal auf Grundlage eines Ausgangsspektrums ausgewählt ist, das sich aus der optischen Ausgangsseite ergibt, und wobei

der optische Ausgang eine Amplitude aufweist, die proportional zu einem Skalarprodukt des Lichts mit

Interaktion und einem Regressionsvektor für eine Charakteristik einer analysierten Probe ist.

19. ICE nach Anspruch 18, wobei das Ausgangsspektrum ein Durchlässigkeitsspektrum von einer elektromagnetischen Strahlung ist, die von der optischen Eingangsseite zur optischen Ausgangsseite durchgelassen wird.

20. ICE nach Anspruch 18, wobei das wenigstens eine geometrische Merkmal eins von einem Mittenabstand zwischen wenigstens zwei Öffnungen aus einer Vielzahl von Öffnungen, die in dem Substrat gebildet ist, einem ersten Durchmesser einer ersten Öffnung, die aus der Vielzahl von Öffnungen ausgewählt wird, und einem zweiten Durchmesser einer zweiten Öffnung, die aus der Vielzahl von Öffnungen ausgewählt wird, umfasst.

21. ICE nach Anspruch 18, wobei das Substrat eine Vielzahl von Blöcken aus dielektrischem Material umfasst, die in einer dreidimensionalen (3D) Struktur mit einer Symmetrie an zwei im Wesentlichen orthogonalen Achsen angeordnet sind, und wobei das wenigstens eine geometrische Merkmal ein Blockdurchmesser ist.

22. ICE nach Anspruch 18, wobei das Substrat eine Vielzahl von Materialschichten umfasst, die benachbart zueinander gestapelt sind, und jede der Vielzahl von Materialschichten eine Vielzahl von Öffnungen umfasst, die in dem Substrat gebildet ist, wobei die Vielzahl von Öffnungen in dem Substrat bei jeder Schicht im Wesentlichen das gleiche eine geometrische Merkmal ist, das zwischen benachbarten Schichten an einer Ebene der Schicht verlagert wurde.

23. ICE nach Anspruch 22, wobei die Öffnungen kreisförmig sind und wobei ferner das wenigstens eine geometrische Merkmal einen Abstand zwischen benachbarten Schichten umfasst.

Es folgen 12 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

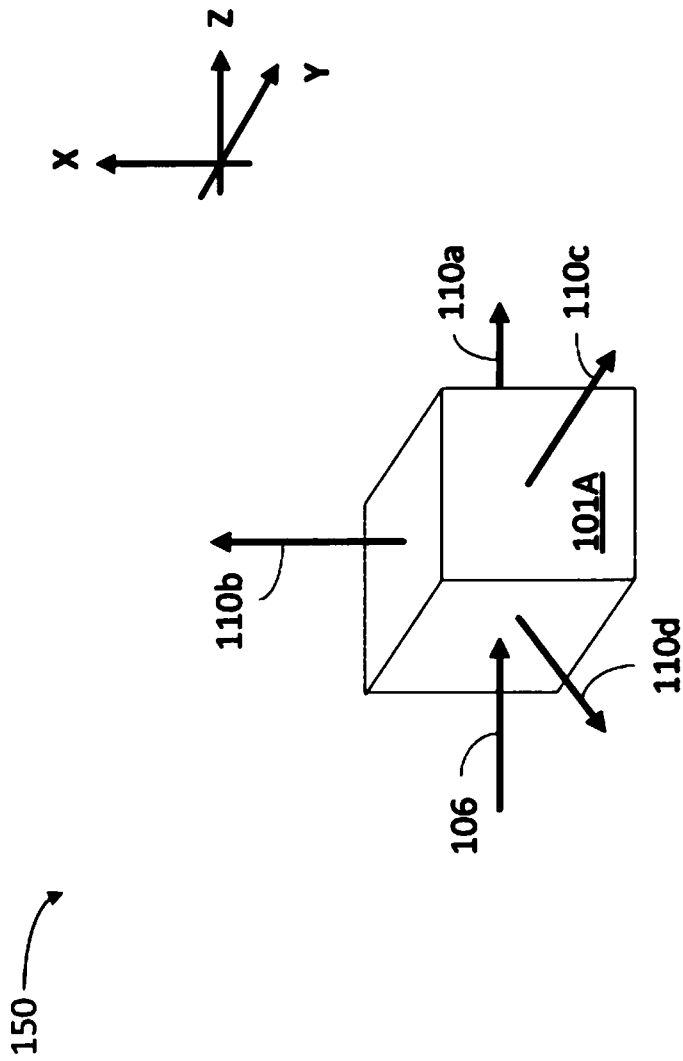


FIG. 1A

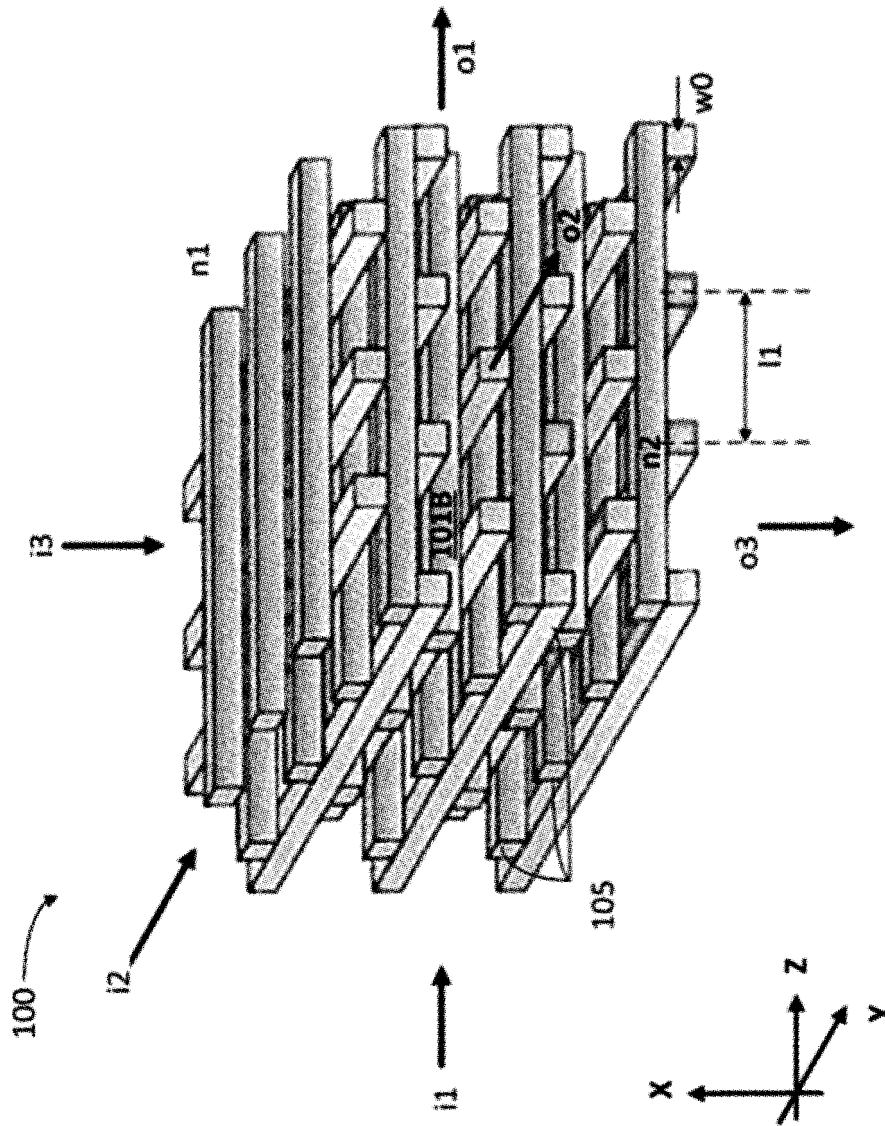


FIG. 1B

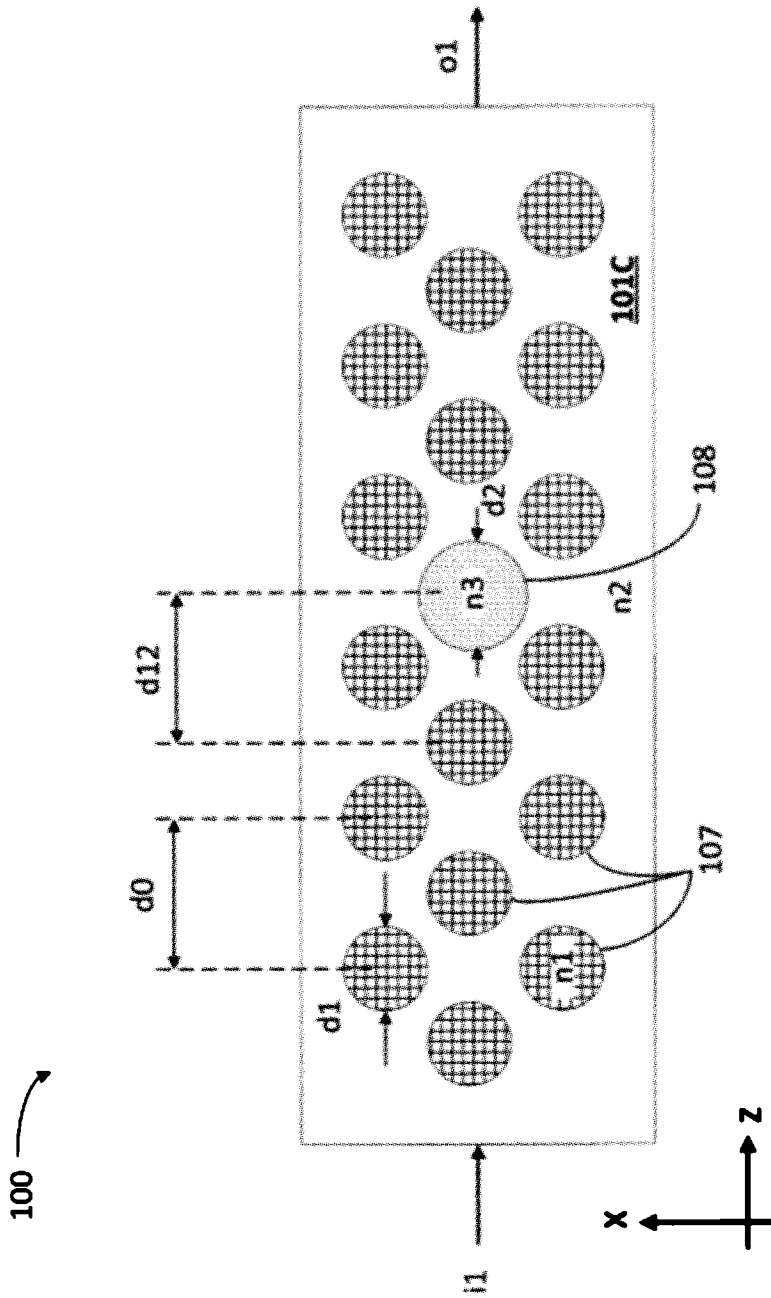


FIG. 1C

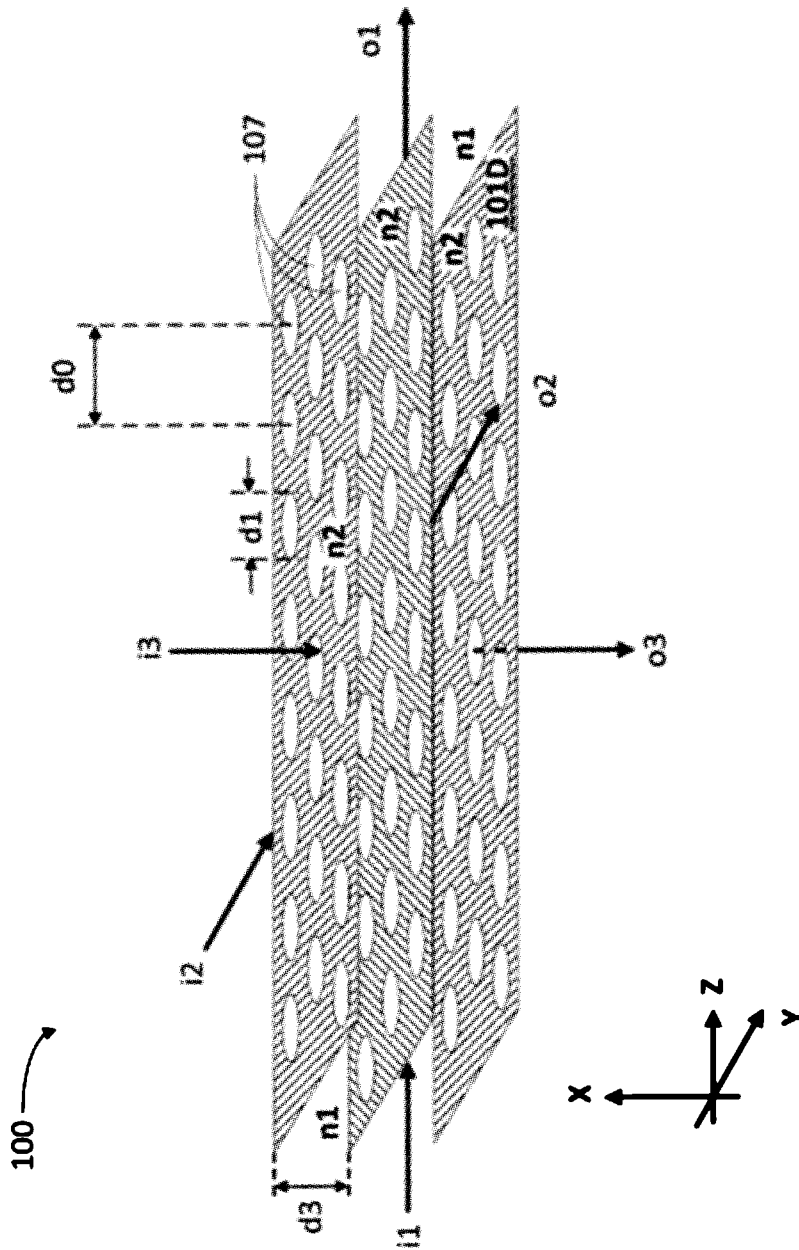


FIG. 1D

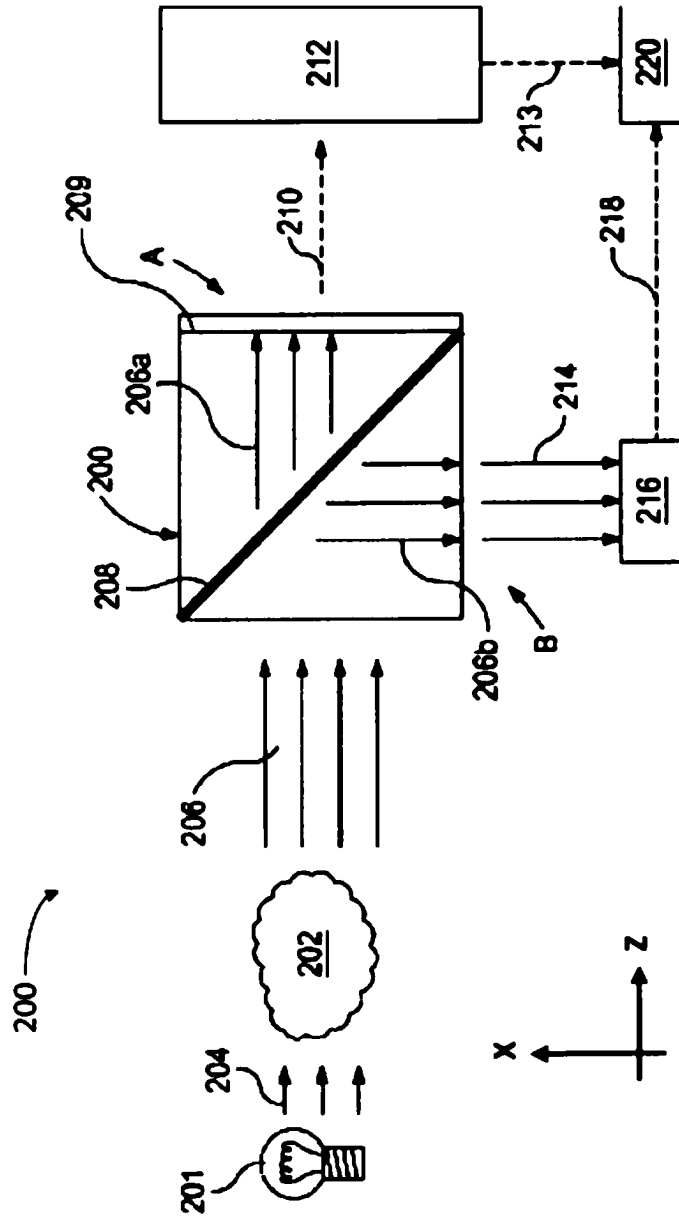


FIG. 2

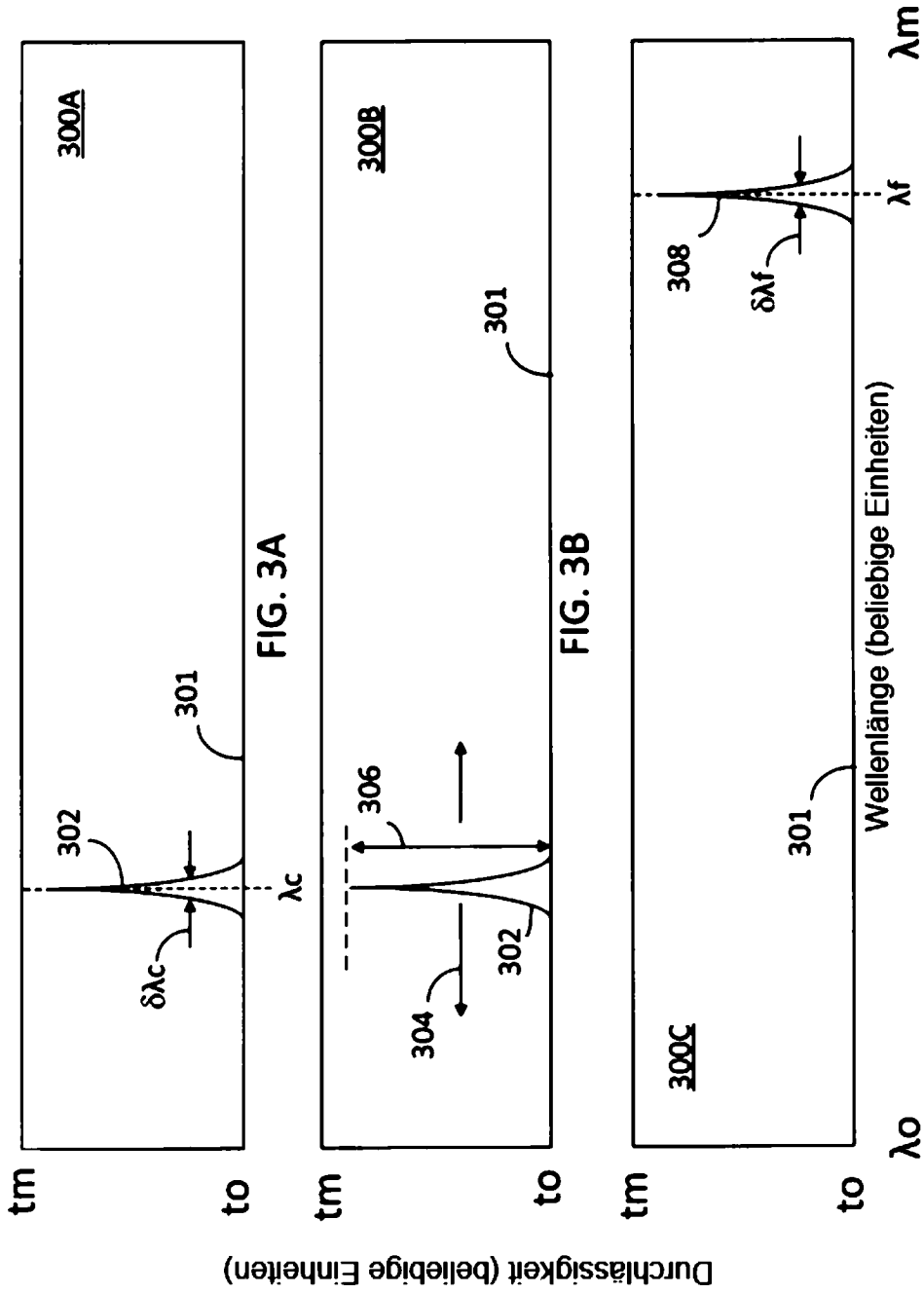
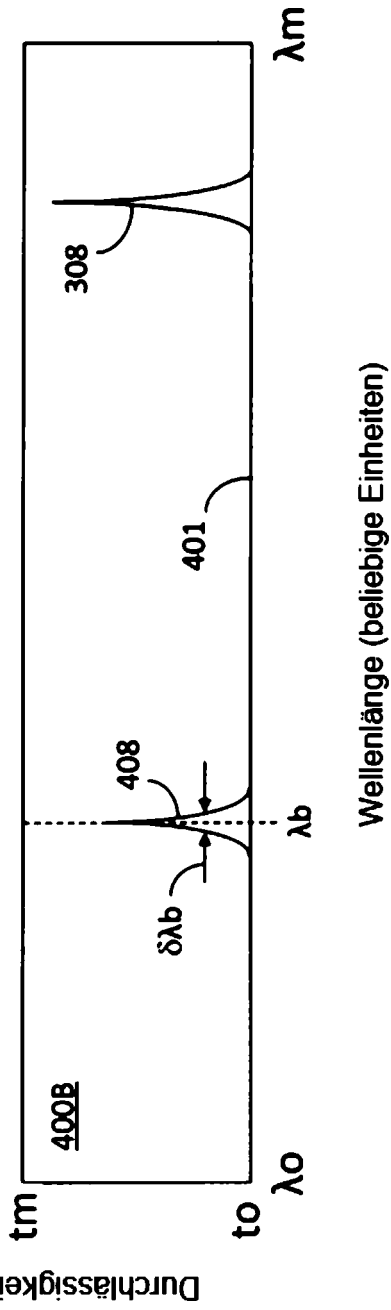
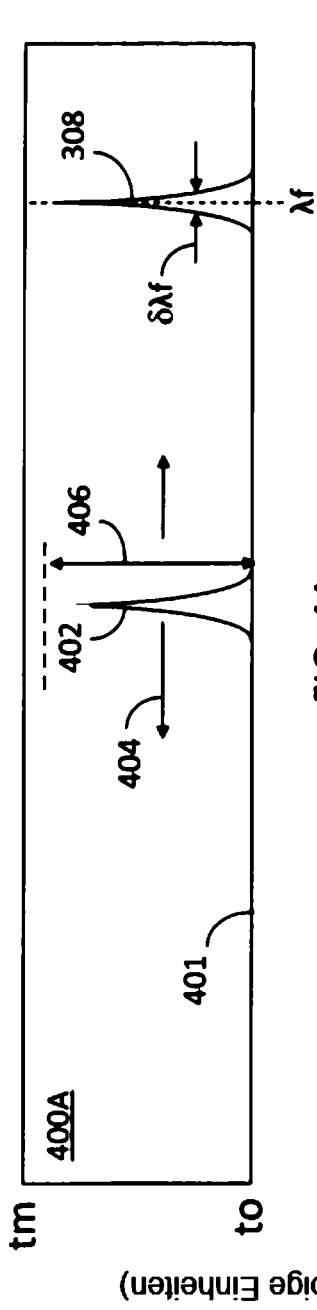


FIG. 3C



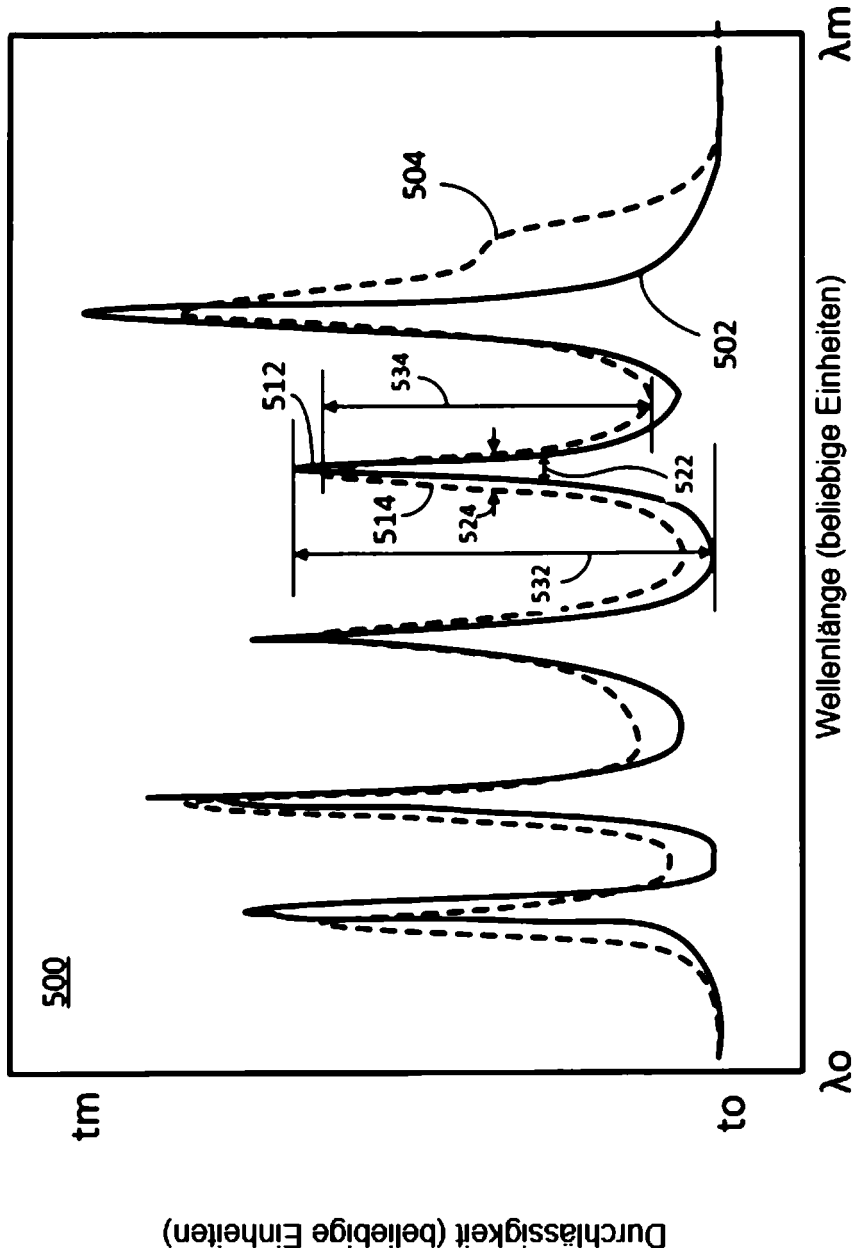


FIG. 5

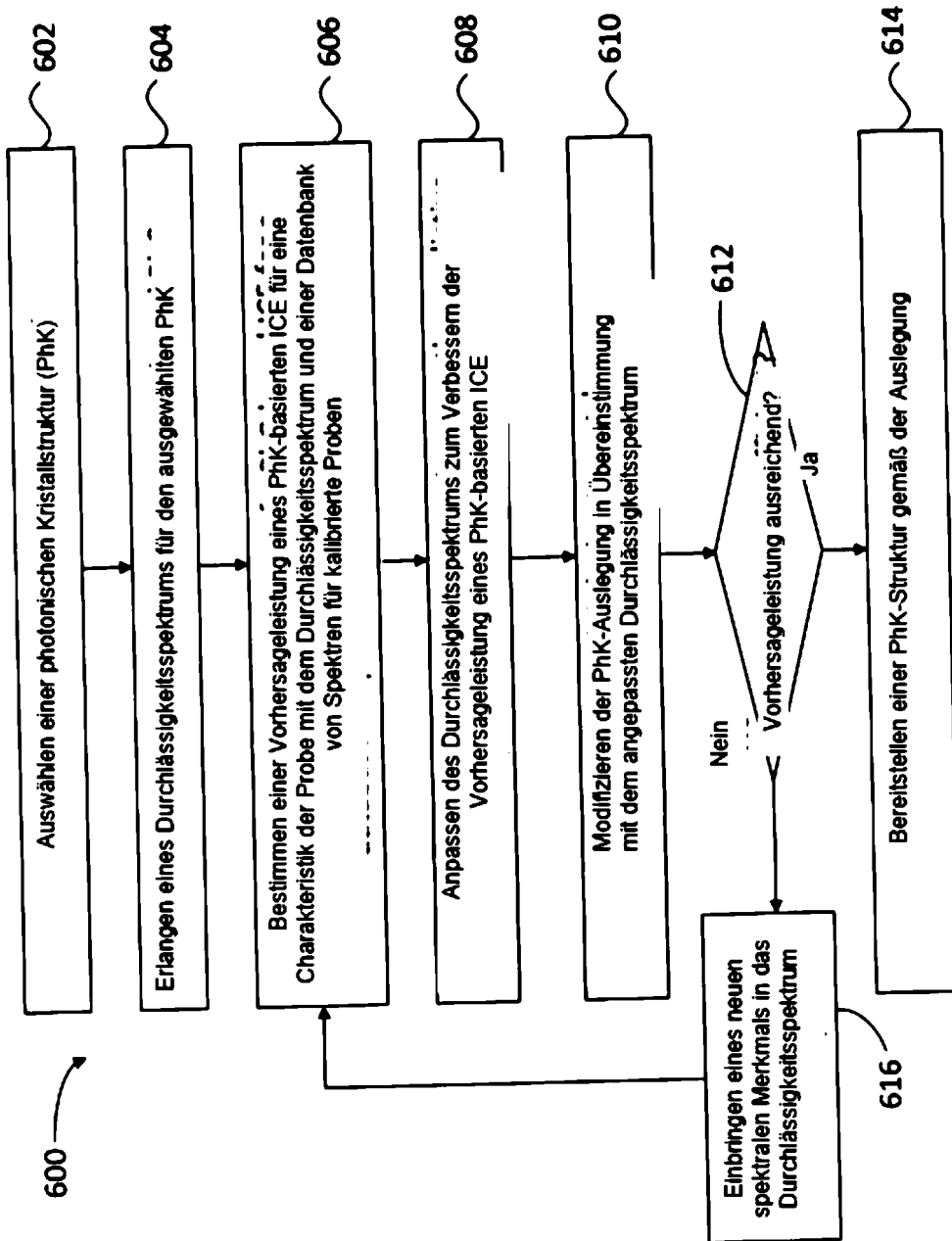


FIG. 6

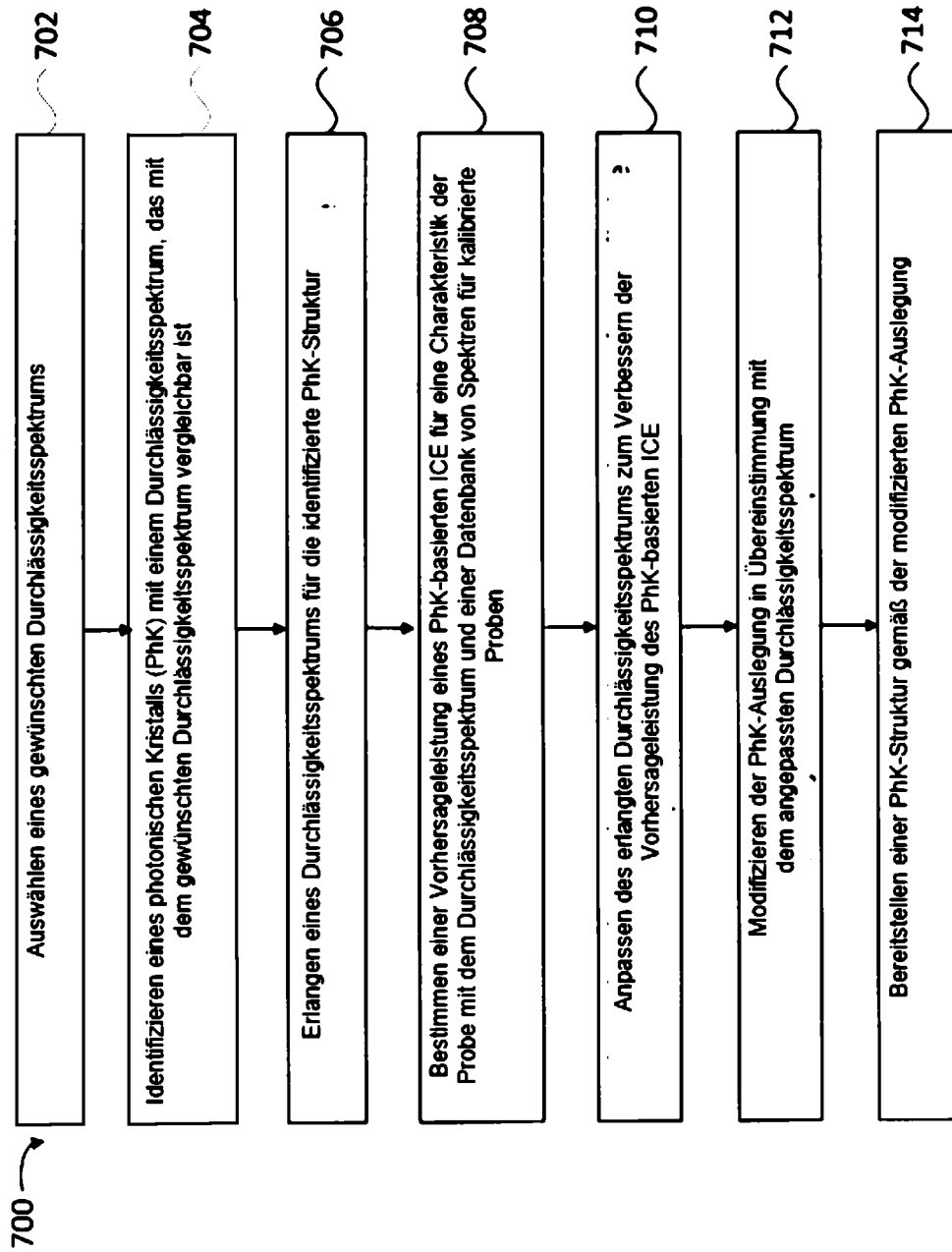


FIG. 7

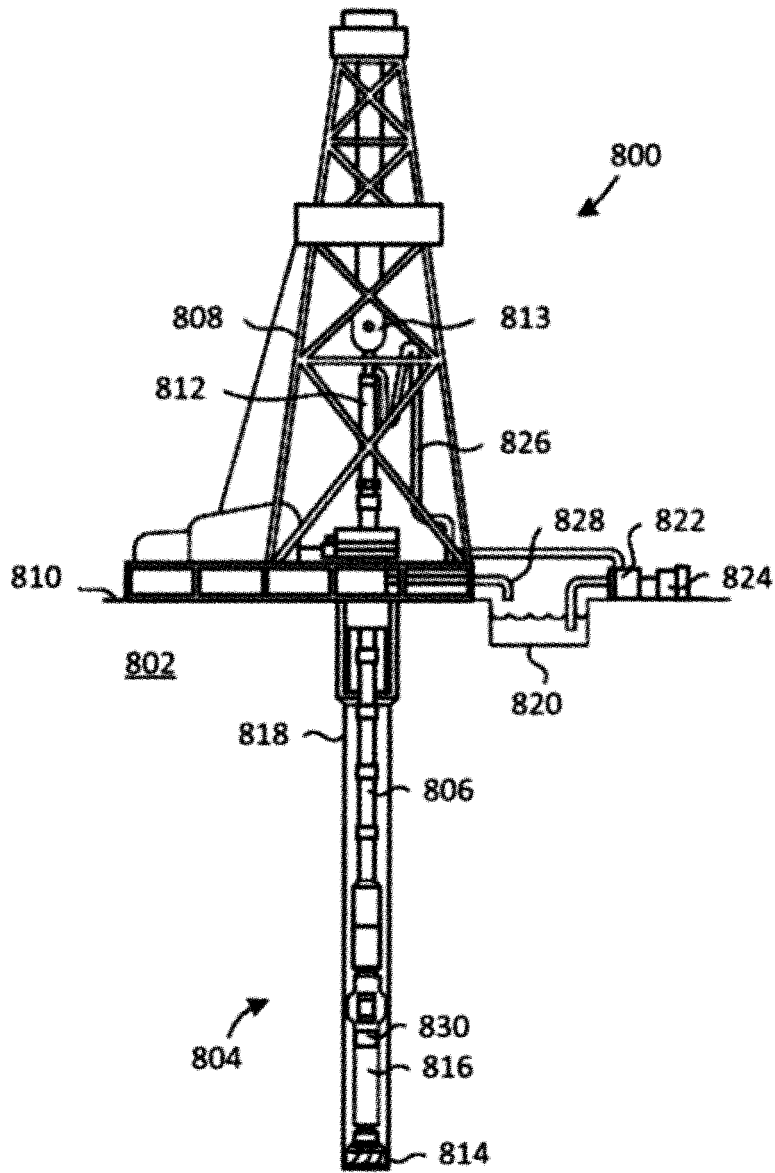


FIG. 8

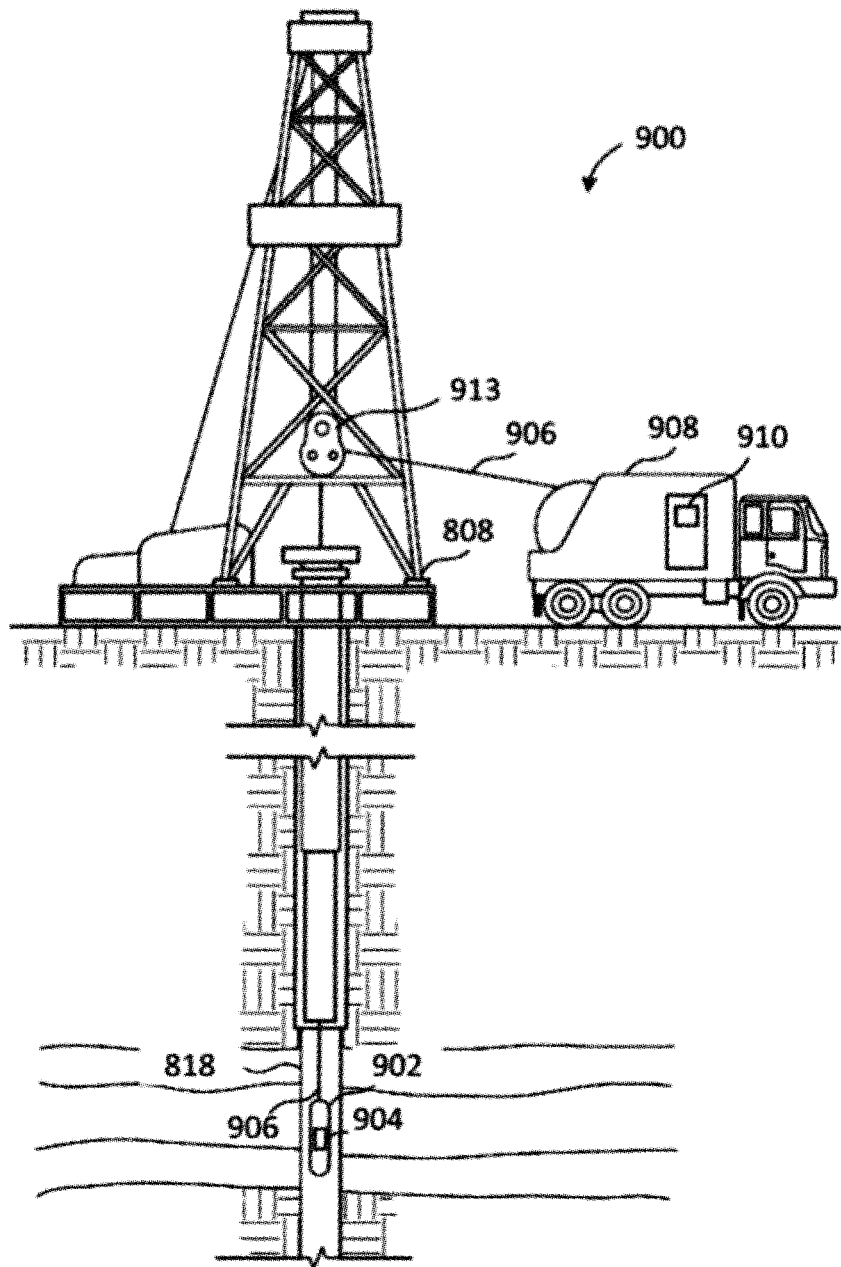


FIG. 9