

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-298612

(P2008-298612A)

(43) 公開日 平成20年12月11日(2008.12.11)

(51) Int.Cl.
G01R 33/28 (2006.01)

F I
G O I N 24/02

テーマコード (参考)

Y

審査請求 未請求 請求項の数 20 O L (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2007-145488 (P2007-145488)
(22) 出願日 平成19年5月31日 (2007.5.31)

(71) 出願人 503360115
独立行政法人科学技術振興機構
埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(74) 代理人 100088155
弁理士 長谷川 芳樹
(74) 代理人 100124291
弁理士 石田 悟
(72) 発明者 遊佐 剛
宮城県仙台市青葉区立町2-14-1104

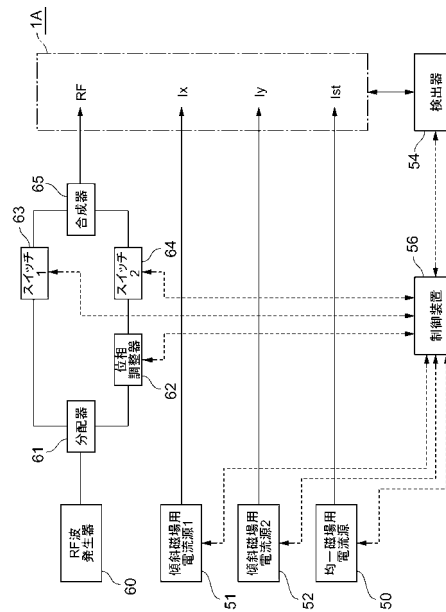
(54) 【発明の名称】 核磁気共鳴撮像システム及び撮像方法

(57) 【要約】

【課題】 測定対象物の画像取得を高い分解能で行うことが可能な核磁気共鳴撮像システム、及び撮像方法を提供する。

【解決手段】 均一磁場用電極、x軸方向の傾斜磁場用電極、y軸方向の傾斜磁場用電極を有する電極群、及びRFアンテナを含む核磁気共鳴撮像素子1Aと、電極群の各電極に電流を供給する電流源50~52と、RFアンテナにRFパルスを供給するRFパルス供給部と、核磁気共鳴信号を検出する検出器54と、核磁気共鳴による撮像を制御する制御装置56とによって撮像システムを構成する。制御装置56は、測定位置(Xm, Ym)に対し、複数段階の操作過程を含む測定過程によって測定位置での測定対象物の原子核の核スピンを操作した後、核磁気共鳴信号の検出を行って、測定位置における局所的な核スピンの情報を取得する。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

核磁気共鳴の測定領域に磁場を印加して、前記測定領域内で局所的な測定位置を設定するための磁場印加用電極群、及び前記測定領域に対して R F パルスを照射するための R F 照射手段を含む核磁気共鳴撮像素子と、

前記磁場印加用電極群を構成する電極のそれぞれに対して磁場発生用の電流を供給する電流供給手段と、

前記 R F 照射手段に対して前記 R F パルスを供給する R F パルス供給手段と、

前記核磁気共鳴撮像素子の前記測定領域内での測定対象物からの核磁気共鳴信号を検出する検出手段と、

前記測定対象物に対する核磁気共鳴による撮像を制御する撮像制御手段とを備え、

前記磁場印加用電極群は、

前記測定領域について測定面を想定するとともに、前記測定領域に対して、設定すべき前記測定位置に応じた均一磁場を印加する均一磁場用電極と、前記測定面に平行な x 軸方向について傾斜磁場を印加する第 1 傾斜磁場用電極と、前記測定面に平行で x 軸と直交する y 軸方向について傾斜磁場を印加する第 2 傾斜磁場用電極とを有して構成され、

前記撮像制御手段は、

x 軸方向の位置 X_m 及び y 軸方向の位置 Y_m が選択された前記測定位置 (X_m, Y_m) に対し、それぞれ所定条件で前記磁場印加用電極群による磁場の印加、及び前記 R F 照射手段による R F パルスの照射を行う複数段階の操作過程を含む測定過程によって、前記測定位置における前記測定対象物の原子核の核スピンを操作した後、前記検出手段によって核磁気共鳴信号の検出を行って、前記測定位置における局所的な核スピンの情報を取得することを特徴とする核磁気共鳴撮像システム。

【請求項 2】

前記撮像制御手段は、

前記複数段階の操作過程を含む前記測定過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの中間状態となり、前記測定位置を除く前記測定領域内の全ての位置で核スピンの初期状態となるように、前記測定対象物の原子核の核スピンを操作することを特徴とする請求項 1 記載の撮像システム。

【請求項 3】

前記測定面において、前記測定位置を通り y 軸に平行な $x = X_m$ の直線を X_m 線、前記測定位置を通り x 軸に平行な $y = Y_m$ の直線を Y_m 線とし、

前記撮像制御手段は、

3 段階以上の操作過程を有し、前記測定位置の核スピンを所定状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で前記測定位置を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程と、3 段階以上の操作過程を有し、前記測定位置の核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で前記測定位置を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程とを含む前記測定過程によって、前記測定対象物の原子核の核スピンを操作することを特徴とする請求項 1 または 2 記載の撮像システム。

【請求項 4】

前記前過程及び前記後過程のそれぞれは、y 軸方向に延びる X_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する 2 段階の操作過程による y 軸勾配エコー操作、または x 軸方向に延びる Y_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する 2 段階の操作過程による x 軸勾配エコー操作の少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項 3 記載の撮像システム。

【請求項 5】

前記後過程は、前記 3 段階以上の操作過程において、前記 R F 照射手段による R F パルスの照射を行わない操作過程を含み、

前記前過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの反転状態または初期状態となることを特徴とする請求項 3 または 4 記載の撮像システム。

10

20

30

40

50

【請求項 6】

前記前過程は、前記 3 段階以上の操作過程において、前記 R F 照射手段による R F パルスの照射を行わない操作過程を含み、

前記前過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの中間状態となるとともに、前記後過程の最初の操作過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの反転状態または初期状態となることを特徴とする請求項 3 または 4 記載の撮像システム。

【請求項 7】

前記前過程は、R F パルスとして位相 0° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 90° の 90° パルスを照射する操作過程とを含み、

前記後過程は、R F パルスとして位相 180° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 270° の 90° パルスを照射する操作過程とを含むことを特徴とする請求項 3 ~ 6 のいずれか一項記載の撮像システム。

10

【請求項 8】

前記前過程は、R F パルスとして位相 0° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 270° の 90° パルスを照射する操作過程とを含み、

前記後過程は、R F パルスとして位相 180° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 90° の 90° パルスを照射する操作過程とを含むことを特徴とする請求項 3 ~ 6 のいずれか一項記載の撮像システム。

【請求項 9】

前記核磁気共鳴撮像素子は、一方の面が前記測定面となっている基板を有し、

20

前記磁場印加用電極群は、前記基板の前記測定面上に集積化されて設けられ、前記基板に対して所定領域に設定された前記測定領域に磁場を印加して、前記測定領域内で局所的な前記測定位置を設定し、

前記 R F 照射手段は、前記基板に対して所定位置に設けられ、前記基板での前記測定領域に対して R F パルスを照射することを特徴とする請求項 1 ~ 8 のいずれか一項記載の撮像システム。

【請求項 10】

前記磁場印加用電極群において、

前記均一磁場用電極は、前記測定領域を囲むように形成されたループ電極を含み、

前記第 1 傾斜磁場用電極は、x 軸方向について前記測定領域を挟むように形成された一対の第 1 スプリット電極を含み、

30

前記第 2 傾斜磁場用電極は、y 軸方向について前記測定領域を挟むように形成された一対の第 2 スプリット電極を含む

ことを特徴とする請求項 1 ~ 9 のいずれか一項記載の撮像システム。

【請求項 11】

核磁気共鳴の測定領域に磁場を印加して、前記測定領域内で局所的な測定位置を設定するための磁場印加用電極群、及び前記測定領域に対して R F パルスを照射するための R F 照射手段を含み、

前記磁場印加用電極群が、前記測定領域について測定面を想定するとともに、前記測定領域に対して、設定すべき前記測定位置に応じた均一磁場を印加する均一磁場用電極と、前記測定面に平行な x 軸方向について傾斜磁場を印加する第 1 傾斜磁場用電極と、前記測定面に平行で x 軸と直交する y 軸方向について傾斜磁場を印加する第 2 傾斜磁場用電極とを有して構成された核磁気共鳴撮像素子を用い、

40

前記磁場印加用電極群を構成する電極のそれぞれに対して磁場発生用の電流を供給する電流供給ステップと、

前記 R F 照射手段に対して前記 R F パルスを供給する R F パルス供給ステップと、

前記核磁気共鳴撮像素子の前記測定領域内での測定対象物からの核磁気共鳴信号を検出する検出ステップと、

前記測定対象物に対する核磁気共鳴による撮像を制御する撮像制御ステップとを備え、

50

前記撮像制御ステップは、

x 軸方向の位置 X_m 及び y 軸方向の位置 Y_m が選択された前記測定位置 (X_m, Y_m) に対し、それぞれ所定条件で前記磁場印加用電極群による磁場の印加、及び前記 RF 照射手段による RF パルスの照射を行う複数段階の操作過程を含む測定過程によって、前記測定位置における前記測定対象物の原子核の核スピンを操作した後、前記検出ステップによって核磁気共鳴信号の検出を行って、前記測定位置における局所的な核スピンの情報を取得することを特徴とする核磁気共鳴撮像方法。

【請求項 12】

前記撮像制御ステップは、

前記複数段階の操作過程を含む前記測定過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの中間状態となり、前記測定位置を除く前記測定領域内の全ての位置で核スピンの初期状態となるように、前記測定対象物の原子核の核スピンを操作することを特徴とする請求項 11 記載の撮像方法。

10

【請求項 13】

前記測定面において、前記測定位置を通り y 軸に平行な $x = X_m$ の直線を X_m 線、前記測定位置を通り x 軸に平行な $y = Y_m$ の直線を Y_m 線とし、

前記撮像制御ステップは、

3 段階以上の操作過程を有し、前記測定位置の核スピンを所定状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で前記測定位置を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程と、3 段階以上の操作過程を有し、前記測定位置の核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で前記測定位置を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程とを含む前記測定過程によって、前記測定対象物の原子核の核スピンを操作することを特徴とする請求項 11 または 12 記載の撮像方法。

20

【請求項 14】

前記前過程及び前記後過程のそれぞれは、y 軸方向に延びる X_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する 2 段階の操作過程による y 軸勾配エコー操作、または x 軸方向に延びる Y_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する 2 段階の操作過程による x 軸勾配エコー操作の少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項 13 記載の撮像方法。

【請求項 15】

前記後過程は、前記 3 段階以上の操作過程において、前記 RF 照射手段による RF パルスの照射を行わない操作過程を含み、

30

前記前過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの反転状態または初期状態となることを特徴とする請求項 13 または 14 記載の撮像方法。

【請求項 16】

前記前過程は、前記 3 段階以上の操作過程において、前記 RF 照射手段による RF パルスの照射を行わない操作過程を含み、

前記前過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの中間状態となるとともに、前記後過程の最初の操作過程を経た段階において、前記測定位置で核スピンの反転状態または初期状態となることを特徴とする請求項 13 または 14 記載の撮像方法。

【請求項 17】

40

前記前過程は、RF パルスとして位相 0° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 90° の 90° パルスを照射する操作過程とを含み、

前記後過程は、RF パルスとして位相 180° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 270° の 90° パルスを照射する操作過程とを含むことを特徴とする請求項 13 ~ 16 のいずれか一項記載の撮像方法。

【請求項 18】

前記前過程は、RF パルスとして位相 0° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 270° の 90° パルスを照射する操作過程とを含み、

前記後過程は、RF パルスとして位相 180° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 90° の 90° パルスを照射する操作過程とを含むことを特徴とする請求項 13 ~ 1

50

6のいずれか一項記載の撮像方法。

【請求項19】

前記核磁気共鳴撮像素子は、一方の面が前記測定面となっている基板を有し、

前記磁場印加用電極群は、前記基板の前記測定面上に集積化されて設けられ、前記基板に対して所定領域に設定された前記測定領域に磁場を印加して、前記測定領域内で局所的な前記測定位置を設定し、

前記RF照射手段は、前記基板に対して所定位置に設けられ、前記基板での前記測定領域に対してRFパルスを照射する

ことを特徴とする請求項11～18のいずれか一項記載の撮像方法。

【請求項20】

前記磁場印加用電極群において、

前記均一磁場用電極は、前記測定領域を囲むように形成されたループ電極を含み、

前記第1傾斜磁場用電極は、x軸方向について前記測定領域を挟むように形成された一対の第1スプリット電極を含み、

前記第2傾斜磁場用電極は、y軸方向について前記測定領域を挟むように形成された一対の第2スプリット電極を含む

ことを特徴とする請求項11～19のいずれか一項記載の撮像方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、核磁気共鳴現象を用いて測定対象物の画像を取得する核磁気共鳴撮像素子を用いた撮像システム、及び撮像方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

核磁気共鳴撮像(MRI: Magnetic Resonance Imaging)法は、磁場中に置かれた測定対象物に高周波(RF波)を照射し、測定対象物中の原子核に生じる核磁気共鳴現象を用いて、その内部の画像情報を非破壊で取得する方法である。このMRI法では、測定対象物に傾斜磁場を印加することによって対象物中での測定位置を特定して、その画像情報を取得する方法が用いられている。

【0003】

核磁気共鳴撮像装置(MRI装置)は、一般には、核磁気共鳴測定用のRFパルスを測定対象物に照射するためのRF照射コイル、測定対象物に静磁場、傾斜磁場を印加するための磁石またはコイル、及び測定対象物からの核磁気共鳴(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)信号を検出するための検出コイルなどによって構成される(例えば、特許文献1参照)。このようなMRI法は、例えば、医療分野における被検体の画像取得などに広く利用されている。

【特許文献1】特開2006-158767号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

上記した従来の核磁気共鳴撮像装置では、その核磁気共鳴測定の位置分解能は、通常、数mm程度である。一方、例えばナノメートル(nm)スケールなどの微細構造についても、微細構造を測定対象物としたMRI法による画像取得の可能性が考えられる。しかしながら、従来の核磁気共鳴撮像装置の構成では、そのような微細構造を測定可能な、高い位置分解能を実現することは困難である。

【0005】

本発明は、以上の問題点を解決するためになされたものであり、核磁気共鳴撮像法による測定対象物の画像取得を高い分解能で行うことが可能な核磁気共鳴撮像素子を用いた撮像システム、及び撮像方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

10

20

30

40

50

【0006】

このような目的を達成するために、本発明による核磁気共鳴撮像システムは、(1)核磁気共鳴の測定領域に磁場を印加して、測定領域内で局所的な測定位置を設定するための磁場印加用電極群、及び測定領域に対してRFパルスを照射するためのRF照射手段を含む核磁気共鳴撮像素子と、(2)磁場印加用電極群を構成する電極のそれぞれに対して磁場発生用の電流を供給する電流供給手段と、(3)RF照射手段に対してRFパルスを供給するRFパルス供給手段と、(4)核磁気共鳴撮像素子の測定領域内での測定対象物からの核磁気共鳴信号を検出する検出手段と、(5)測定対象物に対する核磁気共鳴による撮像を制御する撮像制御手段とを備え、(6)磁場印加用電極群は、測定領域について測定面を想定するとともに、測定領域に対して、設定すべき測定位置に応じた均一磁場を印加する均一磁場用電極と、測定面に平行なx軸方向について傾斜磁場を印加する第1傾斜磁場用電極と、測定面に平行でx軸と直交するy軸方向について傾斜磁場を印加する第2傾斜磁場用電極とを有して構成され、(7)撮像制御手段は、x軸方向の位置 X_m 及びy軸方向の位置 Y_m が選択された測定位置(X_m, Y_m)に対し、それぞれ所定条件で磁場印加用電極群による磁場の印加、及びRF照射手段によるRFパルスの照射を行う複数段階の操作過程を含む測定過程によって、測定位置における測定対象物の原子核の核スピンを操作した後、検出手段によって核磁気共鳴信号の検出を行って、測定位置における局所的な核スピンの情報を取得することを特徴とする。

10

【0007】

また、本発明による核磁気共鳴撮像方法は、(a)核磁気共鳴の測定領域に磁場を印加して、測定領域内で局所的な測定位置を設定するための磁場印加用電極群、及び測定領域に対してRFパルスを照射するためのRF照射手段を含み、磁場印加用電極群が、測定領域について測定面を想定するとともに、測定領域に対して、設定すべき測定位置に応じた均一磁場を印加する均一磁場用電極と、測定面に平行なx軸方向について傾斜磁場を印加する第1傾斜磁場用電極と、測定面に平行でx軸と直交するy軸方向について傾斜磁場を印加する第2傾斜磁場用電極とを有して構成された核磁気共鳴撮像素子を用い、(b)磁場印加用電極群を構成する電極のそれぞれに対して磁場発生用の電流を供給する電流供給ステップと、(c)RF照射手段に対してRFパルスを供給するRFパルス供給ステップと、(d)核磁気共鳴撮像素子の測定領域内での測定対象物からの核磁気共鳴信号を検出する検出ステップと、(e)測定対象物に対する核磁気共鳴による撮像を制御する撮像制御ステップとを備え、(f)撮像制御ステップは、x軸方向の位置 X_m 及びy軸方向の位置 Y_m が選択された測定位置(X_m, Y_m)に対し、それぞれ所定条件で磁場印加用電極群による磁場の印加、及びRF照射手段によるRFパルスの照射を行う複数段階の操作過程を含む測定過程によって、測定位置における測定対象物の原子核の核スピンを操作した後、検出ステップによって核磁気共鳴信号の検出を行って、測定位置における局所的な核スピンの情報を取得することを特徴とする。

20

30

【0008】

上記した撮像システム及び撮像方法において用いられる核磁気共鳴撮像素子では、測定対象物を含む測定領域を設定し、この測定領域について2次元の測定面(x-y面)を設定するとともに、均一磁場用電極、第1傾斜磁場用電極、及び第2傾斜磁場用電極の3種類の電極からなる磁場印加用電極群を用いて撮像素子を構成している。このような電極構成を用いることにより、測定領域内での局所的な測定位置の設定、及びそれによる測定対象物の画像情報の取得を好適に実現して、測定対象物についての画像情報を高い分解能で取得することが可能となる。

40

【0009】

また、このような構成の撮像素子を用いた核磁気共鳴撮像システム、及び撮像方法において、電極群を構成する3種類の電極に対して、それぞれ電流供給手段から磁場発生用の電流を供給して測定を行っている。さらに、測定対象物の画像取得において、設定された測定位置(X_m, Y_m)に対し、複数段階の操作過程を含む測定過程によって測定対象物の原子核の核スピンを操作した後に核磁気共鳴信号の検出を行って、測定位置における局

50

所的な核スピンの情報を取得している。このように、測定過程において所定の手順で核スピンを操作した後に、核磁気共鳴信号の検出を1回のみ行って測定位置での核スピンの情報を取得する構成により、上記した測定対象物についての画像取得を効率的に、精度良く実行することが可能となる。

【0010】

ここで、核磁気共鳴撮像素子の具体的な構成については、撮像素子は、一方の面が測定面となっている基板を有し、磁場印加用電極群は、基板の測定面上に集積化されて設けられ、基板に対して所定領域に設定された測定領域に磁場を印加して、測定領域内で局所的な測定位置を設定し、RF照射手段は、基板に対して所定位置に設けられ、基板での測定領域に対してRFパルスを照射することが好ましい。

10

【0011】

上記構成の撮像素子では、基板に対して所定領域において、測定対象物を含む測定領域を設定するとともに、その基板上に磁場印加用電極群を集積することによって、撮像素子を構成している。このように、核磁気共鳴測定に必要な磁場印加用の電極等が集積化された構成の素子を用いることにより、測定対象物についての画像情報を十分に高い分解能で取得することができる。

【0012】

また、撮像素子における磁場印加用電極群の具体的な構成については、均一磁場用電極は、測定領域を囲むように形成されたループ電極を含み、第1傾斜磁場用電極は、x軸方向について測定領域を挟むように形成された一对の第1スプリット電極を含み、第2傾斜磁場用電極は、y軸方向について測定領域を挟むように形成された一对の第2スプリット電極を含むことが好ましい。これにより、3種類の電極を用いた測定領域への均一磁場、x軸(第1軸)方向の傾斜磁場、及びy軸(第2軸)方向の傾斜磁場の印加を、基板上への集積化等が可能な簡単な電極構成で実現することができる。また、電極群の具体的な電極構成については、これ以外にも様々な構成を用いて良い。

20

【0013】

また、測定領域へのRFパルスの照射に用いられるRF照射手段については、基板の測定面上に、磁場印加用電極群に対して絶縁層によって絶縁されて形成されたRFアンテナを含む構成を用いることができる。あるいは、基板の測定面とは反対側の面上に形成されたRFアンテナを含む構成を用いることができる。これらの構成では、RFアンテナは、磁場印加用電極群とともに基板に集積化される。

30

【0014】

また、撮像素子による画像取得の対象となる測定対象物については、基板において、測定領域内での測定対象物は、測定面上、または測定面から所定深さの基板内に配置されることが好ましい。

【0015】

複数段階の操作過程を含む測定過程による核スピンの操作方法については、撮像システムは、撮像制御手段が、複数段階の操作過程を含む測定過程を経た段階において、測定位置で核スピンの中間状態となり、測定位置を除く測定領域内の全ての位置で核スピンの初期状態となるように、測定対象物の原子核の核スピンを操作することが好ましい。

40

【0016】

同様に、撮像方法は、撮像制御ステップが、複数段階の操作過程を含む測定過程を経た段階において、測定位置で核スピンの中間状態となり、測定位置を除く測定領域内の全ての位置で核スピンの初期状態となるように、測定対象物の原子核の核スピンを操作することが好ましい。

【0017】

このように、複数段階の操作過程を含む測定過程において、測定領域内で測定位置での核スピンのみが中間状態となるように核スピンの操作を行うことにより、測定過程を経た後に核磁気共鳴信号の検出を行うことで、測定位置のみについての局所的な核スピンの情報を確実に取得することが可能となる。

50

【 0 0 1 8 】

具体的には、撮像システムは、測定面において、測定位置を通り y 軸に平行な $x = X_m$ の直線を X_m 線、測定位置を通り x 軸に平行な $y = Y_m$ の直線を Y_m 線とし、撮像制御手段は、3段階以上の操作過程を有し、測定位置の核スピンを所定状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程と、3段階以上の操作過程を有し、測定位置の核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程とを含む測定過程によって、測定対象物の原子核の核スピンを操作することが好ましい。

【 0 0 1 9 】

同様に、撮像方法は、測定面において、測定位置を通り y 軸に平行な $x = X_m$ の直線を X_m 線、測定位置を通り x 軸に平行な $y = Y_m$ の直線を Y_m 線とし、撮像制御ステップにおいて、3段階以上の操作過程を有し、測定位置の核スピンを所定状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程と、3段階以上の操作過程を有し、測定位置の核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程とを含む測定過程によって、測定対象物の原子核の核スピンを操作することが好ましい。

10

【 0 0 2 0 】

測定対象物の原子核の核スピンの操作方法において、このように、前過程と後過程とによって構成された測定過程を用いることにより、測定領域内で測定位置での核スピンのみを中間状態とする核スピンの操作を、少ない段階数の操作過程で確実に実現することが可能となる。

20

【 0 0 2 1 】

また、このように前過程と後過程とを有して構成される測定過程において、前過程及び後過程のそれぞれは、 y 軸方向に延びる X_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する2段階の操作過程による y 軸勾配エコー操作、または x 軸方向に延びる Y_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する2段階の操作過程による x 軸勾配エコー操作の少なくとも一方を含むことが好ましい。

【 0 0 2 2 】

また、上記した測定過程において、後過程は、3段階以上の操作過程において、RF照射手段によるRFパルスの照射を行わない操作過程を含み、前過程を経た段階において、測定位置で核スピンの反転状態または初期状態となることが好ましい。あるいは、前過程は、3段階以上の操作過程において、RF照射手段によるRFパルスの照射を行わない操作過程を含み、前過程を経た段階において、測定位置で核スピンの中間状態となるとともに、後過程の最初の操作過程を経た段階において、測定位置で核スピンの反転状態または初期状態となることが好ましい。

30

【 0 0 2 3 】

測定領域に対するRFパルスの照射については、測定過程において、前過程は、RFパルスとして位相 0° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 90° の 90° パルスを照射する操作過程とを含み、後過程は、RFパルスとして位相 180° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 270° の 90° パルスを照射する操作過程とを含むことが好ましい。

40

【 0 0 2 4 】

あるいは、測定過程において、前過程は、RFパルスとして位相 0° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 270° の 90° パルスを照射する操作過程とを含み、後過程は、RFパルスとして位相 180° の 90° パルスを照射する操作過程と、位相 90° の 90° パルスを照射する操作過程とを含むことが好ましい。

【 発明の効果 】

【 0 0 2 5 】

本発明の核磁気共鳴撮像システム、及び撮像方法によれば、測定領域について想定された x y 測定面に対し、均一磁場用電極、第1傾斜磁場用電極、及び第2傾斜磁場用電極が

50

らなる磁場印加用電極群を用いて撮像素子を構成し、これらの3種類の電極に対してそれぞれ磁場発生用の電流を供給して測定を行うとともに、測定対象物の画像取得において、設定された測定位置に対し、複数段階の操作過程を含む測定過程によって測定対象物の原子核の核スピンを操作した後に核磁気共鳴信号の検出を行って、測定位置における局所的な核スピンの情報を取得することにより、測定対象物の画像取得を高い分解能で効率的に行うことが可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0026】

以下、図面とともに本発明による核磁気共鳴撮像システム、及び核磁気共鳴撮像方法の好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

10

【0027】

まず、本発明による核磁気共鳴撮像システム、及び撮像方法において用いられる核磁気共鳴撮像素子の構成について説明する。図1は、核磁気共鳴撮像素子の一実施形態の平面構成を概略的に示す図である。また、図2は、図1に示した撮像素子の断面構造を示す断面図である。

【0028】

ここで、図1においては、核磁気共鳴撮像素子1Aの構成のうちで、後述する磁場印加用電極群20の構成、及びRFアンテナ15の設置位置(設置範囲)等を具体的に示すとともに、その他の素子構造については模式的に図示している。また、以下の説明においては、図1の平面構成において、基板の測定面に平行で互いに直交する2つの軸をそれぞれx軸(第1軸)、及びy軸(第2軸)とし、測定面に垂直な軸をz軸とする。また、図2は、撮像素子1Aにおける電極群20の中心位置を通りx軸及びz軸に平行な面での断面構造を示している。

20

【0029】

本実施形態による核磁気共鳴撮像素子1Aは、基板10と、磁場印加用電極群20と、RFアンテナ15とを備えて構成されている。本撮像素子1Aでは、基板10に対して所定領域に核磁気共鳴の測定領域12が設定される。図2に示す構成では、測定領域12の設定の具体的な一例として、基板10の一方の面である測定面(図2中の上面)11から所定深さの基板10内の領域が測定領域12として設定されており、その測定領域12内に測定対象物13が配置されている。

30

【0030】

撮像素子1Aは、図2に示すように、基板10に対して磁場印加用電極群20とRFアンテナ15とが集積化された素子構造となっている。磁場印加用電極群20は、基板10の測定面11上に集積化されて設けられた複数の電極から構成され、測定領域12に対して核磁気共鳴測定に必要な磁場を印加して、測定領域12内で局所的な測定位置を設定するために用いられる。また、この電極群20は、測定面11上において測定領域12を囲むように、領域12からみてx軸方向、及びy軸方向に略対称となる電極パターンで形成されている。

40

【0031】

具体的には、磁場印加用電極群20は、均一磁場用電極25と、第1傾斜磁場用電極30、35と、第2傾斜磁場用電極40、45との3種類の電極によって構成されている。均一磁場用電極25は、測定領域12に対して、設定すべき測定位置に応じた均一磁場を印加するための電極であり、測定領域12を囲むように形成された矩形のループ電極によって構成されている。このループ電極25は、図1中の左下を起点とした一巻きコイルを構成しており、その両端部にそれぞれ電流供給用の配線26、27が設けられている。

【0032】

本撮像素子1Aでは、この電極25によって測定領域12に印加される均一磁場の大きさを制御することにより、領域12内での測定位置を所望の位置に設定することが可能な

50

構成となっている。例えば、電極 25 による均一磁場の大きさを変えていくことにより、領域 12 内において x 軸方向または y 軸方向に測定位置を走査することができる。なお、測定領域 12 に対する均一磁場の印加については、この基板 10 上に集積化されて測定位置の制御に用いられる均一磁場用電極 25 に加えて、磁石、コイル等による通常の静磁場印加手段（図示していない）が合わせて用いられる。

【0033】

第 1 傾斜磁場用電極 30、35 は、測定領域 12 に対して、基板 10 の測定面 11 に平行な第 1 軸である x 軸方向について傾斜磁場を印加するための電極であり、x 軸方向について測定領域 12 を挟むように形成された一对の第 1 スプリット電極によって構成されている。スプリット電極 30 は、図 1 中で領域 12 からみて左側（x 軸の負の側）で、電極 25 の左辺の外側に y 軸に沿って延びる直線状の電極パターンで形成されており、その両端部にそれぞれ電流供給用の配線 31、32 が設けられている。また、スプリット電極 35 は、領域 12 からみて右側（x 軸の正の側）で、電極 25 の右辺の外側に同じく y 軸に沿って延びる直線状の電極パターンで形成されており、その両端部にそれぞれ電流供給用の配線 36、37 が設けられている。

10

【0034】

第 2 傾斜磁場用電極 40、45 は、測定領域 12 に対して、基板 10 の測定面 11 に平行な第 2 軸である y 軸方向について傾斜磁場を印加するための電極であり、y 軸方向について測定領域 12 を挟むように形成された一对の第 2 スプリット電極によって構成されている。スプリット電極 40 は、図 1 中で領域 12 からみて下側（y 軸の負の側）で、電極 25 の下辺の外側に x 軸に沿って延びる直線状の電極パターンで形成されており、その両端部にそれぞれ電流供給用の配線 41、42 が設けられている。また、スプリット電極 45 は、領域 12 からみて上側（y 軸の正の側）で、電極 25 の上辺の外側に同じく x 軸に沿って延びる直線状の電極パターンで形成されており、その両端部にそれぞれ電流供給用の配線 46、47 が設けられている。

20

【0035】

これらの各電極からなる電極群 20 に対し、基板 10 に対して所定位置に RF アンテナ 15 が設けられている。RF アンテナ 15 は、基板 10 での測定領域 12 に対して、測定対象物 13 中の原子核に生じる核磁気共鳴を測定するための RF パルスを照射する RF 照射手段である。本実施形態においては、図 2 に示すように、基板 10 の測定面 11 上には電極群 20 を覆う絶縁層 16 が設けられており、この絶縁層 16 上に RF アンテナ 15 が形成されている。これにより、RF アンテナ 15 は、基板 10 の測定面 11 上に、電極群 20 に対して絶縁層 16 によって絶縁された状態で集積化されている。

30

【0036】

次に、上記の撮像素子 1A を用いた本発明による核磁気共鳴撮像システムについて説明する。図 3 は、核磁気共鳴撮像システムの一実施形態の構成を示すブロック図である。本実施形態による撮像システムは、核磁気共鳴撮像素子 1A と、均一磁場用電流源 50 と、傾斜磁場用電流源 51、52 と、RF 波発生器 60 と、検出器 54 と、制御装置 56 とを備えて構成されている。

40

【0037】

これらのうち、撮像素子 1A の構成については、図 1 及び図 2 に関して上述した通りである。また、本構成において、電流源 50、51、52 によって、磁場印加用電極群 20 を構成する電極のそれぞれに対して磁場発生用の電流を供給する電流供給手段が構成されている。

【0038】

均一磁場用電流源 50 は、撮像素子 1A の電極 25 に均一磁場発生用の電流 I_{st} を供給するための電流源であり、図 1 に示すように、配線 26、27 の間に接続されている。第 1 傾斜磁場用電流源 51 は、電極 30、35 に x 軸方向の傾斜磁場発生用の電流 I_x を供給するための電流源であり、配線 31、32 の間、及び配線 36、37 の間に接続されている。第 2 傾斜磁場用電流源 52 は、電極 40、45 に y 軸方向の傾斜磁場発生用の電

50

流 I_y を供給するための電流源であり、配線 4 1、4 2 の間、及び配線 4 6、4 7 の間に接続されている。これらの電流源 5 0、5 1、5 2 としては、例えば、立ち上がり時間がナノ秒程度の高速スイッチを有する直流電流源が好適に用いられる。

【0039】

RF 波発生器 6 0 は、分配器 6 1、位相調整器 6 2、第 1 スイッチ 6 3、第 2 スイッチ 6 4、及び合成器 6 5 とともに、撮像素子 1 A の RF アンテナ 1 5 に対して RF パルスを供給する RF パルス供給手段を構成している。この RF パルス供給手段から RF アンテナ 1 5 への RF パルスは、具体的な測定内容に応じて単一の RF パルス、または複数の RF パルスからなる RF パルス列として供給される。

【0040】

具体的には、RF 波発生器 6 0 から出力された RF 波は、分配器 6 1 によって等分配される。そして、分配された一方の RF 波は、スイッチ 6 3 を介して合成器 6 5 へと入力される。また、他方の RF 波は、位相調整器 6 2 で位相が調整された後にスイッチ 6 4 を介して合成器 6 5 へと入力される。そして、合成器 6 5 で合成された RF 波が、核磁気共鳴測定用の RF パルスとして撮像素子 1 A の RF アンテナ 1 5 へと供給される。

【0041】

このような構成において、発生器 6 0 からの RF 波出力の ON/OFF、及び位相調整器 6 2、スイッチ 6 3、6 4 の動作を制御することにより、撮像素子 1 A の RF アンテナ 1 5 へと供給される RF パルスを制御することができる。なお、RF パルス供給手段の具体的な構成については、図 3 はその一例を示すものであり、これ以外にも様々な構成を用いて良い。

【0042】

検出器 5 4 は、撮像素子 1 A における測定領域 1 2 内での測定対象物 1 3 からの核磁気共鳴信号を検出する検出手段である。この検出器 5 4 は、静磁場印加手段による静磁場、及び磁場印加用電極群 2 0 による磁場を含む所定の磁場が測定領域 1 2 に印加された状態で、RF アンテナ 1 5 から測定領域 1 2 へと RF パルスを照射することによって生じた核磁気共鳴信号を、光学的または電気的な方法等で検出して外部へと取り出す。このような核磁気共鳴信号の取得を、測定領域 1 2 への磁場の印加条件、及び RF パルスの照射条件を変えながら実行することにより、測定領域 1 2 内にある測定対象物 1 3 の 2 次元の画像情報を取得することができる。

【0043】

これらの電流源 5 0、5 1、5 2、RF 波発生器 6 0 を含む RF パルス供給手段、及び検出器 5 4 に対して、制御装置 5 6 が設置されている。制御装置 5 6 は、撮像素子 1 A において測定領域 1 2 内に配置されている測定対象物 1 3 に対する核磁気共鳴による撮像を制御する撮像制御手段である。本撮像システムにおける制御装置 5 6 は、測定領域 1 2 内で x 軸方向の位置 X_m 及び y 軸方向の位置 Y_m が選択された測定位置 (X_m, Y_m) に対し、所定の操作方法で測定対象物 1 3 の原子核の核スピンの操作を行うように、撮像システムの各部の動作を制御する。

【0044】

すなわち、制御装置 5 6 は、それぞれ所定条件で磁場印加用電極群 2 0 による磁場の印加、及び RF アンテナ 1 5 による RF パルスの照射を行う複数段階の操作過程を含む測定過程によって、測定位置における測定対象物 1 3 の原子核の核スピンを操作した後、検出器 5 4 によって核磁気共鳴信号の検出を行って、測定位置 (X_m, Y_m) における局所的な核スピンの情報を取得する。また、このような核スピンの情報の取得を測定位置を変更しながら繰り返して実行することにより、測定対象物 1 3 の 2 次元の画像が取得される。なお、制御装置 5 6 による撮像の制御方法については、具体的にはさらに後述する。

【0045】

本実施形態による核磁気共鳴撮像素子、及びそれを用いた撮像システム、撮像方法の効果について説明する。

【0046】

10

20

30

40

50

図1及び図2に示した撮像素子1Aでは、素子1Aを構成する基板10に対して所定領域において、測定対象物13を含む測定領域12を設定するとともに、その基板10上に磁場印加用電極群20等を集積することによって、撮像素子1Aを構成している。このように、核磁気共鳴測定に必要な磁場印加用の電極等が集積化された構成の素子を用いることにより、測定対象物13についての画像情報を高い分解能で取得することができる。

【0047】

さらに、測定領域12への磁場の印加に用いられる電極群20について、均一磁場用電極25、第1傾斜磁場用電極30、35、及び第2傾斜磁場用電極40、45の3種類の電極を設けている。これらの電極を組み合わせて用いることにより、測定領域12内での局所的な測定位置の設定、制御、測定位置の変更、走査、及びそれによる測定対象物13

10

【0048】

また、図3に示した撮像システムでは、上記したように磁場印加用の電極等が基板10上に集積化された構成の撮像素子1Aを用い、電極群20を構成する3種類の電極に対して、それぞれ対応する電流源から磁場発生用の電流を供給して測定を行っている。これにより、測定領域12内での局所的な測定位置を確実に制御しつつ、測定対象物13の画像情報の取得を高い分解能で好適に実現することが可能となる。

【0049】

さらに、測定対象物13の画像取得において、設定された測定位置(X_m , Y_m)に対し、複数段階の操作過程を含む測定過程によって測定対象物13の原子核の核スピンを操作した後に核磁気共鳴信号の検出を行って、測定位置における局所的な核スピンの情報を取得している。このように、測定過程において所定の手順で核スピンを操作した後に、検出器54による核磁気共鳴信号の検出を1回のみ行って測定位置での核スピンの情報を取得する構成により、上記した測定対象物についての画像取得を効率的に実行することが可能となる。

20

【0050】

また、図1に示した構成例では、測定領域12に磁場を印加するための電極群20での各電極の具体的な構成として、ループ電極25、一对の第1スプリット電極30、35、及び一对の第2スプリット電極40、45によって電極群20を構成している。このような電極パターンとすることにより、測定位置設定用の均一磁場、 x 軸方向の傾斜磁場、及び y 軸方向の傾斜磁場の測定領域12への印加を、基板10上に好適に集積することが可能な簡単な電極構成で実現することができる。

30

【0051】

図4は、図1に示した構成の電極群20を有する撮像素子1Aにおける電極パターンの作製例を示す電子顕微鏡写真である。ここでは、素子1Aの基体となる基板10として厚さ0.5mmのGaAs半導体基板を用い、金によって電極群20の各電極パターンを形成している。本作製例では、基板上に厚さ20nmのチタンを介して金の電極パターンを形成している。なお、チタン層は基板と金との密着性を高めるためのものであり、不要であれば設けなくても良い。また、電極パターンについては、均一磁場用電極25のループ形状の内側の幅(電極間隔)を50 μ mとし、各電極のパターン幅を1 μ mとしている。図4より、図1に示した構成の電極群20の電極パターンが良好に得られていることがわかる。また、電極群20の具体的な電極構成については、これ以外にも様々な構成を用いて良い。

40

【0052】

一般には、撮像素子1Aを構成する基板10としては、上記したGaAs基板のように表面が十分に平坦な材質の基板を好適に用いることができる。また、電極群20の各電極については、例えば金、アルミなどの材質による電極パターンを用いることができる。あるいは、測定が超伝導転移温度以下の低温で行われる場合には、超伝導材料からなる電極パターンを用いても良い。また、各電極の厚さについては、例えば200nm~1 μ m程度の厚さとすることが好ましい。

50

【 0 0 5 3 】

また、撮像素子 1 A の断面構造についても、図 2 に示した構造以外にも様々な構成を用いることが可能である。図 5 は、図 1 及び図 2 に示した撮像素子の変形例 (a)、(b) の断面構造を示す断面図である。

【 0 0 5 4 】

図 5 の変形例 (a) は、測定領域 1 2 に R F パルスを照射する R F アンテナ 1 7 が基板 1 0 の測定面 1 1 とは反対側の面、すなわち、基板 1 0 に対して電極群 2 0 とは反対側の面上に形成されている点で図 2 に示した構成と異なっている。このように、R F アンテナについては、基板の測定面 1 1 上、または測定面 1 1 とは反対側の面上に集積化される構成など、必要に応じてその設置位置を変更して良い。一般には、R F アンテナなどの R F 照射手段は、電極群 2 0 が測定面 1 1 上に集積化される基板 1 0 に対して、測定領域 1 2 に R F パルスを照射することが可能な所定位置に設けられていれば良い。

10

【 0 0 5 5 】

図 5 の変形例 (b) は、基板 1 0 に対する測定領域の設定が図 2 の構成例、及び図 5 の変形例 (a) と異なっている。すなわち、変形例 (b) では、測定領域の設定の他の例として、基板 1 0 の測定面 1 1 上の領域が測定領域 1 8 として設定されており、その測定領域 1 8 内に測定対象物 1 9 が配置されている。このように、測定領域及び測定対象物については、具体的な測定対象物の種類等に応じて、基板 1 0 の測定面 1 1 上、または測定面 1 1 から所定深さの基板 1 0 内の領域など、必要に応じて測定領域を設定して良い。

20

【 0 0 5 6 】

例えば、図 2 の構成例、及び図 5 の変形例 (a) のように、基板 1 0 の測定面 1 1 から所定深さの基板 1 0 内に測定対象物 1 3 が配置される構成では、測定対象物 1 3 はあらかじめ基板 1 0 内に埋め込まれて配置される。このような測定対象物 1 3 の具体的な例としては、例えば量子ドット、量子ビットなどが挙げられる。すなわち、このような構成の撮像素子は、量子コンピュータ等に用いられる量子ビットの読み出しに利用することが可能である。この場合、基板 1 0 中での量子ビットの深さは、例えば測定面 1 1 から数 1 0 0 n m ~ 数 μ m 程度とすることが好ましい。

【 0 0 5 7 】

また、図 5 の変形例 (b) のように、基板 1 0 の測定面 1 1 上に測定対象物 1 9 が配置される構成では、測定対象物 1 9 はあらかじめ基板 1 0 上に配置されていても良く、あるいは必要に応じて基板 1 0 上に配置、交換される構成であっても良い。

30

【 0 0 5 8 】

ここで、本発明における核磁気共鳴による「撮像」とは、例えば、医療分野において M R I 装置を用いて行われている画像取得のような例に限られるものではない。例えば、測定領域内において、ナノ領域の核スピンによる量子ビットが複数配列されている場合に、測定位置を制御しながら、個々の量子ビットについて局所検出を行っていくような場合も「撮像」、すなわち測定領域 1 2 についての画像取得に含んでいる。一般には、設定された測定領域内において、測定位置を特定、制御しながら、局所的な情報を核磁気共鳴信号によって検出することが可能であれば良い。

【 0 0 5 9 】

測定領域 1 2 内での測定対象物 1 3 からの核磁気共鳴信号を検出する検出器 5 4 (図 3 参照) に用いられる核スピン検出方法については、上記したように、例えば光学的または電気的な方法で核磁気共鳴信号を検出する方法を用いることができる。あるいは、それら以外の方法で核磁気共鳴信号を検出する方法を用いても良い。

40

【 0 0 6 0 】

核磁気共鳴信号を光学的に検出する方法は、例えば図 5 に示す変形例 (a)、(b) のような構造において好適に用いることができる。このような光学的な検出方法の一例について説明する (例えば非特許文献「D. Gammon et al., "Nuclear Spectroscopy in Single Quantum Dots: Nanoscopic Raman Scattering and Nuclear Magnetic Resonance", Science Vol. 277, pp. 85-88 (1997)」を参照)。この方法では、まず、円偏光した光を測定対

50

象物に照射することにより、対象物中の原子核での核スピンを偏極させる。そして、核スピンの偏極の度合いによって量子ドットの発光エネルギーがシフトすることを利用し、RFパルスを照射して核スピンの状態を変化させた際のエネルギーシフト量を核磁気共鳴信号として検出する。

【0061】

一方、核磁気共鳴信号を電氣的に検出する方法は、例えば図2に示す構成例、及び図5に示す変形例(a)のような構造において好適に用いることができる。このような電氣的な検出方法の一例について説明する(例えば非特許文献「G. Yusa et al., "Controlled Multiple Quantum Coherences of Nuclear Spins in a Nanometre-Scale Device", Nature Vol.434, pp.1001-1005(2005)」を参照)。この方法では、まず、スピン偏極した電流をナノ領域に流して、対象物中の原子核での核スピンを偏極させる。そして、核スピンを偏極させると対象物の電気抵抗が変化することを利用し、RFパルスを照射して核スピンの重ね合わせ状態を生成した際の電気抵抗を核磁気共鳴信号として検出する。

10

【0062】

図1~図3に示した核磁気共鳴撮像システムの構成について、本発明による核磁気共鳴撮像方法とともにさらに説明する。なお、以下において、図6に示すように、全体の測定領域12内での測定位置(測定範囲)について、核磁気共鳴測定によって情報を得ようとする測定位置が、位置P(Xm, Ym)に設定されているものとする。

【0063】

上記実施形態の撮像素子1A及び撮像システムでは、上記したように、検出器54による核磁気共鳴信号の取得を、測定領域12への磁場の印加条件、及びRFパルスの照射条件を適宜に設定して実行することにより、測定領域12についての2次元の画像情報が取得される。また、このような測定領域12への磁場の印加条件、及びRFパルスの照射条件は、例えばパーソナルコンピュータなどを用いて構成される撮像制御手段である制御装置56によって制御される(図3参照)。

20

【0064】

ここで、電極群20の各電極に供給される電流パルス、及び測定領域12に照射されるRFパルスは、制御装置56によってパルス幅、強度、パルスの同期等が制御される。また、検出器54で取得された核磁気共鳴信号は制御装置56へと入力され、この制御装置56において、測定対象物13の画像化処理、あるいは量子ビットの読み出し処理などの必要な処理が行われる。

30

【0065】

このような構成では、制御装置56が、第1傾斜磁場用電極30、35、または第2傾斜磁場用電極40、45への電流の供給、及びそれによって測定領域12に印加される傾斜磁場を制御することで、測定位置を設定する軸方向を選択するとともに、均一磁場用電極25への電流の供給、及びそれによって測定領域12に印加される均一磁場を制御することで、領域12内において、測定位置を走査することが好ましい。

【0066】

このように、第1傾斜磁場用電極30、35または第2傾斜磁場用電極40、45によって傾斜磁場を印加して、測定位置を設定する軸方向(x軸方向またはy軸方向)を選択するとともに、均一磁場用電極25によって測定領域12に印加される均一磁場の大きさの設定または変更を制御することにより、領域12内における測定位置の設定、及びその変更、走査を好適に実現することができる。

40

【0067】

具体的には、制御装置56が、複数段階の操作過程を含む測定過程について、(1)第1傾斜磁場用電極30、35への電流供給をON、第2傾斜磁場用電極40、45への電流供給をOFFとして、x軸方向について傾斜磁場が印加されて測定位置Xmが選択された状態で、測定領域12にRFパルスを照射する操作過程と、(2)第2傾斜磁場用電極40、45への電流供給をON、第1傾斜磁場用電極30、35への電流供給をOFFとして、y軸方向について傾斜磁場が印加されて測定位置Ymが選択された状態で、測定領

50

域 1 2 に R F パルスを照射する操作過程とを含む測定過程を用いて、測定対象物 1 3 に対して核磁気共鳴による撮像を行うことが好ましい。

【 0 0 6 8 】

このような測定領域に対する磁場の印加、及びそれによる測定位置 P の選択について、図 6 ~ 図 8 を用いて説明する。ここで、図 6 に示すように、測定領域 1 2 内で設定された測定位置 P (X m , Y m) に対し、2 次元の測定面である x y 面内において、測定位置 P を通り y 軸に平行な $x = X m$ の直線を X m 線、測定位置 P を通り x 軸に平行な $y = Y m$ の直線を Y m 線とする。

【 0 0 6 9 】

また、測定領域 1 2 に印加される磁場について、静磁場印加手段によって印加される磁場 B_0 が測定対象物 1 3 の原子核の核スピンの核スピンの周波数に対応する磁場に固定されていると仮定する。このとき、測定領域 1 2 内の各位置 (x , y) において、磁場 B_0 に加えて電極群 2 0 によって印加される測定位置設定用の磁場を $B(x, y)$ とすると、測定領域 1 2 内で測定位置設定用の磁場が $B = 0$ となる位置 (範囲) において、核磁気共鳴が発生する。

10

【 0 0 7 0 】

このような条件において、第 1 傾斜磁場用電極 3 0、3 5 への電流供給を ON、第 2 傾斜磁場用電極 4 0、4 5 への電流供給を OFF として、x 軸方向の測定位置 X m を選択する場合を考える。具体的には、均一磁場用電極 2 5 に対して電流源 5 0 から均一磁場発生用の電流 I_{st} が供給されて、測定領域 1 2 に均一磁場 B_{st} が印加されているものとする。また、第 1 傾斜磁場用電極 3 0、3 5 に電流源 5 1 から x 軸方向の傾斜磁場発生用の電流 I_x が供給されて、測定領域 1 2 に x 軸方向傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加されているものとする。

20

【 0 0 7 1 】

このとき、図 7 に示すように、測定領域 1 2 内の各位置 (x , y) に対し、測定位置設定用の磁場として、x 座標に依存する磁場 $B = B_{st} + B_1(x)$ が印加される。そして、 $B = B_{st} + B_1(X m) = 0$ となる $x = X m$ の直線である X m 線上の各位置において、核磁気共鳴が発生するための条件が満たされることとなる。均一磁場 B_{st} 、及び傾斜磁場 $B_1(x)$ を設定する際には、選択しようとする x 軸方向の測定位置 X m についてこのような条件 $B = 0$ が満たされるように、各磁場の値、及び電極に供給される電流の値が設定される。

30

【 0 0 7 2 】

また、y 軸方向の測定位置 Y m の選択についても、均一磁場 B_{st} 、及び y 軸方向傾斜磁場 $B_2(y)$ によって同様に、測定位置 Y m を選択することができる。この場合、 $B = B_{st} + B_2(Y m) = 0$ となる $y = Y m$ の直線である Y m 線上の各位置において、核磁気共鳴が発生するための条件が満たされることとなる。均一磁場 B_{st} 、及び傾斜磁場 $B_2(y)$ を設定する際には、選択しようとする y 軸方向の測定位置 Y m についてこのような条件 $B = 0$ が満たされるように、各磁場の値、及び電極に供給される電流の値が設定される。

40

【 0 0 7 3 】

また、図 8 に示すように、x 軸方向の測定位置 X m の選択については、上記したように測定位置 X m に対応して設定された均一磁場 B_{st} 、及び傾斜磁場 $B_1(x)$ を測定領域 1 2 に印加した場合 (図 8 (a)) に加えて、逆符号の均一磁場 $-B_{st}$ 、及び反転した傾斜磁場 $-B_1(x)$ を測定領域 1 2 に印加した場合 (図 8 (b)) にも同様に、測定位置 X m を選択することができる。これは、y 軸方向の測定位置 Y m の選択についても同様である。このような 2 種類の測定位置の設定方法は、後述するように勾配エコー操作において好適に用いることができる。

【 0 0 7 4 】

次に、複数段階の操作過程を含む測定過程による核スピンの操作方法について、その具体例とともにさらに説明する。以下の説明においては、R F パルス照射前の磁場中での核

50

スピンの状態を「初期状態」、核スピンの角度が 90° パルスの照射によって 90° 倒れた状態を「中間状態」、核スピンの角度が 180° 倒れて反対方向を向いている状態を「反転状態」と定義する。

【0075】

複数段階の操作過程を含む測定過程による原子核の核スピンの操作方法については、撮像システムの制御装置 56 が、複数段階の操作過程を含む測定過程を経た段階において、測定位置 P で核スピンの角度が中間状態となり、測定位置 P を除く測定領域 12 内の全ての位置で核スピンの角度が初期状態となるように、測定対象物 13 の原子核の核スピンの角度を操作することが好ましい。

【0076】

このように、複数段階の操作過程を含む測定過程において、測定領域 12 内で測定位置 P での核スピンの角度のみが中間状態となるように核スピンの角度を行うことにより、測定過程を経た後に検出器 54 によって核磁気共鳴信号の検出を行うことで、測定位置 P (X_m , Y_m) のみについての局所的な核スピンの角度の情報を確実に取得することが可能となる。

【0077】

具体的には、核スピンの角度を操作する測定過程について、(1) 3 段階以上の操作過程を有し、測定位置の核スピンの角度を所定状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置を除く位置の核スピンの角度を中間状態とする前過程と、(2) 3 段階以上の操作過程を有し、測定位置の核スピンの角度を中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置を除く位置の核スピンの角度を初期状態とする後過程とを含む測定過程によって、測定対象物の原子核の核スピンの角度を操作することが好ましい。

【0078】

測定対象物の原子核の核スピンの角度の操作方法において、このように構成された測定過程を用いることにより、測定領域 12 内で測定位置 P での核スピンの角度のみを中間状態とする核スピンの角度の操作を、少ない操作過程で確実に実現することが可能となる。具体的には、前過程を 3 段階の操作過程とし、後過程を同じく 3 段階の操作過程とした場合に、最少で 6 段階の操作過程によって測定過程を構成することができる。

【0079】

また、このように前過程と後過程とを有して構成される測定過程において、前過程及び後過程のそれぞれは、 y 軸方向に伸びる X_m 線上で中間状態になっている核スピンの角度に対する 2 段階の操作過程による y 軸勾配エコー操作、または x 軸方向に伸びる Y_m 線上で中間状態になっている核スピンの角度に対する 2 段階の操作過程による x 軸勾配エコー操作の少なくとも一方を含むことが好ましい。

【0080】

この場合、2 段階の操作過程による x 軸勾配エコー操作は、図 8 に模式的に示したように、均一磁場用電極 25 によって均一磁場 B_{st1} が印加されるとともに、第 1 傾斜磁場用電極 30、35 によって x 軸方向について傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加されて x 軸方向の位置 X_m が選択される第 1 操作過程と、均一磁場用電極 25 によって第 1 操作過程とは逆符号で均一磁場 $-B_{st1}$ が印加されるとともに、第 1 傾斜磁場用電極 30、35 によって x 軸方向について第 1 操作過程とは反転した傾斜磁場 $-B_1(x)$ が印加されて x 軸方向の位置 X_m が選択され、第 1 操作過程とともに x 軸方向の勾配エコー操作を構成する第 2 操作過程とによって構成することができる。

【0081】

同様に、2 段階の操作過程による y 軸勾配エコー操作は、均一磁場用電極 25 によって均一磁場 B_{st2} が印加されるとともに、第 2 傾斜磁場用電極 40、45 によって y 軸方向について傾斜磁場 $B_2(y)$ が印加されて y 軸方向の位置 Y_m が選択される第 1 操作過程と、均一磁場用電極 25 によって第 1 操作過程とは逆符号で均一磁場 $-B_{st2}$ が印加されるとともに、第 2 傾斜磁場用電極 40、45 によって y 軸方向について第 1 操作過程とは反転した傾斜磁場 $-B_2(y)$ が印加されて y 軸方向の位置 Y_m が選択され、第 1 操作過程とともに y 軸方向の勾配エコー操作を構成する第 2 操作過程とによって構成するこ

10

20

30

40

50

とができる。

【0082】

図9は、複数の操作過程を含む核磁気共鳴の測定過程の第1実施例を示すタイミングチャートである。また、図10は、図9に示した実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。なお、以下の第1～第5実施例においては、いずれも、測定過程を最少の6段階の操作過程T1～T6によって構成した例を示している。ただし、このような測定過程に含まれる操作過程については、7段階以上の操作過程によって測定過程を構成しても良い。

【0083】

図9は、第1実施例において、測定領域12に照射されるRFパルス、及び磁場印加用電極群20に供給される磁場発生用の電流パルスについて示している。これらのうち、磁場発生用の電流パルスは、測定領域12に印加される磁場パルスに対応している。

【0084】

また、以下の各実施例において核スピンの操作に用いられるRFパルスは、全て90°パルス(/ 2パルス)である。この90°パルスについては、例えば、静磁場印加手段から印加される磁場B0の条件下で、測定対象物13を構成している原子核の核スピンの共鳴する周波数に固定することが好ましい。また、各RFパルスのパルス時間幅は、所定のRF強度において、90°パルスとなる時間幅として設定される。

【0085】

なお、図9のタイミングチャートにおいては、連続する操作過程のRFパルス間の時間を0とした例を示しているが、操作過程ごとにRFパルス間に時間を空ける構成としても良い。ただし、この場合のパルス時間間隔については、測定対象物13における核スピンのコヒーレント時間に比べて十分に短い時間間隔に設定することが好ましい。

【0086】

また、本実施例においては、図9のチャート(a)～(d)に示すように、RF強度、及びパルス時間幅が同じで位相が異なる4種類のRFパルスとして、(a)位相0°の90°パルス、(b)位相90°の90°パルス、(c)位相180°の90°パルス、及び(d)位相270°の90°パルスを用いて核スピンの操作を行っている。これらのRFパルスの位相については、図3に示した構成において、位相調整器62の動作を制御することによって、RFパルスの位相を制御することができる。

【0087】

また、図9において、チャート(e)、(f)、(g)は、それぞれ、電極群20から測定領域12に印加される磁場発生用に各電極へと供給される電流パルスを示すタイミングチャートである。具体的には、チャート(e)はx軸方向の第1傾斜磁場用電極30、35へと供給される電流パルスIxを、チャート(f)はy軸方向の第2傾斜磁場用電極40、45へと供給される電流パルスIyを、また、チャート(g)は均一磁場用電極25へと供給される電流パルスIstを示している。

【0088】

基板10上に集積化された電極群20によって測定領域12に印加される磁場(局所磁場)を発生させるための磁場発生用電流パルスとしては、図3に関して上述したように、電流源50から電極25に供給される電流パルスIst、電流源51から電極30、35に供給される電流パルスIx、及び電流源52から電極40、45に供給される電流パルスIyの3種類の電流パルスがある。

【0089】

電流パルスIstは、均一磁場Bstを発生させるための電流パルスである。また、電流パルスIxは、x軸方向についての傾斜磁場(磁場勾配)B1(x)を発生させるための電流パルスである。また、電流パルスIyは、y軸方向についての傾斜磁場B2(y)を発生させるための電流パルスである。図9のタイミングチャートにおいては、これらの電流パルスIx、Iy、Istは、上記したように、それぞれチャート(e)、(f)、(g)に示されている。

10

20

30

40

50

【0090】

電流パルス I_x 、 I_y 、 I_{st} の電流値は、設定すべき測定位置 (X_m , Y_m) に対応する磁場 $B_1(x)$ 、 $B_2(y)$ 、 B_{st} に応じた値に設定される。ここで、これらの磁場のうちで均一磁場 B_{st} については、以下において、 x 軸方向の位置 X_m を選択する際の均一磁場を $B_{st} = B_{st1}$ 、 y 軸方向の位置 Y_m を選択する際の均一磁場を $B_{st} = B_{st2}$ とする。

【0091】

本実施例の核スピンの操作方法では、操作過程 $T_1 \sim T_6$ のうち、前半の3段階の操作過程 $T_1 \sim T_3$ が、測定位置 P の核スピンを反転状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程を構成している。また、後半の3段階の操作過程 $T_4 \sim T_6$ が、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程を構成している。

10

【0092】

具体的には、まず、第1操作過程 T_1 において、均一電流パルス I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス I_x が電極群に供給され、測定領域 12 に対して均一磁場 B_{st1} 及び x 軸方向傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加される。このとき、 x 軸方向の位置 X_m が選択され、 X_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、RFパルスとして、位相 0° のRFパルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図10(a)に示すように、測定位置 P を含む X_m 線上の各位置の核スピンの初期状態から x 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。

20

【0093】

次に、第2操作過程 T_2 において、均一電流パルス I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス I_y が電極群に供給され、測定領域 12 に対して均一磁場 B_{st2} 及び y 軸方向傾斜磁場 $B_2(y)$ が印加される。このとき、 y 軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 90° のRFパルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図10(b)に示すように、測定位置 P を除く Y_m 線上の各位置の核スピンの初期状態から y 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。このとき、測定位置 P の核スピンは変化しない。また、測定位置 P を除く X_m 線上の各位置の核スピンは、 y 軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

30

【0094】

次に、第3操作過程 T_3 において、均一電流パルス I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス I_y が電極群に供給され、測定領域 12 に対して逆符号の均一磁場 B_{st2} 及び反転した y 軸方向傾斜磁場 $B_2(y)$ が印加される。このとき、 y 軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 0° のRFパルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図10(c)に示すように、測定位置 P の核スピンの中間状態から反転状態へと遷移する。このとき、測定位置 P を除く Y_m 線上の各位置の核スピンは変化しない。また、測定位置 P を除く X_m 線上の各位置の核スピンは、第2操作過程 T_2 とは反転した y 軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

40

【0095】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置 P の核スピンを反転状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程が終了する。また、この前過程を構成する操作過程 $T_1 \sim T_3$ のうち、2段階の操作過程 T_2 、 T_3 が、前過程における y 軸勾配エコー操作の過程となっている。

【0096】

続いて、第4操作過程 T_4 において、均一電流パルス I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス I_x が電極群に供給され、測定領域 12 に対して均一磁場 B_{st1} 及び x 軸方向傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加される。このとき、 x 軸方向の位置 X_m が選択され、 X_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 180° のRFパルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図10(d)に示すように、測定位置 P を除く X_m

50

線上の各位置の核スピンの、中間状態から初期状態へと遷移する。また、測定位置 P の核スピンの、反転状態から x 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。また、測定位置 P を除く Y m 線上の各位置の核スピンは、x 軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

【0097】

次に、第 5 操作過程 T 5 において、均一電流パルス - I s t 1 及び x 軸傾斜電流パルス - I x が電極群に供給され、測定領域 1 2 に対して逆符号の均一磁場 - B s t 1 及び反転した x 軸方向傾斜磁場 - B 1 (x) が印加される。このとき、x 軸方向の位置 X m が選択され、X m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、本操作過程では、測定領域 1 2 への R F パルスの照射は行われぬ。これにより、図 1 0 (e) に示すように、測定位置 P を除く Y m 線上の各位置の核スピンは、第 4 操作過程 T 4 とは反転した x 軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

10

【0098】

最後に、第 6 操作過程 T 6 において、均一電流パルス - I s t 2 及び y 軸傾斜電流パルス - I y が電極群に供給され、測定領域 1 2 に対して逆符号の均一磁場 - B s t 2 及び反転した y 軸方向傾斜磁場 - B 2 (y) が印加される。このとき、y 軸方向の位置 Y m が選択され、Y m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 2 7 0 ° の R F パルスが測定領域 1 2 に照射される。これにより、図 1 0 (f) に示すように、測定位置 P を除く Y m 線上の各位置の核スピンの、中間状態から初期状態へと遷移する。また、このとき、測定位置 P の核スピンは変化しない。

20

【0099】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、X m 線上及び Y m 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程が終了し、6 段階の操作過程からなる測定過程が終了する。また、この後過程を構成する操作過程 T 4 ~ T 6 のうち、2 段階の操作過程 T 4、T 5 が、後過程における x 軸勾配エコー操作の過程となっている。

【0100】

このように、測定位置 P で核スピンの中間状態となり、測定位置 P を除く測定領域 1 2 内の全ての位置で核スピンの初期状態となった図 1 0 (f) の状態で、検出器 5 4 によって核磁気共鳴信号の検出を行う。これにより、測定位置 P (X m , Y m) における局所的な核スピンの情報を選択的に取得することができる。核磁気共鳴信号を取得したら、必要に応じて核スピンを緩和もしくは励起させて、初期状態へと戻す。

30

【0101】

また、上記方法において、測定位置 (X m , Y m) は、測定領域 1 2 に印加される均一磁場及び傾斜磁場の組合せ、すなわち電極群 2 0 の各電極に供給される電流値の組合せによって設定される。したがって、これらの電流値を制御して測定位置を測定領域 1 2 内で走査することによって、測定領域 1 2 内にある測定対象物 1 3 の 2 次元の画像情報を、高分解能で取得することが可能である。

【0102】

また、例えばこのような核磁気共鳴撮像システムを、ナノ領域の核スピンを量子ビットとした量子コンピュータ等における量子ビットの局所検出装置に応用する場合、上記の電流値を制御することにより、読み出す量子ビットを選択することが可能となる。

40

【0103】

図 1 1 は、複数の操作過程を含む核磁気共鳴の測定過程の第 2 実施例を示すタイミングチャートである。また、図 1 2 は、図 1 1 に示した実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。

【0104】

本実施例の核スピンの操作方法では、操作過程 T 1 ~ T 6 のうち、前半の 3 段階の操作過程 T 1 ~ T 3 が、測定位置 P の核スピンを反転状態とし、X m 線上及び Y m 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程を構成している。また、後半の 3 段階の操作過程 T 4 ~ T 6 が、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、X m 線上及び Y m 線

50

上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程を構成している。また、本実施例の測定過程において、操作過程 T 1 ~ T 3 を含む前過程については第 1 実施例と同様である。

【 0 1 0 5 】

続いて、第 4 操作過程 T 4 において、均一電流パルス I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス I_y が電極群に供給され、測定領域 1 2 に対して均一磁場 B_{st2} 及び y 軸方向傾斜磁場 $B_2(y)$ が印加される。このとき、y 軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 270° の RF パルスが測定領域 1 2 に照射される。これにより、図 1 2 (d) に示すように、測定位置 P を除く Y_m 線上の各位置の核スピスが、中間状態から初期状態へと遷移する。また、測定位置 P の核スピスが、反転状態から y 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。また、測定位置 P を除く X_m 線上の各位置の核スピンは、y 軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

10

【 0 1 0 6 】

次に、第 5 操作過程 T 5 において、均一電流パルス - I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス - I_y が電極群に供給され、測定領域 1 2 に対して逆符号の均一磁場 - B_{st2} 及び反転した y 軸方向傾斜磁場 - $B_2(y)$ が印加される。このとき、y 軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、本操作過程では、測定領域 1 2 への RF パルスの照射は行われない。これにより、図 1 2 (e) に示すように、測定位置 P を除く X_m 線上の各位置の核スピンは、第 4 操作過程 T 4 とは反転した y 軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

20

【 0 1 0 7 】

最後に、第 6 操作過程 T 6 において、均一電流パルス - I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス - I_x が電極群に供給され、測定領域 1 2 に対して逆符号の均一磁場 - B_{st1} 及び反転した x 軸方向傾斜磁場 - $B_1(x)$ が印加される。このとき、x 軸方向の位置 X_m が選択され、 X_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 180° の RF パルスが測定領域 1 2 に照射される。これにより、図 1 2 (f) に示すように、測定位置 P を除く X_m 線上の各位置の核スピスが、中間状態から初期状態へと遷移する。また、このとき、測定位置 P の核スピンは変化しない。

【 0 1 0 8 】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程が終了し、6 段階の操作過程からなる測定過程が終了する。また、この後過程を構成する操作過程 T 4 ~ T 6 のうち、2 段階の操作過程 T 4、T 5 が、後過程における y 軸勾配エコー操作の過程となっている。

30

【 0 1 0 9 】

このように、測定位置 P で核スピスが中間状態となり、測定位置 P を除く測定領域 1 2 内の全ての位置で核スピスが初期状態となった図 1 2 (f) の状態で、検出器 5 4 によって核磁気共鳴信号の検出を行う。これにより、測定位置 P (X_m, Y_m) における局所的な核スピンの情報を選択的に取得することができる。

【 0 1 1 0 】

また、本実施例は、測定過程の前過程、及び後過程での勾配エコー操作についての構成が第 1 実施例と異なっている。すなわち、図 9、図 1 0 に示した第 1 実施例では、前過程において、y 軸方向に延びる X_m 線上の核スピに対する 2 段階の操作過程 T 2、T 3 による y 軸勾配エコー操作を行うとともに、後過程において、x 軸方向に延びる Y_m 線上の核スピに対する 2 段階の操作過程 T 4、T 5 による x 軸勾配エコー操作を行っている。

40

【 0 1 1 1 】

これに対して、図 1 1、図 1 2 に示した第 2 実施例では、前過程において、 X_m 線上の核スピに対する y 軸勾配エコー操作を行うとともに、後過程において、同じく X_m 線上の核スピに対する y 軸勾配エコー操作を行っている。このように、測定過程での前過程及び後過程における勾配エコー操作については、両者で同じ軸方向の勾配エコー操作を行

50

う構成としても良い。

【0112】

一般には、上記したように、測定過程において、前過程及び後過程のそれぞれで、 y 軸方向に延びる X_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する2段階の操作過程による y 軸勾配エコー操作、または x 軸方向に延びる Y_m 線上で中間状態になっている核スピンの対する2段階の操作過程による x 軸勾配エコー操作の少なくとも一方を実行することが好ましい。これにより、最終的に測定領域12内で測定位置Pでの核スピンのみを中間状態とする核スピンの操作を好適に実現することができる。

【0113】

図13は、複数の操作過程を含む核磁気共鳴の測定過程の第3実施例を示すタイミングチャートである。また、図14は、図13に示した実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。

【0114】

本実施例の核スピンの操作方法では、操作過程 $T_1 \sim T_6$ のうち、前半の3段階の操作過程 $T_1 \sim T_3$ が、測定位置Pの核スピンを初期状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置Pを除く位置の核スピンを中間状態とする前過程を構成している。また、後半の3段階の操作過程 $T_4 \sim T_6$ が、測定位置Pの核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置Pを除く位置の核スピンを初期状態とする後過程を構成している。

【0115】

具体的には、まず、第1操作過程 T_1 において、均一電流パルス I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス I_x が電極群に供給され、測定領域12に対して均一磁場 B_{st1} 及び x 軸方向傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加される。このとき、 x 軸方向の位置 X_m が選択され、 X_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、RFパルスとして、位相 0° のRFパルスが測定領域12に照射される。これにより、図14(a)に示すように、測定位置Pを含む X_m 線上の各位置の核スピンの初期状態から x 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。

【0116】

次に、第2操作過程 T_2 において、均一電流パルス I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス I_y が電極群に供給され、測定領域12に対して均一磁場 B_{st2} 及び y 軸方向傾斜磁場 $B_2(y)$ が印加される。このとき、 y 軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 90° のRFパルスが測定領域12に照射される。これにより、図14(b)に示すように、測定位置Pを除く Y_m 線上の各位置の核スピンの初期状態から y 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。このとき、測定位置Pの核スピンは変化しない。また、測定位置Pを除く X_m 線上の各位置の核スピンは、 y 軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

【0117】

次に、第3操作過程 T_3 において、均一電流パルス I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス I_y が電極群に供給され、測定領域12に対して逆符号の均一磁場 $-B_{st2}$ 及び反転した y 軸方向傾斜磁場 $-B_2(y)$ が印加される。このとき、 y 軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 180° のRFパルスが測定領域12に照射される。これにより、図14(c)に示すように、測定位置Pの核スピンの中間状態から初期状態へと遷移する。このとき、測定位置Pを除く Y_m 線上の各位置の核スピンは変化しない。また、測定位置Pを除く X_m 線上の各位置の核スピンは、第2操作過程 T_2 とは反転した y 軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

【0118】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置Pの核スピンを初期状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置Pを除く位置の核スピンを中間状態とする前過程が終了する。また、この前過程を構成する操作過程 $T_1 \sim T_3$ のうち、2段階の操作過程 T_2 、 T_3 が、前過程における y 軸勾配エコー操作の過程となっている。

10

20

30

40

50

【0119】

続いて、第4操作過程T4において、均一電流パルス I_{st1} 及びx軸傾斜電流パルス I_x が電極群に供給され、測定領域12に対して均一磁場 B_{st1} 及びx軸方向傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加される。このとき、x軸方向の位置 X_m が選択され、 X_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 180° のRFパルスが測定領域12に照射される。これにより、図14(d)に示すように、測定位置Pを除く X_m 線上の各位置の核スピンの中間状態から初期状態へと遷移する。また、測定位置Pの核スピンの初期状態からx軸の負の方向を向く中間状態へと遷移する。また、測定位置Pを除く Y_m 線上の各位置の核スピンは、x軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

【0120】

次に、第5操作過程T5において、均一電流パルス $-I_{st1}$ 及びx軸傾斜電流パルス $-I_x$ が電極群に供給され、測定領域12に対して逆符号の均一磁場 $-B_{st1}$ 及び反転したx軸方向傾斜磁場 $-B_1(x)$ が印加される。このとき、x軸方向の位置 X_m が選択され、 X_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、本操作過程では、測定領域12へのRFパルスの照射は行われない。これにより、図14(e)に示すように、測定位置Pを除く Y_m 線上の各位置の核スピンは、第4操作過程T4とは反転したx軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

【0121】

最後に、第6操作過程T6において、均一電流パルス $-I_{st2}$ 及びy軸傾斜電流パルス $-I_y$ が電極群に供給され、測定領域12に対して逆符号の均一磁場 $-B_{st2}$ 及び反転したy軸方向傾斜磁場 $-B_2(y)$ が印加される。このとき、y軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 270° のRFパルスが測定領域12に照射される。これにより、図14(f)に示すように、測定位置Pを除く Y_m 線上の各位置の核スピンの中間状態から初期状態へと遷移する。また、このとき、測定位置Pの核スピンは変化しない。

【0122】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置Pの核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置Pを除く位置の核スピンを初期状態とする後過程が終了し、6段階の操作過程からなる測定過程が終了する。また、この後過程を構成する操作過程T4～T6のうち、2段階の操作過程T4、T5が、後過程におけるx軸勾配エコー操作の過程となっている。

【0123】

このように、測定位置Pで核スピンの中間状態となり、測定位置Pを除く測定領域12内の全ての位置で核スピンの初期状態となった図14(f)の状態、検出器54によって核磁気共鳴信号の検出を行う。これにより、測定位置P(X_m, Y_m)における局所的な核スピンの情報を選択的に取得することができる。

【0124】

また、本実施例は、操作過程T1～T3による前過程を経た段階において、測定位置Pで核スピンの初期状態となっている点で第1実施例と異なっている。すなわち、図9、図10に示した第1実施例では、前過程を経た段階において、測定位置Pで核スピンの反転状態となっている。これに対して、図13、図14に示した第3実施例では、前過程を経た段階において、測定位置P以外の位置での核スピンは第1実施例と同じ状態であるが、測定位置Pの核スピンは反転状態ではなく初期状態となっている。

【0125】

一般には、前過程を経た段階において、測定位置Pの核スピンを反転状態または初期状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置Pを除く位置の核スピンを中間状態とすることが好ましい。これにより、最終的に測定領域12内で測定位置Pでの核スピンのみを中間状態とする核スピンの操作を好適に実現することができる。

【0126】

図15は、複数の操作過程を含む核磁気共鳴の測定過程の第4実施例を示すタイミング

10

20

30

40

50

チャートである。また、図 16 は、図 15 に示した実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。

【0127】

本実施例の核スピンの操作方法では、操作過程 T1 ~ T6 のうち、前半の3段階の操作過程 T1 ~ T3 が、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、Xm 線上及び Ym 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程を構成している。また、後半の3段階の操作過程 T4 ~ T6 が、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、Xm 線上及び Ym 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程を構成している。

【0128】

具体的には、まず、第1操作過程 T1 において、均一電流パルス I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス I_x が電極群に供給され、測定領域 12 に対して均一磁場 B_{st1} 及び x 軸方向傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加される。このとき、x 軸方向の位置 X_m が選択され、Xm 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、RF パルスとして、位相 0° の RF パルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図 16 (a) に示すように、測定位置 P を含む Xm 線上の各位置の核スピンの初期状態から x 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。

10

【0129】

次に、第2操作過程 T2 において、均一電流パルス I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス I_y が電極群に供給され、測定領域 12 に対して均一磁場 B_{st2} 及び y 軸方向傾斜磁場 $B_2(y)$ が印加される。このとき、y 軸方向の位置 Y_m が選択され、Ym 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 90° の RF パルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図 16 (b) に示すように、測定位置 P を除く Ym 線上の各位置の核スピンの初期状態から y 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。このとき、測定位置 P の核スピンは変化しない。また、測定位置 P を除く Xm 線上の各位置の核スピンは、y 軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

20

【0130】

次に、第3操作過程 T3 において、均一電流パルス $-I_{st2}$ 及び y 軸傾斜電流パルス $-I_y$ が電極群に供給され、測定領域 12 に対して逆符号の均一磁場 $-B_{st2}$ 及び反転した y 軸方向傾斜磁場 $-B_2(y)$ が印加される。このとき、y 軸方向の位置 Y_m が選択され、Ym 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、本操作過程では、測定領域 12 への RF パルスの照射は行われぬ。これにより、図 16 (c) に示すように、測定位置 P を除く Xm 線上の各位置の核スピンは、第2操作過程 T2 とは反転した y 軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

30

【0131】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、Xm 線上及び Ym 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程が終了する。また、この前過程を構成する操作過程 T1 ~ T3 のうち、2段階の操作過程 T2、T3 が、前過程における y 軸勾配エコー操作の過程となっている。

【0132】

続いて、第4操作過程 T4 において、均一電流パルス I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス I_y が電極群に供給され、測定領域 12 に対して均一磁場 B_{st2} 及び y 軸方向傾斜磁場 $B_2(y)$ が印加される。このとき、y 軸方向の位置 Y_m が選択され、Ym 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 0° の RF パルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図 16 (d) に示すように、測定位置 P の核スピンの中間状態から反転状態へと遷移する。このとき、測定位置 P を除く Ym 線上の各位置の核スピンは変化しない。また、測定位置 P を除く Xm 線上の各位置の核スピンは、y 軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

40

【0133】

次に、第5操作過程 T5 において、均一電流パルス $-I_{st2}$ 及び y 軸傾斜電流パルス $-I_y$ が電極群に供給され、測定領域 12 に対して逆符号の均一磁場 $-B_{st2}$ 及び反転

50

した y 軸方向傾斜磁場 - $B_2(y)$ が印加される。このとき、 y 軸方向の位置 Y_m が選択され、 Y_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 270° の RF パルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図 16 (e) に示すように、測定位置 P を除く Y_m 線上の各位置の核スピンの中間状態から初期状態へと遷移する。また、測定位置 P の核スピンの反転状態から y 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。また、測定位置 P を除く X_m 線上の各位置の核スピンは、第 4 操作過程 T4 とは反転した y 軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

【0134】

最後に、第 6 操作過程 T6 において、均一電流パルス - I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス - I_x が電極群に供給され、測定領域 12 に対して逆符号の均一磁場 - B_{st1} 及び反転した x 軸方向傾斜磁場 - $B_1(x)$ が印加される。このとき、 x 軸方向の位置 X_m が選択され、 X_m 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 180° の RF パルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図 16 (f) に示すように、測定位置 P を除く X_m 線上の各位置の核スピンの中間状態から初期状態へと遷移する。また、このとき、測定位置 P の核スピンは変化しない。

10

【0135】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、 X_m 線上及び Y_m 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程が終了し、6 段階の操作過程からなる測定過程が終了する。また、この後過程を構成する操作過程 T4 ~ T6 のうち、2 段階の操作過程 T4、T5 が、後過程における y 軸勾配エコー操作の過程となっている。

20

【0136】

このように、測定位置 P で核スピンの中間状態となり、測定位置 P を除く測定領域 12 内の全ての位置で核スピンの初期状態となった図 16 (f) の状態で、検出器 54 によって核磁気共鳴信号の検出を行う。これにより、測定位置 P (X_m, Y_m) における局所的な核スピンの情報を選択的に取得することができる。

【0137】

また、本実施例は、測定領域 12 への RF パルスの照射が行われない操作過程が前過程に含まれている点で第 1 実施例と異なっている。すなわち、図 9、図 10 に示した第 1 実施例では、後過程に含まれる操作過程 T5 が、測定領域 12 への RF パルスの照射が行われない操作過程となっている。これに対して、図 15、図 16 に示した第 4 実施例では、前過程に含まれる操作過程 T3 が、測定領域 12 への RF パルスの照射が行われない操作過程となっている。

30

【0138】

前過程及び後過程において 1 回ずつ行われる勾配エコー操作に用いられる 4 段階の操作過程では、そのうちの 1 回を RF 照射なしとして勾配エコーのみを行う操作過程とすることが好ましい。また、この RF 照射なしの操作過程については、上記したように前過程及び後過程のいずれに含まれる構成としても良い。また、RF 照射なしの操作過程が前過程に含まれる第 4 実施例では、図 16 に示すように、前過程を経た段階における測定位置 P の核スピンの反転状態または初期状態ではなく中間状態のままとなっており、後過程の最初の操作過程 T4 において核スピンの反転状態とされる。

40

【0139】

一般には、RF パルスの照射を行わない操作過程が後過程に含まれる場合 (第 1、2、3 実施例)、前過程を経た段階において、測定位置 P で核スピンの反転状態または初期状態となるのが好ましい。また、RF パルスの照射を行わない操作過程が前過程に含まれる場合 (第 4 実施例)、前過程を経た段階において、測定位置 P で核スピンの中間状態となるとともに、後過程の最初の操作過程を経た段階において、測定位置 P で核スピンの反転状態または初期状態となるのが好ましい。

【0140】

図 17 は、複数の操作過程を含む核磁気共鳴の測定過程の第 5 実施例を示すタイミング

50

チャートである。また、図 18 は、図 17 に示した実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。

【0141】

本実施例の核スピンの操作方法では、操作過程 T1 ~ T6 のうち、前半の3段階の操作過程 T1 ~ T3 が、測定位置 P の核スピンを反転状態とし、Xm 線上及び Ym 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを中間状態とする前過程を構成している。また、後半の3段階の操作過程 T4 ~ T6 が、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、Xm 線上及び Ym 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程を構成している。また、本実施例の測定過程において、操作過程 T1 ~ T3 を含む前過程については第1実施例と同様である。

10

【0142】

続いて、第4操作過程 T4 において、均一電流パルス I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス I_x が電極群に供給され、測定領域 12 に対して均一磁場 B_{st1} 及び x 軸方向傾斜磁場 $B_1(x)$ が印加される。このとき、x 軸方向の位置 Xm が選択され、Xm 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、本操作過程では、測定領域 12 への RF パルスの照射は行われぬ。これにより、図 18 (d) に示すように、測定位置 P を除く Ym 線上の各位置の核スピンは、x 軸方向の傾斜磁場によって位相がずれる。

【0143】

次に、第5操作過程 T5 において、均一電流パルス - I_{st1} 及び x 軸傾斜電流パルス - I_x が電極群に供給され、測定領域 12 に対して逆符号の均一磁場 - B_{st1} 及び反転した x 軸方向傾斜磁場 - $B_1(x)$ が印加される。このとき、x 軸方向の位置 Xm が選択され、Xm 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 180° の RF パルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図 18 (e) に示すように、測定位置 P を除く Xm 線上の各位置の核スピンの中間状態から初期状態へと遷移する。また、測定位置 P の核スピンの反転状態から x 軸の正の方向を向く中間状態へと遷移する。また、測定位置 P を除く Ym 線上の各位置の核スピンは、第4操作過程 T4 とは反転した x 軸方向の傾斜磁場によって位相が再収束する。

20

【0144】

最後に、第6操作過程 T6 において、均一電流パルス - I_{st2} 及び y 軸傾斜電流パルス - I_y が電極群に供給され、測定領域 12 に対して逆符号の均一磁場 - B_{st2} 及び反転した y 軸方向傾斜磁場 - $B_2(y)$ が印加される。このとき、y 軸方向の位置 Ym が選択され、Ym 線上において核磁気共鳴の発生条件が満たされた状態となる。また、位相 270° の RF パルスが測定領域 12 に照射される。これにより、図 18 (f) に示すように、測定位置 P を除く Ym 線上の各位置の核スピンの中間状態から初期状態へと遷移する。また、このとき、測定位置 P の核スピンは変化しない。

30

【0145】

以上により、本実施例での測定過程における、測定位置 P の核スピンを中間状態とし、Xm 線上及び Ym 線上で測定位置 P を除く位置の核スピンを初期状態とする後過程が終了し、6段階の操作過程からなる測定過程が終了する。また、この後過程を構成する操作過程 T4 ~ T6 のうち、2段階の操作過程 T4、T5 が、後過程における x 軸勾配エコー操作の過程となっている。

40

【0146】

このように、測定位置 P で核スピンの中間状態となり、測定位置 P を除く測定領域 12 内の全ての位置で核スピンの初期状態となった図 18 (f) の状態で、検出器 54 によって核磁気共鳴信号の検出を行う。これにより、測定位置 P (Xm, Ym) における局所的な核スピンの情報を選択的に取得することができる。

【0147】

また、本実施例では、後過程に含まれる x 軸勾配エコー操作の操作過程 T4、T5 において、RF 照射なしの操作過程が後段の操作過程 T5 ではなく、前段の操作過程 T4 となっている点で第1実施例と異なっている。このように、RF 照射なしの操作過程について

50

は、勾配エコー操作の前段、後段の操作過程のいずれに設定しても良い。これは、前過程に含まれる勾配エコー操作においてRF照射なしの操作過程を用いる構成においても同様である。

【0148】

本発明による核磁気共鳴撮像システム、及び撮像方法は、上記した実施形態及び実施例に限られるものではなく、様々な変形が可能である。例えば、磁場印加用電極群を構成する各電極の具体的な電極パターンについては、図1に示した構成以外にも様々な構成を用いて良い。一般には、基板に集積化される磁場印加用電極群は、測定領域に対して、設定すべき測定位置に応じた均一磁場を印加する均一磁場用電極と、測定領域に対して、基板の測定面に平行なx軸方向について傾斜磁場を印加する第1傾斜磁場用電極と、測定領域 10
に対して、測定面に平行でx軸と直交するy軸方向について傾斜磁場を印加する第2傾斜磁場用電極とを有して構成されていれば良い。

【0149】

また、撮像素子における基板、電極群、RFアンテナの積層構造等についても、上記した構成に限らず、様々な構成を用いて良い。また、上記構成の撮像素子を用いた具体的な撮像方法についても、上記した方法に限らず、具体的な測定対象物の種類、配置、電極群の構成等に応じて様々な方法を用いることが可能である。

【0150】

また、上記実施形態では、核磁気共鳴測定に用いられる核磁気共鳴撮像素子として、一方の面が測定面となっている基板を有し、磁場印加用電極群が基板の測定面上に集積化され 20
て設けられた構成の撮像素子を用いている。一般には、核磁気共鳴撮像素子は、核磁気共鳴の測定領域に磁場を印加して、測定領域内で局所的な測定位置を設定するための磁場印加用電極群、及び測定領域に対してRFパルス照射するためのRF照射手段を含み、磁場印加用電極群が、均一磁場用電極と、x軸方向についての第1傾斜磁場用電極と、y軸方向についての第2傾斜磁場用電極とを有する構成であれば良い。

【0151】

また、上記した第1～第5実施例では、いずれも測定過程において、前過程が、RFパルスとして位相0°の90°パルス照射する操作過程と、位相90°の90°パルス照射する操作過程とを含み、後過程が、RFパルスとして位相180°の90°パルス照射する操作過程と、位相270°の90°パルス照射する操作過程とを含む構成を用 30
いている。

【0152】

このような測定過程については、上記した構成に限らず、例えば、前過程が、RFパルスとして位相0°の90°パルス照射する操作過程と、位相270°の90°パルス照射する操作過程とを含み、後過程が、RFパルスとして位相180°の90°パルス照射する操作過程と、位相90°の90°パルス照射する操作過程とを含む構成とすることも可能である。また、前過程及び後過程のそれぞれにおける勾配エコー操作については、その前段、後段の操作過程での傾斜磁場の向きを入れ換えても良い。

【産業上の利用可能性】

【0153】

本発明は、核磁気共鳴撮像法による測定対象物の画像取得を高い分解能で行うことが可能な核磁気共鳴撮像素子を用いた撮像システム、及び撮像方法として利用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0154】

【図1】核磁気共鳴撮像素子の一実施形態の平面構成を概略的に示す図である。

【図2】図1に示した撮像素子の断面構造を示す断面図である。

【図3】核磁気共鳴撮像システムの一実施形態の構成を示すブロック図である。

【図4】撮像素子における電極パターンの作製例を示す電子顕微鏡写真である。

【図5】撮像素子の変形例(a)、(b)の断面構造を示す断面図である。

【図6】測定領域における測定位置Pについて示す図である。

10

20

30

40

50

- 【図 7】測定領域における x 軸方向の測定位置 X m の選択について示す図である。
- 【図 8】測定領域における x 軸方向の測定位置 X m の選択について示す図である。
- 【図 9】核磁気共鳴の測定過程の第 1 実施例を示すタイミングチャートである。
- 【図 10】第 1 実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。
- 【図 11】核磁気共鳴の測定過程の第 2 実施例を示すタイミングチャートである。
- 【図 12】第 2 実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。
- 【図 13】核磁気共鳴の測定過程の第 3 実施例を示すタイミングチャートである。
- 【図 14】第 3 実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。
- 【図 15】核磁気共鳴の測定過程の第 4 実施例を示すタイミングチャートである。
- 【図 16】第 4 実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。
- 【図 17】核磁気共鳴の測定過程の第 5 実施例を示すタイミングチャートである。
- 【図 18】第 5 実施例における核スピンの操作方法を示す模式図である。

【符号の説明】

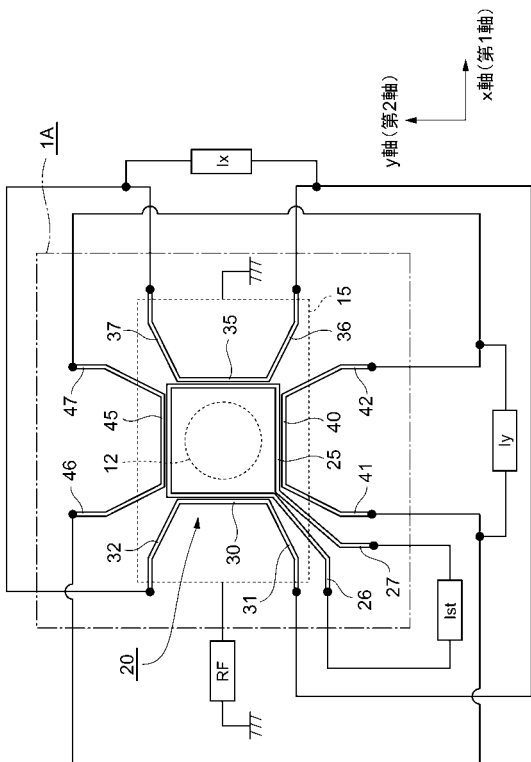
【 0 1 5 5 】

1 A ... 核磁気共鳴撮像素子、 1 0 ... 基板、 1 1 ... 測定面、 1 2 ... 測定領域、 1 3 ... 測定対象物、 1 5 ... R F アンテナ、 1 6 ... 絶縁層、 2 0 ... 磁場印加用電極群、 2 5 ... 均一磁場用電極、 2 6、 2 7 ... 配線、 3 0、 3 5 ... 第 1 傾斜磁場用電極、 3 1、 3 2、 3 6、 3 7 ... 配線、 4 0、 4 5 ... 第 2 傾斜磁場用電極、 4 1、 4 2、 4 6、 4 7 ... 配線、 5 0 ... 均一磁場用電流源、 5 1 ... 第 1 傾斜磁場用電流源、 5 2 ... 第 2 傾斜磁場用電流源、 5 4 ... 検出器、 5 6 ... 制御装置、 6 0 ... R F 波発生器、 6 1 ... 分配器、 6 2 ... 位相調整器、 6 3 ... 第 1 スイッチ、 6 4 ... 第 2 スイッチ、 6 5 ... 合成器。

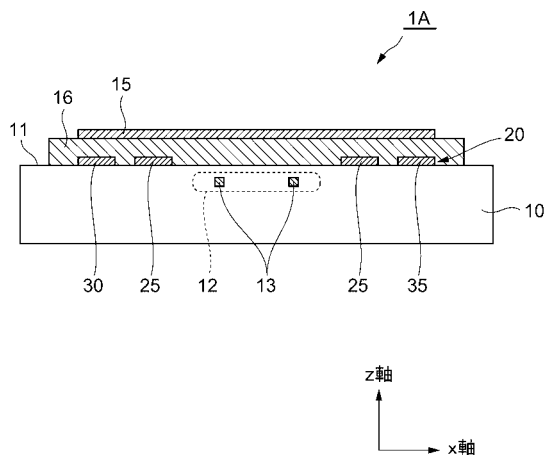
10

20

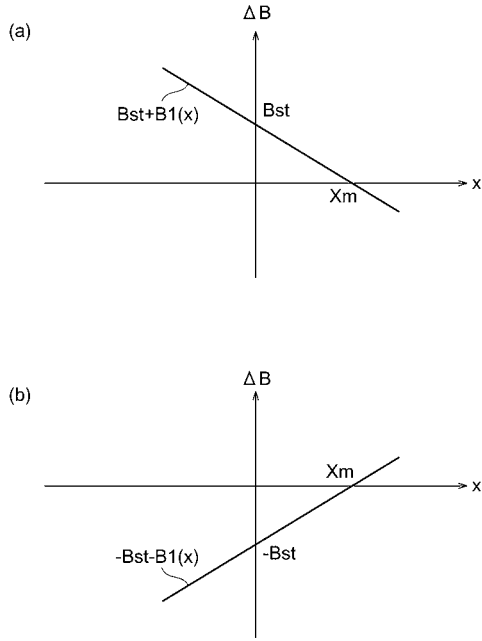
【図 1】



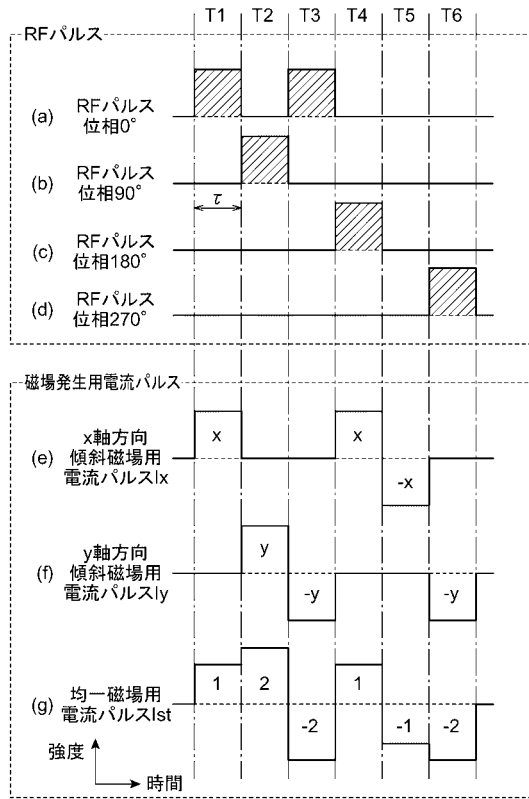
【図 2】



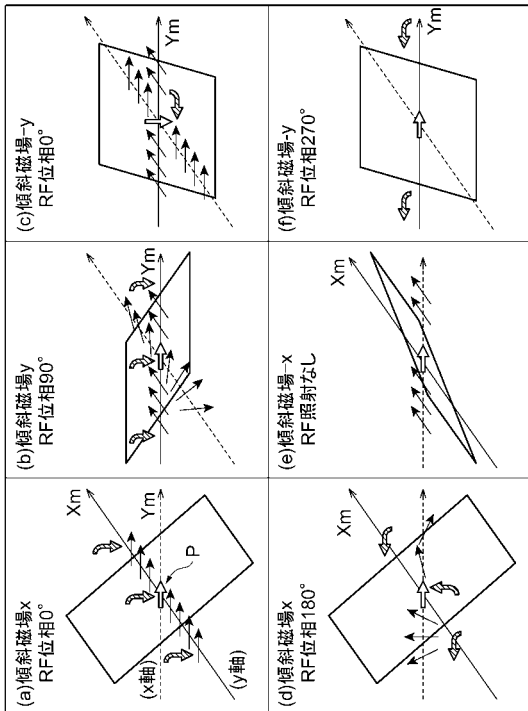
【 図 8 】



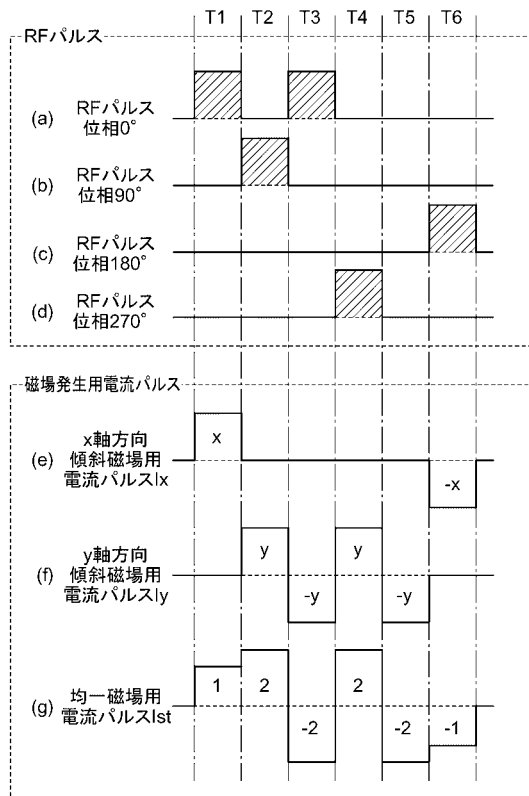
【 図 9 】



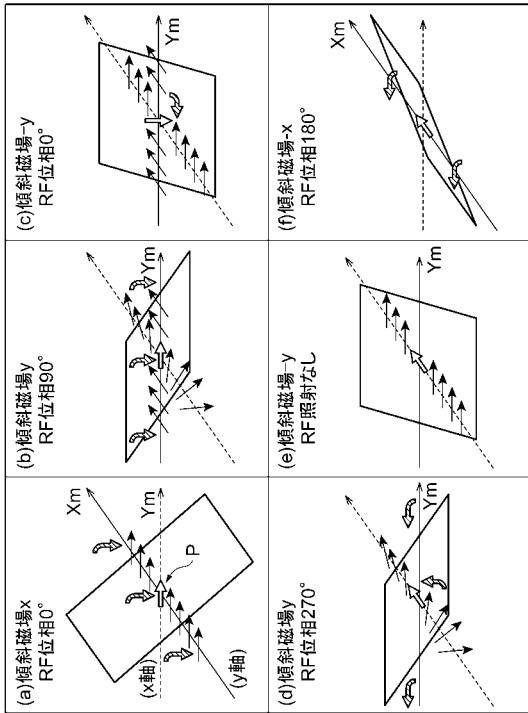
【 図 1 0 】



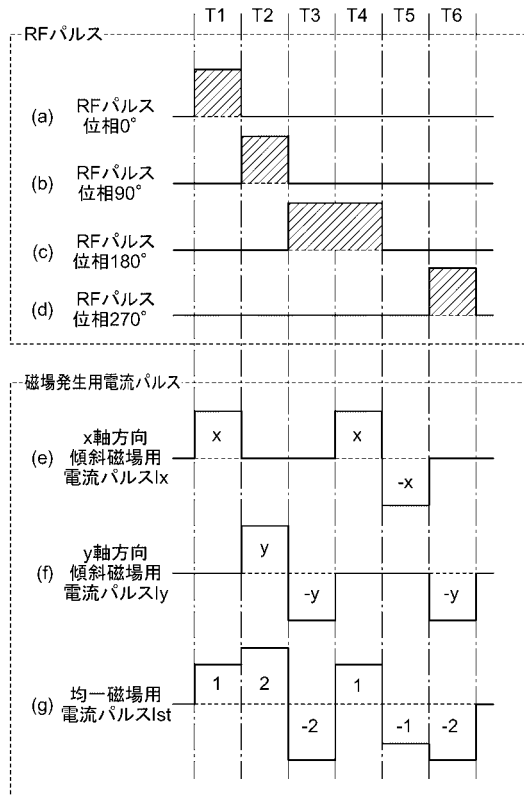
【 図 1 1 】



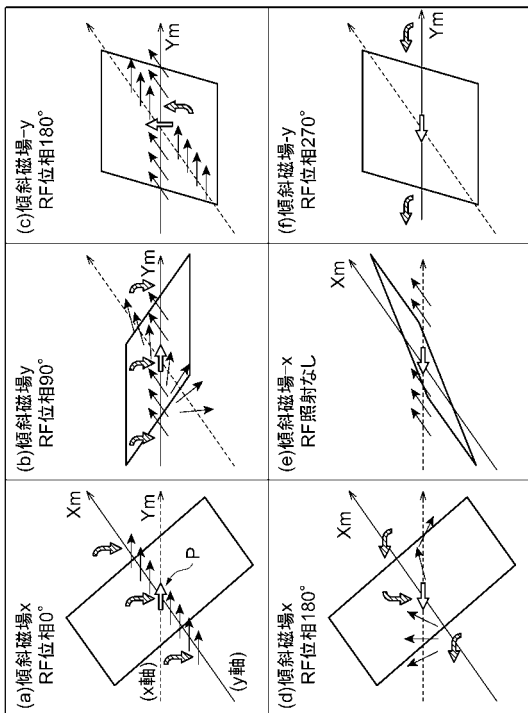
【 図 1 2 】



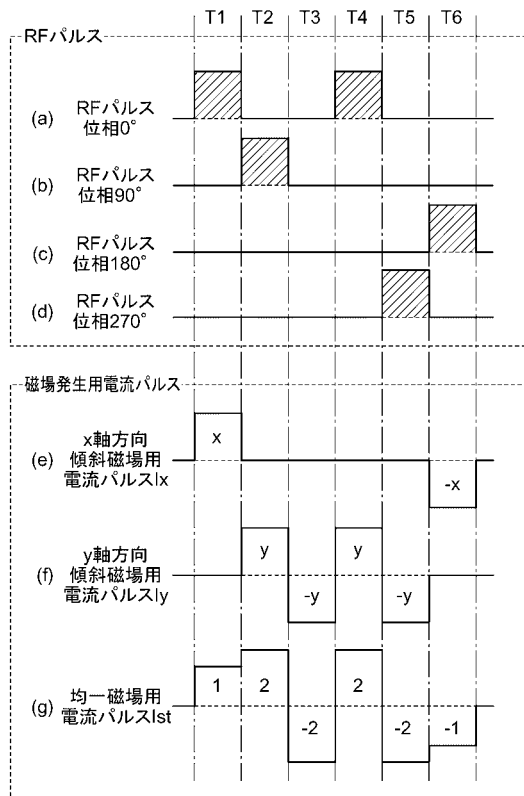
【 図 1 3 】



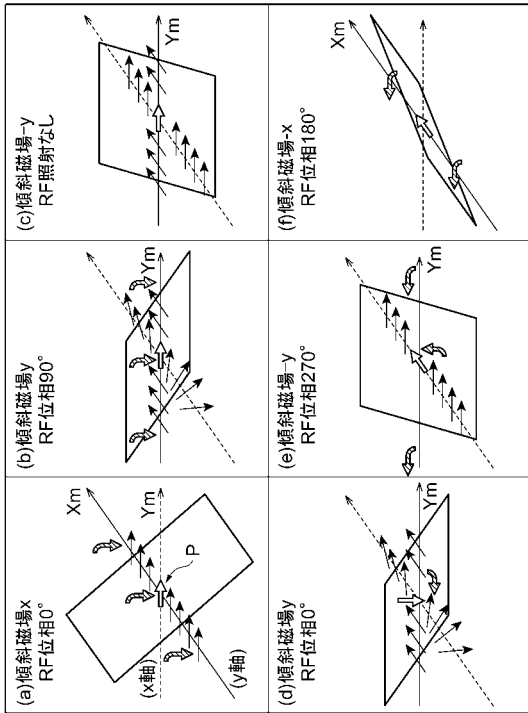
【 図 1 4 】



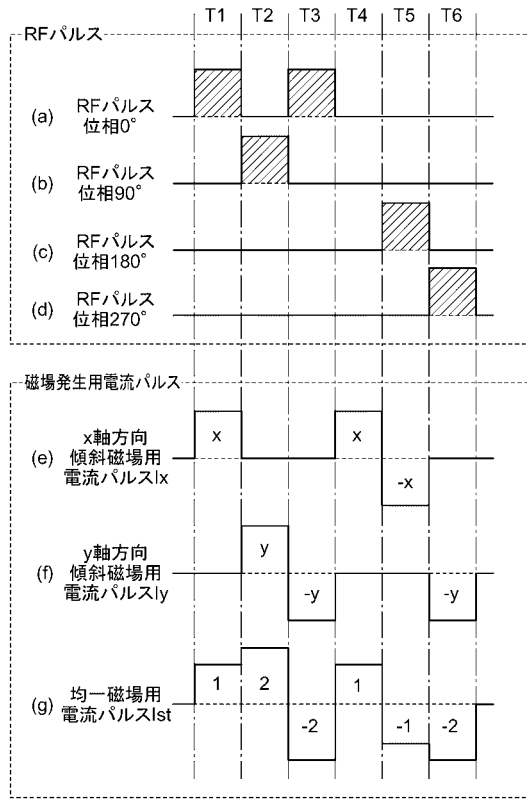
【 図 1 5 】



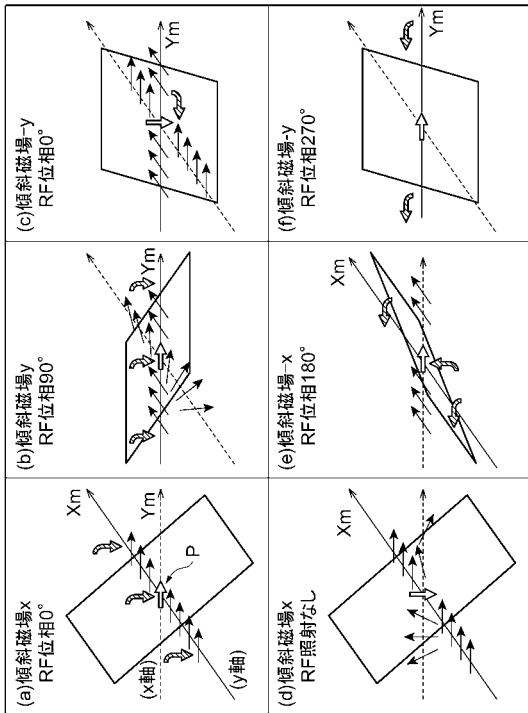
【 図 1 6 】



【 図 1 7 】



【 図 1 8 】



【 図 4 】

