

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5135578号
(P5135578)

(45) 発行日 平成25年2月6日(2013.2.6)

(24) 登録日 平成24年11月22日(2012.11.22)

(51) Int. Cl. F I
GO 1 R 33/60 (2006.01) GO 1 N 24/10 5 2 O Z
GO 1 N 24/10 (2006.01) GO 1 N 24/00 G
 GO 1 N 24/10 5 1 O R

請求項の数 4 (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2007-39951 (P2007-39951) (22) 出願日 平成19年2月20日(2007.2.20) (65) 公開番号 特開2008-203104 (P2008-203104A) (43) 公開日 平成20年9月4日(2008.9.4) 審査請求日 平成22年2月3日(2010.2.3)</p>	<p>(73) 特許権者 504160781 国立大学法人金沢大学 石川県金沢市角間町ヌ7番地 (74) 代理人 100109210 弁理士 新居 広守 (72) 発明者 北川 章夫 石川県金沢市角間町ヌ7番地 国立大学法 人金沢大学内 審査官 田中 洋介</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気共鳴測定装置、集積回路および磁気共鳴測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

測定対象物の磁気共鳴に関する物性値を測定する磁気共鳴測定装置であって、
 前記測定対象物に磁場を印加する磁場印加手段と、
 前記測定対象物と一定関係の位置に配置されたインダクタと、
 前記インダクタに交流電流を供給する電流供給手段と、
 前記電流供給手段によって供給される交流電流の周波数、または、前記磁場印加手段によ
 って印加される磁場の強さを調整値とし、前記調整値を変化させる調整手段と、
 前記調整手段によって変化された調整値ごとに、前記インダクタのインダクタンスを計
 測するインダクタンス計測手段と、
 前記インダクタンス計測手段によって計測されたインダクタンスが特徴的な変化傾向を
 示す前記調整値に基づいて、前記測定対象物の物性値を特定する物性値特定手段と
 を備え、
 前記物性値特定手段は、
前記インダクタンスが特徴的な変化傾向を示す前記調整値と、前記調整値におけるイン
 ダクタンスの実部および虚部とをそれぞれ特性値として検出し、
前記特性値に応じた前記測定対象物の物性値を特定し、
前記インダクタンス計測手段は、
自己インダクタンスまたは相互インダクタンスを前記インダクタンスとして計測し、
前記自己インダクタンスを計測する際には、

10

20

前記インダクタにかかる交流電圧の複素数の値を、前記インダクタに流れる交流電流の複素数の値で除算することによって、前記インダクタの自己インダクタンスの実部および虚部を導出し、

前記相互インダクタンスを計測する際には、

前記インダクタにかかる交流電圧の複素数の値を、前記インダクタに磁氣的に結合された他のインダクタに誘導される交流電圧の複素数の値で除算した結果を用いて、前記インダクタと前記他のインダクタとの間の相互インダクタンスの実部および虚部を導出する

ことを特徴とする磁気共鳴測定装置。

【請求項 2】

前記物性値特定手段は、

前記測定対象物の電子スピン共鳴に関する物性値を特定することを特徴とする請求項 1 記載の磁気共鳴測定装置。

10

【請求項 3】

測定対象物の磁気共鳴に関する物性値を測定する集積回路であって、

前記測定対象物と一定関係の位置に配置されたインダクタと、

前記インダクタに交流電流を供給する電流供給手段と、

前記電流供給手段によって供給される交流電流の周波数、または、磁場印加手段によって前記測定対象物に印加される磁場の強さを調整値とし、前記調整値を変化させる調整手段と、

前記調整手段によって変化された調整値ごとに、前記インダクタのインダクタンスを計測するインダクタンス計測手段と、

20

前記インダクタンス計測手段によって計測されたインダクタンスが特徴的な変化傾向を示す前記調整値に基づいて、前記測定対象物の物性値を特定する物性値特定手段と

を備え、

前記物性値特定手段は、

前記インダクタンスが特徴的な変化傾向を示す前記調整値と、前記調整値におけるインダクタンスの実部および虚部とをそれぞれ特性値として検出し、

前記特性値に応じた前記測定対象物の物性値を特定し、

前記インダクタンス計測手段は、

自己インダクタンスまたは相互インダクタンスを前記インダクタンスとして計測し、

30

前記自己インダクタンスを計測する際には、

前記インダクタにかかる交流電圧の複素数の値を、前記インダクタに流れる交流電流の複素数の値で除算することによって、前記インダクタの自己インダクタンスの実部および虚部を導出し、

前記相互インダクタンスを計測する際には、

前記インダクタにかかる交流電圧の複素数の値を、前記インダクタに磁氣的に結合された他のインダクタに誘導される交流電圧の複素数の値で除算した結果を用いて、前記インダクタと前記他のインダクタとの間の相互インダクタンスの実部および虚部を導出する

ことを特徴とする集積回路。

【請求項 4】

40

測定対象物の磁気共鳴に関する物性値を測定する磁気共鳴測定方法であって、

前記測定対象物に磁場を印加する磁場印加ステップと、

前記測定対象物と一定関係の位置に配置されたインダクタに、交流電流を供給する電流供給ステップと、

前記電流供給ステップで供給される交流電流の周波数、または、前記磁場印加ステップで印加される磁場の強さを調整値とし、前記調整値を変化させる調整ステップと、

前記調整ステップで変化された調整値ごとに、前記インダクタのインダクタンスを計測するインダクタンス計測ステップと、

前記インダクタンス計測ステップで計測されたインダクタンスが特徴的な変化傾向を示す前記調整値に基づいて、前記測定対象物の物性値を特定する物性値特定ステップと

50

を含み、
 前記物性値特定ステップでは、
 前記インダクタンスが特徴的な変化傾向を示す前記調整値と、前記調整値におけるイン
 ダクタンスの実部および虚部とをそれぞれ特性値として検出し、
 前記特性値に応じた前記測定対象物の物性値を特定し、
 前記インダクタンス計測ステップでは、
 自己インダクタンスまたは相互インダクタンスを前記インダクタンスとして計測し、
 前記自己インダクタンスを計測する際には、
 前記インダクタにかかると交流電圧の複素数の値を、前記インダクタに流れる交流電流の
 複素数の値で除算することによって、前記インダクタの自己インダクタンスの実部および
 虚部を導出し、
 前記相互インダクタンスを計測する際には、
 前記インダクタにかかると交流電圧の複素数の値を、前記インダクタに磁氣的に結合され
 た他のインダクタに誘導される交流電圧の複素数の値で除算した結果を用いて、前記イン
 ダクタと前記他のインダクタとの間の相互インダクタンスの実部および虚部を導出する
 ことを特徴とする磁気共鳴測定方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、測定対象物の磁気共鳴に関する物性値を測定する装置に関する。

20

【背景技術】

【0002】

従来、測定対象物の磁気共鳴に関する物性値を測定する装置として、測定対象物に含まれる、不対電子を持つ原子、分子またはイオンであるフリーラジカルを測定する電子スピン共鳴（ESR：Electron Spin Resonance）装置が利用されている（例えば、非特許文献1参照）。

【0003】

このような電子スピン共鳴装置（以下、単にESRという）は、電子材料や機能性素材の性能評価、年代測定などに用いられている。また、最近では、ESRは、生体内の薬の動態の観測や、食物の抗酸化作用の定量化、環境測定などにも広く利用されている。

30

【0004】

図7は、上記非特許文献1のESRの原理を説明するための説明図である。

【0005】

ESR900は、マイクロ波発振器901と、サーキュレータ902と、空洞共振器903と、電磁石904と、検波器905と、評価部906とを備えている。マイクロ波発振器901、空洞共振器903および検波器905は、導波管907を介してサーキュレータ902に接続されている。

【0006】

マイクロ波発振器901は、例えば10GHzの周波数のマイクロ波（電磁波）を発生する。

40

【0007】

サーキュレータ902は、マイクロ波発振器901から出力され、導波管907を介して伝播するマイクロ波の伝播方向を空洞共振器903側に向ける。また、サーキュレータ902は、空洞共振器903から出力され、導波管907を介して伝播するマイクロ波の伝播方向を検波器905側に向ける。

【0008】

空洞共振器903は、マイクロ波発振器901から導波管907を介して入力されるマイクロ波を空間内に閉じ込めて共振させる。このような空洞共振器903は、そのマイクロ波が共振条件を満たすような寸法に設定されている。また、この空洞共振器903の内部には、測定対象物であるサンプル10がキャピラリ管に封入された状態で挿入される。

50

【 0 0 0 9 】

電磁石 9 0 4 は、サンプル 1 0 に直流の磁場（磁場の強さ H_{DC} ）を印加する。この磁場の磁束密度は、例えば数百 m T である。

【 0 0 1 0 】

検波器 9 0 5 は、空洞共振器 9 0 3 から導波管 9 0 7 を介して入力されるマイクロ波のエネルギーを検出する。

【 0 0 1 1 】

評価部 9 0 6 は、検波器 9 0 5 によって検出されたエネルギーに基づいて、測定対象物の磁気共鳴に関する、つまり測定対象物のフリーラジカルに関する物性値を特定し、測定対象物の定量的および定性的な評価を行う。

10

【 0 0 1 2 】

このような E S R 9 0 0 を用いてサンプル 1 0 の測定を行うときには、空洞共振器 9 0 3 にマイクロ波を入力し、サンプル 1 0 に磁場を印加する。サンプル 1 0 に磁場が印加されると、サンプル 1 0 に含まれるフリーラジカルの不対電子にはゼーマン分裂が生じる。つまり、2 種類の不対電子に、磁場の強さ H_{DC} に比例した大きさのエネルギー差が生じる。

【 0 0 1 3 】

そして、磁場の強さ H_{DC} を変化させる。その結果、特定の磁場の強さ H_{DC} において、マイクロ波のエネルギーと、ゼーマン分裂によるエネルギー差とが一致する。このとき、不対電子の状態に遷移が生じ、つまり共鳴（磁気共鳴）が生じる。これにより、マイクロ波のエネルギーはその磁気共鳴によって吸収される。

20

【 0 0 1 4 】

すなわち、磁場の強さ H_{DC} を変化させると、検波器 9 0 5 では、特定の磁場の強さ H_{DC} において、マイクロ波のエネルギーが急激に減少することが観測される。

【 0 0 1 5 】

評価部 9 0 6 は、このようにマイクロ波のエネルギーが急激に減少する磁場の強さ H_{DC} などに基づいて、つまり、電力損失の変化に基づいて、フリーラジカルに関する物性値を特定する。

【非特許文献 1】“ E S R と E P R ”、[online]、日本電子株式会社、[平成 19 年 2 月 2 日検索]、インターネット < URL : <http://www.jeol.co.jp/technical/ai/esr/esr-information/esrinfo-01.htm> >

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 6 】

しかしながら、従来の E S R では、その装置の大きさが非常に大きく、さらにその装置の重量が非常に重いという問題がある。

【 0 0 1 7 】

例えば、空洞共振器 9 0 3 の寸法は、マイクロ波の波長に応じた寸法（半波長の整数倍）でなければならない。その結果、空洞共振器 9 0 3 を小型化することができない。また、マイクロ波やサンプル 1 0 に応じて磁場の強さ H_{DC} を調整する必要があり、電磁石 9 0 4 も小型化することができない。その結果、E S R の装置の重量は、6 0 0 k g ~ 2 t となっている。

40

【 0 0 1 8 】

したがって、このような E S R を実地に運び、環境測定を行うようなことができず、E S R の使い勝手も悪いという問題も生じている。さらに、従来の E S R では、マイクロ波の周波数を容易に変更することができないので、サンプル 1 0 に応じて装置全体のシステムを組み直す必要がある。

【 0 0 1 9 】

そこで、本発明は、かかる問題に鑑みてなされたものであって、小型化および軽量化を図った磁気共鳴測定装置を提供することを目的とする。

50

【課題を解決するための手段】**【0020】**

上記目的を達成するために、本発明に係る磁気共鳴測定装置は、測定対象物の磁気共鳴に関する物性値を測定する磁気共鳴測定装置であって、前記測定対象物に磁場を印加する磁場印加手段と、前記測定対象物と一定関係の位置に配置されたインダクタと、前記インダクタに交流電流を供給する電流供給手段と、前記電流供給手段によって供給される交流電流の周波数、または、前記磁場印加手段によって印加される磁場の強さを調整値とし、前記調整値を変化させる調整手段と、前記調整手段によって変化された調整値ごとに、前記インダクタのインダクタンスを計測するインダクタンス計測手段と、前記インダクタンス計測手段によって計測されたインダクタンスが特徴的な変化傾向を示す前記調整値に基づいて、前記測定対象物の物性値を特定する物性値特定手段とを備えることを特徴とする。

10

【0021】

これにより、磁気共鳴をさせずに、インダクタンスの変化傾向に基づいて測定対象物の物性値を特定するため、寸法制限を有する従来のESRの空洞共振器を不要とし、装置全体の小型化を図ることができる。例えば、磁気共鳴測定装置を携帯電話や腕時計のサイズにまで小型化し得る可能性がある。その結果、磁気共鳴測定装置を携帯することができ、実地での測定および評価である *in-situ* 評価を行うことができる。また、従来のESRでは、マイクロ波の周波数を変更するときには、空洞共振器の寸法を調整するようにシステムを組み直す必要があるが、本発明では、インダクタに流れる交流電流の周波数、

20

【0022】

なお、本発明は、このような磁気共鳴測定装置として実現することができるだけでなく、その磁気共鳴測定装置による測定方法や、その磁気共鳴測定装置に測定させるためのプログラム、そのプログラムを格納する記憶媒体、集積回路としても実現することができる。

【発明の効果】**【0023】**

本発明の磁気共鳴測定装置は、小型化および軽量化を図ることができるという作用効果を奏する。

30

【発明を実施するための最良の形態】**【0024】**

以下、本発明の実施の形態における磁気共鳴測定装置について図面を参照しながら説明する。

【0025】

図1は、本発明の実施の形態における磁気共鳴測定装置の構成図である。

【0026】

本実施の形態における磁気共鳴測定装置100は、小型化および軽量化された装置であって、インダクタ101、磁石102、交流電圧源103、周波数調整部104、インダクタンス計測部105、特性値検出部106、物性評価部107、電圧計111、電流計112、およびオペアンプ113を備えている。

40

【0027】

磁石102は、測定対象であるサンプル11に、例えば数十mTの磁束密度の直流磁場を印加する。

【0028】

インダクタ101は、サンプル11と一定関係の位置、即ちサンプル11から磁気的影響を受けるような位置に配置されている。例えば、インダクタ101の中空部にサンプル11が配置される。

50

【 0 0 2 9 】

交流電圧源 1 0 3 は、周波数調整部 1 0 4 によって設定された周波数の交流電圧を供給する。

【 0 0 3 0 】

オペアンプ 1 1 3 は、交流電圧源 1 0 3 から供給される交流電圧に応じた電流をインダクタ 1 0 1 に流すバッファアンプ（インピーダンス変換器）である。

【 0 0 3 1 】

つまり、本実施の形態では、交流電圧源 1 0 3 およびオペアンプ 1 1 3 が、インダクタ 1 0 1 に交流電流を供給する電流供給手段として構成されている。

【 0 0 3 2 】

電圧計 1 1 1 は、インダクタ 1 0 1 にかかる交流電圧の値を計測する。そして、電圧計 1 1 1 は、インダクタ 1 0 1 にかかる交流電圧の値を、そのインダクタ 1 0 1 にかかる交流電圧と交流電圧源 1 0 3 の交流電圧との位相差に応じた複素数 v として、インダクタンス計測部 1 0 5 に通知する。

10

【 0 0 3 3 】

電流計 1 1 2 は、インダクタ 1 0 1 に流れる交流電流の値を計測する。そして、電流計 1 1 2 は、インダクタ 1 0 1 に流れる交流電流の値を、そのインダクタ 1 0 1 に流れる交流電流と交流電圧源 1 0 3 の交流電圧との位相差に応じた複素数 i として、インダクタンス計測部 1 0 5 に通知する。

【 0 0 3 4 】

周波数調整部 1 0 4 は、交流電圧源 1 0 3 から供給される交流電圧の周波数を調整して設定する。例えば、周波数調整部 1 0 4 は、低周波数から高周波数まで所定の間隔で交流電力の周波数をスweep（変化）させる。そして、周波数調整部 1 0 4 は、設定された周波数をインダクタンス計測部 1 0 5 に通知する。

20

【 0 0 3 5 】

つまり、本実施の形態では、周波数調整部 1 0 4 が、交流電圧源 1 0 3 およびオペアンプ 1 1 3 によってインダクタ 1 0 1 に供給される交流電流の周波数を調整値とし、その調整値を変化させる調整手段として構成されている。

【 0 0 3 6 】

インダクタンス計測部 1 0 5 は、その周波数調整部 1 0 4 によって設定された周波数、つまりインダクタ 1 0 1 に流れる交流電流の角周波数 ω における、インダクタ 1 0 1 の自己インダクタンス L を複素数として算出する。

30

【 0 0 3 7 】

即ち、インダクタンス計測部 1 0 5 は、角周波数 ω における複素数の自己インダクタンス L を、 $L = v / i$ によって算出する。

【 0 0 3 8 】

なお、本来、自己インダクタンスは、2 端子対回路のリアクタンス成分として定義され、実数値で表されるが、ここでは、計算方法を明確にするため、複素透磁率に比例する複素数の自己インダクタンスという量を定義する。

【 0 0 3 9 】

特性値検出部 1 0 6 は、インダクタ 1 0 1 に流れる交流電流の角周波数 ω が変化するとともに、その角周波数 ω における自己インダクタンス L の実部または虚部の変化傾向を観測する。そして、特性値検出部 1 0 6 は、特徴的な変化傾向を示すときの角周波数 ω_0 を、特性値である共鳴角周波数 ω_0 として検出する。さらに、特性値検出部 1 0 6 は、その特徴的な変化傾向を示すときにおける自己インダクタンス L の実部または虚部を、特性値として検出する。

40

【 0 0 4 0 】

ここで、自己インダクタンス L は、インダクタ 1 0 1 の形状に依存した係数 A_{ge0} と透磁率 μ とを用いて、 $L = \mu \cdot A_{ge0}$ として示される。また、透磁率 μ は $\mu = \mu' () - j \mu'' ()$ として、つまり複素数として示される。その結果、自己インダクタンス L は

50

、 $L = (\mu'(\omega) - j\mu''(\omega)) \cdot A_{ge0} = \mu'(\omega) \cdot A_{ge0} - j\mu''(\omega) \cdot A_{ge0}$ 。
 μ_0 として、透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ と虚部 $\mu''(\omega)$ とを用いて示される。

【0041】

したがって、特性値検出部106は、透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ または虚部 $\mu''(\omega)$ の変化傾向を観測し、特徴的な変化傾向を示すときにおける透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ または虚部 $\mu''(\omega)$ を、特性値 μ'_0 または特性値 μ''_0 として検出している。

【0042】

なお、複素数である透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ は、磁界エネルギーの蓄積に対応し、透磁率 μ の虚部 $\mu''(\omega)$ は、エネルギーの損失に対応している。

【0043】

物性評価部107は、上述の特性値に基づいて、サンプル11の磁気共鳴に関する、つまりサンプル11のフリーラジカルに関する物性値を特定する。すなわち、物性評価部107は、フリーラジカルの濃度、構造、電子状態、および電子分布などを特定して評価する。

【0044】

例えば、物性評価部107は、既知の複数のサンプルの特性値と物性値とを対応付けたテーブルを記憶しており、そのテーブルを参照することにより、サンプル11の物性値を特定する。

【0045】

具体的には、物性評価部107は、例えば、半導体、セラミックス薄、触媒、および色素材料などの材料評価、さらに、食品の評価や血液診断などの生体材料や生体組織の分析、および活性酸素などのフリーラジカルの計測による薬品投与の影響追跡などを行う。なお、食品の評価や血液診断のように、水分を含むサンプル11に対しても評価される。

【0046】

なお、本実施の形態では、特性値検出部106および物性評価部107が、インダクタンス計測部105によって計測されたインダクタンスが特徴的な変化傾向を示す調整値に基づいて、サンプル11の物性値を特定する物性値特定手段として構成されている。

【0047】

図2は、角周波数 ω に対する磁化率 χ の実部 χ' と虚部 χ'' の変化を示す図である。

【0048】

角周波数 ω に対する透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ および虚部 $\mu''(\omega)$ の変化傾向は、角周波数 ω に対する磁化率 χ の実部 $\chi'(\omega)$ および虚部 $\chi''(\omega)$ と同様の変化傾向を示す。

【0049】

磁化率 χ は、 $\chi = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega)$ として複素数で示される。そして、透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ は、磁化率 χ の実部 $\chi'(\omega)$ を用いて、 $\mu'(\omega) = \mu_0 \cdot (1 + \chi'(\omega))$ として示され、透磁率 μ の虚部 $\mu''(\omega)$ は、磁化率 χ の虚部 $\chi''(\omega)$ を用いて、 $\mu''(\omega) = \mu_0 \cdot \chi''(\omega)$ として示される。なお、 μ_0 は真空中の透磁率である。

【0050】

したがって、透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ および虚部 $\mu''(\omega)$ は、磁化率 χ の実部 $\chi'(\omega)$ および虚部 $\chi''(\omega)$ とそれぞれ比例関係にある。

【0051】

磁化率 χ の実部 $\chi'(\omega)$ は、図2の(a)に示すように、インダクタ101に流れる交流電流の角周波数 ω が共鳴角周波数 ω_0 付近で変化すると、大きく変動する。つまり、自己インダクタンス L の実部または透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ も、図2の(a)に示すような変化傾向を示す。

【0052】

また、磁化率 χ の虚部 $\chi''(\omega)$ は、図2の(b)に示すように、インダクタ101に流れる交流電流の角周波数 ω が共鳴角周波数 ω_0 になると、最大になる。つまり、角周波

10

20

30

40

50

数 が小さい値から共鳴角周波数 ω_0 に近づくと、虚部 χ'' () は共鳴角周波数 ω_0 付近から急激に増加し、共鳴角周波数 ω_0 で最大値となる。そして、角周波数 ω が共鳴角周波数 ω_0 よりも大きくなると、虚部 χ'' () は共鳴角周波数 ω_0 付近で急激に減少する。

【 0 0 5 3 】

つまり、自己インダクタンス L の虚部または透磁率 μ の虚部 μ'' () も、図 2 の (b) に示すような変化傾向を示す。

【 0 0 5 4 】

本実施の形態における特性値検出部 106 は、図 2 の (a) に示す変化傾向または図 2 の (b) に示す変化傾向から、最大値や最小値となるような激しい変動を示す傾向を、特徴的な変化傾向として見つけ出している。

10

【 0 0 5 5 】

ここで、従来の ESR における測定感度について説明する。

【 0 0 5 6 】

従来の ESR の測定感度 Δm は、それぞれ以下の (数 1) によって示される。なお、 H_0 (Resonator) は空洞共振器の磁場の強さを示し、 H_0 (Sample) はサンプル中の磁場の強さを示す。また、Volume (Resonator) は空洞共振器の体積を示し、Volume (Sample) はサンプルの体積を示す。

【 0 0 5 7 】

【 数 1 】

$$\Delta m \propto \chi'' \frac{H_0(\text{Sample})}{H_0(\text{Resonator})} \cdot \frac{\text{Volume}(\text{Sample})}{\text{Volume}(\text{Resonator})}$$

20

【 0 0 5 8 】

上記 (数 1) において、 H_0 (Resonator) H_0 (Sample) が成り立つため、(数 1) は以下の (数 2) のように示される。

【 0 0 5 9 】

【 数 2 】

$$\Delta m \propto \chi'' \frac{\text{Volume}(\text{Sample})}{\text{Volume}(\text{Resonator})}$$

30

【 0 0 6 0 】

つまり、従来の ESR では、Volume (Resonator) を小さくすることができないため、薄膜材料のような微小なサンプルに対しては、測定感度が非常に低下してしまう。例えば、従来の ESR の測定感度は、 10^{12} 個よりも少ないフリーラジカルを検出することができない。

【 0 0 6 1 】

一方、本実施の形態における磁気共鳴測定装置 100 では、従来の ESR のように空洞共振器を用いないため、インダクタ 101 を小さくすることで、微小なサンプルであっても高い測定感度を維持することができる。

40

【 0 0 6 2 】

ここで、本実施の形態における予備実験結果について説明する。

【 0 0 6 3 】

予備実験では、DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) をサンプルとして用い、半導体集積回路 (チップ) 上に形成されたインダクタ 101 を利用した。

【 0 0 6 4 】

図 3 は、本実施の形態の予備実験に使用される半導体集積回路の外観図である。

【 0 0 6 5 】

50

この図3に示すように、半導体集積回路20には、幅寸法が約120 μ mのインダクタ101が形成されている。

【0066】

予備実験では、このような半導体集積回路20のインダクタ101が形成されている部分に、約250 μ MのDPFHを含むエタノール溶液を約2 μ lだけ滴下して乾燥させた。

【0067】

また、公称磁束密度が約10mTの永久磁石を磁石102として利用し、約10~140MHzの範囲で交流電圧源103の周波数をスイープさせた。なお、インダクタンス計測部105には、HP4396A-85046A Network Analyzer (日本ヒューレットパッカード社製)を利用した。

10

【0068】

図4は、インダクタンス計測部105によって計測されたインダクタンスの実部を示す図である。

【0069】

インダクタンス計測部105による計測では、インダクタンス(自己インダクタンス)の実部において、低周波数の領域に多くのノイズが現れたが、約120MHz付近で特徴的な変化傾向が観測された。

【0070】

図5は、インダクタンス計測部105によって計測されたインダクタンスの虚部と測定時の角周波数との積を示す図である。

20

【0071】

インダクタンス計測部105による計測では、インダクタンス(自己インダクタンス)の虚部において、上述と同様、低周波数の領域に多くのノイズが現れたが、約120MHz付近で特徴的な変化傾向が観測された。

【0072】

このような図4および図5によって示される計測結果から、特性値である共鳴角周波数 ω_0 が120MHzとして検出された。

【0073】

また、本予備実験における測定感度を概算したところ、 10^{11} ~ 10^{12} 個のフリーラジカルを検出することができるという結果が得られた。したがって、本予備実験では、サンプルが微小であるにも拘らず、本発明が従来のESRと同等以上の測定感度を有することが示された。なお、本予備実験では、磁束密度などの設定値を最適化せずに測定を行っており、得られた結果が測定感度の最良値でないことは言うまでもない。また、サンプルに印加される磁場の磁束密度にはばらつきがあり、正確な磁束密度を特定するためには、サンプルの位置における磁束密度を実際に測定する必要がある。なお、本予備実験におけるサンプルの磁束密度は、サンプルのg値から、約4.3mTと算出される。

30

【0074】

上記に示されたように本実施の形態では、磁気共鳴をさせずに、インダクタンスの変化傾向に基づいて物性値を特定するため、寸法制限を有する従来のESRの空洞共振器を不要とし、装置全体の小型化を図ることができる。言い換えれば、寸法設計の自由度を高めることができる。

40

【0075】

また、空洞共振器の制限を受けることなく、交流電流の角周波数を自由に設定することができる。したがって、交流電圧源103を小型化することができる。さらに、サンプルに印加される磁場の強さは角周波数と密接な関係にあるが、角周波数を適切に選択することができるため、その磁場を印加する磁石を簡素化することができる。

【0076】

つまり、従来のESRでは磁場の強度を変化させてサンプルの物性値を測定する必要があるが、本実施の形態では、角周波数を自由に設定することができるため、磁場の代わ

50

りに角周波数 を変化させてサンプルの物性値を測定することができる。その結果、磁石 102 に電磁石を用いる必要がなく、永久磁石を用いることができる。

【0077】

したがって、大きな体積と重量の空洞共振器を有する従来の ESR では、その装置全体をチップ化することは不可能であるが、本実施の形態における磁気共鳴測定装置 100 では、その装置をチップ（半導体集積回路）化して小型化することが可能となる。さらに、装置の外部に強い電磁波が放出されないため、電波法の規制を受けることなく、使用可能な角周波数 の選択の幅を広げることができる。

【0078】

その結果、本実施の形態の磁気共鳴測定装置では、実地での測定および評価である *in-situ* 評価を行うことができる。例えば、本実施の形態のインダクタ 101 が形成されたチップにサンプルを載せたり、インプラントブルにサンプルを測定したりすることによって、フリーラジカルなどの短寿命の物質や薄膜材料の定量化を行うことができる。

【0079】

さらに、本実施の形態では、導波管やマイクロストリップ線路を用いず、一般的な集積回路だけを使用するため、本実施の形態の磁気共鳴測定装置 100 を量産化することができ、コスト低減を図ることができる。

【0080】

さらに、本実施の形態では、インダクタ 101 を含む集積回路の微細加工技術により、インダクタ 101 に対するサンプルの体積比率を高めることができ、その結果、高感度化を図り、微小なサンプルでも十分な測定感度で測定することができる。

【0081】

このように本実施の形態における磁気共鳴測定装置は、医療技術分野や材料科学分野で多用されている ESR や NMR (Nuclear Magnetic Resonance) と同様の用途および機能を有しながら、それらの装置よりも測定感度が高く、集積回路化を図ることができる。

【0082】

(変形例)

以上、本発明に係る磁気共鳴測定装置について、実施の形態を用いて説明したが、本発明は、これらに限定されるものではない。

【0083】

例えば、上記実施の形態では、インダクタ 101 の自己インダクタンスを計測したが、相互インダクタンスを計測しても良い。

【0084】

図 6 は、本変形例に係る磁気共鳴測定装置の構成図である。

【0085】

本実施の形態における磁気共鳴測定装置 200 は、相互インダクタンスの変化に基づいてサンプル 11 のフリーラジカルに関する物性値を測定する装置であって、インダクタ 201a, 201b、磁石 202、交流電流源 203、周波数調整部 204、インダクタンス計測部 205、特性値検出部 206、物性評価部 207、電圧計 211, 212、オペアンプ 213, 214、およびフィードバック抵抗 215 を備えている。

【0086】

磁石 202 は、測定対象であるサンプル 11 に、例えば数十 mT の磁束密度の直流磁場を印加する。

【0087】

インダクタ 201a, 201b は、それぞれ磁氣的に結合され、サンプル 11 と一定関係の位置、即ちサンプル 11 から磁氣的影響を受けるような位置に配置されている。例えば、インダクタ 201a, 201b の中空部にサンプル 11 が配置される。

【0088】

交流電流源 203 は、周波数調整部 204 によって設定された周波数の交流電流を供給する。また、交流電流源 203 には、PLL (Phase Locked Loop) が備えられている。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 9 】

オペアンプ 2 1 3 は、インダクタ 2 0 1 a に流れる交流電流をフィードバック抵抗 2 1 5 に流す反転増幅器として動作する。

【 0 0 9 0 】

オペアンプ 2 1 4 は、ボルテージフォロアとして構成されており、インダクタ 2 0 1 b に生じる誘導電圧を出力する。

【 0 0 9 1 】

電圧計 2 1 1 は、インダクタ 2 0 1 a にかかる交流電圧の値を計測する。そして、電圧計 2 1 1 は、インダクタ 2 0 1 a にかかる交流電圧の値を、そのインダクタ 2 0 1 a にかかる交流電圧と交流電流源 2 0 3 の交流電流との位相差に応じた複素数 v_1 として、インダクタンス計測部 2 0 5 に通知する。

10

【 0 0 9 2 】

電圧計 2 1 2 は、インダクタ 2 0 1 b に誘導される交流電圧の値を計測する。そして、電圧計 2 1 2 は、インダクタ 2 0 1 b に誘導される交流電圧の値を、そのインダクタ 2 0 1 b に誘導される交流電圧と交流電流源 2 0 3 の交流電流との位相差に応じた複素数 v_2 として、インダクタンス計測部 2 0 5 に通知する。

【 0 0 9 3 】

周波数調整部 2 0 4 は、交流電流源 2 0 3 から供給される交流電流の周波数を調整して設定する。例えば、周波数調整部 2 0 4 は、低周波数から高周波数まで所定の間隔で交流電流の周波数を変化させる。そして、周波数調整部 2 0 4 は、設定された周波数をインダクタンス計測部 2 0 5 に通知する。

20

【 0 0 9 4 】

インダクタンス計測部 2 0 5 は、その周波数調整部 2 0 4 によって設定された周波数、つまりインダクタ 2 0 1 a に流れる交流電流の角周波数 ω における、インダクタ 2 0 1 a , 2 0 1 b の相互インダクタンス M を算出する。

【 0 0 9 5 】

つまり、インダクタ 2 0 1 b に誘導される交流電圧 v_2 は、インダクタ 2 0 1 a に流れる交流電流の値 I_1 を用いて、以下の (数 3) のように示される。

【 0 0 9 6 】

【 数 3 】

$$v_2 = j\omega \cdot M \cdot I_1$$

30

【 0 0 9 7 】

ここで、電流値 I_1 の代わりにフィードバック抵抗 2 1 5 の抵抗値 R と電圧値 v_1 とを用いると、交流電圧 v_2 は、以下の (数 4) のように示される。

【 0 0 9 8 】

【 数 4 】

$$v_2 = -j\omega \cdot \frac{M}{R} \cdot v_1$$

40

【 0 0 9 9 】

したがって、インダクタンス計測部 2 0 5 は、以下の (数 5) に示すように、相互インダクタンス M を複素数として算出する。

【 0 1 0 0 】

【数5】

$$M = -\frac{R}{j\omega} \cdot \frac{v_2}{v_1}$$

【0101】

特性値検出部206は、インダクタ201aに流れる交流電流の角周波数 ω が変化すると共に、その角周波数 ω における相互インダクタンスMの実部または虚部の変化傾向を観測する。そして、特性値検出部206は、特徴的な変化傾向を示すときの角周波数 ω_0 を、特性値である共鳴角周波数 ω_0 として検出する。さらに、特性値検出部206は、その特徴的な変化傾向を示すときにおける相互インダクタンスMの実部または虚部を、特性値として検出する。

10

【0102】

ここで、相互インダクタンスMは、インダクタ201a, 201bの形状および構成に依存した係数 A_{geo} と透磁率 μ とを用いて、 $M = \mu \cdot A_{geo}$ として示される。また、透磁率 μ は $\mu = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega)$ として、つまり複素数として示される。その結果、相互インダクタンスMは、 $M = (\mu'(\omega) - j\mu''(\omega)) \cdot A_{geo} = \mu'(\omega) \cdot A_{geo} - j\mu''(\omega) \cdot A_{geo}$ として、透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ と虚部 $\mu''(\omega)$ とを用いて示される。

20

【0103】

したがって、特性値検出部206は、透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ または虚部 $\mu''(\omega)$ の変化傾向を観測し、特徴的な変化傾向を示すときにおける透磁率 μ の実部 $\mu'(\omega)$ または虚部 $\mu''(\omega)$ を、特性値 μ'_0 または特性値 μ''_0 として検出している。

【0104】

物性評価部207は、上述の特性値に基づいて、サンプル11の磁気共鳴に関する、つまりサンプル11のフリーラジカルに関する物性値を特定する。

【0105】

このように本変形例に係る磁気共鳴測定装置200は、相互インダクタンスの変化傾向に基づいて物性値を特定するため、上記実施の形態の磁気共鳴測定装置100と同様、寸法制限を有する従来のESRの空洞共振器を不要とし、装置全体の小型化を図ることができる。

30

【0106】

以上、本発明について実施の形態およびその変形例を用いて説明したが、本発明はこれらに限定されるものではない。

【0107】

例えば、本実施の形態およびその変形例では、インダクタに流れる交流電流の角周波数を調整値として変化させたが、角周波数 ω の代わりに、サンプルに印加される磁場の強さを調整値として変化させてもよい。

【0108】

また、インダクタが形成されたチップ上に、磁束密度を測定するための回路(ホール素子など)を集積化して、高精度化を図ってもよい。

40

【産業上の利用可能性】

【0109】

本発明の磁気共鳴測定装置は、小型化を図ることができるという効果を奏し、例えば、半導体、セラミックス薄、触媒、および色素材料などの材料評価に有用であり、さらに、食品の評価や血液診断などの生体材料や生体組織の分析、および活性酸素などのフリーラジカルの計測による薬品投与の影響追跡などに有用である。

【図面の簡単な説明】

【0110】

50

- 【図1】本発明の実施の形態における磁気共鳴測定装置の構成図である。
- 【図2】同上の測定方法を説明するための説明図である。
- 【図3】同上のインダクタが形成された半導体集積回路の外観図である。
- 【図4】同上のインダクタンスの実部の計測結果を示す図である。
- 【図5】同上のインダクタンスの虚部と角周波数との積の計測結果を示す図である。
- 【図6】同上の変形例に係る磁気共鳴測定装置の構成図である。
- 【図7】従来のESRの原理を説明するための説明図である。

【符号の説明】

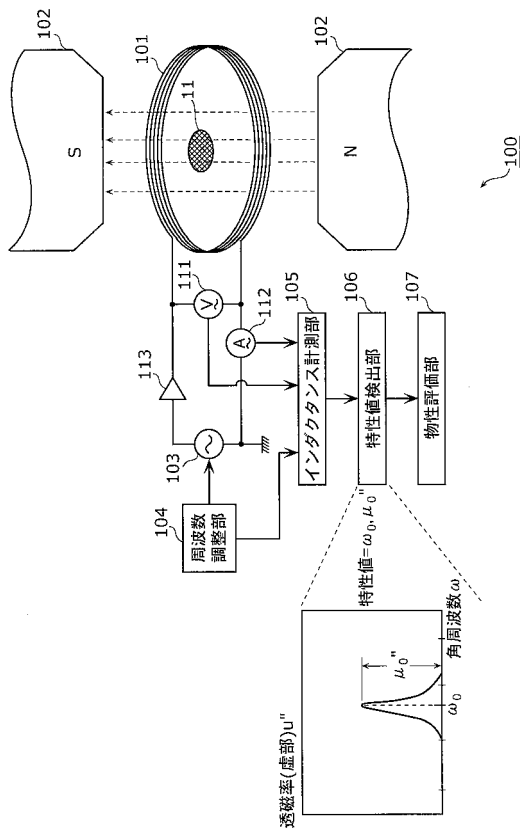
【0111】

- 10, 11 サンプル
- 100 磁気共鳴測定装置
- 101 インダクタ
- 102 磁石
- 103 交流電圧源
- 104 周波数調整部
- 105 インダクタンス計測部
- 106 特性値検出部
- 107 物性評価部
- 111 電圧計
- 112 電流計
- 113 オペアンプ

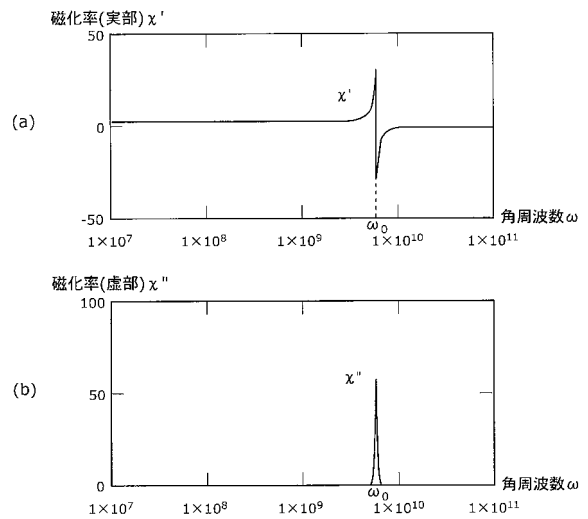
10

20

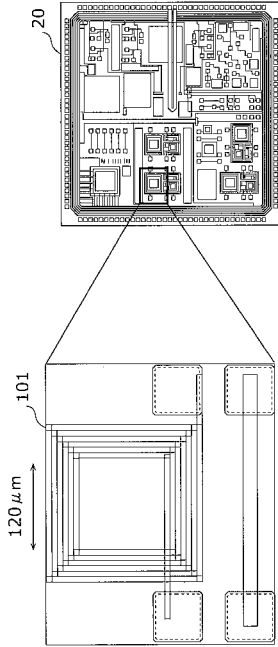
【図1】



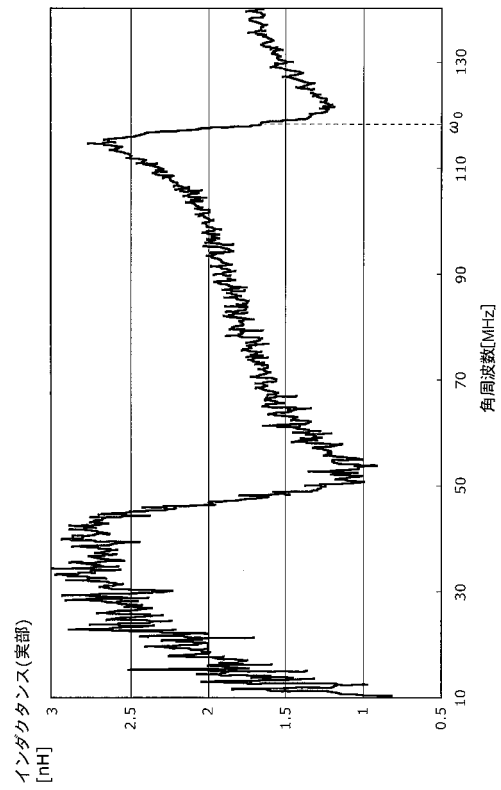
【図2】



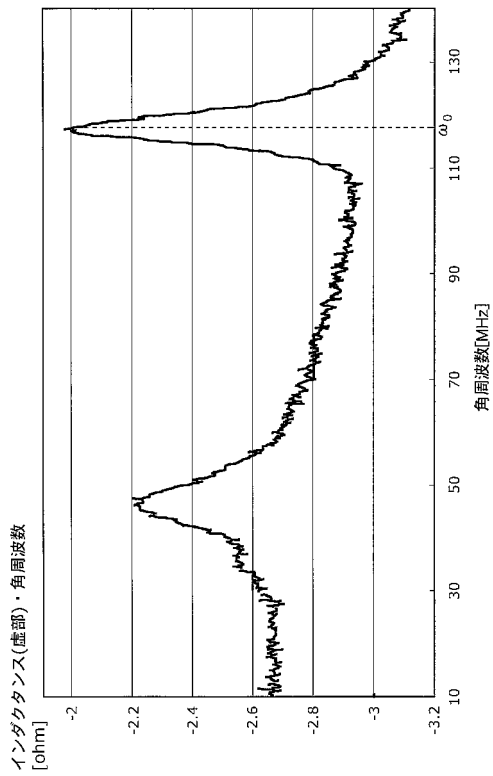
【図3】



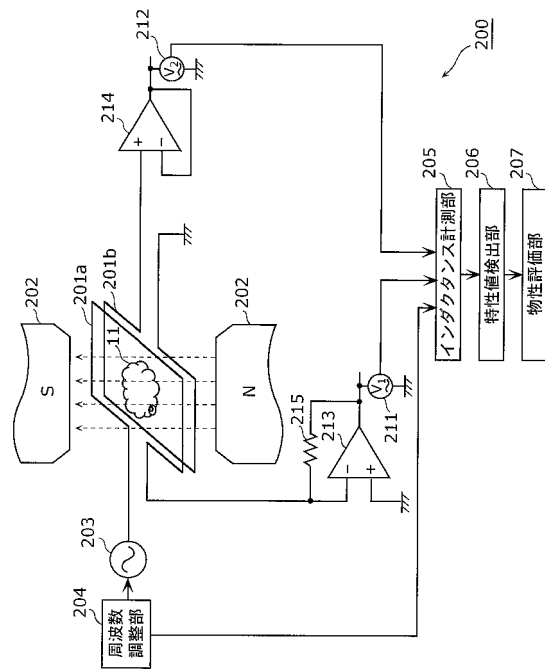
【図4】



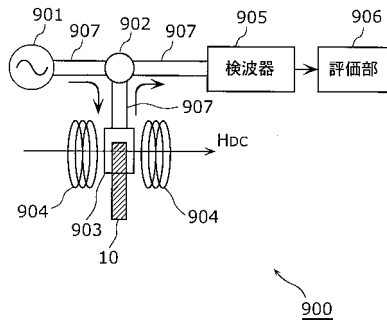
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特公平05-060554(JP, B2)
国際公開第2007/029539(WO, A1)
特開2002-122646(JP, A)
特開2000-065769(JP, A)
遠藤誠, 走査型非線形透磁率顕微鏡, 2005年(平成17年)秋季 第66回応用物理学会学術講演会講演予稿集 第2分冊 Extended Abstracts (The 66th Autumn Meeting, 2005); The Japan Society of Applied Physics No.2, (社)応用物理学会, 第2巻

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 24/00 - 24/14
G01N 27/00 - 27/24
G01R 33/20 - 33/64
JSTPlus/JST7580(JDreamII)