

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2016年4月14日(14.04.2016)

WIPO | PCT

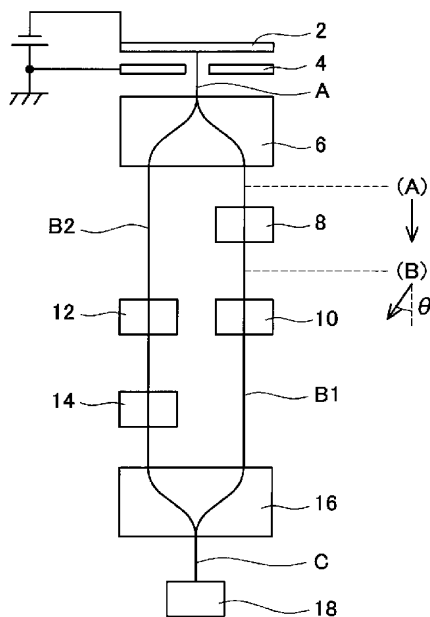
(10) 国際公開番号
WO 2016/056425 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 23/20 (2006.01) H01J 37/26 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/077393
- (22) 国際出願日: 2015年9月28日(28.09.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-208345 2014年10月9日(09.10.2014) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人名古屋大学 (NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION NAGOYA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒4648601 愛知県名古屋市千種区不老町1番 Aichi (JP).
- (72) 発明者: 桑原 真人 (KUWAHARA Makoto); 〒4648601 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 Aichi (JP). 田中 信夫 (TANAKA Nobuo); 〒4648601 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 Aichi (JP). 宇治原 徹 (UJIHARA Toru); 〒4648601 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 Aichi (JP). 齋藤 晃 (SAITOH Koh); 〒4648601 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 Aichi (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 快友国際特許事務所 (KAI-U PATENT LAW FIRM); 〒4516009 愛知県名古屋市西区牛島町6番1号 名古屋ルーセントタワー9階 Aichi (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: DEVICE FOR MEASURING COHERENCE OF SPIN-POLARIZED ELECTRON BEAM AND USAGE METHOD THEREOF

(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) Abstract: In the present invention, the path of a spin-polarized electron beam is separated into two by a separator 6. The spinning direction of the electron beam is rotated by a spinning-direction rotating device 8 disposed on a first advancing path B1, and the electron beam is delayed by a first delaying device 10. On a second advancing path B2, the electron beam passes through a sample table. The portions of the spin-polarized electron beam separated into the first advancing path and the second advancing path are made to overlap each other by a biprism 16, and the intensity distribution of the spin-polarized electron beam is measured. The coherence is measured on the basis of the relationship among the spinning-direction rotation angle, the delay time, and the clarity of interference fringes.

(57) 要約: スピン偏極電子線の進路をセパレータ6で2分する。第1進路B1上に配置されているスピン方向回転機8でスピン方向を回転させ、第1遅延装置10で遅延させる。第2進路B2では電子線が試料台を通過する。バイプリズム16で、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、その強度分布を測定する。スピン方向回転角

と、遅延時間と、干渉縞の明瞭度の関係から、コヒーレンスを測定する。



WO 2016/056425 A1

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

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

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に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。

(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。

(3) 干渉縞の明瞭度が最大となるときの回転角から、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とき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。

(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] [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WO2011/122171号公報と特開2007-258119号公報に開示されており、重複説明を省略する。
- [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B1に沿って進行するスピン偏極電子線と、第2進路B2に沿って進行するスピン偏極電子線に分割される。
- [0013] 第1進路B1上には、スピン方向回転機8と、第1遅延装置10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 θ だけ回転したスピン方向を例示している。第1遅延装置10は、第1進路B1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10に入射した電子を、時刻 $T_1 + \Delta t_1$ において第1遅延装置10から放出する。 Δt_1 が遅延時間となる。

[0014] 第2進路B2上には、第2遅延装置12と、試料台14が配置されている。第2遅延装置12は、第2進路B2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12に入射した電子を、時刻 $T_2 + \Delta t_2$ において第2遅延装置12から放出する。 Δt_2 が遅延時間となる。

試料台14には試料が置かれる。試料台14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。

[0015] 参照番号16は、バイプリズムであり、第1進路B1上を移動してきたスピン偏極電子線と第2進路B2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18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18は、撮像面に到達した電子線の強度分布を記憶する。

[0016] 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 $\theta = \text{ゼロ}$ であり、第1遅延装置10による遅延時間 $\Delta t_1 = \text{ゼロ}$ であり、第2遅延装置12による遅延時間 $\Delta t_2 = \text{ゼロ}$ 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は時間差が生じる。スピン偏極電子線の場合、バイプリズム16で重ね合わせる2本のスピン偏極電子線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 θ = 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 Δt_2 = ゼロとし、第1遅延装置10による遅延時間 Δt_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 Δt_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 Δt_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 Δt_1 と、干渉縞の明瞭度の関係を示し、この場合、遅延時間 $\Delta t_1 = t_3$ 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 $\theta = \text{ゼロ}$ とし、第2遅延装置12による遅延時間 $\Delta t_2 = \text{ゼロ}$ とし、第1遅延装置10による遅延時間 Δt_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 $\Delta t_1 = \text{ゼロ}$ のときに最大の明瞭度となり、第1遅延時間 Δt_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 Δt_1 からコヒーレンス時間を測定することができる。

次に、試料をおかず、スピン方向回転機8による回転角 $\theta = \text{ゼロ}$ し、第1遅延装置10による第1遅延時間 $\Delta t_1 = \text{ゼロ}$ とし、第2遅延装置12による第2遅延時間 Δt_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 $\Delta t_2 = \text{ゼロ}$ のときに最大の明瞭度となり、第2遅延時間 Δt_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 Δt_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、 Δt_1 と Δt_2 の双方を計測する。理論的には、 Δt_1 または Δt_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 1 2 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 1 0 による第 1 遅延時間 $\Delta t_1 = \text{ゼロ}$ 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 1 2 による第 2 遅延時間 Δt_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 1 2 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 1 2 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 3 0 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 2 0 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、2 2 は集束レンズを示し、2 4 は試料レンズを示し、2 6 は中間レンズを示し、2 8 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の間であればよく、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。

[0024] 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]

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

スピン方向回転機は、数3に示す操作を加える。 θ 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、 ϕ 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]

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

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

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]

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

[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Tは、試料が電子線に与える相互作用を示す。

[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]

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

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、スピントップの効果測定することができる。

[数9]

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

[数10]

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

[数11]

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

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 1 2 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 1 3 となり、ダウンスピン電子によるときの干渉縞は数 1 4 となる。数 1 3 と数 1 4 から、数 1 5 が得られる。数 1 5 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12]

$$T = \begin{pmatrix} T_{up} & 0 \\ 0 & T_{down} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(i k_{\uparrow} x) & 0 \\ 0 & \exp(i k_{\downarrow} x) \end{pmatrix}$$

$$\approx \begin{pmatrix} \exp\left(i \frac{\sqrt{2m_e(E_k - V_{\uparrow})}}{\hbar} x\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(i \frac{\sqrt{2m_e(E_k - V_{\downarrow})}}{\hbar} x\right) \end{pmatrix}$$

[数13]

$$1 + \frac{1}{2} \langle \uparrow | T^{\dagger} D(\delta_R - \delta_L) R_{spin}(\theta, \phi) | \uparrow \rangle + \frac{1}{2} \langle \uparrow | R_{spin}(\theta, \phi)^{\dagger} D(-\delta_R + \delta_L) T | \uparrow \rangle$$

$$= 1 + \cos(\delta_R - \delta_L - k_{\uparrow} x) \cos \frac{\theta}{2}$$

[数14]

$$1 + \frac{1}{2} \langle \downarrow | T^{\dagger} D(\delta_R - \delta_L) R_{spin}(\theta, \phi) | \downarrow \rangle + \frac{1}{2} \langle \downarrow | R_{spin}(\theta, \phi)^{\dagger} D(-\delta_R + \delta_L) T | \downarrow \rangle$$

$$= 1 + \cos(\delta_R - \delta_L - k_{\downarrow} x) \cos \frac{\theta}{2}$$

[数15]

$$(k_{\uparrow} - k_{\downarrow})x = \left(\frac{\sqrt{2m(E_k - V_{\uparrow})}}{\hbar} - \frac{\sqrt{2m(E_k - V_{\downarrow})}}{\hbar} \right) x$$
$$\cong \frac{(V_{\downarrow} - V_{\uparrow})}{2E_k} \frac{\sqrt{2mE_k}}{\hbar} x$$

[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。

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。

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、

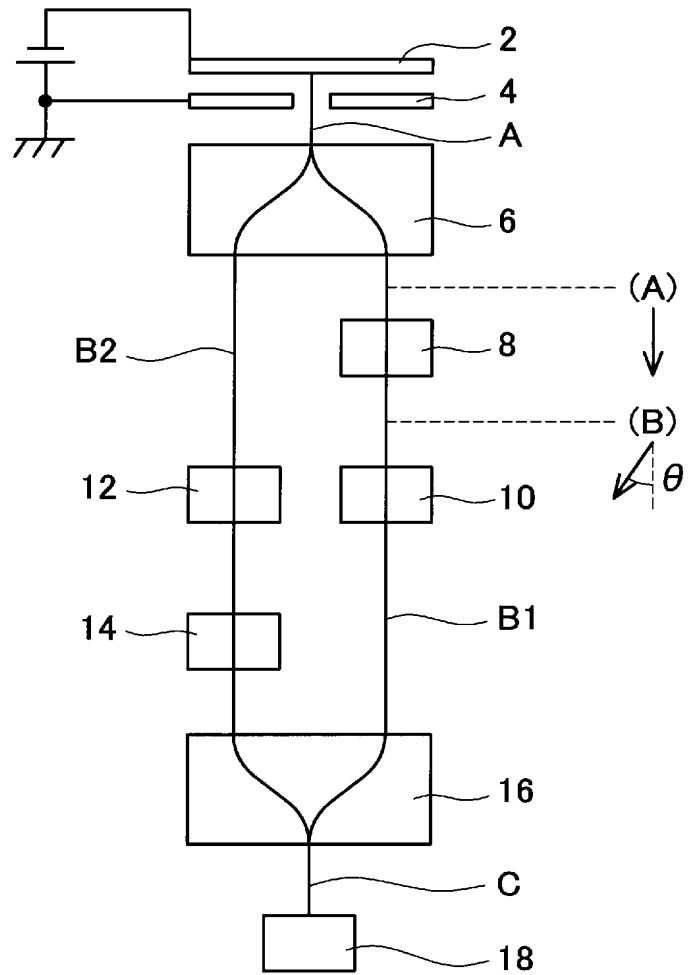
前記スピン方向回転機による回転角と前記強度分布測定によって得られる干渉縞の明瞭度の関係を測定し、前記干渉縞が最も明瞭となる回転角を特定する測定方法。

[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、

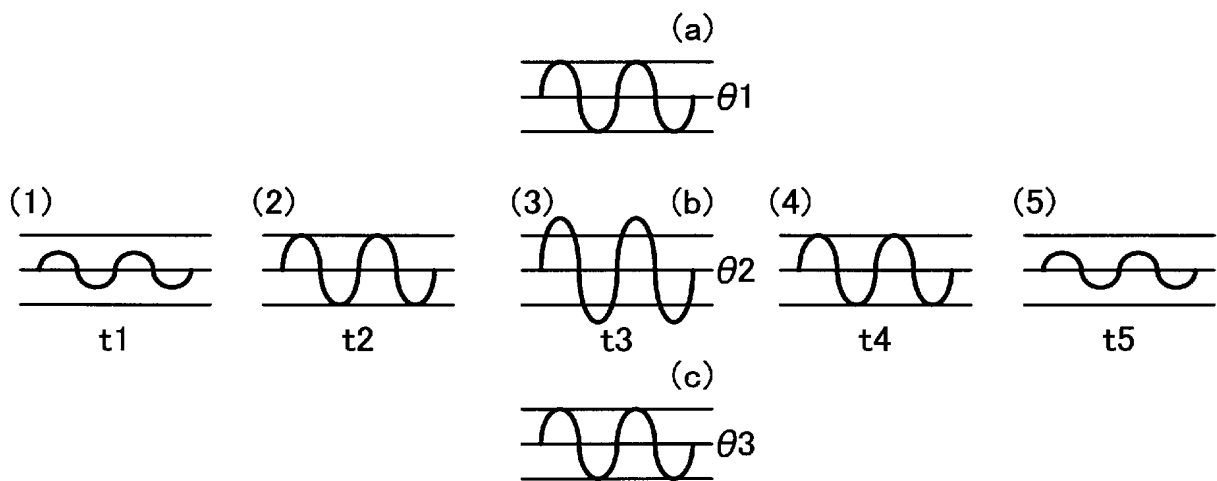
前記第1遅延装置による遅延時間と前記第2遅延装置による遅延時間の時間差と前記強度分布測定によって得られる干渉縞の明瞭度の関係を測定し、前記干渉縞が最も明瞭となる時間差を特定する測定方法

。

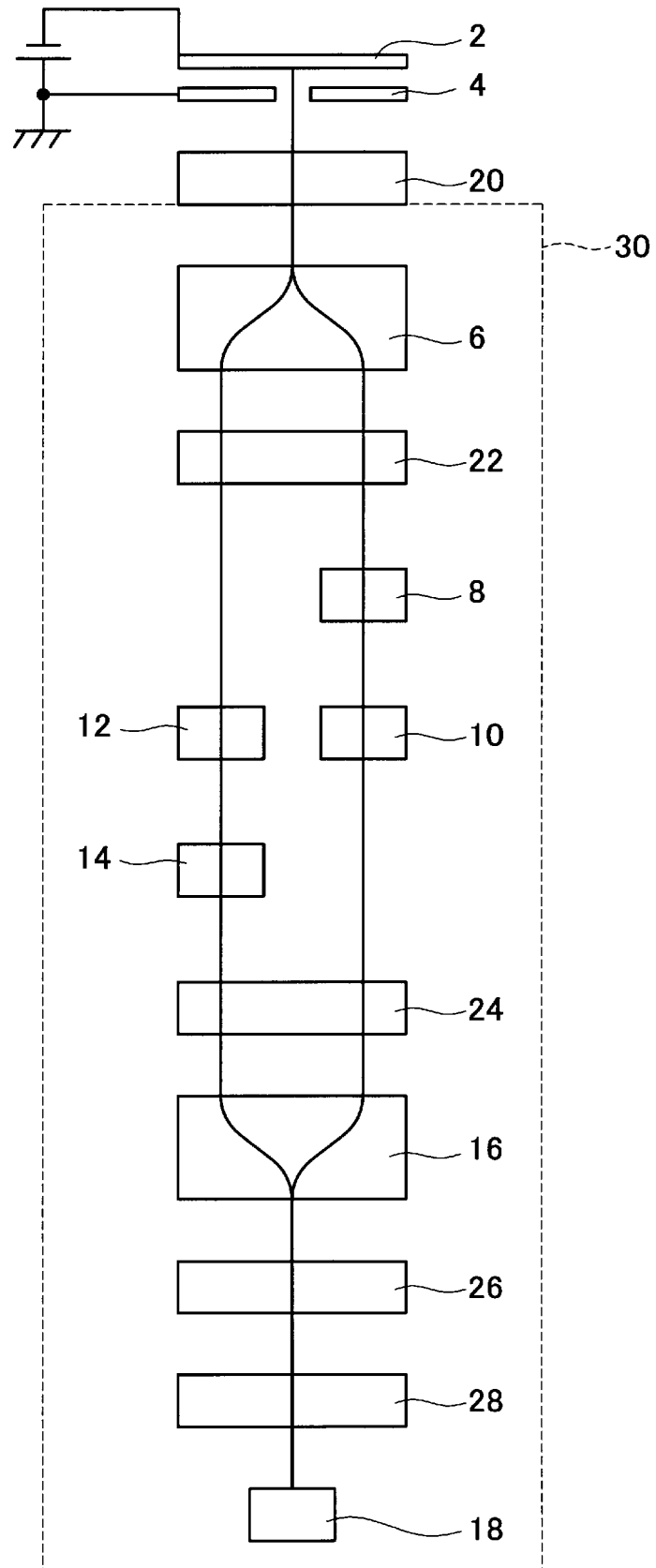
[図1]



[図2]



[図3]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/077393

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01N23/20(2006.01) i, H01J37/26(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01N23/20, H01J37/26

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2015 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JSTPlus/JST7580 (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2008-218063 A (Hitachi, Ltd.), 18 September 2008 (18.09.2008), entire text & US 2008/0210868 A1 entire text	1-8
A	WO 2011/122171 A1 (Nagoya University), 06 October 2011 (06.10.2011), entire text & US 2013/0009058 A1 entire text & EP 2555222 A1	1-8
A	JP 10-106465 A (Fujitsu Ltd.), 24 April 1998 (24.04.1998), entire text (Family: none)	1-8

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
04 December 2015 (04.12.15)

Date of mailing of the international search report
15 December 2015 (15.12.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/077393

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Soichiro KUSUNOKI, Makoto KUWAHARA, Yuto NANBO, Akira SAITO, Toru UJIHARA, Hidefumi ASANO, Yoshikazu TAKEDA, Nobuo TANAKA, "Spatial coherence of electron beam in spin-polarized transmission electron microscope", Abstracts of the Meeting of the Physical Society of Japan, 26 August 2013 (26.08.2013), vol.68, no.2, page 858, ISSN 1342-8349, 26aKE-5, entire text	1-8
A	Makoto KUWAHARA, Tsutomu NAKANISHI, Yoshikazu TAKEDA, Nobuo TANAKA, "Development of Spin-Polarized and Pulsed Transmission Electron Microscope -Based on the Fundamentals and the Advantage of Polarized Electron Source-", Microscopy, 30 April 2013 (30.04.2013), vol.48, no.1, pages 3 to 8, ISSN 1349-0958, entire text	1-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01N23/20(2006.01)i, H01J37/26(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01N23/20, H01J37/26			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2015年 日本国実用新案登録公報 1996-2015年 日本国登録実用新案公報 1994-2015年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus/JST7580 (JDreamIII)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
A	JP 2008-218063 A (株式会社日立製作所) 2008.09.18, 全文 & US 2008/0210868 A1, 全文	1-8	
A	WO 2011/122171 A1 (国立大学法人名古屋大学) 2011.10.06, 全文 & US 2013/0009058 A1, 全文 & EP 2555222 A1	1-8	
A	JP 10-106465 A (富士通株式会社)	1-8	
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。		<input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。	
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 04.12.2015		国際調査報告の発送日 15.12.2015	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 藤田 都志行	2W 3014 電話番号 03-3581-1101 内線 3250

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
	1998.04.24, 全文 (ファミリーなし)	
A	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, 2013.08.26, Vol. 68, No. 2, p. 858, ISSN 1342-8349, 26aKE-5, 全文	1-8
A	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, 2013.04.30, Vol. 48, No. 1, p. 3-8, ISSN 1349-0958, 全文	1-8