

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6245715号
(P6245715)

(45) 発行日 平成29年12月13日(2017.12.13)

(24) 登録日 平成29年11月24日(2017.11.24)

(51) Int.Cl.	F I	
GO 1 N 23/04 (2006.01)	GO 1 N 23/04	
GO 1 N 23/20 (2006.01)	GO 1 N 23/20	3 5 0
GO 1 N 23/225 (2006.01)	GO 1 N 23/225	3 1 0
HO 1 J 37/295 (2006.01)	HO 1 J 37/295	
HO 1 J 37/06 (2006.01)	HO 1 J 37/06	A

請求項の数 8 (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2016-553052 (P2016-553052)	(73) 特許権者	504139662
(86) (22) 出願日	平成27年9月28日 (2015. 9. 28)		国立大学法人名古屋大学
(86) 国際出願番号	PCT/JP2015/077393		愛知県名古屋市千種区不老町 1 番
(87) 国際公開番号	W02016/056425	(74) 代理人	110000110
(87) 国際公開日	平成28年4月14日 (2016. 4. 14)		特許業務法人快友国際特許事務所
審査請求日	平成29年3月2日 (2017. 3. 2)	(72) 発明者	桑原 真人
(31) 優先権主張番号	特願2014-208345 (P2014-208345)		愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大
(32) 優先日	平成26年10月9日 (2014. 10. 9)		学法人名古屋大学内
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(72) 発明者	田中 信夫
			愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大
			学法人名古屋大学内
		(72) 発明者	宇治原 徹
			愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大
			学法人名古屋大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スピン偏極電子線のコヒーレンス測定装置と、その利用方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

スピン方向が偏在しているスピン偏極電子線を放出する半導体光陰極と、
その半導体光陰極が放出したスピン偏極電子線の進路を2分するセパレータと、
そのセパレータによって分割された一方の進路（第1進路）上に配置されているスピン
方向回転機と第1遅延装置と、
前記セパレータによって分割された他方の進路（第2進路）上に配置されている試料台
と、

前記第1進路と前記第2進路に分割されたスピン偏極電子線を重ね合わせるバイプリズ
ムと、

前記バイプリズムが重ね合わせたスピン偏極電子線の強度分布を測定する強度分布測定
装置を備えているスピン偏極電子線のコヒーレンス測定装置。

【請求項 2】

前記第2進路上に配置されている第2遅延装置をさらに有する請求項1に記載のコヒー
レンス測定装置。

【請求項 3】

請求項1又は2に記載のコヒーレンス測定装置が組み込まれている電子顕微鏡であり、
前記半導体光陰極が、電子顕微鏡の電子線源を兼用している電子顕微鏡。

【請求項 4】

請求項1又は2に記載のコヒーレンス測定装置が組み込まれている電子顕微鏡であり、

前記第1進路と前記第2進路を移動するスピン偏極電子線の双方が、電子顕微鏡の試料レンズを通過する電子顕微鏡。

【請求項5】

前記バイプリズムが、前記試料レンズの下流に配置されている請求項4に記載の電子顕微鏡。

【請求項6】

前記セパレータが、前記試料台の上流に配置されている請求項5に記載の電子顕微鏡。

【請求項7】

請求項1又は2に記載のコヒーレンス測定装置を利用して、試料がスピン偏極電子線のスピン方向を回転させる回転角を測定する方法であり、

前記スピン方向回転機による回転角と前記強度分布測定によって得られる干渉縞の明瞭度の関係を測定し、前記干渉縞が最も明瞭となる回転角を特定する測定方法。

【請求項8】

請求項2に記載のコヒーレンス測定装置を利用して、試料がスピン偏極電子線の移動速度に与える変化を測定する方法であり、

前記第1遅延装置による遅延時間と前記第2遅延装置による遅延時間の時間差と前記強度分布測定によって得られる干渉縞の明瞭度の関係を測定し、前記干渉縞が最も明瞭となる時間差を特定する測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本明細書では、スピンの偏極度が高い電子線のコヒーレンス（コヒーレンス長、またはコヒーレンス時間）を測定することができる装置を開示する。本明細書では、また、その測定装置を利用して、試料の特性を測定する方法をも開示する。

【背景技術】

【0002】

本発明者らは、歪み超格子半導体層を備えている半導体光陰極を開発し、スピンの偏極度の高い電子線（例えば、大半の電子がアップスピンの電子線、または大半の電子がダウンスピンの電子線のことをいい、本明細書ではスピン偏極電子線という）を発生させることに成功した。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

スピン偏極電子線のコヒーレンスを測定できると、様々な測定が可能となる。例えば、試料を通過することによってスピン偏極電子線のコヒーレンスが変化する現象を測定することができれば、試料とスピン偏極電子線の相互作用が明確となり、試料の特性が判明する。これにより、試料のスピンの状態を評価することも可能となり、量子コンピュータやスピントロニクス分野において非常に有用である。しかしながら、現状では、スピン偏極電子線のコヒーレンスを測定する実際的な方法がない。

【0004】

本明細書では、スピン偏極電子線のコヒーレンスを測定する装置と、その利用方法を提案する。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本明細書で開示する測定装置は、スピン偏極電子線の進路を2進路に分割するセパレータと、そのセパレータによって分割された一方の進路（第1進路）上に配置されているスピン方向回転機と第1遅延装置と、前記セパレータによって分割された他方の進路（第2進路）上に配置されている試料台と、第1進路と第2進路に分割されたスピン偏極電子線を重ね合わせるバイプリズムと、重ね合わせたスピン偏極電子線の強度分布を測定する強度分布測定装置を備えている。試料台に試料を配置することで、試料とスピン偏極電子線

10

20

30

40

50

の相互作用を測定することができる。必要に応じて、第2進路上に第2遅延装置を配置してもよい。

【0006】

スピン偏極電子線を2進路に分割して重ね合わせることでスピン偏極電子線の干渉縞が生じる。この干渉縞の明瞭度は下記のように変化する。

(1) 第1遅延装置と第2遅延装置を利用することで、バイプリズムで重ね合わせる第1進路からのスピン偏極電子線と第2進路からのスピン偏極電子線の時間関係を調整することができる。第1進路からのスピン偏極電子線が第2進路からのスピン偏極電子線よりも進行する状態から、第1進路からのスピン偏極電子線が第2進路からのスピン偏極電子線よりも遅行する状態の間で、時間差を調整することができる。特定の時間差(第1遅延装置による遅延時間と第2遅延装置による遅延時間の差)において、干渉縞の明瞭度は最大となる。その特定の時間差の前後において干渉縞の明瞭度が維持され、その特定の時間差からコヒーレンス時間以上ずれると干渉縞が測定されなくなる。干渉縞の明瞭度が劣化する時間差と前記した特定の時間差から、コヒーレンス時間を測定することができる。電子線の進行速度を乗じることによって、コヒーレンス長を求めることができる。

10

(2) スピン方向回転機によって第1進路を進行するスピン偏極電子線のスピン方向が回転する。試料との相互作用によって第2進路を進行するスピン偏極電子線のスピン方向が変化することもある。そのために、スピン方向回転機が特定の回転角に調整された状態で干渉縞の明瞭度は最大となる。その回転角の前後において干渉縞の明瞭度が低下する。スピン方向回転機による回転角に依存して干渉縞の明瞭度が変化する現象を測定することによって、測定している事象が、スピン偏極電子線によって得られた干渉縞であることが確認できる。

20

(3) 干渉縞の明瞭度が最大となる時の回転角から、試料との相互作用によってスピン方向が回転する角度を測定することが可能となる。

(4) 干渉縞の明瞭度が最大となる時の干渉縞の強度から、試料との相互作用によってスピン方向が反転した電子の比率を測定することが可能となる。

(5) 後記するように、スピン偏極電子線のコヒーレンスを測定する場合、試料台に試料を配置する必要がない。試料台自体は、スピン偏極電子線に対して透明としておく。

(6) スピン偏極電子線のコヒーレンスを測定する場合、第1進路からのスピン偏極電子線が第2進路からのスピン偏極電子線よりも遅行する状態さえ得られれば良く、第1進路からのスピン偏極電子線が第2進路からのスピン偏極電子線よりも進行する状態は不可欠でない。第2遅延装置の存在は不可欠でない。

30

(7) 試料の多くは、スピン偏極電子線の移動速度を低下させる。その低下分を測定するためには、第2遅延装置が不必要である。スピン偏極電子線の移動速度を増大させる試料を測定しない限り、第2遅延装置は不要である。

【0007】

本明細書に記載の装置によってスピン偏極電子線のコヒーレンスを測定することが可能となり、スピン偏極電子線と試料の相互作用を測定することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

40

【図1】第1実施例のコヒーレンス測定装置の構成を説明する図。

【図2】コヒーレンス測定装置で測定される干渉縞を示す図。

【図3】第2実施例のコヒーレンス測定装置の構成を説明する図。

【発明を実施するための形態】

【0009】

以下に説明する実施例の技術的特徴を列記する。

コヒーレンス測定装置が、電子顕微鏡に組み込まれている。

コヒーレンス測定装置で、試料がスピン偏極電子線のスピン方向を回転させる回転角を測定する。

コヒーレンス測定装置で、試料がスピン偏極電子線のスピン方向を反転させる比率を測

50

定する。

コヒーレンス測定装置で、試料がスピン偏極電子線の移動速度に与える変化を測定する。

【実施例 1】

【0010】

図 1 は、第 1 実施例のコヒーレンス測定装置を示している。参照番号 2 は、半導体光陰極を示し、その上面に円偏光レーザー光を照射すると、その下面からスピン偏極電子線を放出する。ここでいうスピン偏極電子線は、アップスピンの電子数とダウンスピンの電子数を比較したときに、一方が他方を大きく優越しており、電子のスピン方向が偏在している電子線のことをいう。スピン偏極電子線を放出する装置の詳細は、国際公開 W O 2 0 1 1 / 1 2 2 1 7 1 号公報と特開 2 0 0 7 - 2 5 8 1 1 9 号公報に開示されており、重複説明を省略する。

10

【0011】

半導体光陰極 2 の下面から放出されたスピン偏極電子線は、アノード電極 4 によって加速され、参照番号 A に示す進路を下方に向かって進行する。半導体光陰極 2 に照射する円偏光レーザーの偏向方向を切換えることによって、大半の電子が進行方向を向くスピンを持っているスピン偏極電子線を利用するか、あるいは反進行方向を向くスピンを持っているスピン偏極電子線を利用するかを切換えることができる。

【0012】

参照番号 6 はセパレータを示し、進路 A に沿って下方に移動するスピン偏極電子線の進路を 2 進路に分割し、分割後の 2 進路が平行となるように進路を曲げる。セパレータ 6 を通過することで、第 1 進路 B 1 に沿って進行するスピン偏極電子線と、第 2 進路 B 2 に沿って進行するスピン偏極電子線に分割される。

20

【0013】

第 1 進路 B 1 上には、スピン方向回転機 8 と、第 1 遅延装置 1 0 が配置されている。図 1 の (A) は、スピン方向回転機 8 に入射する前のスピン偏極電子線のスピン方向を例示しており、ダウンスピンのスピン偏極電子線のスピン方向を示している。(B) は、スピン方向回転機 8 によってスピン方向が だけ回転したスピン方向を例示している。第 1 遅延装置 1 0 は、第 1 進路 B 1 上を移動するスピン偏極電子線を遅らせる。例えば、時刻 T 1 に第 1 遅延装置 1 0 に入射した電子を、時刻 T 1 + t 1 において第 1 遅延装置 1 0 から放出する。 t 1 が遅延時間となる。

30

【0014】

第 2 進路 B 2 上には、第 2 遅延装置 1 2 と、試料台 1 4 が配置されている。第 2 遅延装置 1 2 は、第 2 進路 B 2 上を移動するスピン偏極電子線を遅らせる。例えば、時刻 T 2 に第 2 遅延装置 1 2 に入射した電子を、時刻 T 2 + t 2 において第 2 遅延装置 1 2 から放出する。 t 2 が遅延時間となる。

試料台 1 4 には試料が置かれる。試料台 1 4 は、スピン偏極電子線に透明である。試料は薄く、スピン偏極電子線が透過する。ただし、電子と試料の相互作用によって、スピン偏極電子線のスピン方向が回転したり、あるいはスピン偏極電子線の一部のスピン方向が反転したりする。試料によっては、試料を通過することで、電子の移動速度が変化することもある。あるいは、アップスピンの通過速度とダウンスピンの通過速度が異なることもある。

40

【0015】

参照番号 1 6 は、バイプリズムであり、第 1 進路 B 1 上を移動してきたスピン偏極電子線と第 2 進路 B 2 上を移動してきたスピン偏極電子線を重ね合わせる。

参照番号 1 8 は、超高感度 CCD カメラであり、多数のイメージセルを備えており、セル毎に各セルに到着した電子線の強度に比例する電圧を出力する。セル毎の出力電圧の分布は撮像面に到達した電子線の強度分布を示す。CCD カメラ 1 8 は、撮像面に到達した電子線の強度分布を記憶する。

【0016】

50

図 1 の測定装置の利用方法を説明する。

最初に、スピン方向回転機 8 による回転角 $\theta = 0$ であり、第 1 遅延装置 10 による遅延時間 $t_1 = 0$ であり、第 2 遅延装置 12 による遅延時間 $t_2 = 0$ であり、試料台 14 に試料が置かれていないとする。すると、CCDカメラ 18 は明瞭な干渉縞を撮影する。

【0017】

次に試料台 14 に試料をおく。すると電子と試料の相互作用によって、スピン偏極電子線のスピン方向が回転し、第 1 進路 B1 からの電子線と第 2 進路 B2 からの電子線の間に時間差が生じる。スピン偏極電子線の場合、パイブリズム 16 で重ね合わせる 2 本のスピン偏極電子電のスピン方向が一致しているときには明瞭な干渉縞が現れ、スピン方向がずれると干渉縞の明瞭度が低下する。また、CCDカメラ 18 で同時に撮影される 2 電子が半導体光陰極 2 から放出された際の時間差が短いほど明瞭な干渉縞が現れ、その時間差がコヒーレンス時間以上であると干渉縞が消失する。そのために、試料台 14 に試料をおくと、CCDカメラ 18 で撮影される干渉縞の明瞭度が低下する。

【0018】

そこで試料台 14 に試料をおいたら、スピン方向回転機 8 による回転角 θ を変化させながら干渉縞の明瞭度を測定する。この場合、「スピン方向回転機 8 による回転角 $\theta =$ 試料によるスピン方向の回転角」の関係となったときに干渉縞の明瞭度が最大となり、スピン方向回転機 8 による回転角 θ がそれからずれるに従って干渉縞の明瞭度は低下する。図 2 における (a) (b) (c) は、スピン方向回転機 8 による回転角 θ と、干渉縞の明瞭度の関係を示し、この場合、スピン方向回転機 8 による回転角が θ_2 で干渉縞が最も明瞭となり、それからずれた回転角 θ_1 と θ_3 では、干渉縞の明瞭度が低下する様子を示している。

この結果、試料とスピン偏極電子線の相互作用によって、スピン方向が θ_2 だけ回転したことが判明する。

【0019】

次に、第 2 遅延装置 12 による遅延時間 $t_2 = 0$ とし、第 1 遅延装置 10 による遅延時間 t_1 を変化させながら、干渉縞の明瞭度を測定する。この場合、「第 1 遅延装置 10 による遅延時間 $t_1 =$ 試料による遅延時間」の関係となったときに干渉縞の明瞭度が最大となり、第 1 遅延装置 10 による遅延時間 t_1 がそれからずれるに従って干渉縞の明瞭度は低下する。図 2 における (1) ~ (5) は、第 1 遅延装置 10 による遅延時間 t_1 と、干渉縞の明瞭度の関係を示し、この場合、遅延時間 $t_1 = t_3$ のときに干渉縞が最も明瞭となる場合を例示している。(2) と (4) は、干渉縞の明瞭度が予め設定した閾値となる場合を示し、(1) と (5) は、干渉縞の明瞭度が予め設定した閾値を下回る場合を示している。この結果、試料によってもたらされる遅延時間は t_3 であり、コヒーレンス時間は $(t_3 - t_2)$ あるいは $(t_4 - t_3)$ であることがわかる。試料によって、コヒーレンス時間は変化する。電子と強く相互作用する試料ほど、コヒーレンス時間が短くなる。

以上のようにして、図 1 のコヒーレンス測定装置によって、試料がスピン方向を回転させる回転角 θ_2 と、試料が電子線の進行速度を遅らせる遅延時間 t_3 と、試料通過後のコヒーレンス時間を測定することができる。コヒーレンス時間と電子の移動速度から、コヒーレンス長を測定することもできる。

【0020】

上記のコヒーレンス測定装置は、半導体光陰極 2 が放出するスピン偏極電子線のコヒーレンス時間を測定することもできる。この場合は、試料をおかず、スピン方向回転機 8 による回転角 $\theta = 0$ とし、第 2 遅延装置 12 による遅延時間 $t_2 = 0$ とし、第 1 遅延装置 10 による遅延時間 t_1 をゼロから増大させながら干渉縞の明瞭度を測定する。遅延時間 $t_1 = 0$ のときに最大の明瞭度となり、第 1 遅延時間 t_1 が長くなるにつれて干渉縞の明瞭度が低下する。干渉縞の明瞭度が予め設定した閾レベルを下回る時の第 1 遅延時間 t_1 からコヒーレンス時間を測定することができる。

10

20

30

40

50

次に、試料をおかず、スピン方向回転機 8 による回転角 $\theta = 0$ とし、第 1 遅延装置 10 による第 1 遅延時間 $t_1 = 0$ とし、第 2 遅延装置 12 による第 2 遅延時間 t_2 をゼロから増大させながら干渉縞の明瞭度を測定する。第 2 遅延時間 $t_2 = 0$ のときに最大の明瞭度となり、第 2 遅延時間 t_2 が長くするにつれて明瞭度が低下する。干渉縞の明瞭度が予め設定した閾レベルを下回る時の第 2 遅延時間 t_2 からコヒーレンス時間を測定することができる。

上記では、 t_1 と t_2 の双方を計測する。理論的には、 t_1 または t_2 の一方からコヒーレンスを知ることができる。第 1 遅延装置 10 と第 2 遅延装置 12 のいずれかがあれば、コヒーレンスを測定することができる。

【0021】

試料によっては、試料を通過するスピン偏極電子線が加速されることがある。この場合は、第 1 遅延装置 10 による第 1 遅延時間 $t_1 = 0$ とし、スピン方向回転機 8 による回転角 θ と第 2 遅延装置 12 による第 2 遅延時間 t_2 を変えながら、干渉縞の明瞭度を測定する。試料による加速効果が第 2 遅延装置 12 による遅延効果によって相殺されたときに干渉縞の明瞭度が最大となる。第 2 遅延装置 12 があれば、試料がスピン偏極電子線を加速させる場合にも対応可能となる。

大半の試料は、試料を通過する電子線の移動速度を遅らせる。その遅れの程度を測定できればよい場合、第 2 遅延装置は不可欠でない。

【0022】

試料によっては、試料を通過するスピン偏極電子のうちの一部のスピン方向が反転することがある。明瞭度が最大になったときの干渉縞の明瞭度から、スピン方向が反転したスピン偏極電子の割合を測定することもできる。電子と強く相互作用する試料ほど、スピン方向を反転させる割合が強く、例えばメモリ材料として使用するのに適さないことが判明する。試料の特性を知ることが可能となる。

また、遅延時間と回転角を調整しながら干渉縞の明瞭度を測定することで、たとえばアップスピン電子が試料を通過する速度と、ダウンスピン電子が試料を通過する速度を測定することも可能である。

【0023】

(第 2 実施例)

図 3 は、コヒーレンス測定装置を透過型電子顕微鏡に組み込んだ装置の構成を示しており、図 1 で説明した要素については、同じ参照番号を用いることで重複説明を省略する。

参照番号 30 は、スピン偏極電子線の発生装置以外の電子顕微鏡の構成を示している。参照番号 20 は、スピン偏極電子線発生装置 透過型電子顕微鏡の結合装置を示し、22 は集束レンズを示し、24 は試料レンズを示し、26 は中間レンズを示し、28 は投影レンズを示している。これらの詳細は国際公開 WO 2011/122171 号公報に開示されており、重複説明を省略する。

コヒーレンス測定装置を透過型電子顕微鏡に組み込むと、試料内の微小範囲毎に、試料とスピン偏極電子線の相互作用を測定することが可能となる。

なお、セパレータ 6 は、集束レンズ 22 の上流側にあってもよいし、下流側にあってもよい。またバイプリズム 16 は、試料レンズ 24 と中間レンズ 26 の間にあってもよいし、中間レンズ 26 と投影レンズ 28 の間にあってもよいし、投影レンズ 28 と CCD カメラ 18 の間にあってもよい。スピン方向回転機 8 と第 1 遅延装置 10 と第 2 遅延装置 12 は、セパレータ 6 とバイプリズム 16 の間にあればよく、集束レンズ 22、試料レンズ 24、中間レンズ 26、投影レンズ 28 との位置関係には制約されない。試料台の上流にセパレータがあり、試料レンズの下流にバイプリズムがあり、第 1 進路を移動するスピン偏極電子線と第 2 進路を移動するスピン偏極電子線の双方が試料レンズを通過する関係であればよい。

本実施例では、TEM にコヒーレンス測定装置を組み込んでいるが、SEM, LEEM, RHEED など、すべての電子線使用装置にコヒーレンス測定装置を組み込むことができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 4 】

図 1 のコヒーレンス測定装置で得られる事象を、数式で説明する。

アップスピンのスピン偏極電子は数 1 で示され、ダウンスピンのスピン偏極電子は数 2 で示される。

【数 1】

$$|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

【数 2】

$$|\downarrow\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

10

スピン方向回転機は、数 3 に示す操作を加える。 は電子の進路に沿った面内でのスピン方向を示す角度であり、 は電子の進路に直交する面内でのスピン方向を示す角度である。

【数 3】

$$R_{spin}(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & -\sin\frac{\theta}{2} \\ e^{-i\phi}\sin\frac{\theta}{2} & e^{-i\phi}\cos\frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$$

20

$$\theta = \mu_B B_{\perp} \tau / \hbar, \quad \phi = \mu_B B_{\parallel} \tau / \hbar$$

B: Magnetic field, μ_B : Bohr magneton

τ : interaction time

第 1 遅延装置は、数 4 に示す操作を加え、第 2 遅延装置は、数 5 の操作を加える。

【数 4】

$$D(\delta_R) = \exp(-i\delta_R) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

30

【数 5】

$$D(\delta_L) = \exp(-i\delta_L) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

半導体光陰極 2 がアップスピンを放出している場合、第 1 経路からバイプリズムに入射する電子線の波動方程式は数 6 となり、第 2 経路からバイプリズムに入射する電子線の波動方程式は数 7 となる。数 7 における Γ は、試料が電子線に与える相互作用を示す。

40

【数 6】

$$|\Psi_R\rangle = D(\delta_R) \cdot R_{spin}(\theta, \phi) \cdot |\uparrow\rangle$$

【数 7】

$$|\Psi_L\rangle = T \cdot D(\delta_L) \cdot |\uparrow\rangle$$

バイプリズムで重ね合された電子線の強度は数 8 に示すものとなる。

【数 8】

$$\begin{aligned} (\langle\Psi_R| + \langle\Psi_L|)(|\Psi_L\rangle + |\Psi_R\rangle) &= \langle\Psi_R|\Psi_R\rangle + \langle\Psi_L|\Psi_L\rangle + \langle\Psi_L|\Psi_R\rangle + \langle\Psi_R|\Psi_L\rangle \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \langle\uparrow|T^\dagger T|\uparrow\rangle + \frac{1}{2} \langle\uparrow|T^\dagger D^\dagger(\delta_L)D(\delta_R)R_{spin}(\theta, \phi)|\uparrow\rangle + \frac{1}{2} \langle\uparrow|R_{spin}(\theta, \phi)^\dagger D^\dagger(\delta_R)D(\delta_L)T|\uparrow\rangle \end{aligned} \quad 10$$

試料を挿入しない場合は、 $T = 1$ となる。

この場合、干渉縞を示す式は数 9 となり、遅延装置の遅延時間と干渉縞の明瞭度の関係から、スピン偏極電子線自体のコヒーレンスを測定することができる。

試料中でスピントロップが生じる場合は、数 10 が成立し、干渉縞を示す式は数 11 となる。スピン方向回転機の回転角を変化させながら干渉縞の明瞭度を測定することで、スピントロップの効果を測定することができる。

【数 9】

$$= 1 + \cos(\delta_R - \delta_L) \cos\left(\frac{\mu_B B \tau}{2\hbar}\right) \quad 20$$

【数 10】

$$T = \begin{pmatrix} f & -g \\ g & f \end{pmatrix}$$

【数 11】

$$\begin{aligned} &1 + \frac{1}{2} \langle\uparrow|T^\dagger D(\delta_R - \delta_L)R_{spin}(\theta, \phi)|\uparrow\rangle + \frac{1}{2} \langle\uparrow|R_{spin}(\theta, \phi)^\dagger D(-\delta_R + \delta_L)T|\uparrow\rangle \\ &= 1 + \frac{1}{2} e^{-i(\delta_R - \delta_L)} \left[f \cos \frac{\theta}{2} + g \sin \frac{\theta}{2} \right] + \frac{1}{2} e^{i(\delta_R - \delta_L)} \left[f \cos \frac{\theta}{2} + g \sin \frac{\theta}{2} \right] \\ &= 1 + \cos(\delta_R - \delta_L) \left[f \cos \frac{\theta}{2} + g \sin \frac{\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad 30 \quad 40$$

試料によって、アップスピン電子との相互作用と、ダウンスピン電子との相互作用が相違することがある。そのときの試料による作用は数 12 となる。

その場合、アップスピン電子によるときの干渉縞は数 13 となり、ダウンスピン電子によるときの干渉縞は数 14 となる。数 13 と数 14 から、数 15 が得られる。数 15 と測定結果から、試料の内部ポテンシャルの差を求めることができる。

【数 1 2】

$$\begin{aligned}
 T &= \begin{pmatrix} T_{up} & 0 \\ 0 & T_{down} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(i k_{\uparrow} x) & 0 \\ 0 & \exp(i k_{\downarrow} x) \end{pmatrix} \\
 &\approx \begin{pmatrix} \exp\left(i \frac{\sqrt{2m_e(E_k - V_{\uparrow})}}{\hbar} x\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(i \frac{\sqrt{2m_e(E_k - V_{\downarrow})}}{\hbar} x\right) \end{pmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

【数 1 3】

$$\begin{aligned}
 &1 + \frac{1}{2} \langle \uparrow | T^{\dagger} D(\delta_R - \delta_L) R_{spin}(\theta, \phi) | \uparrow \rangle + \frac{1}{2} \langle \uparrow | R_{spin}(\theta, \phi)^{\dagger} D(-\delta_R + \delta_L) T | \uparrow \rangle \\
 &= 1 + \cos(\delta_R - \delta_L - k_{\uparrow} x) \cos \frac{\theta}{2}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

【数 1 4】

$$\begin{aligned}
 &1 + \frac{1}{2} \langle \downarrow | T^{\dagger} D(\delta_R - \delta_L) R_{spin}(\theta, \phi) | \downarrow \rangle + \frac{1}{2} \langle \downarrow | R_{spin}(\theta, \phi)^{\dagger} D(-\delta_R + \delta_L) T | \downarrow \rangle \\
 &= 1 + \cos(\delta_R - \delta_L - k_{\downarrow} x) \cos \frac{\theta}{2}
 \end{aligned}$$

【数 1 5】

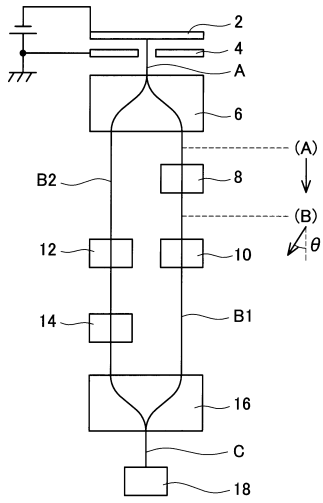
$$\begin{aligned}
 (k_{\uparrow} - k_{\downarrow})x &= \left(\frac{\sqrt{2m(E_k - V_{\uparrow})}}{\hbar} - \frac{\sqrt{2m(E_k - V_{\downarrow})}}{\hbar} \right) x \\
 &\cong \frac{(V_{\downarrow} - V_{\uparrow}) \sqrt{2mE_k}}{2E_k \hbar} x
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

【0025】

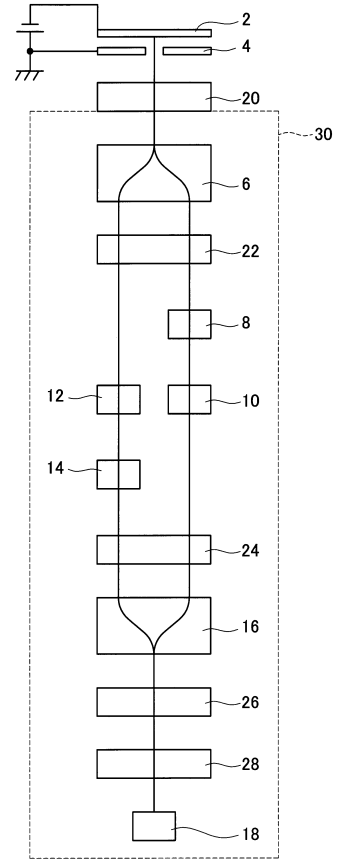
以上、本発明の具体例を詳細に説明したが、これらは例示にすぎず、請求の範囲を限定するものではない。請求の範囲に記載の技術には、以上に例示した具体例を様々に変形、変更したものが含まれる。 40

また、本明細書または図面に説明した技術要素は、単独であるいは各種の組合せによって技術的有用性を発揮するものであり、出願時の請求項記載の組合せに限定されるものではない。また、本明細書または図面に例示した技術は、複数目的を同時に達成するものであり、そのうちの一つの目的を達成すること自体で技術的有用性を持つものである。

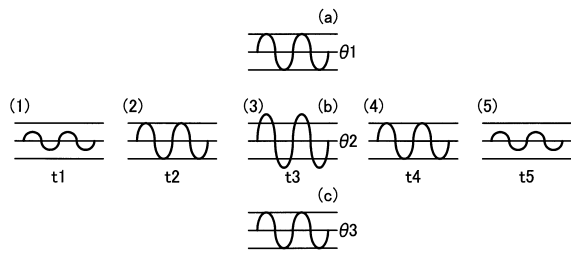
【図1】



【図3】



【図2】



フロントページの続き

(72)発明者 齋藤 晃

愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内

審査官 藤田 都志行

(56)参考文献 特開2008-218063(JP,A)

国際公開第2011/122171(WO,A1)

特開平10-106465(JP,A)

米国特許出願公開第2013/0168577(US,A1)

楠 聡一郎, 桑原 真人, 南保 由人, 齋藤 晃, 宇治原 徹, 浅野 秀文, 竹田 美和, 田中 信夫,
「スピン偏極透過電子顕微鏡における電子線空間干渉性」, 日本物理学会講演概要集, 一般社団
法人日本物理学会, 2013年 8月26日, Vol. 68, No. 2, p. 858, ISSN 1342-8349, 26aK
E-5

桑原 真人, 中西 彊, 竹田 美和, 田中 信夫, 「スピン偏極パルス透過電子顕微鏡の開発 偏
極電子源の原理とその応用」, 顕微鏡, 公益社団法人日本顕微鏡学会, 2013年 4月30
日, Vol. 48, No. 1, pp. 3-8, ISSN 1349-0958

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 23/04

G01N 23/20

G01N 23/225

H01J 37/295

H01J 37/06

JSTPlus/JST7580(JDreamIII)