



(10) **DE 10 2009 003 640 B4** 2020.06.18

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 003 640.7**

(22) Anmeldetag: **18.03.2009**

(43) Offenlegungstag: **24.09.2009**

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **18.06.2020**

(51) Int Cl.: **G01R 15/24** (2006.01)

G01R 19/00 (2006.01)

F03D 17/00 (2016.01)

B64D 45/02 (2006.01)

B81B 7/02 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
12/051,290 19.03.2008 US

(73) Patentinhaber:
General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(74) Vertreter:
**Zimmermann & Partner Patentanwälte mbB,
80331 München, DE**

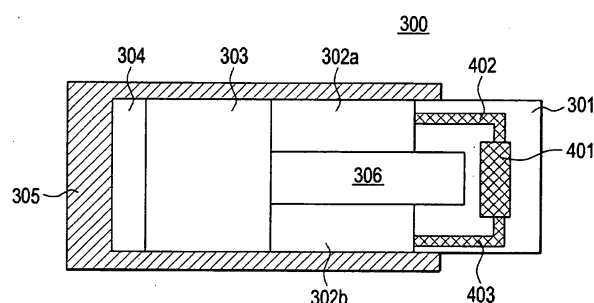
(72) Erfinder:
**Kraemer, Sebastian Gerhard Maxim, 81677
München, DE; Hernandez, Yaru Najem Mendez,
80939 München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2005 / 0 007 093	A1
US	5 502 373	A

(54) Bezeichnung: **Mikroelektromechanische Strommessvorrichtung**

(57) Hauptanspruch: Mikro-elektromechanische (MEMS) Strommessvorrichtung, aufweisend: einen Trägerabschnitt (306); einen optischen Abschnitt (301), der auf dem Trägerabschnitt (306) angeordnet ist, wobei der optische Abschnitt (301) einen optischen Pfad (402, 403) und ein magnetosensitives Element (401) in dem optischen Pfad (402, 403) enthält; eine Lichtquelle (302a), die auf dem Trägerabschnitt (306) in funktioneller Kommunikation mit einem ersten Ende des optischen Pfades (402) angeordnet ist; und einen Photodetektor (302b), der auf dem Trägerabschnitt (306) in funktioneller Kommunikation mit einem zweiten Ende des optischen Pfades (302b) angeordnet ist; und wobei in dem optischen Abschnitt (301) optische Wellenleiter (402) und (403) angeordnet sind, die den optischen Pfad bereitstellen, so dass Licht zu/von der Lichtquelle bzw. dem Photodetektor wandern kann.



Beschreibung**HINTERGRUND DER ERFINDUNG**

[0001] Die vorliegende Offenbarung betrifft allgemein die Strommessung, und insbesondere mikroelektromechanische (MEMS)-Strommessvorrichtungen.

[0002] Im Wesentlichen sind Magnetfeldmessvorrichtungen zur Stoß- und/oder Impulsstromregistrierung auf Halbleiter basierende Systeme unter Einsatz von Schleifenantennen, Rogowski-Spulen (oder magnetische Karten) beschränkt. Die Schleifenantennen detektieren eine Änderung in dem magnetischen Feld, welche zu einer Spannungsänderung führt, indem sie die Spannung an den Anschlüssen an den Antennen registrieren. Jedoch haben Antennen und Magnetkarten Einschränkungen dahingehend, dass die Vorrichtungen sehr empfindlich gegen elektromagnetische Störung (EMI) sind. Auch Rogowski-Spulen zeigen Einschränkungen bezüglich der Bandbreite für Strommessungen und Magnetfeldmessungen.

[0003] Ferner sind diese Vorrichtungen schwierig in Anwendungen zu integrieren, die mit Blitzdetektion in Flugzeugen, Türmen oder turmartigen Strukturen zu tun haben. Beispielsweise hat eine Windkraftanlage ein turmartiges Aussehen und einen solchen Aufbau und enthält Flügel, die sich in regelmäßigen Intervallen nach oben erstrecken. Auch ein Flugzeug hat beispielsweise Flügel (Tragflächen), welche sich aus der Hauptstruktur (Rumpf) in regelmäßigen Intervallen erstrecken. Zusätzlich kann eine Windkraftanlage geerdet sein und ist sowohl gegen Blitzschlag als auch EMI empfindlich. Da Antennen, Rogowski-Spulen und Magnetkarten Einschränkungen in Anwendungen in Verbindung mit EMI haben, kann deren Brauchbarkeit in Windkraftanlagenanwendungen verringert sein.

[0004] US 5502373A offenbart einen magneto-optischen Strommessapparat. US 2005/0007093A1 offenbart eine Strommesstechnik und einen Strommessapparat.

KURZBESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0005] Eine mikroelektromechanische Strommessvorrichtung weist einen Trägerabschnitt, einen auf dem Trägerabschnitt angeordneten optischen Abschnitt, wobei der optische Abschnitt einen optischen Pfad und ein magnetosensitives Element in dem optischen Pfad enthält, eine auf dem Trägerabschnitt in funktioneller Kommunikation mit einem ersten Ende des optischen Pfades angeordnete Lichtquelle, und einen auf dem Trägerabschnitt in funktioneller Kommunikation mit einem zweiten Ende des optischen Pfades angeordneten Photodetektor auf.

[0006] Diese und weitere Aufgaben, Vorteile und Merkmale der Erfindung werden besser aus der detaillierten Beschreibung der Erfindung verständlich, die in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen beschrieben wird.

Figurenliste

[0007] Diese und weitere Merkmale, Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden besser verständlich, wenn die nachstehende detaillierte Beschreibung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen gelesen wird, in welchen gleiche Bezugszeichen gleiche Elemente durchgängig durch die Zeichnungen bezeichnen, wobei:

Fig. 1: ein Beispiel einer optischen Stromsensorvorrichtung gemäß einer Beispielausführungsform darstellt;

Fig. 2: ein Beispiel einer optischen Stromsensorvorrichtung gemäß einer weiteren Beispielausführungsform darstellt;

Fig. 3 einen Querschnitt einer MEMS-Strommessvorrichtung gemäß einer Beispielausführungsform darstellt;

Fig. 4 eine Übersichtsansicht einer MEMS-Strommessvorrichtung gemäß einer Beispielausführungsform darstellt;

Fig. 5 ein Beispiel einer Windkraftanlagenanwendung einer MEMS-Strommessvorrichtung gemäß einer Beispielausführungsform darstellt;

Fig. 6 ein Beispiel einer Flugzeuganwendung einer MEMS-Strommessvorrichtung gemäß einer Beispielausführungsform darstellt;

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0008] Detaillierte veranschaulichende Ausführungsformen werden hierin offenbart. Jedoch sind die hierin offenbarten spezifischen funktionalen Details lediglich für die Zwecke einer Beschreibung von Beispielausführungsformen repräsentativ. Beispielausführungsformen können jedoch in vielen alternativen Formen verkörpert werden und sollten nicht als nur auf die hierin dargestellten Ausführungsformen beschränkt betrachtet werden.

[0009] Demzufolge werden, obwohl Beispielausführungsformen zu verschiedenen Modifikationen und alternativen Formen fähig sind, Ausführungsformen davon nur im Rahmen eines Beispiels in den Zeichnungen dargestellt und hierin im Detail beschrieben. Es dürfte sich jedoch verstehen, dass keine Absicht vorliegt, Beispielausführungsformen auf die hierin offenbarten speziellen Formen zu beschränken, sondern dass im Gegenteil Beispielausführungsformen alle Modifikationen, Äquivalente und Alternativen, die in den Schutzzumfang der Beispielausführungsformen fallen, abdecken sollen.

[0010] Es dürfte sich verstehen, dass, obwohl die Begriffe „erster, zweiter, usw.“ hierin zum Beschreiben verschiedener Formen oder Modelle verwendet werden können, diese Formen oder Modelle nicht auf diese Begriffe begrenzt sein sollen. Diese Begriffe werden nur zum Unterscheiden einer Form oder eines Modells von einem anderen verwendet. Beispielsweise könnte eine erste Form als eine zweite Form bezeichnet werden und ebenso könnte ein zweites Modell als erstes Modell bezeichnet werden, ohne von dem Schutzzumfang dieser Offenbarung abzuweichen. So wie hierin verwendet, beinhaltet der Begriff „und/oder“ und das „/-“-Symbol irgendeine oder alle Kombinationen von einem oder mehreren den zugeordneten aufgelisteten Elementen.

[0011] So wie hierin verwendet, sollen die Singularformen „ein, einer, eine, eines“ und „der, die, das“ auch die Pluralformen mit umfassen, soweit es der Zusammenhang nicht deutlich anderweitig anzeigt. Es dürfte sich auch verstehen, dass die Begriffe „aufweisen“, „aufweisend“, „enthält“, und/oder „enthaltend“, wenn sie hierin verwendet werden, das Vorliegen festgestellter Merkmale, ganzzahliger Einheiten, Schritte, Operationen, Elemente und/oder Komponenten spezifizieren, aber nicht das Vorliegen oder den Zusatz von einem oder mehreren anderen Merkmalen, ganzzahligen Einheiten, Schritten, Operationen, Elementen, Komponenten und/oder Gruppen davon ausschließen. Daher dient die hierin verwendete Terminologie nur dem Zweck der Beschreibung spezieller Ausführungsformen und soll nicht Beispielausführungsformen beschränken.

[0012] Hierin nachstehend werden Beispielausführungsformen der vorliegenden Offenbarung im Detail beschrieben. Gemäß Beispielausführungsformen wird ein in eine MEMS-Struktur integriertes Strommesselement offenbart. Die Strommessprinzipien des MEMS-Elementes basieren auf einem Faraday-Effekt in einem optischen Kristall oder einem anderen optischen Medium (z.B. einer optischen Faser). Gemäß wenigstens einer exemplarischen Ausführungsform können ein(e) MEMS-Strommesselement/Vorrichtung eine Energiequelle, eine Lichtquelle, ein magnetosensitives Material, einen Photodetektor, eine Signalverarbeitungs-/ Speichereinheit, und/oder eine Kommunikationseinheit enthalten, obwohl einige von diesen Komponenten weggelassen oder getrennt gemäß irgendeiner speziellen Implementation integriert sein können. Das relativ kleine Element kann in der Nähe eines Leiters angeordnet werden, um Blitzschlag- und/oder AC-gepulste Stromereignisse durch Messen des Magnetfeldes zu registrieren, das durch den Strom in dem Leiter induziert wird. Die Daten können zur Übertragung nach dem Ereignis oder (im Wesentlichen zur selben Zeit wie das Ereignis) an eine von dem Strommesselement abgesetzte Systemsteuereinheit gespeichert werden. Die Vorrichtung kann mit zusätzlichen Einrichtungen auf der MEMS-Struktur, wie z.B. Beschleunigungsmessern, Dehnungsmesssensoren, und/oder Temperaturmesselementen ausgestattet sein. Um das Magnetfeld in mehreren Dimensionen zu messen, kann der optische Anteil des Sensors multiplexiert sein.

[0013] Eine Anwendung von Strommesselementen kann die Blitzschlag- und/oder Stoßstromdetektion sein. Blitzschlagstrommesssysteme können ein breites Frequenzspektrum und einen großen Messbereich erfordern und können gegen elektromagnetische Störung (EMI) isoliert oder dagegen resistent sein müssen. Faseroptische Stromsensoren (FOCS) können diese Spezifikationen erfüllen. FOCS beruhen auf magnetoptischen Effekten, in welchen optische Eigenschaften von Materialien durch Magnetfelder oder durch die eigene Magnetisierung des Materials beeinflusst werden. FOCS sind in Bezug auf EMI robust, da das durch den Strom bewirkte magnetische Feld in ein optisches Signal in einem Element mit kleinen Abmessungen umgewandelt werden kann. Somit wird das elektrisch Signalrauschen nicht an eine Datenerfassungseinheit übertragen. Wei-

tere Aufgaben von FOCS sind neben dem verringerten Gewicht, dass der Sensor nicht durch einen aus einem unerwarteten durch einen Blitzschlag oder großem Stromereignis ausgelösten Stoßstrom beschädigt werden kann. Abhängig von den angewendeten optischen Materialien können unterschiedliche Konfigurationen auf der Basis des Faraday-Effektes so wie hierin offenbart, implementiert werden.

[0014] In Fig. 1 ist eine exemplarische optische Strömmessvorrichtung **100** dargestellt. Die Vorrichtung **100** enthält einen ersten Polarisator **101** und einen zweiten Polarisator **102**. Der erste Polarisator **101** ist an einem Anfangsabschnitt einer optischen Faser **103** positioniert, und der zweite Polarisator **102** ist an einem Endabschnitt der optischen Faser **103** positioniert. Die optische Faser **103** ist um wenigstens einen Leiter **104** gewickelt. Der Winkel θ , um welchen sich die Polarisationssebene des Lichtes in der Faser bei Vorliegen eines durch den Strom I in den Leiter **104** induzierten magnetischen Feldes, dreht, ist durch die nachstehende Gleichung 1 gegeben.

$$\theta = VNI \quad \text{Gleichung 1:}$$

[0015] In der Gleichung 1 bezeichnet V die Verdet-Konstante des magnetooptischen Materials (z.B. der optischen Faser), N bezeichnet die Anzahl der Windungen der optischen Faser **103**, und I bezeichnet einen durch den Leiter **104** fließenden Strom. Um ein hohes Signal/Rausch-Verhältnis in dem Ausgangssignal zu erhalten, können einige Umdrehungen N der optischen Faser um den Leiter **104** erforderlich sein, und unterschiedliche optische Pfade und Lichtdrehungs-Detektionsverfahren können angewendet werden, um externe Effekte zu verringern und/oder zu eliminieren.

[0016] Derzeit gibt es Fasern mit relativ großer Verdet-Konstante, aber es kann aber ein langer Ausbreitungspfad (z.B. eines großes N) erforderlich sein, um messbare Effekte zu erzielen. Jedoch kann die Verwendung von optischen Fasern als ein Sensor in einigen Anwendungen unpraktisch sein, da es nicht immer möglich ist, die Faserspule um einen Leiter zu wickeln. Ein weiterer Nachteil eines Nur-Faser-Sensors besteht darin, dass in einigen Anwendungen der Leiter nicht kleiner als 4 bis 5 cm im Durchmesser sein kann. Eine Verletzung dieser Bedingung führt typischerweise zu einer relativ großen Temperaturempfindlichkeit. Zusätzlich können eine durch Biegungen in der optischen Faser aufgrund interner Spannungen verursachte lineare Doppelbrechung sowie intrinsische Doppelbrechungen in Faserstromsensoren zunehmend signifikant werden.

[0017] Jedoch sind exemplarische Ausführungsformen nicht auf Stromsensoren beschränkt, welche vollständig aus einer optischen Faser bestehen. Gemäß einigen exemplarischen Ausführungsformen können optisch transparente oder durchscheinende ferrimagnetische Materialien verwendet werden. Beispielsweise zeigen optisch transparente ferrimagnetische oder ferromagnetische Kristallmaterialien eine große Verdet-Konstante und somit eine höhere Empfindlichkeit aufgrund eines vergrößerten Drehungswinkels pro Längeneinheit. Ferrimagnetische Eisengranatkristalle zeigen eine magnetooptische Empfindlichkeit, die um Größenordnung als die von typischen paramagnetischen und diamagnetischen Materialien ist. In Yttrium-Eisengranat (YIG) können Empfindlichkeiten von angenähert 0,3 mT, mit 500+ MHz Bandbreite in flussgezogenen Stäben von 1 mm Durchmesser und 5 mm Länge erhalten werden. Ersatzgranate, wie z.B. Ga:YIG zeigen größere Empfindlichkeiten, jedoch oft mit niedrigeren Resonanzfrequenzen, die die Bandbreite verringern können.

[0018] Um exemplarische Ausführungsformen mit ferrimagnetischen Materialien besser zu verstehen, erfolgt hierin nachstehend eine Beschreibung des allgemeinen Faraday-Effektes, des Faraday-Effektes in ferrimagnetischen Materialien und einer exemplarischen Strömmessvorrichtung, die einen ferrimagnetischen Block wie hierin nachstehend angegeben enthält.

[0019] Der Faraday-Effekt kann im Wesentlichen aus der Drehung der Polarisationssebene von linear polarisiertem Licht beim Austritt aus einem Medium bei einem in Längsrichtung angelegten magnetischen Feld bestehen. Bei diamagnetischen und paramagnetischen Materialien tritt linear polarisiertes Licht, das in der Richtung des magnetischen Feldes wandert, mit einer Nettodrehung θ aus, sodass die nachstehende Gleichung 2 erfüllt ist.

$$\theta(\lambda, T) = V(\lambda, T) \int H dl \quad \text{Gleichung 2}$$

[0020] In der Gleichung 2 bezeichnet θ den gemessenen Drehungswinkel des elektrischen Feldes des austretenden Lichtes, λ bezeichnet die Freiraumwellenlänge des austretenden Lichtes, T bezeichnet die Umgebungstemperatur, V bezeichnet die Verdet-Konstante des magnetooptischen Materials und H bezeichnet die Magnetfeldintensität entlang dem Ausbreitungspfad.

[0021] Im Gegensatz zur optischen Aktivität, bei der die Drehungsrichtung direkt in Bezug zur Ausbreitungsrichtung steht, ist der Faraday-Effekt nicht-reziprok. Die Drehung ist hauptsächlich auf das Magnetfeld bezogen, sodass eine Reflexion von Licht zurück auf sich selbst die Drehung verdoppelt, was eine nützliche Eigenschaft insbesondere für FOCS- unter Verwendung von Faserspulen als Messelement sein kann.

[0022] Aufgrund der Gleichung für diamagnetische und paramagnetische Materialien (Gleichung 2) ist die Verdet-Konstante ein Anzeiger für die Eignung eines magnetischen Materials zur Verwendung als ein Faraday-Dreher. Die optische Drehung von polarisiertem Licht, das eine elektronische Struktur passiert, kann als eine zirkuläre Doppelbrechung verstanden werden, was durch das Vorliegen unterschiedlicher Brechungsindizes für links kreisförmig 1-polarisierte und rechts kreisförmig r-polarisierte Lichtkomponenten beschrieben wird. Jede Komponente durchquert die Probe mit einem unterschiedlichen Brechungsindex n und daher mit unterschiedlicher Geschwindigkeit.

[0023] Wenn Licht mit einer Frequenz f ein elektronisches System und/oder einen optischen Pfad durchläuft, der mit der Larmor-Frequenz f_L dreht, sind die Frequenz-abhängigen Brechungsindizes durch die nachstehend präsentierten Gleichungen 3 und 4 gegeben.

$$n_l = n(f - f_L) \quad \text{Gleichung 3:}$$

$$n_r = n(f + f_L) \quad \text{Gleichung 4:}$$

[0024] Somit ist das Ergebnis für die Gleichung der Verdet-Konstante durch die nachstehende Gleichung 5 gegeben.

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad \text{Gleichung 5:}$$

[0025] Die Verdet-Konstante ist sowohl zu der Wellenlänge des Lichtes als auch seiner Dispersion in dem Medium, welche temperaturabhängig ist, proportional. In ferrimagnetischen und ferromagnetischen Materialien steht die Magnetisierung in einer nicht-linearen Beziehung zu der magnetischen Feldstärke. Somit kann die Verdet-Konstante nicht genutzt werden.

[0026] Ferrimagnetische Materialien wie z.B. Yttrium oder andere Seltenerde-Eisengranate (z.B. YIG und RIG) haben im Allgemeinen eine relativ größere spezifische Faraday-Drehung im Vergleich zur optischen Faser. Dieses führt zu einem kleineren Faraday-Dreher, um eine gegebene magnetische Feldstärke zu messen, sodass leichtgewichtige magnetoptische Wandler möglich werden. Verfahren zum Züchten dieser Materialien sind allgemein bekannt. Ferner kann das Gehäuse für den Wandler mit Einführung von Materialien mit hoher Verdet-Konstante kleiner sein.

[0027] Aufgrund der inhärenten magnetischen Eigenschaften, welche ihre Wurzeln auf Atomebene haben, besteht ein möglicher Nachteil bezüglich ferrimagnetischer und ferromagnetischer Materialien in ihrer Komplexität auf einer theoretischen Ebene, welche nicht von selbst zu einer rein theoretischen Vorhersage der Faraday-Drehung führt, wie bei diamagnetischen und paramagnetischen Materialien, in welchen die Gleichung 2 vollständig angewendet werden kann.

[0028] Bezüglich des Faraday-Effektes in ferrimagnetischen Materialien werden die ferrimagnetischen und ferromagnetischen Materialien in einem externen Magnetfeld magnetisiert und bleiben nach Wegnahme des Feldes magnetisiert. Sie können beide eine spontane Magnetisierung zeigen (d.h., sie besitzen ein magnetisches Nettomoment bei Fehlen eines magnetischen Feldes). In ferrimagnetischen Materialien sind die magnetischen Momente der Atome auf unterschiedlichen Untergittern entgegengesetzt. Jedoch sind die entgegengesetzten Momente ungleich und es bleibt eine Nettomagnetisierung bestehen. In ferromagnetischen Materialien haben alle magnetischen Ionen einen positiven Beitrag zur Nettomagnetisierung. Der Magnetismus beruht auf dem magnetischen Dipolmoment, das durch den Spin eines Elektrons in Kombination mit dessen Drehimpuls besteht. In Ferrimagneten und Ferromagneten haben Atome teilweise gefüllte Schalen oder Spins, welche sich nicht in Oben/Unten-Paaren befinden, die das Dipolmoment aufheben, und können somit eine Nettomagnetisierung ohne ein angelegtes externes magnetisches Feld haben.

[0029] Die Elektronen bewegen sich aufgrund des Pauli-Ausschlussprinzips in denselben Richtungen. Es liegt jedoch ein Konfliktphänomen vor, und es besteht darin, dass nahe zueinander befindliche Dipole eine Tendenz haben, sich in entgegengesetzte Richtungen auszurichten. Dieses erzeugt magnetische Domänen, in welchen eine Dipolausrichtung in einem Nahbereich, aber eine Gegenrichtung in einem Fernbereich vorliegt. Der Übergang zwischen den Bereichen wird als Domänenwand, oder Bloch-Wand bezeichnet. Unter einem ausreichend starken externen Magnetfeld richtet sich die Domäne wieder aus. Jedoch bedingt auch dieses wiederum, dass bei niedrigen angelegten Feldern das Vorliegen dieser Domänen und deren Wechselwirkung mit einem intensivierenden oder sich änderndem Magnetfeld berücksichtigt werden muss. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Magnetisierung des Materials geändert werden kann, ist durch die dynamischen Eigenschaften der Domänenwandbewegungen begrenzt.

[0030] YIG, Yttriumeisengranat ist ein ferrimagnetischer Granatkristall mit der Zusammensetzung $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Er ist für Licht mit einer Wellenlänge länger als etwa $1,1 \mu\text{m}$ durchlässig. Bei $1,3 \mu\text{m}$ und $1,5 \mu\text{m}$ Wellenlängen, bei welchen zuverlässige Quellen und Detektoren leicht in der Telekommunikation verfügbar sind, sind die optischen Verluste relativ niedrig.

[0031] Ein dispersive Drehung aus dem elektrischen Dipolübergang und eine nicht-dispersive Teildrehung aus dem magnetischen Dipolübergang kann für YIG aufgrund seiner großen Faraday-Drehung unterschieden werden. Der Beitrag für die magnetooptische Drehung und Längeneinheit aus den unterschiedlichen Atomen kann durch die nachstehend dargestellte Gleichung 6 beschrieben werden.

$$\theta(T) = (A_m + A_e) M_{Fe}^0(T) + (B_m + B_e) M_{Fe}^t(T) + (C_m + C_e) M_R(T) \quad \text{Gleichung 6:}$$

[0032] Die Indizes m und e zeigen den Beitrag von unterschiedlichen Arten von Resonanz an, und die Hochstellungen o und t zeigen oktaedrische und tetraedrische Positionen von den Eisenatomen von YIG an. Für niedrige Frequenzen kann das durch einen elektrischen Strom in einer Strommessvorrichtung induzierte magnetische Nahfeld auf der Basis von ferromagnetischen Materialien durch das Biot-Savart-Gesetz, das nachstehend durch die Gleichung 7 dargestellt wird, berechnet werden.

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \quad \text{Gleichung 7:}$$

[0033] In der Gleichung 7 bezeichnet der Vektor H das Magnetfeld, I repräsentiert den Strom in einem gegebenen Drahtsegment, der Vektor L repräsentiert die Länge des Drahtsegmentes, und der Vektor r repräsentiert den Verschiebungsvektor von dem magnetosensitiven Element zu dem Feldpunkt. Daher können ferrimagnetische Materialien zum Detektieren des Faraday-Effektes verwendet werden, und können somit in optischen Strommessvorrichtungen verwendet werden. Beispielsweise stellt **Fig. 2** eine exemplarische Stromsensorvorrichtung **200** mit ferrimagnetischem Material gemäß einer Beispielausführungsform dar.

[0034] Die Vorrichtung **200** enthält Polarisatoren **201** und **202**. Die Polarisatoren **201** und **202** können zu den Polarisatoren **101** und **102** ähnlich sein. Die Polarisatoren **201** und **202** können dazu genutzt werden, um effektiv das in die Vorrichtung **200** eintretende Licht zu polarisieren, und um einen Winkel θ zu messen, der die Änderung im Polarisationswinkel des die Vorrichtung **200** verlassenden Lichtes repräsentiert. Die Vorrichtung **200** enthält ferner einen ferrimagnetischen Block **203**. Der ferrimagnetische Block **203** kann jedes ferrimagnetische Material aufweisen, wie es vorstehend beschrieben wurde. Ferner kann der ferrimagnetische Block **203** im Wesentlichen eine rechteckige Form haben. Alternativ kann der ferrimagnetische Block **203** in einer im Wesentlichen elliptischen Form vorliegen, was es dem in den Block **203** eintretendem Licht ermöglicht, über eine Strecke **1** zu wandern, welche die Gesamtlänge des Blockes **203** ermöglicht. Bei der Wanderung des Lichtes über die Strecke **1** erfährt es eine Änderung im Polarisationswinkel in Bezug auf. ein den ferrimagnetischen Block **203** beeinflussenden magnetisches Feld. Die Auswirkungen des magnetischen Feldes sind beispielsweise vorstehend beschrieben.

[0035] Die Vorrichtung **200** enthält ferner einen Leiter **104**. Der Leiter **104** kann ähnlich dem Leiter **104** von **Fig. 1** sein und kann einen durch die Vorrichtung **200** zu messenden Strom führen. Der Strom I erzeugt das Magnetfeld **B**, welches den ferrimagnetischen Block **203** beeinflusst, und dadurch den Polarisationswinkel des Lichtes in dem ferrimagnetischen Block **203** ändert, was es der Vorrichtung **200** ermöglicht, effektiv den Strom I zu messen.

[0036] Um den Strom (z.B. Blitzstrom) zu messen, kann das Messelement des faseroptischen Magnetfeldsensors (z.B. der Block **203**) relativ nahe an dem Leiter **104** platziert werden, um die magnetische Felddichte **B** oder das magnetische Feld **H** zu detektieren, das durch den Strom erzeugt oder induziert wird und um die sich aus Störungsquellen ergebenden Effekte zu minimieren.

[0037] In dem Sensorkopf kann der magnetooptische Eisengranat- oder Block **203** zwischen zwei Polarisatoren **201** und **202** (siehe **Fig. 2**) angeordnet sein. Als Lichtquelle können eine Superlumineszenzdiode (SLD), eine Laserdiode oder eine lichtemittierende Diode verwendet werden, welche Licht in einen optischen Wellenleiter (z.B. eine optische Faser) einkoppeln, die den Block **203** speist. Zusätzliche optische Elemente, wie z.B. Linsen oder andere Elemente können zur Einkopplung von den optischen Wellenleiter verlassendem Licht in den ferrimagnetischen Block **203** verwendet werden. Ähnliche optische Elemente (z.B. Linsen usw.) können zum Einkoppeln von den ferrimagnetischen Block **203** verlassendem Licht in einen weiteren optischen Wellenleiter zur Übertragung an einen Lichtsensor, wie z.B. einen Halbleiterphotosensor, eine in Umkehrrichtung vorgespannte Diode oder eine andere geeignete Vorrichtung wie z.B. einen optoelektrischen Wandler verwendet werden. Somit kann das Ausgangssignal des Sensorkopfes ein intensitätsmoduliertes Lichtsignal sein, welches an den optoelektrischen (O/E) Wandler mit einem weiteren optischen Wellenleiter geleitet wird.

[0038] Hierin nachstehend wird eine MEMS-Strommessvorrichtung unter Bezugnahme auf die **Fig. 3** und **Fig. 4** beschrieben. Die MEMS-Strommessvorrichtung kann auf der Basis der vorstehend beschriebenen Prinzipien arbeiten und kann ferrimagnetische und/oder ferromagnetische Materialien und/oder andere magneto-sensitive Materialien für die Detektion des Faraday-Effektes enthalten und kann daher in Strommessanwendungen eingesetzt werden.

[0039] In **Fig. 3** ist ein Querschnitt einer MEMS-Strommessvorrichtung **300** gemäß einer Beispielausführungsform dargestellt. Die Vorrichtung **300** enthält einen optischen Abschnitt **301**. Der optische Abschnitt **301** kann optische Wellenleiter und magnetosensitive Elemente, beispielsweise eine optische Faser und/ oder ferrimagnetische Materialien enthalten. Die Vorrichtung **300** enthält ferner einen Lichtquellen/Photodetektorabschnitt **302a/b**. Der Abschnitt **302a/b** kann eine getrennte Lichtquelle zum Senden von polarisiertem Licht durch den optischen Abschnitt **301** und einen getrennten Photodetektor zum Detektieren des Faraday-Effektes aus dem im optischen Abschnitt **301** verlassendem polarisiertem Licht enthalten.

[0040] Die Vorrichtung **300** enthält ferner einen Signalverarbeitungs/Energiequellenabschnitt **303**. Der Abschnitt **303** kann Energie für die Lichtquelle des Abschnittes **302** und weitere Abschnitte der Vorrichtung **300** liefern. Ferner kann der Abschnitt **303** Signalverarbeitungsoperationen, wie z.B. Operationen, die in etwa den hierin vorstehend beschriebenen Gleichungen ähnlich sind, enthalten. Die Operationen können die Ermittlung eines Stromwertes oder die Detektion eines Blitzschlages auf der Basis einer Winkeldifferenz von den optischen Abschnitt **301** verlassendem polarisierten Licht detektieren.

[0041] Die Vorrichtung **300** enthält ferner eine Kommunikationseinheit **304**. Die Kommunikationseinheit **304** kann in funktioneller Kommunikation mit dem Abschnitt **303** stehen und kann Information bezüglich des durch die Vorrichtung **300** detektierten Stroms übertragen. Beispielsweise kann ein Strom in relativ unmittelbarer Nähe zu der Vorrichtung **300** fließen. Der Strom kann durch eine Winkeländerung in der Polarisation von den optischen Abschnitt **301** verlassendem Licht gemessen werden, welche durch eine Veränderung in der Lichtintensität detektiert werden kann. Der Abschnitt **303** kann eine Winkeldifferenz interpretieren und ermitteln, ob ein Strom oder ein ein Magnetfeld veränderndes Ereignis (z.B. ein Blitzschlag) aufgetreten ist. Danach oder im Wesentlichen zum selben Zeitpunkt kann der Kommunikationsabschnitt **304** Information bezüglich der Ermittlung übertragen.

[0042] Die Vorrichtung **300** enthält ferner eine EMI-Isolation oder Reduktionsbarriere **305**. Die Barriere **305** kann eine gewisse Abschirmung vor oder eine Reduzierung von EMI für die Vorrichtung **300** bereitstellen. Beispielsweise können, obwohl der optische Abschnitt **301** von EMI relativ unbeeinflusst bleibt, die Abschnitte **303** und/oder **304** einen Betrag an EMI Reduzierung/ aufgetreten ist Isolation erfordern. Die Barriere **305** kann aus jedem geeigneten Material zur Reduzierung von EMI bestehen.

[0043] Die Vorrichtung **300** enthält ferner einen Träger **306**. Der Träger **306** kann ein mechanischer Abschnitt oder ein Substrat sein, das tatsächlich die unterschiedlichen Abschnitte der Vorrichtung **300** (z.B. 301 - 305) unterstützt. In **Fig. 4** ist eine Übersichtsansicht der MEMS-Strommessvorrichtung **300** gemäß einer Beispielausführungsform dargestellt.

[0044] Wie in **Fig. 4** dargestellt, kann die Vorrichtung **300** ferner optische Wellenleiter **402** und **403** enthalten, die in oder auf dem optischen Abschnitt **301** angeordnet sind. Die optischen Wellenleiter können einen Pfad für Licht bereitstellen, sodass es zu/von den Lichtquellen/Photodetektorabschnitten **302a/b** wandern kann. Die Vorrichtung **300** enthält ferner ein magnetosensitives Element **401**. Das magnetosensitive Element **401** kann ferrimagnetische, ferromagnetische oder andere geeignete Materialien aufweisen und kann eine Änderung im Polarisationswinkel von Licht bewirken, das durch das magnetosensitive Element **401** wandert, wenn ein Magnetfeld das magnetosensitive Element **401** beeinflusst. Beispielsweise kann ein in einem Leiter in relativ unmittelbarer Nähe zu der Vorrichtung **300** ein Magnetfeld erzeugen, welches das magnetosensitive Element **401** beeinflusst, und dadurch eine Änderung in der Polarisation von Licht in dem optischen Abschnitt **301** registrieren.

[0045] Daher stellen wie vorstehend beschrieben, Beispielausführungsformen MEMS-basierende Strommessvorrichtungen bereit. Es sei angemerkt, dass Strommessvorrichtungen wie hierin beschrieben, in einer Vielfalt von Anwendungen, die gegen EMI oder andere Formen elektrischer Störung empfindlich sind, angewendet werden können. Beispielsweise können wie hierin vorstehend beschrieben, Windkraftanlagen oder Flugzeuge relativ großen Beträgen von EMI ausgesetzt sein. Ferner kann es erwünscht sein, Blitzschläge (d.h., große Stromspitzen) in Windkraftanlagen oder Flugzeugen zu detektieren. Daher werden eine Windkraftanlage und ein Flugzeug beinhaltende Beispielanwendung hier beschrieben. Diese Beispielanwendung dient nur dem Zweck eines besseren Verständnisses der Beispielausführungsformen und ist somit in keiner Weise für die Beispielausführungsformen einschränkend.

[0046] **Fig. 5** stellt ein Beispiel einer Windkraftanlagenanwendung einer MEMS-Strommessvorrichtung gemäß einer Beispielausführungsform dar. Gemäß Darstellung kann die Windkraftanlage **500** mehrere Flügel **510** enthalten. Jeder Flügel kann für Blitzschlag oder andere Stromereignisse empfindlich sein und daher können einer oder mehrere von Windkraftanlagenflügeln **510** mit einer MEMS-Strommessvorrichtung **502** ausgestattet sein. Die Vorrichtung **502** kann im Wesentlichen der hierin vorstehend beschriebenen Vorrichtung **300** ähnlich sein.

[0047] Ein Kommunikationskanal **503** kann zwischen die Vorrichtung **502** und eine Windturbinensteuereinheit **501** geschaltet sein. Der Kommunikationskanal **503** kann ein beliebiger Kommunikationskanal sein, welcher eine effektive Kommunikation von Information zwischen der Vorrichtung **502** und der Steuereinheit **501** ermöglicht. Beispielsweise kann der Kommunikationskanal **503** ein faseroptischer Kanal, ein elektrischer Kommunikationskanal oder ein anderer geeigneter Kanal sein. Die Steuereinheit **501** kann auf oder in den Nasenkonusabschnitt **511** der Windkraftanlage **500** integriert oder installiert sein und kann sowohl mit der Vorrichtung **502** kommunizieren als auch den Betrieb der Windkraftanlage **500** steuern.

[0048] **Fig. 6** stellt ein Beispiel einer Flugzeuganwendung einer MEMS-Strommessvorrichtung gemäß einer Beispielausführungsform dar. Gemäß Darstellung kann ein Flugzeug **600** mehrere Flügel **610** enthalten. Jeder Flügel kann gegen Blitzschlag oder andere Stromereignisse empfindlich sein und daher können einer oder mehrere von den Flügeln des Flugzeugs **610** mit einer MEMS-Strommessvorrichtung **602** ausgestattet sein. Die Vorrichtung **602** kann im Wesentlichen der hierin vorstehend beschriebenen Vorrichtung **300** ähnlich sein.

[0049] Ein Kommunikationskanal **603** kann zwischen die Vorrichtung **602** und eine Flugzeugsteuereinheit **601** geschaltet sein. Der Kommunikationskanal **603** kann ein beliebiger Kommunikationskanal sein, welcher eine effektive Kommunikation von Information zwischen der Vorrichtung **602** und der Steuereinheit **601** ermöglicht. Beispielsweise kann der Kommunikationskanal **603** ein faseroptischer Kanal, ein elektrischer Kommunikationskanal oder ein anderer geeigneter Kanal sein. Die Steuereinheit **601** kann auf oder in dem Rumpfabschnitt **611** des Flugzeugs **600** integriert oder eingebaut sein, und kann sowohl mit der Vorrichtung **602** kommunizieren als auch den Betrieb des Flugzeugs **600** steuern.

[0050] Es sei ferner angemerkt, dass gemäß Beispielausführungsformen für einen Zeitraum, wenn ein Blitzdetektionssystem in einem Bereitschaftsmodus und für eine Auslösung im Falle eines Einschlages vorbereitet ist, der Strom durch die Lichtquelle so angepasst wird, dass der o/e-Wandler ein konstantes Signal bei einem definierten Sollwert ausgibt. Wenn ein Einschlag auftritt, wird das Ausgangssignal abhängig von der Polarität des Einschlagstroms in einer positiven oder negativen Richtung moduliert. Jedoch ist aufgrund einer Änderung in der Umgebungstemperatur oder aufgrund anderer Effekte in der optischen Ausrüstung dieses Sollwertsignal nicht konstant. Diese Drift beeinflusst die Auslösung des Systems an dem Sollwert und kann den Auslösepegel überschreiten, oder sich zu den Grenzwerten des o/e-Wandlers hin bewegen.

[0051] Für ein Mehrfachsensorsystem (z.B. mehrere Sensoren, die an mehreren Windkraftanlagenflügeln oder Flugzeugflügeln befestigt sind) ist die Drift an jedem Sensorkopf dieselbe, wenn eine gemeinsame optische Quelle verwendet wird. Somit können durch Beobachtung eines Kanals die anderen Sensordriften abgeleitet werden. Um die Drift zu steuern, und um die Sollwerte auf einen optimalen Pegel eingestellt zu halten, wird ein zusätzliches niederfrequentes Eingangssignal in das Datenerfassungssystem mit einbezogen. Dieser Kanal ist mit einer Steuerschaltung verbunden, welche die Sollwerte mit einer Proportional-Integral-Differential-(PID)-Regelung anpasst. Da die Abtastrate der Regelungsschaltung kleiner als die der Datenerfassung für die Blitzstrommessung ist, stört das Regelungssystem die Blitzstrommessung nicht.

[0052] Wie hierin beschrieben, stellen Beispielausführungsformen Strommessvorrichtungen unter Verwendung optischer Materialien bereit. Die Vorrichtungen können mit einer Stromversorgung zusammengefasst sein. Die Stromversorgung kann die Energie für eine Lichtquelle, einen Photodetektor, eine Datenverarbeitungseinheit und/oder eine Kommunikationseinheit bereitstellen. Die Energieversorgung kann eine Batterie, eine Photozelle (entweder durch Faseroptik oder Sonnenlicht gespeist) und/oder ein elektromechanischer Transformator sein. Die Lichtquelle kann eine Superlumineszenzdiode (SLD), eine Laserdiode, oder eine lichtemittierende Diode sein. Das emittierte Licht kann linear polarisiert sein. Das Licht kann auf einer MEMS-Struktur der Vorrichtungen in einem integrierten Lichtführungssystem zu einem magnetosensitiven Element oder Kristall geführt werden. Wenn der Polarisationszustand nicht durch die Lichtquelle gesteuert werden kann, kann ein Polarisator vor den Kristall eingeführt werden. Die optische Kristallstruktur, welche eine relativ hohe Verdet-Konstante (z.B. ferri- oder ferromagnetische Kristalle) bereitstellt, kann entweder direkt während der MEMS-Verarbeitung oder anschließend in der Struktur angeordnet werden. Hinter dem Kristall führt ein zweiter Polarisator (z.B. 45° gegenüber dem ankommenden Licht) zu einer Intensitätsmodulation des in Bezug auf das magnetische Feld passierenden Lichtes (Faraday-Effekt). Die Photodetektoreinheit kann diese Intensität messen. Die Signalverarbeitungseinheit kann die Ableitung in Bezug auf die Zeit messen. Ein Blitzschlag oder Strom wird detektiert, wenn diese Ableitung einen vorbestimmten Grenzwert (positiv oder negativ) überschreitet.

[0053] In einem Beispiel eines Blitzeinschlages kann die Information durch eine Kommunikationseinheit über eine faseroptische Verbindung, Funkübertragung, elektrische Übertragung usw. an eine Steuereinheit gesendet werden. Elektronische Anteile der Vorrichtung können EMI-isoliert sein. In derzeitigen Messanwendungen können verbesserte MEMS-Vorrichtungen, welche beispielsweise Blitzparameter messen, mit einem Lichtquellenregelungskreis ausgestattet sein. Dieser bei einer niedrigeren Frequenz als der Blitzschlagfrequenz geregelte Kreis kann die Ausgangsintensität auf einen relativ stabilen Wert halten. Um die Magnetfeldmessungen zu kalibrieren, kann eine Temperaturmessvorrichtung in der EMI-isolierten MEMS-Struktur realisiert werden.

[0054] Obwohl nur einige Beispielausführungsformen der vorliegenden Erfindung somit beschrieben worden sind, ist es offensichtlich, dass dieselben in vielerlei Weise variiert werden können. Die vorstehende Beschreibung der Erfindung verwendet diese Beispiele einschließlich der besten Ausführungsform, um dem Fachmann auf diesem Gebiet zu ermöglichen, die Erfindung einschließlich der Herstellung und Nutzung aller Elemente oder Systeme und Durchführung aller enthaltenen Verfahren in die Praxis umzusetzen. Der patentierbare Schutzzumfang der Erfindung ist durch die Ansprüche definiert und kann weitere für den Fachmann auf diesem Gebiet ersichtliche Beispiele enthalten. Derartige weitere Beispiele sollen innerhalb des Schutzzumfangs der Ansprüche enthalten sein, wenn sie strukturelle Elemente haben, die sich nicht von der wörtlichen Beschreibung der Ansprüche unterscheiden, oder wenn sie äquivalente strukturelle Elemente mit unwesentlichen Änderungen gegenüber der wörtlichen Beschreibung in den Ansprüchen enthalten. Derartige Varianten werden nicht als Abweichung vom Erfindungsgedanken und Schutzzumfang der vorliegenden Erfindung betrachtet, und alle derartigen Modifikationen sollen in dem Schutzzumfang der vorliegenden Erfindung, wie in den nachstehenden Ansprüchen festgestellt, enthalten sein.

[0055] Eine mikroelektromechanische (MEMS) Strommessvorrichtung enthält einen Trägerabschnitt **306**, einen optischen Abschnitt **301**, der auf dem Trägerabschnitt **306** angeordnet ist, wobei der optische Abschnitt **301** einen optischen Pfad **402**, **403** und ein magnetosensitives Element **401** in dem optischen Pfad **402**, **403**, eine Lichtquelle **302a**, die auf dem Trägerabschnitt **306** in funktioneller Kommunikation mit einem ersten Ende des optischen Pfades **402** angeordnet ist, und einen Photodetektor **302** enthält, der auf dem Trägerabschnitt **306** in funktioneller Kommunikation mit einem zweiten Ende des optischen Pfades **403** angeordnet ist.

Bezugszeichenliste

100	Strommessvorrichtung
101	Polarisator
102	Polarisator
103	Optische Faser
104	Leiter
200	Strommessvorrichtung
201	Polarisator
202	Polarisator
203	Magnetischer Granat / ferrimagnetischer Block
301	Optischer Abschnitt
302a/b	Lichtquelle/Photodetektor
303	Signalverarbeitungsabschnitt
304	Kommunikationsabschnitt
305	EMI-Isolationsbarriere
306	Trägerabschnitt
401	Magnetosensitives Element
402	Optischer Wellenleiter
403	Optischer Wellenleiter
500	Windkraftanlage
501	Steuereinheit
502	MEMS-Stromsensor
503	Kommunikationskanal
510	Windkraftanlagenflügel
511	Nasenkonus
601	Flugzeugsteuereinheit
602	MEMS-Stromsensor
603	Kommunikationskanal
610	Flügel
611	Rumpf

Patentansprüche

1. Mikro-elektromechanische (MEMS) Strommessvorrichtung, aufweisend: einen Trägerabschnitt (306); einen optischen Abschnitt (301), der auf dem Trägerabschnitt (306) angeordnet ist, wobei der optische Abschnitt (301) einen optischen Pfad (402, 403) und ein magnetosensitives Element (401) in dem optischen Pfad (402, 403) enthält; eine Lichtquelle (302a), die auf dem Trägerabschnitt (306) in funktioneller Kommunikation mit einem ersten Ende des optischen Pfades (402) angeordnet ist; und einen Photodetektor (302b), der auf dem Trägerabschnitt (306) in funktioneller Kommunikation mit einem zweiten Ende des optischen Pfades (302b) angeordnet ist; und wobei in dem optische Abschnitt (301) optische Wellenleiter (402) und (403) angeordnet sind, die den optischen Pfad bereitstellen, sodass Licht zu/von der Lichtquelle bzw. dem Photodetektor wandern kann.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei das magnetosensitive Element (401) ein ferrimagnetischer Block, ein ferromagnetischer Block, ein magnetosensitiver Kristall oder eine optische Faser mit konstanter Polarisierung ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei eine Lichtquelle (302a) eine Superlumineszenzdiode, eine lichtemittierende Diode oder eine Laserdiode ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, ferner aufweisend: einen Signalverarbeitungsabschnitt (303) in funktioneller Kommunikation mit dem Photodetektor (302b).
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei der Signalverarbeitungsabschnitt (303) in funktioneller Kommunikation mit der Lichtquelle (302a) steht.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei der Signalverarbeitungsabschnitt (303) dafür konfiguriert ist, eine Stärke eines Stromes zu bestimmen, der in relativ unmittelbarer Nähe zu dem magnetosensitiven Element (401) fließt.
7. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei der Signalverarbeitungsabschnitt (303) dafür konfiguriert ist, eine Stärke eines Stromes zu bestimmen, der in relativ unmittelbarer Nähe zu dem magnetosensitiven Element (401) fließt.
8. Vorrichtung nach Anspruch 1, ferner aufweisend: einen Kommunikationsabschnitt (304) in funktioneller Kommunikation mit dem Signalverarbeitungsabschnitt.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, wobei der Kommunikationsabschnitt (304) dafür konfiguriert ist, von dem Signalverarbeitungsabschnitt ermittelte Strommessergebnisse zu übertragen.
10. Vorrichtung nach Anspruch 8, ferner aufweisend: eine elektromagnetische Isolations-(EMI)-Barriere (305), die dafür konfiguriert ist, den Kommunikationsabschnitt, den Signalverarbeitungsabschnitt, die Lichtquelle und den Photodetektor von EMI zu isolieren.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

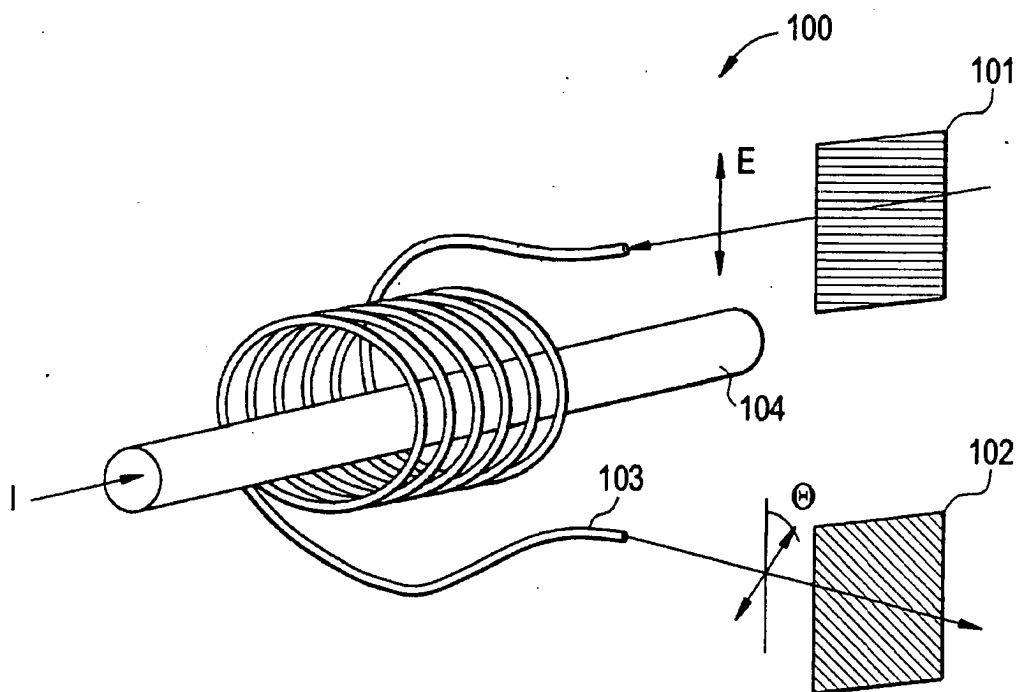


FIG. 2

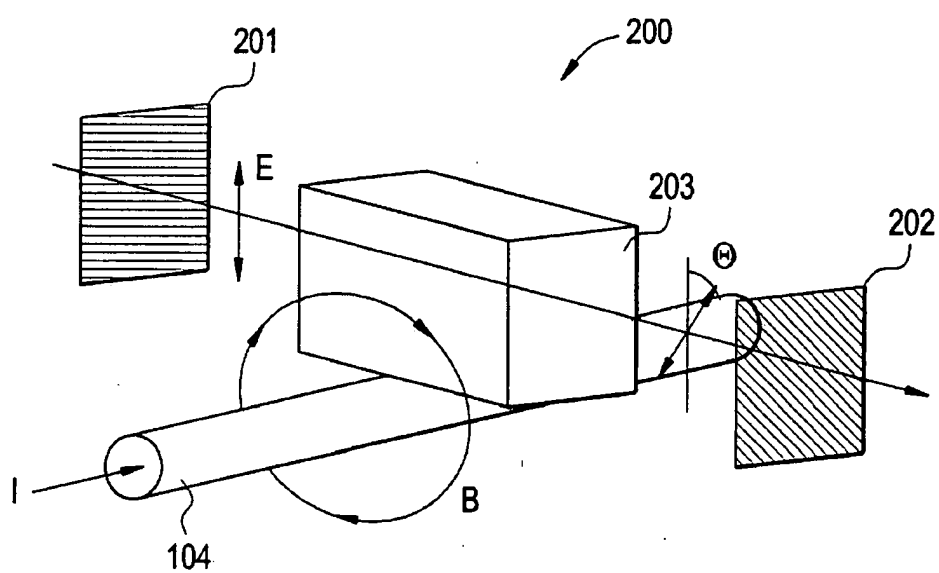


FIG. 3

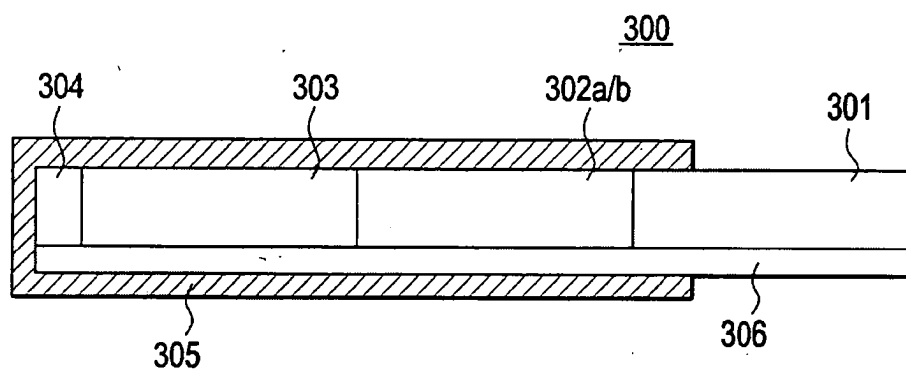


FIG. 4

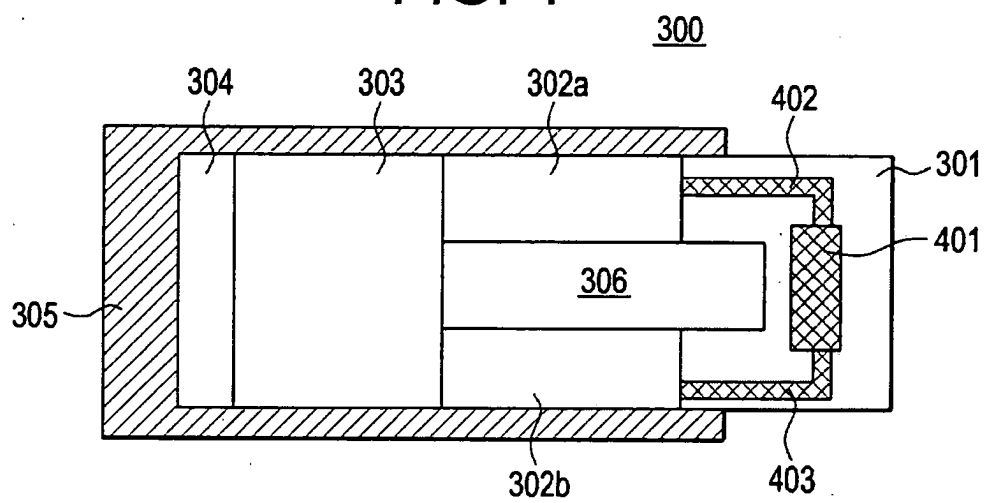


FIG. 5

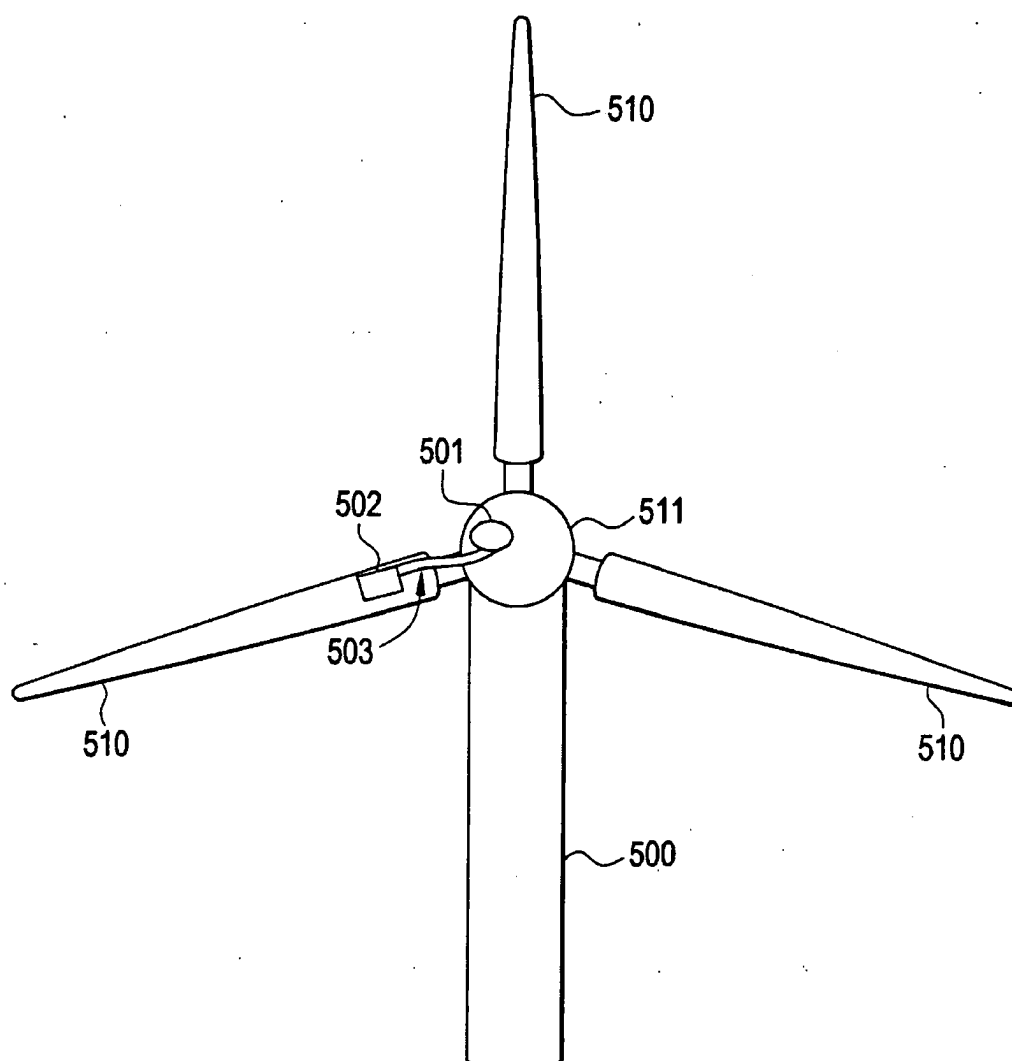


FIG. 6

