

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7679975号
(P7679975)

(45)発行日 令和7年5月20日(2025.5.20)

(24)登録日 令和7年5月12日(2025.5.12)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 N 24/00 (2006.01)

G 0 1 R 33/26 (2006.01)

G 0 1 R 33/032 (2006.01)

G 0 1 N 24/00 P

G 0 1 R 33/26

G 0 1 R 33/032

請求項の数 12 (全23頁)

(21)出願番号	特願2022-520883(P2022-520883)	(73)特許権者	509251143
(86)(22)出願日	令和2年10月6日(2020.10.6)		エヌビーエル マネージメント リミテッド
(65)公表番号	特表2022-551123(P2022-551123 A)		イギリス国 ミドルセックス ティーダブリュー 1 1 0エルダブリュー テディントン ハンプトン ロード (番地なし)
(43)公表日	令和4年12月7日(2022.12.7)	(73)特許権者	505105327
(86)国際出願番号	PCT/GB2020/052464		ザ・ユニバーシティ・オブ・ストラスクライド
(87)国際公開番号	WO2021/069880		イギリス・グラスゴー・G 1・1 X Q・リッチモンド・ストリート・1 6・マクカンス・ビルディング
(87)国際公開日	令和3年4月15日(2021.4.15)	(74)代理人	110002321
審査請求日	令和5年9月28日(2023.9.28)		弁理士法人永井国際特許事務所
(31)優先権主張番号	1914464.1	(72)発明者	ベビントン, パトリック
(32)優先日	令和1年10月7日(2019.10.7)		イギリス国 ジー 1 1エックスキュー
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 原子スピン配向の生成のための方法およびシステム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

振動磁場を検出する方法であって、
原子アンサンブル内に原子スピン配向を生成することを含み、前記原子スピン配向を生成することが、
前記原子アンサンブルに定常磁場を提供して、前記原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第1および第2の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすことと、
前記原子アンサンブルを電磁光放射ビームによって励起することを含み、前記ビームが、直線偏極を有し、前記第1の多様体を伴う遷移から離調され、したがって前記原子アンサンブル内の前記第1の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、前記第1の多様体から前記第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動され、
前記方法がさらに、
前記原子アンサンブルを通過した後の前記ビームを検出して、振動磁場を検出することを含む、
方法。

【請求項 2】

振動磁場を検出する方法であって、
原子アンサンブル内に原子スピン配向を生成することを含み、前記原子スピン配向を生成することが、
前記原子アンサンブルに定常磁場を提供して、前記原子アンサンブルの原子エネルギー準

位の基底状態の第 1 および第 2 の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすことと、
前記原子アンサンブルを電磁光放射ビームによって励起することとを含み、前記ビームが
円偏極を有する磁力計ポンプビームであり、前記第 1 の多様体を伴う遷移から離調され、
したがって前記原子アンサンブル内の前記第 1 の多様体の原子ポピュレーションの大部分
が、前記第 1 の多様体から前記第 2 の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動され、
前記方法がさらに、

直線偏極を有する、周波数に関して前記磁力計ポンプビームにより縮退した磁力計プロ
ーブビームによって前記原子アンサンブルを探索することを含み、
前記方法がさらに、

前記原子アンサンブルを通過した後の前記磁力計プローブビームを検出して、振動磁場
を検出することを含み、

前記方法がさらに、

放射源によって放出されたビームを分裂させて、磁力計ポンプビームと磁力計プローブビ
ームとにすることを含む、

方法。

【請求項 3】

前記ポンプビームが、前記第 1 の多様体を伴う遷移から離調され、したがって前記原子ア
ンサンブル内の前記第 1 の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、前記第 1 の多様体
から最大または最小の磁気量子数を有する前記第 2 の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ
移動される、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記ビームの光放射パワーが、閾値パワーを超過して、前記第 2 の多様体のゼーマンサブ
レベルの前記原子ポピュレーションの分布に非対称性を引き起こし、原子スピン配向をも
たらし、

前記閾値パワーが、前記原子アンサンブルの磁気光学回転信号の光放射ビームパワーへの
依存が非線形になるパワーである、

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記定常磁場が、前記原子アンサンブル内に 30 kHz 以下のラーモア周波数を生じさせ
るように構成され、及び／又は

前記ビームが、前記第 1 の多様体を伴う前記遷移から負に離調される、

請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 6】

前記ビームの周波数が、前記第 2 の多様体からの磁気光学回転信号を最大にする周波数で
ある、請求項 1 ～ 5 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7】

前記定常磁場が、前記原子アンサンブル内に 20 kHz より大きいラーモア周波数を生じ
させるように構成される、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 8】

振動 1 次磁場を提供して、導電性または透磁性の物体によって 2 次磁場をもたらすこと
を含む、請求項請求項 1 ～ 7 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

原子アンサンブル内に原子スピン配向を生成するシステムであって、

第 1 および第 2 の多様体を含む基底状態を含む原子エネルギー準位を有する原子アンサ
ンブルと、

前記原子アンサンブルに定常磁場を提供して、前記原子アンサンブルの原子エネルギー準
位の基底状態の第 1 および第 2 の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすように構成された
磁場源と、

直線偏極を有する電磁光放射ビームによって前記原子アンサンブルを励起するように構成
された放射源とを含み、前記ビームは、前記第 1 の多様体を伴う遷移から離調され、した

10

20

30

40

50

がって前記原子アンサンブル内の前記第 1 の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、前記第 1 の多様体から前記第 2 の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動され、前記システムはさらに、
直線偏極ビームを検出して振動磁場を検出するように構成された検出器を含む、
システム。

【請求項 10】

閾値パワーを超過する光放射パワーを前記ビームに提供して、前記第 2 の多様体のゼーマンサブレベルの前記原子ポピュレーションの分布に非対称性を引き起こし、原子スピン配向をもたらすように構成される、請求項 9 に記載のシステム。

【請求項 11】

原子アンサンブル内に原子スピン配向を生成するシステムであって、
前記システムが、第 1 および第 2 の多様体を含む基底状態を含む原子エネルギー準位を有する原子アンサンブルと、
前記原子アンサンブルに定常磁場を提供して、前記原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第 1 および第 2 の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすように構成された磁場源と、
電磁光放射ビームによって前記原子アンサンブルを励起するように構成された放射源とを含み、前記ビームが、円偏極を有するポンプビームであり、前記第 1 の多様体を伴う遷移から離調され、したがって前記原子アンサンブル内の前記第 1 の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、前記第 1 の多様体から前記第 2 の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動され、
前記放射源は、周波数に関して前記円偏極ポンプビームで縮退した直線偏極プローブビームによって前記原子アンサンブルを探索するように構成され、
前記システムはさらに、
前記直線偏極ビームを検出して振動磁場を検出するように構成された検出器を含み、
前記放射源は、単一のビームを放出するように構成され、
前記システムはさらに、
前記単一のビームを前記ポンプビームおよび前記プローブビームに分裂させるように構成されたビームスプリッタを含む、
システム。

【請求項 12】

前記原子アンサンブルがルビジウムであり、前記放射源が、4 mW 以下の光放射パワーを有する前記ビームを放出するように構成され、及び／又は
前記放射源が垂直共振器型面発光レーザダイオードである、
請求項 9 ～ 11 のいずれか一項に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子スピン配向を生成するための方法およびシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

スピン偏極の生成は、固体サンプル [1] から低温原子アンサンブル [2、3] まで多種多様なシステムの研究および応用において、重要なステップである。原子物理学の領域において、標準的な方法（光励起）は、偏光から原子系への角運動量の伝達に依拠する [4]。典型的な方式は、静磁場に沿って伝播する円偏極レーザビームとの原子サンプルの相互作用を伴うのに対して、異なる偏極 [5～7] およびレーザ数 [8] を含む他の構成も実証されている。光励起はまた、スピン交換衝突（SEC）を介して実現される標的原子への光学角運動量の伝達も含む [9、10]。スピン偏極プロセスの別のカテゴリでは、光励起を非線形スピンドYNAMICS と組み合わせる [11、12]。1つの特定の認識、いわゆるアライメントから配向への変換は、相互に直交する磁場および電場におけるポ

ピュレーションの不均衡の発生を伴う〔13～15〕。このようにして、スピンの好ましい方向ではなく好ましい軸に沿って位置合わせされるテンソル偏極（アライメント）を、スピンの1つの方向にバイアスされるベクトル偏極（配向）に変形することができる〔16〕。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

本発明の態様は、原子スピン配向を生成するための改善された方法およびシステムを提供しようとするものである。

【課題を解決するための手段】

【0004】

本発明の一態様によれば、原子アンサンブル内に原子スピン配向を生成する方法が提供され、この方法は、

原子アンサンブルに定常磁場を提供して、原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第1および第2の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすことと、

原子アンサンブルを電磁光放射ビームによって励起することを含み、このビームは第1の多様体を伴う遷移から離調され、したがって原子アンサンブル内の第1の多様体の原子ポピュレーション（atomic population）の大部分が、第1の多様体から第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動される。

【0005】

いくつかの実施形態では、ビームは第1の多様体を伴う遷移から離調され、したがって原子アンサンブル内の第1の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、第1の多様体から最大または最小の磁気量子数を有する第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動される。

【0006】

いくつかの実施形態では、ビームの光放射パワーが閾値パワーを超過して、第2の多様体のゼーマンサブレベルの原子ポピュレーションの分布に非対称性を引き起こし、原子スピン配向をもたらす。

【0007】

いくつかの実施形態では、閾値パワーは、原子アンサンブルの磁気光学回転信号の光放射ビームパワーへの依存が非線形になるパワーである。磁気光学回転信号は、原子アンサンブルを通過した後、好ましくはアンサンブルが振動磁場を受けたときのビームの検出から取得することができる。当業者には理解されよう。信号は、ビーム偏極の振動の振幅に関係することができる。当業者には理解されるように、定常磁場にさらされた原子アンサンブル内のゼーマンサブレベル間の振動磁場によってもたらされる結合から、磁気光学信号が生じる。

【0008】

いくつかの実施形態では、閾値パワーは2 mWである。

【0009】

いくつかの実施形態では、定常磁場は、原子アンサンブル内に30 kHz以下のラーモア周波数を生じさせるように構成される。

【0010】

いくつかの実施形態では、定常磁場は、原子アンサンブル内に20 kHz以下のラーモア周波数を生じさせるように構成される。

【0011】

いくつかの実施形態では、ビームの周波数は、第2の多様体からの磁気光学回転信号を最大にする周波数である。

【0012】

いくつかの実施形態では、ビームは、第1の多様体を伴う遷移から負に離調される。

【0013】

10

20

30

40

50

いくつかの実施形態では、ビームは直線偏極を有する。他の実施形態では、ビームは円偏極を有する。好ましくは、円偏極ビームは定常磁場に平行（または実質的に平行）である。

【0014】

いくつかの実施形態では、定常磁場は、原子アンサンブル内に20kHzより大きいラーモア周波数を生じさせるように構成される。

【0015】

本発明の一態様によれば、ビームが直線偏極を有する上記の方法を含む振動磁場を検出する方法が提供され、この方法は、原子アンサンブルを通過した後のビームを検出して、振動磁場を検出することを含む。

【0016】

本発明の一態様によれば、ビームが円偏極を有する上記の方法を含む振動磁場を検出する方法が提供され、ビームが磁力計ポンプビームであり、この方法は、直線偏極を有する、周波数に関して磁力計ポンプビームによって縮退した磁力計プローブビームによって原子アンサンブルを探索することを含み、この方法は、原子アンサンブルを通過した後の磁力計プローブビームを検出して、振動磁場を検出することを含む。

【0017】

いくつかの実施形態では、この方法は、振動1次磁場を提供して、導電性または透磁性の物体によって2次磁場をもたらすことを含む。

【0018】

上記の態様のいずれの場合も、直線偏極ビームの偏極は、定常磁場に対して好ましくは平行であり、または実質的に平行である。直線偏極ビームは、定常磁場方向を横断、好ましくは直交し、検出のために振動磁場を横断、好ましくは直交する。

【0019】

本発明の一態様によれば、原子アンサンブル内に原子スピン配向を生成するシステムが提供され、このシステムは、

第1および第2の多様体を含む基底状態を含む原子エネルギー準位を有する原子アンサンブルと、

第1の多様体を伴う遷移から離調された電磁光放射ビームによって原子アンサンブルを励起するように構成された放射源とを含み、したがって原子アンサンブル内の第1の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、第1の多様体から第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動される。

【0020】

いくつかの実施形態では、システムは、閾値パワーを超過する光放射パワーを有するビームを提供して、第2の多様体のゼーマンサブレベルの原子ポピュレーションの分布に非対称性を引き起こし、原子スピン配向をもたらすように構成される

【0021】

いくつかの実施形態では、ビームは直線偏極を有する。

【0022】

いくつかの実施形態では、ビームは、円偏極を有するポンプビームである。

【0023】

いくつかの実施形態では、システムは、周波数に関して円偏極ポンプビームで実質的に縮退した直線偏極プローブビームによって原子アンサンブルを探索するように構成された放射源を含む。これは、励起に使用されるものと同じ放射源とすることができる。

【0024】

いくつかの実施形態では、放射源は、単一のビームを放出するように構成され、システムは、単一のビームをポンプビームおよびプローブビームに分裂させるように構成されたビームスプリッタを含む。

【0025】

いくつかの実施形態では、システムは、直線偏極ビームを検出して振動磁場を検出する

10

20

30

40

50

ように構成された検出器を含む。

【0026】

いくつかの実施形態では、原子アンサンブルはルビジウムであり、放射源は、4 mW以下の光放射パワーを有するビームを放出するように構成される。

【0027】

いくつかの実施形態では、放射源は、垂直共振器型面発光レーザダイオードである。

【0028】

いくつかの実施形態では、システムは、原子アンサンブルに定常磁場を提供して、原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第1および第2の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすように構成された磁場源を含む。

【0029】

いくつかの実施形態では、システムは原子磁力計である。

【0030】

本発明の実施形態について、添付の図面を参照しながら、例示のみを目的として以下に説明する。

【図面の簡単な説明】

【0031】

【図1】基底状態多様体間でポピュレーションを移動させることによって、原子基底状態内でポピュレーションの不均衡（偏極）をもたらす単一の直線偏極ビームの概略的な構成を示す図である。静バイアス磁場が、基底状態多様体内にエネルギー分裂をもたらす。共鳴振動磁場が、基底状態多様体間にコヒーレンスを生成し、原子偏極を歳差運動させる。この原子偏極の回転が、直線偏極ビームにマッピングされ、バランスフォトダイオードおよび偏光ビームスプリッタからなる簡単な偏光計によって検出される。

【図2】縮退した光周波数によって単一のビームが2つのビームに分裂される概略的な構成を示す図である。直線偏極ビームは、図1に記載のものと同様に作用する。円偏極ビームは、基底状態多様体間のポピュレーションの移動を増強するために使用される。

【図3】原子アンサンブルの第2の多様体内の配向の発生を示す概略図である。

【図4(a)】 $F = 3$ および $F = 4$ セシウムの基底状態多様体間でポピュレーションを移動させ、 $F = 3$ および $F = 4$ セシウムの基底状態多様体内にポピュレーションの不均衡（原子スピン）をもたらす直線偏極レーザビームを描く概略図である。

【図4(b)】黒色の矢印で示すように、隣接する $F = 4$ ゼーマンサブレベル間にコヒーレンスをもたらし、原子スピン偏極を B_{off} の周りで歳差運動させる、弱い無線周波数場 B_{rf} を描く概略図である。スピン歳差運動は、直線偏極プローブビームによって監視される。

【図5】 $6^2S_{1/2} F = 3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F' = 2$ の遷移から離調するプローブビームに対する r_{f} 信号振幅 R の依存を示す図である。 $F = 3$ および $F = 4$ の共鳴が、それぞれ赤色および黒色の矢印によって示されている。測定は、5.9 mWのレーザビームパワーによって行われた。

【図6】 $6^2S_{1/2} F = 3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F' = 2$ の遷移（-100 MHzの離調）付近で同調されたレーザビーム周波数によって記録された r_{f} 分光信号を示す図である。 $F = 3$ および $F = 4$ の共鳴が、それぞれ赤色および黒色の矢印によって示されている。 $F = 4$ コヒーレンスによってもたらされるスペクトルプロファイルにおいて、アライメント(a)から配向(b)への遷移を見ることができる。測定は、(a) 200 μW および(b) 9.1 mWのレーザビームパワーによって実行された。

【図7(a)】直線偏極ビームのみ（黒色の実線）によって記録された磁気光学回転信号を、直交偏極成分を有する円偏極ポンプビーム（赤色の破線および青色の点線）の存在下で示す図である。直線偏極ビームパワーは12.4 mWであり、ポンプパワーは17 μW である。

【図7(b)】直線偏極ビームのみ（黒色の三角形）のレーザビームパワーに対する信号振幅の依存を、 B_{off} に平行な円偏極ビーム（赤色の点および青色の菱形が、ポンプビームに対する2つの直交円偏極のいずれかを有する測定を表す）と組み合わせて示す図である。

10

20

30

40

50

【図 8】 オフセット磁場強度（ラーモア周波数）に対する $r f$ 信号振幅（ a ）および位相（ b ）の直角成分の依存を示す図である。 $r f$ スペクトルの周波数は、 $r f$ スペクトルの中心からの離調の点から表される。測定は、 4.6 mW のレーザビームパワーによって行われた。

【図 9 - 1 1】 磁気光学回転信号とも呼ばれる磁力計の信号が 3 つの位相でどのようにもたらされるかを示す図である。

【図 1 2】 $r f$ スペクトルの一例を示す図である。

【図 1 3】 円偏極ビームに対する磁力計の振幅とポンプビームパワーとの関係を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0032】

本発明の実施形態は、以下に説明するように、直線偏極ビームによるいくつかの実施形態において、室温のアルカリ金属蒸気における原子スピン配向の生成を効率的に提供することが可能である。

【0033】

従来、原子スピン配向は、偏光から原子系への角運動量の移動によって実現される。

【0034】

以下に論じる測定構成は、マルチレーザポンププローブシステムの性能に匹敵する単一の低パワーレーザダイオードに基づく簡単で頑強な無線周波数原子磁力計を可能にする。

【0035】

以下に説明する本発明のいくつかの実施形態は、光励起、非線形スピンドYNAMICS、およびスピン交換衝突という 3 つの要素を組み合わせた、たとえば室温のセシウム蒸気における配向生成機構を提供する。スピン交換緩和率の変動によって、原子サンプルのアライメントと配向との間の遷移が提示される。原子無線周波数スペクトルを監視することによって、観察が実行される。

【0036】

図 1 は、無線周波数原子磁力計を示し、いくつかの実施形態では、無線周波数原子磁力計を同調可能とすることができる。磁力計は、振動 1 次磁場を提供するように構成された 1 次磁場源（図示せず）とともに使用するためのものである。この実施形態では、1 次磁場源は $r f$ コイルであるが、他の実施形態では、他の可変の磁場源を使用することもできる。 $r f$ コイルは、調査すべきサンプルの表面に実質的に直交する 1 次磁場を提供するように構成される。この実施形態では、この表面は調査中の表面であり、これはサンプルの主表面である。

【0037】

この実施形態では、 $r f$ コイルは、直径 0.02 mm の銅線を 1000 回巻いたコイルであり、高さ 10 mm 、内径 2 mm 、および外径 4 mm を有する。しかし、これらの寸法は、用途に応じて変更することができるが、当業者には理解されよう。

【0038】

$r f$ コイルは、サンプルに隣接して配置することができるが、全体としてサンプルの一方の側に、サンプルと重複しない関係で配置できるように構成され、振動 1 次磁場を生成して、サンプルによって 1 次磁場と同じ周波数で振動する 2 次磁場 4 をもたらすように動作することができる。2 次磁場は、サンプルの材料応答を示す。

【0039】

サンプルは導電性（必ずしも高い導電性を有する必要はない）および／または透磁率を有するはずであり、したがってサンプルに時制を与えることができる。

【0040】

原子磁力計は、2 次磁場を検出して、たとえば材料欠陥の撮像を実行するように構成される。

【0041】

この実施形態では、原子磁力計は検出セル 3 を含み、この実施形態では、検出セル 3 は

10

20

30

40

50

、周囲温度において 1 cm^3 のパラフィンで被覆されたガラスセルであり、原子アンサンブルを含む。この実施形態では、原子アンサンブルは、セシウム原子蒸気である（原子密度は $n_{\text{Cs}} = 3.3 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ ）。

【0042】

磁力計は、検出セル3でバイアス磁場5を、したがってバイアス磁場方向に原子アンサンブルへ提供するように構成されたバイアス磁場源（図示せず）を含む。「バイアス」および「オフセット」という用語は、この磁場の文脈で区別なく使用される。バイアス磁場は、定常磁場または静磁場であり、変動させることもできるが、安定化されており振動しない。バイアス磁場は、原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第1および第2の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすように構成される。バイアス場の強度が、ラモア周波数を画定する。

10

【0043】

この実施形態では、オフセット磁場は、3対の入れ子状の直交する正方形のヘルムホルツコイルによって能動的に安定化される。これらはバイアス磁場源を提供するが、他の実施形態では、他のバイアス磁場源を使用することもできる。

【0044】

磁力計は、放射源1、この実施形態ではレーザを含み、放射源1は、バイアス磁場を横断、この実施形態では直交する電磁光放射ビーム2によって、検出セル3内の原子標本の原子を励起するように構成される。

【0045】

ビーム2は、原子標本を励起して、原子アンサンブル内に配向をもたらすように構成される。

20

【0046】

ビーム2はまた、検出セル3を探索して原子アンサンブルを探索し、特に原子アンサンブル内の原子コヒーレンス歳差運動を探索するためのプローブビームとして働く。

【0047】

原子アンサンブルの集合的な原子スピンの発生は、ビーム2の偏極状態にマッピングされる。

【0048】

原子磁力計は、検出器を含む。この実施形態では、検出器は、検出セル3内の原子アンサンブルを通過した後のビーム2を受け取って検出し、原子アンサンブルの領域内の振動磁場を検出するように構成された均衡偏光計6を含む。偏光計6は、偏光ビームスプリッタ9と、ビーム2がビームスプリッタ9へ進む途中に通過するように構成された2分の1波長板10と、ビームスプリッタ9の両方の出力を受け取るように構成されたフォトダイオードとを含み、ビームスプリッタ9の出力のうちの一方は、ビームスプリッタ9から鏡8を介してフォトダイオード7へ経路指定される。

30

【0049】

セル3を通して伝送されるレーザ光は、偏光計によって分析される。

【0050】

検出器は、ビーム2の検出に応答して検出信号を出力するように構成される。この検出信号は、典型的には、検出されたビーム2の偏極および／または振幅を表す電圧または電流信号である。この実施形態では、検出器の出力は、ビーム2の偏極を表す電圧信号を提供する均衡光検出器の出力である。この信号の振幅および位相は、2次磁場4を検出し、それによってサンプルの材料応答を検出し、場合により材料欠陥の撮像を実行するために、たとえばコンピュータによって使用することができる。

40

【0051】

当業者には理解されるように、磁気光学回転信号とも呼ばれる磁力計の信号は、3つの位相でもたらされる。図9～図11は、従来のポンプおよびプローブビームシステムに基づいてこれを示す。しかし、本明細書に説明するように、議論中の実施形態では、単一のビームがこれらの役割の両方を担う。

50

【0052】

第1に、図9を参照すると、ポンプビームへの結合によって、原子アンサンブル内に原子ポピュレーションの偏極（または言い換えれば、図9に黒色の矢印で示されているバイアス磁場に沿ったスピン成分）を生じさせる。図9では、多くの従来のシステムの場合と同様に、ポンプビームがバイアス場に平行な円偏極ビームとして便宜上示されているが、図1の実施形態では、これはプローブビームと同じビームである。

【0053】

図10を参照すると、振動磁場（たとえば、2次磁場）が、原子コヒーレンスを生じさせ、または言い換えれば原子スピンを傾斜させ、バイアス場の周りでその歳差運動を引き起こす。バイアス場に直角のスピン成分（すなわち、原子コヒーレンス）は、バイアス磁場の強度によって画定されるラーモア周波数で歳差運動する。

10

【0054】

図11を参照すると、原子スピンの振動が、直線偏極プローブビームによって監視される。

【0055】

スピンの歳差運動は、ビーム偏極にマッピングされ、すなわちスピンの振動がビーム偏極の振動をもたらす（ファラデー効果）。光検出器は、特有の駆動周波数で振動の振幅を記録する。駆動周波数を走査することで、rfスペクトルが与えられる。このrfスペクトルは、他に磁気光学回転信号としても知られており、その一例が図12に示されている。F=3およびF=4のスピンは、異なる周波数で振動する（F=3およびF=4のスピンに対するラーモア周波数は異なる）。F=4の共鳴プロファイルの振幅および位相が、非破壊試験において振幅および位相の画像を生じさせる。

20

【0056】

上記で説明したように、多くの従来の磁力計が、直線偏極プローブビームとは異なる周波数で円偏極ポンプビームを使用する。対照的に、図1の実施形態では、放射源1は、ポンプおよびプローブビームの両方として使用される単一の直線偏極ビーム2を放出するように構成される。ビーム2の偏極は、バイアス磁場に対して実質的に平行であり、最適なのは平行偏極である。

【0057】

本発明者らは、原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第1の多様体を伴う遷移からビームを離調することによって、原子アンサンブル内の第1の多様体の原子ポピュレーションの大部分を第1の多様体から基底状態の第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動させることが可能であることを見出した。さらに、本発明者らは、直線偏極ビームの場合、ビームの光放射パワーを増大させることによって、閾値パワーを上回って第2の多様体における分布の対称性が崩れ、次いで第2の多様体内で配向が得られることを見出した。

30

【0058】

原子物理学におけるポピュレーションとは、原子アンサンブル内での特定のエネルギー準位の占有の確率を指す。最大磁気数を有するサブレベルのポピュレーションが0.5であるという場合、これは平均で所与のアンサンブル内の原子の50%がそのレベルを占めることを意味する。

40

【0059】

それに応じて、ビーム2は、原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第1の多様体を伴う遷移から離調され（この実施形態では、第1の多様体は $6^2S_{1/2}F=3$ であり、第2の多様体は $6^2S_{1/2}F=4$ であり、ビーム2は $6^2S_{1/2}F=3 \rightarrow 6^2P_{3/2}F=4$ の遷移から離調される）、したがって原子アンサンブル内の第1の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、第1の多様体から基底状態の第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動される。この効果を最大にするために、この実施形態では、ビームの周波数は、第2の多様体からの磁気光学回転信号を最大にする周波数であり、いくつかの実施形態では、これを自動で行うことができるが、それでもなお観察可能な信号を有するこの最

50

大値前後の周波数を使用することもできることが、当業者には理解されよう。以下で詳細に論じる図5を参照すると、図5は、プローブビーム（ポンプなし）の異なる離調に対して記録された約700のrfスペクトルからなり、それぞれ赤色および黒色の矢印で示された $F=3$ および $F=4$ に対する共鳴を示す。同じく以下で論じる図8は、同じ方法で（異なるラーモア周波数に対して記録された1群のrfスペクトルとして）記録されている。この実施形態では、離調は約 -416 MHz （ 3.3 mW の場合）から約 -290 MHz （ 10 mW の場合）の範囲とすることができる。

【0060】

さらに、この実施形態では、ビーム2の光放射パワーが閾値パワーを超過して、第2の多様体のゼーマンサブレベルの原子ポピュレーションの分布に非対称性を引き起こし、スピン配向をもたらす。この実施形態では、閾値パワーは 2 mW であるが、他の実施形態に対する閾値パワーは異なることもあり、これは原子磁力計の構成、特に原子アンサンブルに依存する。閾値パワーは、原子アンサンブルの磁気光学回転信号の光放射ビームパワーへの依存が非線形になるパワーとすることができるため、当業者であれば、任意の特定の実施形態で使用するための適当な閾値パワーを判断することができる。

【0061】

図1の実施形態には、円偏極ビームではなく直線偏極ビームが、原子アンサンブルに配向をもたらすことができるという利点があり、これは、同じビームを使用して偏極を探索することができることを意味する。これにより、必要とされる放射源の数を削減することができる。またその結果、電力消費およびセンサ寸法をより小さくすることができる。

【0062】

この実施形態では、ビーム2は、第1の多様体を伴う遷移から負に離調され、したがって原子アンサンブル内の第1の多様体の原子ポピュレーションの大部分が、第1の多様体から最大または最小磁気量子数を有する第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへ移動され、これらは最も高い運動量を有する状態であり、他に第2の多様体の伸張状態とも呼ばれる。負の離調とは、ビームの周波数が遷移の周波数に対して低減されることを意味する。

【0063】

図3は、第2の多様体における配向の発生を示す概略図を提供する。配向は、ポピュレーションが高いまたは低い磁気量子数を有するゼーマンサブレベルへ、好ましくは最大または最小の量子数を有するゼーマンサブレベルへ励起されることによって特徴付けられる。

【0064】

図3の左側に、セシウムのエネルギー準位の概略図が示されている。

【0065】

図3aは、閾値パワーを下回るより低いパワーにおける離調励起の結果を示す。図3bは、閾値パワーを上回るより高いパワーにおける離調励起の結果を示す。図3aおよび図3bの各々において、破線は第1の多様体（ $F=3$ ）および第2の多様体（ $F=4$ ）のゼーマンサブレベルを示し、破線上の点はそのサブレベルのポピュレーションを示す。

【0066】

図3aに見ることができるように、閾値パワーを下回ると、励起により第1の多様体の原子ポピュレーションの一部が第2の多様体へ動くが、アライメントは存在し、第1および第2の多様体の両方において対称のポピュレーション分布が存在する。

【0067】

図3bに見ることができるように、励起が閾値パワーを上回ると、第1の多様体にはアライメントがまだ存在するが、第2の多様体のポピュレーションが実質的に排他的に単一の伸張状態になるため、第2の多様体には配向が生じる。

【0068】

この実施形態では、原子アンサンブルはセシウムである。しかしセシウムが、使用することのできる唯一の要素であるというわけではない。それにもかかわらず、原子アンサンブルは、好ましくはアルカリ金属、特にセシウムまたはルビジウムである。

【0069】

上記から明らかなように、使用中、原子磁力計は、原子アンサンブル内に原子スピン配向を生成する方法を実施し、この方法は、

バイアス磁場源によって、原子アンサンブルにバイアス磁場である定常磁場を提供して、原子アンサンブルの原子エネルギー準位の基底状態の第1および第2の多様体内でゼーマン分裂を引き起こすことと、

放射源1によって、原子アンサンブルを電磁光放射ビーム2によって励起して、原子アンサンブル内に原子スピン配向をもたらすことを含む。

【0070】

これが発生している間に、上記で論じた方法で、サンプルに隣接してrfコイルを動作させて、rf周波数で振動する1次磁場を提供し、サンプルによってrf周波数で振動する2次磁場4をもたらすことができる。

10

【0071】

少なくとも部分的に2次磁場4の結果による原子アンサンブルの集合的な原子スピンの発生は、磁力計プローブビームとしても使用されるビーム2の偏極状態にマッピングされる。言い換えれば、このビームによってアンサンブルを励起することは、このビームによってアンサンブルを探索することでもある。

【0072】

検出器は、原子アンサンブルを通過した後のビーム2を検出して、振動する2次磁場4を検出し、この実施形態ではしたがって、材料欠陥の撮像を実行することができる。

20

【0073】

図1の実施形態には、単一のビーム2を使用するという利点があるが、これは20kHz～30kHzの範囲内、1kHz～30kHzの範囲内、または最大20kHzの低いラーモア周波数、典型的には30kHz以下で最も効果的であり、それに応じて、バイアス磁場源は、原子アンサンブル内にこれらの範囲のうちの1つの範囲内のラーモア周波数をもたらすように構成され動作される。しかし、以下に説明する図2の実施形態は、複雑さの増大を犠牲にするが、図1の実施形態より効果的である。

【0074】

図2の実施形態は、以下に論じるように円偏極ポンプビームも使用することを除いて、図1の実施形態と同様である。

【0075】

30

図2の磁力計は、放射源1によって放出された直線偏極ビーム2から第2のビームを分裂させるように構成されたビームスプリッタ13を含む。直線偏極ビーム2は、図1に関して説明したように継続し、第2のビームは、円偏極ポンプビーム11に変換され、検出セル内の原子アンサンブルへ誘導および提供され、上述したように、第1の多様体から第2の多様体の磁気ゼーマンサブレベルへの原子ポピュレーションの移動を増強するために使用される。

【0076】

この実施形態では、磁力計は、プローブビームが原子アンサンブルで閾値を上回る光放射パワーを有するように構成される。

【0077】

40

しかし、円偏極ビームによって励起が提供されるため、すべての実施形態で直線偏極ビームによって励起を提供する必要があるというわけではない。いくつかの実施形態では、直線偏極ビームのパワーを閾値より小さくし、励起を支援しないことも可能である。

【0078】

円偏極ポンプビームのパワーに関しては、ポンプおよびプローブビームによる偏極励起の特徴が異なることに留意されたい。円偏極ビームによる間接的な励起は、高いパワーを必要とせず、実際には信号は、約200～500μWで飽和し、さらに高いパワーの場合、信号の振幅は減少する。非線形性をもたらすのは、直線偏極ビームのみである。図13は、磁力計の振幅とポンプビームパワーとの関係を示すグラフである(Appl. Phys. Lett. 2012掲載)。他方では、図7b(以下に論じる)は、ポンプビームの

50

所与のパワーに対して、閾値を上回る限り、プローブビームが信号（偏極）を増大させることが可能であることを示す。増大は、パワー依存勾配（青色）の斜度の変化によって示されている。

【0079】

それに応じて、この実施形態では、ポンプビームのパワーは、 $200 \sim 500 \mu\text{W}$ の範囲内であるが、いくつかの実施形態では、この範囲外の値もなお使用することができる。

【0080】

図2の実施形態では、第2のビームは、鏡を介して4分の1波長板12を通して再誘導され、直線偏極を円偏極に変換し、検出セルでバイアス場方向に対して平行に誘導される。

【0081】

ポンプビームの円偏極は、光励起の有効性を改善する。この結果の1つは、システムをより高いラーモア周波数でより効果的に動作させることができることである。したがって、この実施形態では、バイアス磁場源は、原子アンサンブル内で 20kHz より大きいラーモア周波数をもたらすように構成され動作される。しかし、システムは、高いラーモア周波数で動作することに制限されるものではなく、より低いラーモア周波数、たとえば図1の実施形態の周波数で動作させることもできる。

【0082】

図2の実施形態では、ポンプビームは増大された励起を提供し、直線偏極ビームはプローブビームとして働くが、上記で説明したように、この実施形態では、直線偏極ビームも励起に寄与する。当業者には理解されるように、ポンプビームおよびプローブビームは、周波数に関して縮退している。この実施形態では、放射源は、プローブビームおよびポンプビームを組み合わせたパワーである $6\text{mW} \sim 7\text{mW}$ の領域内の光放射パワーを有するビームを放出するように構成される。他の実施形態では、このパワーをより大きくすることができ、これは最大 10mW とすることができ、または 10mW を上回ることができる。

【0083】

使用中、図2の実施形態は、図1の実施形態とほぼ同じように動作しかつ動作される。しかし、この実施形態では、原子アンサンブルは、プローブビームおよびポンプビームという2つのビームによって励起され、上記で論じたように、2つのビームの両方が励起に寄与する。

【0084】

当業者には理解されるように、図2の実施形態のように放射源が単一のビームを放出し、システムがビームを分裂させる代わりに、適当な偏極および類似の周波数が使用されることを条件に、複数の放射源を使用することもできるが、これによりシステムのコストおよび複雑さが増大する。

【0085】

さらに、一部が円偏極ビームに分裂および変換される直線偏極ビームを放射源1が放出する必要はない。これを逆に実行し、放射源が円偏極ビームを放出し、その一部が直線偏極ビームに分裂および変換されることも可能である。

【0086】

図2の実施形態の利点は、説明したようにビームが離調されるため、同じタイプの対称性を励起する（または欠く）ことである。これは、ビームを同じ周波数にすることができ、言い換えれば周波数に関して縮退していることができ、単一の放射源が両方を好都合に生成することが可能であることを意味する。離調がなければ、円偏極ビームおよび直線偏極ビームが競合するはずであり、これは、従来のシステムの場合と同様に、これを防止するために、異なる周波数を使用することが必要になるはずであり、複数の放射源が必要とされるはずであるということを意味する。

【0087】

別の実施形態では、システムは、図2に関連して上述したように構成され動作される。この実施形態では、原子アンサンブルはルビジウム蒸気であり、放射源は垂直共振器型面発光レーザダイオード（VCSEL）である。ルビジウムは、セシウムより低いパワーの

10

20

30

40

50

レーザダイオードによって記載の機能を提供することができ、比較的低いパワーのV C S E Lダイオードを使用することを可能にすることが有利である。これは、セシウムの約9 G H zと比較して、ルビジウムの基底状態の超微細分裂が約3または6 G H zであるからである。この実施形態では、放射源は、約4 mW以下、典型的には約4 mWの光放射パワーを有するビームを放出するように構成される。

【0088】

上述した特定の原子磁力計が、使用することのできる唯一のタイプの原子磁力計であるというわけではなく、たとえば検出器を変更することもできるが、好ましくは、検出器は、プローブビームの偏極および／または振幅を検出することができる光検出器であることが、当業者には理解されよう。

【0089】

いくつかの実施形態では、地球磁場をバイアス場として使用し、したがってバイアス磁場源を省略することも可能である。

【0090】

本明細書に記載する方法およびシステムの用途には、たとえば石油およびガスパイプならびにエネルギー分野における絶縁下の腐食の検出、輸送分野における鉄筋コンクリート構造の監視、物体の検出、監視、ならびに原子力発電所における核廃棄物容器の監視が含まれる。

【0091】

得られる利点には、システムを安全かつ非侵襲のものにすることができること（非電離放射）、パイプラインの内壁および／または外壁の腐食の検出を可能にすること、腐食とパイプ内の屈曲部／T字接合部／溶接部からのパイプラインの幾何形状の変化との区別を可能にすること、すべての絶縁タイプの走査を可能にすること、低コストにすることができ、分解能およびスイッチ走査モードの改善の提供を可能にすることが含まれる。

【0092】

主要な記載の実施形態は、原子磁力計に関するが、材料の化学分析または非破壊試験などの他の領域でも、原子スピン配向を生成するためのシステムおよび／または方法を使用することができる。そのような実施形態では、たとえば検出器を適宜省略または修正することができ、r fコイルを省略することができる。

【0093】

実験結果および議論

(1) 非共鳴光励起、(2) 非線形スピンダイナミクス、および(3) S E C（選択的緩和およびコヒーレンス移動[17~20]）という3つの要素を組み合わせた、室温のセシウム蒸気におけるスピン配向の生成の機構を調査した実験結果および議論を以下に提示する。当然ながら、以下に論じる詳細は、上述した実施形態で使用するすることができる。

【0094】

(1) 直線偏極レーザビームが、非共鳴光励起によって原子ポピュレーションを $F=3$ 多様体から $F=4$ 多様体へ動かし、図4(a)に示すように、両方のレベル内でポピュレーションの不均衡（アライメント）をもたらす。ビームの特定の周波数離調により、 $F=4$ レベルへ移動されたポピュレーションの大部分が、いずれかの伸張状態、すなわち最大または最小の磁気量子数を有するサブレベルへ進むことが確実になる。 $F=3$ レベル内のダイナミクスは、レーザ場への共鳴結合によって画定され、 $F=4$ の原子スピンは、弱い遠共鳴光学S E C結合の存在下でのみ発生する。

【0095】

(2) 光学場への弱い結合は、ポピュレーション分布の対称性を崩す非線形スピンダイナミクスを駆動する。特に、これによりポピュレーションの一部が伸張状態のうちの1つから動き、實際上これらの原子はS E C緩和を受けやすくなる(3)。

【0096】

これら2つの要因（非線形スピンダイナミクスおよびS E C）の結果、アライメントに寄与するスピン方向のうちの1つを表す成分の抑制、および低磁場での原子配向の生成が

10

20

30

40

50

観察される。論じた技法の直接的な実装は、無線周波数（rf）原子磁気測定〔21、22〕の領域内であるが、可能な応用例には、材料の化学分析〔23〕から非破壊試験〔24、25〕に及ぶ広い範囲の技術が含まれる。

【0097】

以下は、実験器具の簡単な説明を含む。原子スピン配向機構の成分は、後に論じる3つの測定パラメータ（レーザ周波数離調、ビームパワー、および磁場強度）に対するrf分光信号の依存によって調査される。

【0098】

実験設定

測定は、図1によるシステムを使用して、遮蔽された環境で実行される〔12、20、26〕が、これがすべての実施形態に必要なとは限らないことに留意されたい。

【0099】

厚さ2mmのミューメタルから作られた、エンドキャップを有する円筒形シールドの5つの層の使用によって、周囲の磁場が抑制される。シールド内のソレノイドが、よく制御されたオフセット磁場 B_{off} を生成し、相対均質度は、セルの長さにならって 10^{-4} を超過する。使用される原子は、周囲温度においてパラフィンで被覆されたセル3内に収容されたセシウム原子蒸気である（原子密度は $n_{Cs} = 0.33 - 1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ）。これらの原子は、直径20mmの直線偏極レーザビーム2によって光励起され、図4（b）に示すように、 B_{off} の方向に直交して伝播する。ビーム2の偏極は、 B_{off} に対して平行である。ビームは、セシウムD2線〔図4（a）〕上を動作するDBRダイオードレーザ1によって提供され、オフセットロックを使用してマスタレーザ周波数に対して $\pm 10 \text{ GHz}$ の範囲内で周波数安定化することができる。同じ直線偏極ビームがまた、ファラデー効果を介して偏極歳差運動のプロープとして作用し〔27〕、集合的な原子スピンの発生が、直線偏極プロープビームの偏極状態にマッピングされる〔8、21、28～30〕。セルを通して伝送されるレーザ光は、入射偏極に対して 45° に向けられた結晶偏光子からなる偏光計6と、商用の均衡光検出器7とによって分析される。その結果得られる信号の2つの直角成分が、ロックイン増幅器によって測定され、駆動するrf場（ B_{rf} ）周波数の基本振動に関係付けられる。

【0100】

非共鳴励起

D2線の遷移確率に基づく簡単なレート方程式により、 $F = 3$ レベルから $F = 4$ レベルへのポピュレーション移動および $F = 4$ 多様体内でのポピュレーションの不均衡の生成のための最適条件（レーザ離調）が、相互に排他的であることが裏付けられる。前者は、レーザ周波数が $6^2S_{1/2} F = 3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F' = 4$ 遷移近傍に同調されたときに最適化され、このとき後者の効果は最小になる。以下の節では、 $F = 4$ レベルにおける配向の増加を最適化する周波数範囲を識別する。

【0101】

図5は、rf信号の大きさ

【数1】

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

を示し、上式で X および Y は、直線偏極レーザビームの周波数が $F = 3$ 基底状態を伴う1群のD2線遷移にならって走査されるときにrf分光信号の2つの直角成分である（ゼロ離調は、 $6^2S_{1/2} F = 3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F' = 2$ の遷移を表す）。 B_{ff} の比較的小さい振幅（ラーモア周波数は約 22 kHz ）により、一方では、両方の基底状態レベルからの寄与を個々に区別することができ、他方では、特定の多様体内のゼーマンレベルが縮退することが確実になる。 $F = 3$ スペクトルプロファイルの成分間の分裂は、テンソル光シフトによってのみ画定される。特に、レーザ周波数が原子共鳴に近づくとき、 $F = 3$ のテンソル光シフトが増大し、その結果、関連するプロファイルの成分間の分裂も増大する。共鳴から

の離調が比較的大きいため、 $F = 4$ プロファイルでは顕著な分裂は生じない。 $6^2S_{1/2} F = 3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F' = 4$ の遷移近傍における $F = 3$ レベルから $F = 4$ レベルへの効率的な励起の結果、レーザ離調に対する $F = 3$ 信号振幅に非対称性がもたらされる。 $F = 4$ 信号の最大が観察される厳密な離調は、レーザパワーによって変動し、約 -416 MHz (3.3 mW) から約 -290 MHz (10 mW) の範囲である。非共鳴 $F = 4$ 励起の観察は、 $D1$ 遷移で観察されるものに類似しているが [31]、2つの違いは指摘に値する。第1に、ゼロ以外のレーザ離調 (図5に表す測定では約 -310 MHz) において、多様体間の最大励起に到達する。第2に、 $F = 3$ レベル (アライメント) および $F = 4$ レベル (配向) 内で生成される偏極の特徴は異なる。

【0102】

非線形ダイナミクス

直線偏光

【数2】

$$(\vec{E}_p)$$

が、テンソル a_c 分極率 α_2 によって原子基底状態に結合し (単スピンハミルトニアン、約 α_2 の光シフトのスカラー部なし、

【数3】

$$(\vec{E}_p \hat{f}^{(i)})^2$$

ここで

【数4】

$$\hat{f}^{(i)}$$

は、第 i の原子の総角運動量演算子である)、したがって原子スピンドイナミクスは概して、非線形の特徴を呈する [11、12]。

【0103】

図6は、 $200 \mu\text{W}$ (a) および 9.1 mW (b) のレーザパワーによって記録された $r f$ スペクトルを示す。 $F = 3$ 共鳴および $F = 4$ 共鳴の位置が、それぞれ赤色および黒色の矢印で示されている。 $r f$ 場周波数が、 B_{off} によって導入される隣接ゼーマンサブレベル間の分裂に整合するとき、偏極回転共鳴が観察される。このアライメントされたシステムでは、 $r f$ 応答は、逆の符号を有する2つのプロファイルからなり、分散性の線形をもたらす。図6(a)に示すように、低いパワーで、 $r f$ スペクトルは、直接光励起によってもたらされる $F = 3$ レベル内のアライメントにより、大きく広い特徴からなり、 $F = 4$ 多様体への非共鳴励起により、構造ははるかに小さくなる。レーザビームパワーの増大は、図6(b)に示すように、 $F = 3$ および $F = 4$ 信号振幅の増大に変換されるだけではない。 $F = 3$ プロファイルの特徴が変わらないままであるのに対して、 $F = 4$ 信号の対称性の変化は、原子配向の存在を示す。 $F = 3$ ゼーマンサブレベルへのレーザ光の共鳴結合の結果、対応するスペクトルプロファイルのパワーが広くなり、これは図6(b)に見られる広く低い振幅の背景に寄与する。

【0104】

$F = 4$ スペクトルプロファイルが原子配向を表すことを裏付けるために、 B_{off} の方向に沿って伝播する円偏極 (ポンプ) ビームによる励起が追加された [26]。ポンプビームは、ダイオードレーザによって生成され、セシウム $6^2S_{1/2} F = 3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F' = 2, 3$ のクロスオーバーに周波数ロックされる。図7(a)の黒色の実線は、直線偏極ビームのみによって記録された $F = 4$ プロファイルに対する $r f$ スペクトルを示す。赤色の破線および青色の点線は、ポンプビームの2つの直交円偏極のうちの1つが追加された場合を

表す。ポンプビームの存在は、サンプル内に原子配向をもたらす（ B_{off} に対して平行または逆平行）。直線偏極ビームおよびポンプビームによって生成された配向が一致する場合、観察されるプロファイルの振幅が増大する〔図7（a）の青色の点線〕。逆のポンプ偏極の場合、信号振幅は減少し、スペクトルの特徴が変化する（赤色の破線）。逆のポンプビーム偏極に対する信号振幅の依存が、図7（b）に示されている（赤色の点および青色の菱形）。直交偏極ポンプビームによってもたらされる信号の振幅は、プローブパワーの2 mW以下である。このパワーを上回る振幅の非対称性は、直線偏極ビームによって誘起されるサンプル配向によってもたらされる。この効果の特徴はまた、直線偏極ビームのみによってもたらされる信号のための振幅データ内に存在する（黒色の三角形）。2 mWの上で見られる振幅パワー依存の直線勾配から2次勾配への変化は、下にある機構の非線形特徴を裏付ける。図6（a）のスペクトルの計算および分裂は、テンソル光シフト（0.2 Hz）がSEC緩和率（3 Hz）より小さいことを示す。しかし、〔12〕の図6に示されているように、そのような小さい値でも、非線形スピンドायナミクスを引き起こすことができる。

【0105】

スピン交換衝突

非線形スピンドायナミクスの効果は、SECに駆動されるコヒーレンス移動によって増強される。ゼーマンサブレベルの遷移周波数間の縮退は、SECに支配されるデコヒーレンス速度の減少をもたらすことが実証されている〔20〕。非縮退の場合とは対照的に、歳差運動スピン間の周波数不整合（位相緩和）は、SECによって影響されるか否かにかかわらず、無視できるほどであり、多様体の変化を伴わないSECプロセスは、緩和に寄与しない。この効果の特徴のうちの1つ、いわゆるコヒーレンス移動プロセス〔17～20〕は、関連するコヒーレンスを表すスペクトルプロファイルが、スペクトルの主要成分の周りに集まることである〔20、32〕。

【0106】

図8は、 B_{off} に対するrf分光信号の2つの正規化された直角位相（X、Y）の依存を示す。正規化は、動作周波数によるrf分光信号の振幅および位相の変動を考慮に入れ、 B_{off} の同じ範囲にわたって標準的なポンププローブ構成〔26〕で実行された。大きい B_{off} （ラーモア周波数は約200 kHz）に対する図8（a）のスペクトルプロファイルは、図8（a）の原子アライメントに典型的な形状を有する。 B_{off} が減少すると、逆の符号を有する成分の重複が増大し、その結果、信号振幅が低減される。非線形スピンドायナミクスの結果、共鳴から約-0.05 kHzの離調に位置決めされたプロファイルによって、図5（a）に表す伸張状態のポピュレーションが減少する。この結果、コヒーレンスに対する緩和率が高くなり、スペクトルのうち負の離調を有する部分に寄与する。その結果、負の離調を有する成分の振幅が、他のプロファイルより B_{off} とともに急速に減少する。様々な成分間のわずかな周波数不整合（ B_{off} の低減に伴う減少）により、20 kHzを下回る周波数範囲にわたって観察されるコヒーレンス移動および原子配向の増加が増強される。完全を期するため、図8（b）に B_{off} の強度とともに他の直角成分の発生を示す。

【0107】

結論 無線周波数原子磁力計

本発明者らは、室温のセシウム蒸気における原子スピン配向の生成を実証した。原子偏極の存在は、無線周波数原子磁力計の動作にとって重要である。単一ビーム技法のrf周波数範囲（1 kHz～30 kHz）は、磁気誘導に基づく非破壊試験の文脈で興味深く、低い動作周波数が、（いわゆる1次）磁場のより深い浸入深さに変換される〔25〕。本明細書に論じる測定構成は、通常は2つ／3つの独立したレーザによって実現される $F=4$ 原子配向の効率的な生成および非共鳴探測を組み合わせる。提示する方式の明らかな利益は、器具の簡単さである。信号対雑音比（SNR）の体系的な測定により、論じた選択肢は、最適化されたポンププローブ構成で記録されたものの1.3～1.4分の1のSNRのみを与えることが裏付けられる〔26〕。図5に示す信号周波数依存の比較的急なピークは、 $F=3$ 共鳴の強い飽和にもかかわらず、レーザ周波数の安定化を可能にする。

【0108】

上記で論じたように、直線偏極ビームによって生成される配向が B_{off} の比較的狭い範囲にわたって観察されるという課題は、同じ周波数（たとえば、 $6^2S_{1/2}F=3 \rightarrow 6^2P_{3/2}F'=2$ の遷移から約 290 MHz ）で動作する円偏極（ポンプ）ビームおよび直線偏極（プローブ）ビームを伴う図2の実施形態などの縮退ポンププローブ構成の実装例によって克服することができる。ポンプビームに対するこの周波数が、最適化された間接的励起方式使用される周波数からさほど遠くないことは、指摘に値する[26]。セシウムの基底状態の超微細分裂（ 9.172 GHz ）は、 $F=4$ からのレーザ周波数の離調を画定し、これは信号振幅および非線形性強度に影響する。したがって、 ^{85}Rb 蒸気（ 3 GHz の超微細分裂）の使用により、記録される信号振幅を増大させることができる。試験では、縮退ポンププローブおよび ^{85}Rb 蒸気の使用の組合せにより、 4 mW のレーザ光パワーを有する原子磁力計の効率的な動作を可能にすることができ、これは単一の垂直共振器型面発光レーザダイオードから実現可能であることが示される。

10

【0109】

記載する実施形態のすべての任意選択の好ましい特徴および修正例、ならびに従属請求項は、本明細書に教示される本発明のあらゆる態様で使用可能である。さらに、従属請求項の個々の特徴、ならびに記載する実施形態のすべての任意選択の好ましい特徴および修正例は、互いに組み合わせることができ、交換可能である。

【0110】

本出願が優先権を主張する英国特許出願第1914464.1号、および本出願に添付の要約書における開示は、参照により本明細書に組み込まれている。

20

【0111】

参考文献

1. D. D. Awschalom, Ronald Hanson, J. Wrachtrup, and B. B. Zhou, *Nat. Photonics* 12, 516 (2018).
2. A. Smith, B. E. Anderson, H. Sosa-Martinez, C. A. Riofrio, I. H. Deutsch, and P. S. Jessen, *Phys. Rev. Lett.* 111, 170502 (2013).
3. T. Chalopin, C. Bouazza, A. Evrard, V. Makhlov, D. Dreon, J. Dalibard, L. A. Sidorenkov, and S. Nascimbene, *Nat. Commun.* 9, 4955 (2018).
4. W. Happer, *Rev. Mod. Phys.* 44, 169 (1972).
5. N. Fortson, and B. Heckel, *Phys. Rev. Lett.* 59, 1281 (1987).
6. W. M. Klipstein, S. K. Lamoreaux, and N. Fortson, *Phys. Rev. Lett.* 76, 2266 (1996).
7. A. Andalkar, R. B. Warrington, M. V. Romalis, S. K. Lamoreaux, B. Heckel, and N. Fortson, *Phys. Rev. A* 65, 023407 (2002).
8. W. Wasilewski, K. Jensen, H. Krauter, J. J. Renema, M. V. Balabas, and E. S. Polzik, *Phys. Rev. Lett.* 104, 133601 (2010).
9. T. G. Walker, and W. Happer, *Rev. Mod. Phys.* 69, 629 (1997).
10. S. Appelt, B.-A. Barnga, C. J. Erikson, M. V. Romalis, A. R. Young, and W. Happer, *Phys. Rev. A* 58, 1412 (1998);
11. G. A. Smith, S. Chaudhury, A. Silberfarb, I. H. Deutsch, and P. S. Jessen, *Phys. Rev. Lett.* 93, 163602 (2004).
12. W. Chalupczak, and P. Josephs-Franks, *Phys. Rev. Lett.* 115, 033004 (2015).
13. D. Budker, D. F. Kimball, S. M. Rochester, V. V. Yashchuk, *Phys. Rev. Lett.* 85, 2088 (2000).
14. M. C. Kuntz, R. C. Hilborn, and A. M. Spencer, *Phys. Rev. A* 65, 023411 (2002).
15. S. M. Rochester, M. P. Ledbetter, T. Zigdon, A. D. Wilson-Gordon, D. Budker, *Phys. Rev. A* 85, 022125 (2012).
16. M. Auzinsh, D. Budker, and S. M. Rochester, *Optically polarized atoms*, Oxford University Press (2010).

30

40

50

17. G. A. Ruff and T. R. Carver, *Phys. Rev. Lett.* **15**, 282 (1965).
18. S. Haroche and C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.* **24**, 974 (1970).
19. J. Skalla, G. Wackerle, and M. Mehring, *Opt. Commun.* **127**, 31 (1996).
20. W. Chalupczak, P. Josephs-Franks, B. Patton, and S. Pustelny, *Phys. Rev. A* **90**, 042509 (2014).
21. M. Savukov, S. J. Seltzer, M. V. Romalis, and K. L. Sauer, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 063004 (2005).
22. W. Chalupczak, R. M. Godun, and S. Pustelny, *Advances in At. Mol. and Opt. Phys.* **67**, 297-336 (2018).
23. G. Bevilacqua, V. Biancalana, Y. Dancheva, A. Vigilante, A. Donati, and C. Rossi, *J. Phys. Chem. Lett.* **8**, 6176 (2017) 10
24. A. Wickenbrock, S. Jurgilas, A. Dow, L. Marmugi, and F. Renzoni, *Opt. Lett.* **39**, 6367 (2014).
25. P. Bevington, R. Gartman and W. Chalupczak, *J. Appl. Phys.* **125**, 094503 (2019).
26. W. Chalupczak, R. M. Godun, P. Anielski, A. Wojciechowski, S. Pustelny, and W. Gawlik, *Phys. Rev. A* **85**, 043402 (2012).
27. Y. Takahashi, K. Honda, N. Tanaka, K. Toyoda, K. Ishikawa, and T. Yabuza ki, *Phys. Rev. A* **60**, 4974 (1999).
28. M. P. Ledbetter, I. M. Savukov, V. M. Acosta, D. Budker, and M. V. Romalis, *Phys. Rev. A* **77**, 033408 (2008) 20
29. W. Chalupczak, R. M. Godun, S. Pustelny, and W. Gawlik, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 242401 (2012).
30. G. Bevilacqua, V. Biancalana, P. Chessa, and Y. Dancheva, *Appl. Phys. B* **122**, 103 (2016).
31. W. Chalupczak, P. Josephs-Franks, S. Pustelny, and W. Gawlik, *Phys. Rev. A* **81**, 013422 (2010).
32. W. Happer and A. C. Tam, *Phys. Rev. A* **16**, 1877 (1977).

30

40

50

【図面】
【図 1】

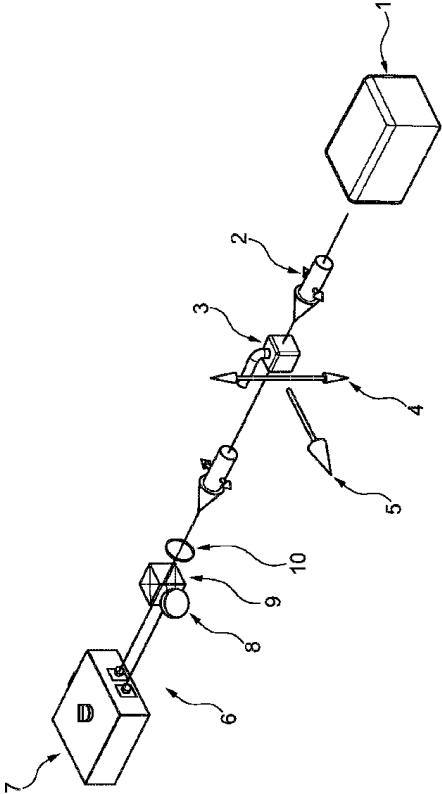


Fig. 1

【図 2】

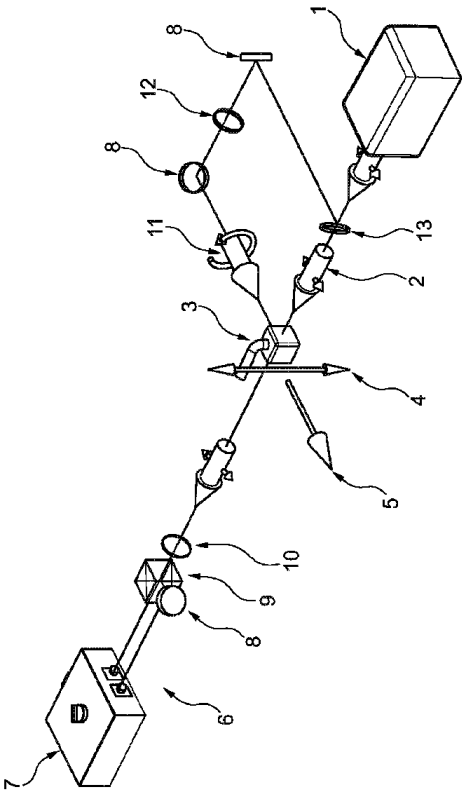


Fig. 2

【図 3】

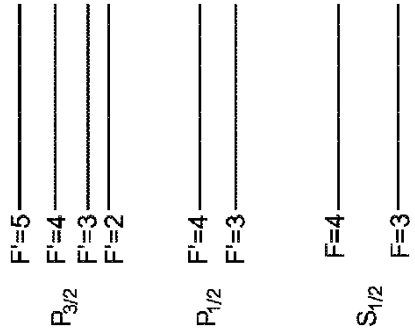


Fig. 3

【図 3 a】

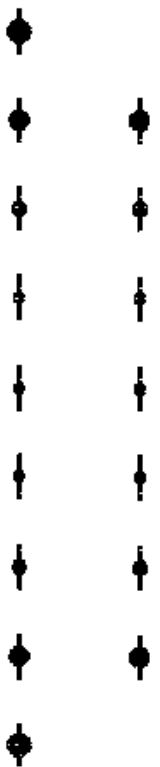


Fig. 3a

10

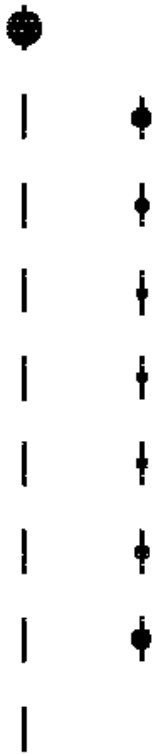
20

30

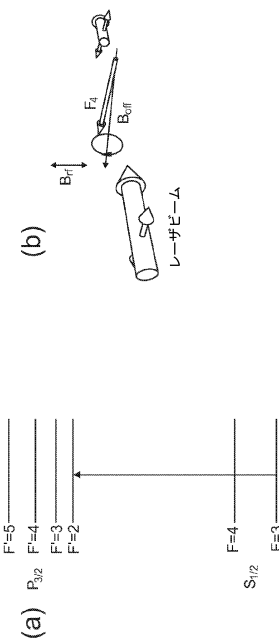
40

50

【図 3 b】



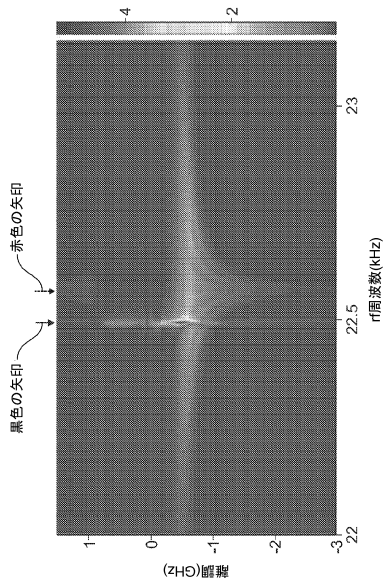
【図 4】



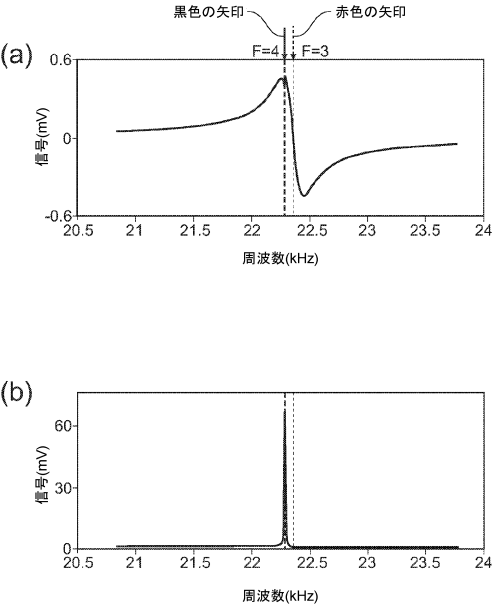
10

20

【図 5】



【図 6】

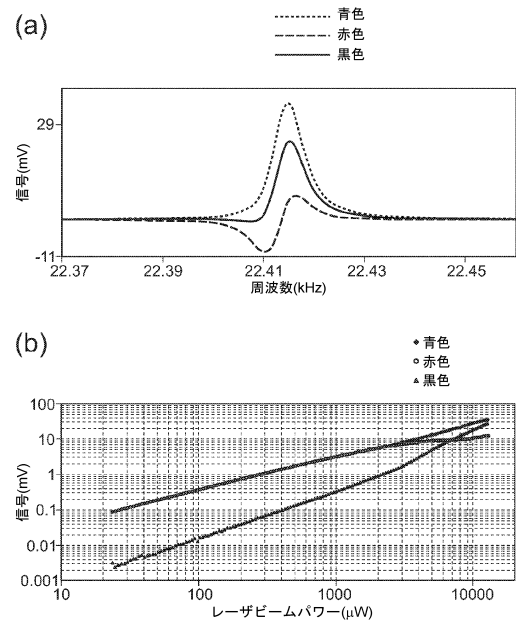


30

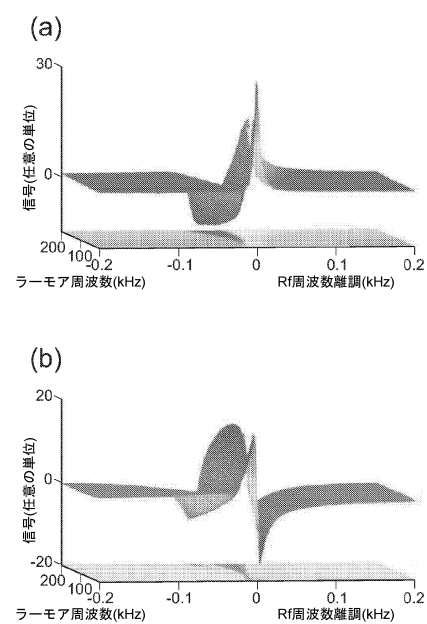
40

50

【図 7】



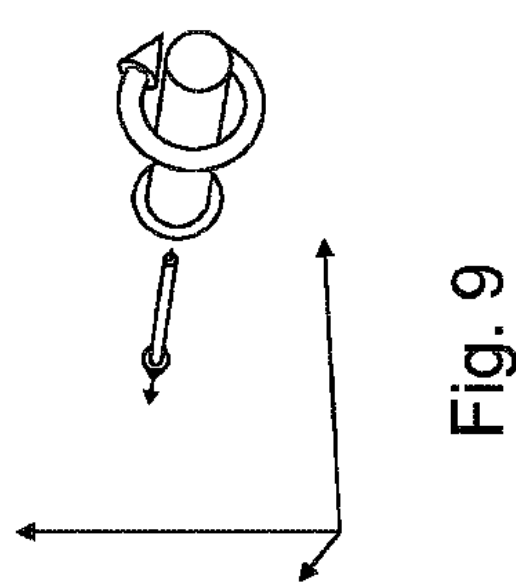
【図 8】



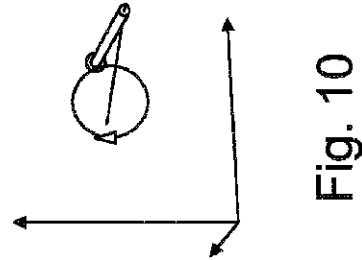
10

20

【図 9】



【図 10】



30

40

50

【図 1 1】

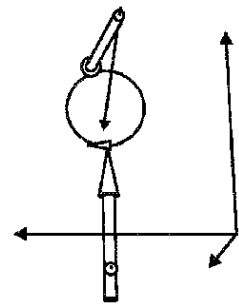
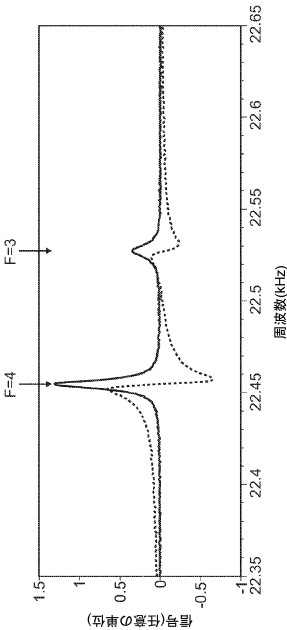


Fig. 11

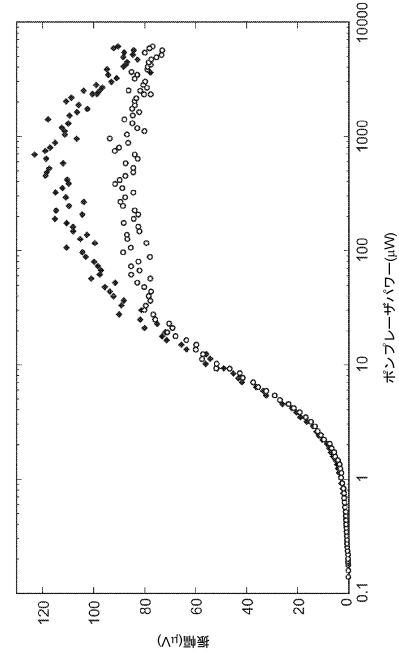
【図 1 2】



10

20

【図 1 3】



30

40

50

フロントページの続き

セントラル スコットランド グラスゴー リッチモンドストリート 16 ザ ユニバーシティ オブ
ストラスクライド

(72)発明者 ガートマン, ラファル

イギリス国 ティーダブリュー11 0エルダブリュー ミドルセックス ミドルセックス テディン
トン ハンプトンロード ナショナル フィジカル ラボラトリー

(72)発明者 チャルザック, ウィトルド

イギリス国 ティーダブリュー11 0エルダブリュー ミドルセックス テディントン ハンプトン
ロード ナショナル フィジカル ラボラトリー

審査官 比嘉 翔一

(56)参考文献 特開2013-127483 (JP, A)

特開2014-197734 (JP, A)

W. Chalupczak, 外, Enhancement of optically pumped spin orientation via spin-exchange col
lisions at low vapor density, Physical Review A, Vol.85, Iss. 4, 2012年04月04日, [https://
journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.85.043402](https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.85.043402)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G01N24/00-G01N24/14

G01R33/00-G01R33/64

A61B 5/055

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDream3)