

(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
2017 年 5 月 4 日(04.05.2017)



(10) 国際公開番号

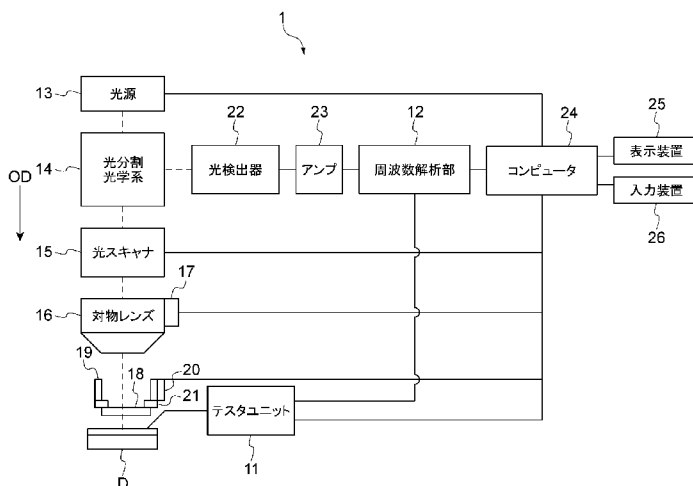
WO 2017/073166 A1

- (51) 国際特許分類:
G01R 19/14 (2006.01) G01N 27/72 (2006.01)
G01N 21/21 (2006.01) G01R 31/26 (2014.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/075983
- (22) 国際出願日: 2016 年 9 月 5 日(05.09.2016)
- (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 2015-214152 2015 年 10 月 30 日(30.10.2015) JP
- (71) 出願人: 浜松ホトニクス株式会社(HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) [JP/JP]; 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 Shizuoka (JP).
- (72) 発明者: 大高 章弘(OTAKA Akihiro); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 中村 共則(NAKAMURA Tomonori); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP).
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA Yoshiki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目 1 番 1 号丸の内 MY PLAZA (明治安田生命ビル) 9 階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (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, 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), ユーロピア (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),

[続葉有]

(54) Title: IMAGE GENERATING METHOD, IMAGE GENERATING DEVICE, IMAGE GENERATING PROGRAM, AND STORAGE MEDIUM

(54) 発明の名称: 画像生成方法、画像生成装置、画像生成プログラム及び記録媒体



- 11 Tester unit
12 Frequency analysis unit
13 Light source
14 Light splitting optical system
15 Optical scanner
16 Objective lens
22 Light detector
23 Amplifier
24 Computer
25 Display device
26 Input device

(57) Abstract: This image generating device obtains a current direction image indicating the direction of current flowing in a semiconductor device, and is provided with: a signal application unit that applies a stimulation signal to the semiconductor device; a magnetism detection unit that outputs a detection signal based on magnetism generated by application of the stimulation signal; and an image generating unit configured to generate, on the basis of the phase difference between the detection signal and a reference signal generated on the basis of the stimulation signal, phase image data including a phase component indicating the phase difference, and to generate, on the basis of the phase image data, a current direction image indicating the direction of current.

(57) 要約: 画像生成装置は、半導体デバイスに流れる電流の方向を示す電流方向像を取得する装置であって、半導体デバイスに刺激信号を印加する信号印加部と、刺激信号の印加によって発生した磁気に基づく検出信号を出力する磁気検出部と、刺激信号に基づいて生成される参照信号と検出信号との位相差に基づいて、位相差を示す位相成分を含んだ位相像データを生成し、位相像データに基づいて、電流の方向を示す電流方向像を生成するように構成される、画像生成部と、を備える。

WO 2017/073166 A1



OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

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：

画像生成方法、画像生成装置、画像生成プログラム及び記録媒体

技術分野

[0001] 本発明は、画像生成方法、画像生成装置、画像生成プログラム及び記録媒体に関する。

背景技術

[0002] 従来、半導体デバイスの検査のために、半導体デバイスにおける電流の強度や電流の流れている部位を検出する検出装置が知られている。例えば、特許文献1には、半導体デバイスから発生する電流によって誘起される磁気を、磁気検出器（超伝導量子干渉素子：SQUID）を用いて検出する非破壊解析装置が開示されている。この装置では、基準信号に同期した変調信号によって強度変調された変調ビームを半導体デバイスに対して照射している。そして、磁気検出器から出力される検出信号と基準信号に基づいて位相差像を得ている。また、非特許文献1には、SQUID等の磁気検出器で検出された磁束密度から、平面方向の電流密度を求める手法が開示されている。この非特許文献1では、電流と磁場との関係をビオ・サバールの法則を用いて数式化し、磁場から電流密度を求める手法が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2005-134196号公報

非特許文献

[0004] 非特許文献1：Bradley J. Roth, Nestor G. Sepulveda, and John P. Wikswo, Jr., "Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution," J. Appl. Phys., 65 (1), 1 January 1989.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、特許文献1では、単に位相差像を用いて高感度に良品と不良品の差異を見分けるに過ぎない。また、非特許文献1では、磁場から電流密度を求める理論式が開示されるに過ぎない。このように、いずれの文献においても、半導体デバイスにおける電流の流れる方向を求める手法等は開示されていない。そこで、本発明の一側面は、半導体デバイスにおける電流の方向を示す画像である電流方向像を生成することができる画像生成方法及び画像生成装置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

[0006] 一側面に係る画像生成方法は、半導体デバイスに流れる電流の方向を示す画像を生成する画像生成方法であって、半導体デバイスに刺激信号を印加するステップと、刺激信号の印加によって発生した磁気を検出し、検出信号を出力するステップと、刺激信号に基づいて生成される参照信号と検出信号との位相差に基づいて、位相差を示す位相成分を含んだ位相像データを生成するステップと、位相像データに基づいて、電流の方向を示す電流方向像を生成するステップと、を含む。

[0007] また、一側面に係る画像生成装置は、半導体デバイスに流れる電流の方向を示す画像を取得する画像生成装置であって、半導体デバイスに刺激信号を印加する信号印加部と、刺激信号の印加によって発生した磁気に基づく検出信号を出力する磁気検出部と、刺激信号に基づいて生成される参照信号と検出信号との位相差に基づいて、位相差を示す位相成分を含んだ位相像データを生成し、位相像データに基づいて、電流の方向を示す電流方向像を生成する、画像生成部と、を備える。

[0008] また、一側面に係る画像生成プログラムは、半導体デバイスに対して刺激信号を印加することにより半導体デバイスに流れる電流の方向を示す画像を取得する処理をコンピュータに実行させるためのプログラムであって、コンピュータを、刺激信号の印加によって発生した磁気に基づく検出信号と刺激信号に基づいて生成される参照信号との位相差から位相差を示す位相成分を

含んだ位相像データを生成する位相像データ生成部と、位相像データに基づいて電流の方向を示す電流方向像を生成する画像生成部として機能させる。また、他の一側面に係る記録媒体は、画像生成プログラムを記録するコンピュータ読み取り可能な記録媒体である。

[0009] この画像生成方法、画像生成装置及び画像生成プログラムでは、半導体デバイスに印加された刺激信号によって磁気が発生する。そして、刺激信号に基づいて生成される参照信号と、磁気に基づく検出信号との位相差に基づいて、位相差を示す位相成分を含んだ位相像データが生成される。位相差は磁場の方向によって変化するため、位相像データは磁場の方向の情報を含むことになる。磁場の方向は、電流の方向によって決まるため、位相像データに基づいて、電流の方向を判定することが可能となる。これにより、判定された電流の方向を用いて、電流の方向を示す画像を生成することができる。

[0010] 一形態において、電流方向像は、方向に応じて設定された複数の色によって、電流の方向が示される構成でもよい。このような構成により、電流の位置と方向とを視覚的に容易に把握することができる。

[0011] 一形態において、複数の色は、少なくとも、電流の方向に対応して区分された4つの角度範囲に対してそれぞれ設定された異なる色を有している構成でもよい。一般的に、半導体デバイスにおける電流経路は、平面視において、X軸方向及びY軸方向に設計されることが多い。この場合、電流の方向は、X方向、-X方向、Y方向及び-Y方向の4つとなる。上記構成のように少なくとも異なる4色を有することで、4つの方向を識別しやすくなる。

[0012] 一形態において、電流方向像を生成するステップは、電流の方向と複数の色との対応関係を変更するステップを含む構成でもよい。例えば、画像生成部は、複数の色のデータをもつ色テーブルと、電流の方向に対応して区分された角度範囲のデータをもつ角度テーブルと、を有し、色テーブルと角度テーブルとの対応関係を変更可能である構成でもよい。この構成によれば、例えば、得られた画像の向きが傾いている場合でも、容易に配色の調整を行うことができる。

[0013] 一形態において、検出信号から生成された磁気の強度を示す強度像データに対して、位相像データに基づく磁気方向のデータを付加したデータを生成し、当該データに基づいて電流の強度を示す電流強度像を生成するステップをさらに含む構成でもよい。この場合、電流強度像と電流方向像とに基づいて電流の強度及び方向を示す電流像を生成するステップをさらに含む構成でもよい。この場合、画像生成部は、検出信号から生成された、磁気の強度を示す強度像データに対して位相像データに基づく磁気方向のデータが付加されたデータを生成し、当該データに基づいて電流の強度を示す電流強度像を生成する構成でもよい。磁気の強度は電流の大きさに対応している。そのため、強度像データに対して磁気方向のデータを付加することによって、電流の大きさを画像に表現することができる。

[0014] 一形態において、電流の方向を示す電流方向像を生成するステップは、検出信号から生成された磁気の強度を示す強度像データに対して、位相像データに基づく磁気方向のデータを付加したデータを生成し、当該データに基づいて電流方向像を生成してもよい。この場合、画像生成部は、検出信号から生成された、磁気の強度を示す強度像データに対して位相像データに基づく磁気方向のデータが付加されたデータを生成し、当該データに基づいて電流方向像を生成する構成でもよい。位相成分と磁気の強度情報の両方を含む当該データを用いることで、より高精度に電流の方向を示す電流方向像を得ることができる。

[0015] 一形態において、磁気検出部は、光を発生する光源と、半導体デバイスに対向配置される磁気光学結晶と、光を磁気光学結晶に照射し、磁気光学結晶から反射された光を導光する照射光学系と、磁気光学結晶から反射された光を検出して、検出信号を出力する光検出器と、を有する構成でもよい。

発明の効果

[0016] この画像生成方法及び画像生成装置によれば、半導体デバイスにおける電流の方向を示す画像である電流方向像を生成することができる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]本発明の第1実施形態に係る検査装置の構成図である。

[図2]図1の検査装置における光分割光学系を説明するための図である。

[図3]位相差を説明するための図である。

[図4]電流像を得る手順の概要を説明するための図である。

[図5]強度像の一例を示す画像である。

[図6]位相像の一例を示す画像である。

[図7]電流強度像及び電流方向像を取得する手順を説明するための図である。

[図8]電流強度像及び電流方向像を取得する手順を説明するための図である。

[図9]電流強度像の一例を示す画像である。

[図10]電流方向像の一例を示す画像である。

[図11]電流方向像における色の割り当てを説明する図である。

[図12]角度と色との関係を示すテーブルである。

[図13]電流強度像による電流方向像のコントラスト調整を説明する図である。

[図14]電流像の一例を示す画像である。

[図15]配色調整画面の一例を示す図である。

[図16]電流方向像を取得する手順を説明するための図である。

[図17]電流強度像の一例を示す画像である。

[図18]電流像の一例を示す画像である。

[図19]電流強度像を取得する手順を説明するための図である。

[図20]電流強度像を取得する手順を説明するための図である。

[図21]電流強度像の一例を示す画像である。

[図22]画像生成プログラムを記録する記録媒体の一例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0018] 以下、本発明の実施形態について、図面を参照して詳細に説明する。なお、各図において同一又は相当部分には同一符号付し、重複する説明を省略する。

[0019] 図1に示されるように、本実施形態に係る画像生成装置1は、例えば、半

導体デバイスDにおいて異常発生箇所を特定する等、半導体デバイスDの検査に使用することができる。画像生成装置1は、半導体デバイスDに対して刺激信号を印加することにより半導体デバイスDに流れる電流の方向を求め、半導体デバイスDに流れる電流の方向を示す画像を生成する。

[0020] 半導体デバイスDとしては、トランジスタ等のPNジャンクションを有する集積回路（例えば、小規模集積回路（SSI：Small Scale Integration）、中規模集積回路（MSI：Medium Scale Integration）、大規模集積回路（LSI：Large Scale Integration）、超大規模集積回路（VLSI：Very Large Scale Integration）、超々大規模集積回路（ULSI：Ultra Large Scale Integration）、ギガ・スケール集積回路（GSI：Giga Scale Integration））、大電流用／高圧用MOSトランジスタ及びバイポーラトランジスタ、電力用半導体素子（パワーデバイス）等がある。また、半導体デバイスDは、半導体デバイスを含むパッケージ、複合基板等であってもよい。

[0021] 半導体デバイスDには、デバイス制御ケーブルを介してテストユニット11（信号印加部）が電氣的に接続されている。テストユニット11は、電源（図示せず）によって動作させられ、半導体デバイスDに所定の変調電流信号（刺激信号）を印加する。半導体デバイスDでは、当該変調電流信号に伴い変調磁場が発生する。変調磁場に応じて強度変調した光が後述する光検出器22に検出されることによって、特定の周波数で変調された光を検出することが可能となる。なお、テストユニット11からの変調電流信号を半導体デバイスDに印加しながら、検出周波数に応じた光を光源13（後述）から発生させることによりロックイン検出を行うものであってもよく、この場合S/Nを向上させることができる。テストユニット11は、タイミング信号ケーブルを介して周波数解析部12に電氣的に接続されている。なお、刺激信号として変調電圧信号を印加してもよい。また、テストユニットの代わりに信号印加部としてパルスジェネレータ等を用いてもよい。

[0022] 画像生成装置1は、光源13を備えている。光源13は、電源（図示せず

）によって動作させられ、後述するMO結晶18（磁気光学結晶）及び半導体デバイスDに照射されるCW光またはパルス光を発生し出力する。光源13から出力される光は、インコヒーレント（非コヒーレント）な光でもよいし、レーザ光のようなコヒーレントな光であってもよい。インコヒーレントな光を出力する光源13としては、SLD（Super Luminescent Diode）やASE（Amplified Spontaneous Emission）、LED（Light Emitting Diode）等を用いることができる。光源13から出力される光がインコヒーレントな光である場合には、MO結晶18における反射光と、半導体デバイスDにおける反射光との間で生じる干渉ノイズを低減することができる。MO結晶18における反射光には、MO結晶18の光入射面における反射光、及びMO結晶18の光反射面における反射光の双方が含まれる。なお、MO結晶18の光入射面における反射光の影響は、光入射面に反射防止加工を施すことにより低減してもよい。

[0023] また、コヒーレントな光を出力する光源13としては、固体レーザ光源や半導体レーザ光源等を用いることができる。光源13から出力される光の波長は、530nm以上であり、好ましくは1064nm以上である。光源13から出力された光は、偏光保存シングルモード光ケーブル（図示せず）、及び、プローブ光用の偏光保存シングルモード光ファイバを介して光分割光学系14に導かれる。光分割光学系14の詳細については後述する。光源13から光分割光学系14に導かれた光は、更に光スキャナ15及び対物レンズ16を含む照射光学系に導かれる。照射光学系である光スキャナ15及び対物レンズ16は、光源13から出力された光をMO結晶18に対して照射する。

[0024] 光スキャナ15は、MO結晶18の光入射面上の照射スポットを走査する。より詳細には、光スキャナ15は、後述するコンピュータ24によって制御されることにより、照射スポットを走査する。光スキャナ15は、例えばガルバノミラーやMEMS（micro electro mechanical system）ミラー、ポリゴンミラー等の光走査素子によって構成されている。

[0025] 対物レンズ１６は、光スキャナ１５によって導かれた光をＭＯ結晶１８に集光する。対物レンズ１６は、ターレット（不図示）等により、低倍率対物レンズと高倍率対物レンズとを切替可能に構成されている。低倍率対物レンズの倍率は例えば５倍であり、高倍率対物レンズの倍率は例えば５０倍である。対物レンズ１６には、対物レンズ駆動部１７が連結されている。対物レンズ駆動部１７が光源１３からの光の光軸方向ＯＤに移動することにより、対物レンズ１６の焦点位置を調整することができる。

[0026] ＭＯ結晶１８は、半導体デバイスＤに対向して配置される。ＭＯ結晶１８は、磁気光学効果により、半導体デバイスＤで発生した磁界に応じて屈折率が変化し、入射された光の偏光状態（偏光方向）を変化させる。例えば、半導体デバイスＤの故障時等において、半導体デバイスＤに変調電流信号が印加されると、故障個所に応じたリーク電流が流れる電流経路が発生する場合がある。この場合、リーク電流が発生した箇所では、リーク電流が発生していない箇所とは異なる磁界が生じる。ＭＯ結晶１８は、このような磁界の変化に応じて、偏光方向が変化した反射光を出射する。当該反射光の偏光方向の相違は、後述する光検出器２２によって取得される光の強度の相違として表れる。ＭＯ結晶１８における反射光は、対物レンズ１６及び光スキャナ１５を介して光分割光学系１４に戻され、戻り光用の光ファイバを介して光検出器２２に導かれる。このような構成により、磁気を検出するための磁気検出部が構成される。

[0027] ここで、ＭＯ結晶１８には、可とう性部材２１を介して、ＭＯ結晶１８を保持するホルダ１９が連結されている。可とう性部材２１は、例えばゴムやバネ等を含んで構成されたリング状の弾性部材である。また、可とう性部材２１は、形状が変形する部材であればよく、必ずしも弾性部材でなくてもよい。可とう性部材２１は、光軸方向ＯＤから見てＭＯ結晶１８の外縁の少なくとも一部を覆うように、ＭＯ結晶１８に固着されている。可とう性部材２１は、ＭＯ結晶１８の光入射面側に固着されている。また、ホルダ１９は、例えばリング状であって、光軸方向ＯＤから見て可とう性部材２１の外縁を

覆うように、可とう性部材 21 に固着されている。よって、可とう性部材 21 の一面は、MO 結晶 18 に固着され、可とう性部材 21 の他面はホルダ 19 に固着されている。リング状の可とう性部材 21 が MO 結晶 18 の外縁を覆い、リング状のホルダ 19 が可とう性部材 21 の外縁を覆っているので、光軸方向 OD から見ると、MO 結晶 18 の光入射面上には、対物レンズ 16 からの光が入力されるための開口が形成されている。ホルダ 19 には、ホルダ駆動部 20 が連結されている。

[0028] ホルダ駆動部 20 は、光軸方向 OD に移動することにより、ホルダ 19 を光軸方向 OD に移動させる。ホルダ駆動部 20 が光軸方向 OD に移動することにより、ホルダ 19 と半導体デバイス D との距離が縮められ、MO 結晶 18 が半導体デバイス D に押し付けられる。つまり、MO 結晶 18 は、半導体デバイス D に当接可能とされている。MO 結晶 18 への光照射は、MO 結晶 18 が半導体デバイス D に当接した状態で行われる。なお、MO 結晶 18 への光照射は、半導体デバイス D に当接した状態で行われることに限らず、MO 結晶 18 と半導体デバイス D の間に所定の間隔を持った状態で行われてもよい。また、対物レンズ駆動部 17 とホルダ駆動部 20 とは一体型の構成とされていてもよい。この場合、当該一体型の構成は、対物レンズ 16 及びホルダ 19 をそれぞれ個別に移動させる機構を有していてもよい。

[0029] 光検出器 22 は、照射された光に応じて、半導体デバイス D に当接した MO 結晶 18 からの反射光を検出し、検出信号を出力する。光検出器 22 は、例えば、フォトダイオード、アバランシェフォトダイオード、光電子増倍管、又はエリアイメージセンサ等である。光検出器 22 は、少なくとも 1 つの検出器を有しており、当該検出器に入力された光の強度を検出する。

[0030] ここで、光分割光学系 14 について図 2 も参照しながら説明する。光分割光学系 14 は、コリメータ 141、146 と、シャッタ 142 と、偏向ビームスプリッタ（以下、PBS : Polarization Beam Splitter と記載）143、ファラデーローテータ（以下、FR : Faraday Rotator と記載）144 と、を含んで構成されている。図 2 に示されるように、光源 13 からの光が光ス

キャナ15を介してMO結晶18に照射される際には、まず、光源13からの光がコリメータ141を介してシャッタ142に入力される。シャッタ142は光のON/OFFを制御できるものであればよい。そして、シャッタ142から出力された光が、PBS143に入力される。PBS143は、偏光成分が0度の光を透過し90度の光を反射するように設定されている。また、PBS143は、シャッタ142からの光の偏光に合わせて設定されている。そのため、PBS143はシャッタ142からの光を透過する。PBS143を透過した偏光成分が0度の光は、入力光の偏光面を22.5度傾ける（回転させる）FR144に入力され、その偏光成分が22.5度となる。FR144を透過した光は、偏光成分が22.5度の光として光スキャナ15に入力される。当該光は、MO結晶18に照射される。

[0031] MO結晶18からの反射光は、半導体デバイスDに印加される変調電流信号で発生した磁界（磁場強度）に比例した磁気光学効果（カー効果、ファラデー効果等）に応じて、偏光面が回転している。当該反射光は、FR144により偏光面を22.5度傾けられ、PBS143に入力される。当該反射光は、PBS143によって偏光成分が90度の光及び0度の光に分割される。偏光成分が90度の光は、PBS143にて反射しコリメータ146を介して光検出器22の光検出器に入力される。このように、光検出器22は、半導体デバイスDで発生した磁界（磁場強度）に応じた偏光面の変化を、光強度として検出し、当該光強度に応じた強度（振幅）の検出信号をアンプ23に出力する。なお、光分割光学系14として、PBS143が1つのみ備わっており、直交する直線偏光のうち偏光成分が90度の光のみ検出する構成を説明したが、これに限定されない。すなわち、光分割光学系14は、PBS143及びFR144の間に入力光の偏光面を45度傾けるFRと、偏光成分が45度の光を透過し135度の光を反射するようなPBSと、コリメータとを更に備え、直交する直線偏光の双方、すなわち偏光成分が90度の光及び0度の光を捉えて差動検出する構成であってもよい。また、光分割光学系14として、ハーフミラーを用いてもよい。

[0032] 図1に戻り、アンプ23は、光検出器22によって出力された検出信号を増幅して出力する。当該増幅後の検出信号は、周波数解析部12に入力される。周波数解析部12としては、ロックインアンプやスペクトラムアナライザ、デジタイザ、クロス・ドメイン・アナライザ（登録商標）、ネットワークアナライザ、デジタイザ等が用いられる。周波数解析部12は、増幅後の検出信号における計測周波数成分を抽出する。計測周波数は、例えば半導体デバイスDに印加される変調電流信号の変調周波数に基づいて設定される。また、周波数解析部12は、半導体デバイスDに印加される変調電流信号と周期が同じ参照信号を取得する。当該参照信号は、例えば、テストユニット11から出力されて周波数解析部12に入力される。

[0033] 周波数解析部12は、計測周波数成分を抽出した検出信号と、取得した参照信号との位相差を導出する。上述したように、検出信号の振幅は、半導体デバイスDで発生した磁界（磁場強度）に応じて変化する。そして、周波数解析部12は、検出信号の振幅に基づいて、検出信号と参照信号との位相差を特定することができる。ここで、電流経路箇所の反射光に係る検出信号と参照信号との位相差は、特定の値となる。具体的には、当該特定の値は、実質的に、電流に応じて発生した磁場がMO結晶18を貫く方向の正負に応じた2値のいずれかとなる。図3に示されるように、参照信号は、周波数解析部12により刺激信号と同じ周期とされる。また、電流経路箇所の検出信号と参照信号との位相差（以下、電流位相差と記載する場合がある）は、複数周期に亘って一定となる。具体的には、電流位相差は、参照信号と刺激信号との位相差 θ_1 と、刺激信号と検出信号との位相差 θ_2 とを加算した値となる。位相差 θ_1 は、参照信号を生成する周波数解析部12の設定によって変化させることができる。電流位相差をより簡易に求めるべく、参照信号の位相と刺激信号の位相とが等しくし、位相差 θ_1 が0とすることが好ましい。位相差 θ_2 は、電流に応じて発生した磁場がMO結晶を貫く方向の正負に応じて、180度（ π ）異なる2値のいずれかとなる。すなわち、磁場方向が正である電流経路箇所の検出信号と刺激信号との位相差 θ_2 と、磁場方向が

負である電流経路箇所の検出信号と刺激信号との位相差 θ_2 とは、 180° 度(π)異なっている。一方で、半導体デバイスDにおける電流経路箇所以外の検出信号と参照信号との位相差は、特定の値とならず、ランダムな値となる。周波数解析部12は、特定した位相差を示す情報を含んだ解析信号をコンピュータ24(画像生成部)に出力する。また、周波数解析部12は、アンプ23から入力された、光強度に応じた強度(振幅)の検出信号をコンピュータ24に出力する。

[0034] コンピュータ24は例えばPC等である。コンピュータ24には、ユーザから計測条件等が入力されるキーボードやマウス等の入力装置26と、ユーザに計測結果等を示すためのディスプレイ等の表示装置25とが接続されている。コンピュータ24は、プロセッサであるCPU(Central Processing Unit)、記録媒体であるRAM(Random Access Memory)又はROM(Read Only Memory)、及び入出力モジュールを含む。コンピュータ24は、入出力モジュールを介して光源13、光スキャナ15、対物レンズ駆動部17、テストユニット11、光検出器22、周波数解析部12等と電氣的に接続(coupling)されており、CPUによってそれらを制御する機能を実行する。

[0035] コンピュータ24は記録媒体に記録された画像生成プログラムP1(後述)をCPUで実行することにより、振幅像、位相像、電流強度像、電流方向像及び電流像の生成を行う。図4に示されるように、コンピュータ24は、まず、計測データに基づいて振幅像(強度像)及び位相像を生成する(ステップS1)。本実施形態では、計測データは、光検出器22から検出された検出信号のデータと、周波数解析部12から出力された解析信号のデータとを有している。また、振幅像は磁場の強度(磁束密度)を示し、位相像は磁場の方向を示す。次いで、コンピュータ24は、振幅像及び位相像に基づいて、電流の強度(電流密度)を示す電流強度像を生成する(ステップS2)。電流強度像において、例えば、電流の強度は明るさ(輝度)によって示される。また、コンピュータ24は、振幅像及び位相像に基づいて、電流の方向を示す電流方向像を生成する(ステップS3)。電流方向像において、例

えば、電流の方向は色によって示される。次いで、コンピュータ 24 は、電流強度像及び電流方向像に基づいて、電流の強度及び方向を示す電流像を生成する（ステップ S 4）。

[0036] 振幅像、位相像、電流強度像、電流方向像及び電流像の生成の方法について、以下、具体的に説明する。

[0037] [振幅像の生成]

コンピュータ 24 は、検出信号の光強度（振幅）、及び MO 結晶 18 の光入射面上の照射スポットの情報に基づいて、照射スポット毎に光強度をマッピングし、振幅像を生成する。振幅像とは、光強度を、光強度に応じた所定の輝度値でマッピングした画像である。そのため、振幅像は、磁場の強度（磁束密度）を示すものの、磁場の方向を示すことはない。光強度と輝度値との対応関係は、例えば光強度が 0 である場合に輝度値が 0 a.u. とされ、光強度が最大である場合に輝度値が 32000 a.u. とされる。すなわち、図 5 に示されるように、振幅像では、磁場の強度が大きいほど白に近く描画され、磁場の強度が小さいほど黒に近く描画される。コンピュータ 24 は、各照射スポットに対応する光強度が含まれた振幅像データを生成する。振幅像データにおいては、各照射スポットの位置を考慮した画像中の位置（参照画素）に、各照射スポットに対応する光強度がマッピングされている。

[0038] [位相像の生成]

コンピュータ 24 は、解析信号に含まれた位相差（位相成分）、及び MO 結晶 18 の光入射面上の照射スポットの情報に基づいて、照射スポット毎に位相成分をマッピングし、位相像を生成する。位相像とは、位相差を、位相差に応じた所定の輝度値でマッピングした画像である。位相差と輝度値との対応関係は、例えば位相差が $-\pi$ である場合に輝度値が 0 a.u. とされ、位相差が 0 である場合に輝度値が 16000 a.u. とされ、位相差が $+\pi$ である場合に輝度値が 32000 a.u. とされる。すなわち、図 6 に示されるように、位相像では、位相差が $-\pi$ に近づくほど黒く描かれ、位相差が π に近づくほど白く描かれる。コンピュータ 24 は、各照射スポットに対応する位相成分

が含まれた位相像データを生成する。位相像データにおいては、各照射スポットの位置を考慮した画像中の位置（参照画素）に、各照射スポットに対応する位相成分がマッピングされている。

[0039] [電流強度像、電流方向像の生成]

本実施形態では、式（１）として示されるビオ・サバルの法則に基づいて、電流強度像及び電流方向像が生成される。

[数1]

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3} d^3 r' \cdots (1)$$

[0040] 図7に示されるように、厚さdを有する半導体デバイスをモデルとして、電流強度像及び電流方向像が生成される原理について説明する。この例では、半導体デバイスの表面がx y平面として規定され、半導体デバイスの厚さ方向がz軸（デバイス表面を0とする）として規定される。空間内の位置r（x、y、z）における磁束密度をB（r）とする。位置rはデバイスの表面からz軸方向に一定の距離であり、この距離はデバイスの厚みdよりも十分に小さいものとする。また、位置rの磁場に影響を与えるデバイス表面上の点r'（x'、y'、0）における電流密度をJ（r'）とする。この場合磁束密度B（r）と、電流密度J（r'）と、位置rから点r'までの距離r - r'は、図7のようになる。このモデルでは、位置rにおけるz軸の磁束のみが、検出信号として検出される。そのため、ビオ・サバルの法則をz軸方向のみに展開し、式（2）を得る。

[数2]

$$B_z(x, y) = \frac{\mu_0 d}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_x(x', y') \cdot (y - y') - J_y(x', y') \cdot (x - x')}{((x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2)^{3/2}} dx' dy' \cdots (2)$$

[0041] 一方、電流が定常的であり、発散及び消滅がないものと考えると、面電流勾配の和が零であり、式（3）から式（4）が得られる。

[数3]

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \cdots (3)$$

[数4]

$$uj_x(u, v) + vj_y(u, v) = 0 \cdots (4)$$

u : x 方向の角周波数

v : y 方向の角周波数

$j_x(u, v)$: x 方向のスペクトル

$j_y(u, v)$: y 方向のスペクトル

[0042] これにより、式(2)及び(4)と、計測された磁束密度 $B(r)$ とを用いることによって、電流密度 $J(r')$ を算出することができる。以下、具体的な算出フローについて説明する。図8に示されるように、まず、コンピュータ24は、 z 軸方向の磁束密度 B_z (絶対値)として、振幅像を得る(ステップS11)。次に、コンピュータ24は、生成された位相像を用いて、振幅像に正負の符号を付加し、磁束の向きの情報を含む磁束密度 B_z' を構築する(ステップS12)。本実施形態では、例えば、式(5)に示されるように、参照画素における振幅値を A_p 、位相値を P_p とすると、位相像の位相成分が $0 \sim \pi$ までの領域を「正」、 $-\pi \sim 0$ までの領域を「負」として、対応する参照画素の振幅像に正負の符号が付加される。

[数5]

$$\text{sign}(P_p) A_p + i \cdot 0 = \text{sign}(P_p) A_p \cdots (5)$$

$$\text{sign}(arg): 1(arg \geq 0), -1(arg < 0)$$

[0043] 次に、コンピュータ24は、構築された磁束密度 B_z' をフーリエ変換することによって、二次元のスペクトルを得る(ステップS13)。そして、式(4)によって、ステップS13で得られたスペクトルが、 x 軸方向のスペクトル $j_x(u, v)$ と y 軸方向のスペクトル $j_y(u, v)$ とに分解される(ステップS14)。次に、得られたスペクトル $j_x(u, v)$ と y 軸方向のスペクトル $j_y(u, v)$ が逆フーリエ変換され、 x 軸方向の電流密度 J_x と y 軸方向の電流密度 J_y とが得られる(ステップS15)。続いて、得られた電流密度 J_x の実部と電流密度 J_y の実部とを式(6)に代入することによって、電流強度像データが得られる(ステップS17)。電流強度像データでは、各参照画素の位置情報と、当該位置における電流強度とが紐付けられて

いる。また、得られた電流密度 J_x の実部と電流密度 J_y の実部とを式 (7) に代入することによって、電流方向像データが得られる (ステップ S 18)。電流方向像データでは、各参照画素の位置情報と、当該位置における電流方向とが紐付けられている。電流方向は、参照画素における平面上の任意の方向 (実施形態では、描画される画像における右方向) を 0 度方向として、 $-\pi \sim \pi$ の範囲で規定される。

[数6]

$$\sqrt{J_x^2 + J_y^2} \cdots (6)$$

[数7]

$$\tan^{-1} \left(\frac{\text{Re}(J_y)}{\text{Re}(J_x)} \right) \cdots (7)$$

[0044] なお、ステップ S 12において、振幅像及び位相像によって I 像 (余弦画像) 及び Q 像 (正弦画像) を構築し、これを B_z' としてフーリエ変換してもよい。すなわち、参照画素における振幅値を A_p 、位相値を P_p とすると、I 像は式 (8) によって算出され、Q 像は式 (9) によって算出される。フーリエ変換は、複素数から複素数への可逆の写像 (いわゆる直交変換) である。よって、 $I_p + i Q_p$ を B_z' としてフーリエ変換の入力とする。このように、 B_z' を構築することによって、時間位相の情報を保持することができるので、位相遅れを検出することができる。

[数8]

$$I_p = A_p \cos P_p \cdots (8)$$

$$-\pi \leq P_p \leq \pi$$

[数9]

$$Q_p = A_p \sin P_p \cdots (9)$$

$$-\pi \leq P_p \leq \pi$$

[0045] コンピュータ 24 は、得られた電流強度像データ、及び、参照画素の位置

情報に基づいて、参照画素毎に電流強度像データの値をマッピングし、電流強度像を生成する。本実施形態の電流強度像とは、電流強度を、電流強度に応じた所定の輝度値でマッピングした画像である。電流強度と輝度値との対応関係は、例えば 16 bit で輝度値を表す場合、電流強度が 0 である場合に輝度値が 0 a.u. とされ、電流強度が最大である場合に輝度値が 65535 a.u. とされる。図 9 に示されるように、電流強度画像では、電流の強度（電流密度）が高いほど白に近く描かれる。

[0046] コンピュータ 24 は、得られた電流方向像データ、及び、参照画素の位置情報に基づいて、参照画素毎に電流方向像データをマッピングし、電流方向像を生成する。本実施形態の電流方向像（図 10 参照）とは、電流方向を、電流方向に応じた所定の色をマッピングした画像である。電流方向と色との対応関係は、所定の範囲に区分された角度範囲に対して、異なる色が割り当てられることで決められる。本実施形態では、例えば、図 11 に示されるように、4 つの範囲に区分された角度範囲に対して、それぞれ異なる色が割り当てられる。この例では、電流方向が $-\pi/4 \sim \pi/4$ の範囲には「赤」が割り当てられている。電流方向が $\pi/4 \sim 3\pi/4$ の範囲には「黄」が割り当てられている。電流方向が $3\pi/4 \sim \pi$ 、 $-\pi/4 \sim -\pi/2$ の範囲には「緑」が割り当てられている。また、電流方向が $-3\pi/4 \sim -\pi/4$ の範囲には「シアン」が割り当てられている。この例では、互いに逆となる方向を示す色同士が補色の関係（赤と緑、黄とシアン）となっている。コンピュータ 24 は、例えば図 12（a）に示されるような電流方向と色とが対応したテーブルを有していてもよい。このテーブルは、電流方向を角度として規定した角度テーブルと、角度範囲に対応する色が規定された色テーブルとを有している。角度テーブルと色テーブルとは、例えば一対一で対応している。この場合、コンピュータ 24 は、テーブルを参照することによって、電流方向に対応する色を決定することができる。

[0047] 例えば、参照画素における電流が画像において右方向に流れる場合、参照画素は、電流方向 0 に対応する「赤」でマッピングされる。参照画素におけ

る電流が画像において上方向に流れる場合、参照画素は、電流方向 $\pi/2$ に対応する「黄」でマッピングされる。参照画素における電流が画像において左方向に流れる場合、参照画素は、電流方向 π 又は $-\pi$ に対応する「緑」でマッピングされる。参照画素における電流が下方向に流れる場合、参照画素は、電流方向 $-\pi/2$ に対応する「シアン」でマッピングされる。図 10 に示されるように、電流方向画像では、黄及びシアンによって描かれる領域が画像において上下方向に延在している。また、赤及び緑によって描かれる領域が画像において左右方向に延在している。また、マーブル模様に見える部分は電流経路が存在しない領域であるため、赤、黄、緑及びシアンによってランダムに描画されている。

[0048] [電流像の生成]

コンピュータ 24 は、得られた電流強度像（電流強度像データ）及び電流方向像（電流方向像データ）に基づいて電流の強度及び方向を示す電流像（電流像データ）を生成する。例えば電流強度像と電流方向像を合成処理することによって、電流像を生成する。電流像の生成においては、電流方向像を形成する色に対して、電流強度像の輝度値によるコントラストエンハンスが加えられる。すなわち、電流方向像の色が電流強度像の輝度値に応じた明度を有する。例えば、コンピュータ 24 は、参照画素における色を電流方向像から参照し、参照画素における明度を電流強度像の輝度値から生成する。明度は、例えば、電流強度像における最大の輝度値（65535）を色の最大の明度（255）に対応させ、最小の輝度値（0）を最小の明度（0）に対応させることで生成される。例えば、図 13 に示されるように、参照画素の色が「黄」である場合、参照画素の輝度値に対応する明度が割り当てられる。この例では、RGB のうち「黄」を構成する色成分である R 及び G の値が輝度値に応じた値となる。すなわち、参照画素における R 及び G の値は、最大の輝度値に対する参照画素の輝度値の割合を 255 に乗じた値となる。コントラストエンハンスが加えられた色によって全ての参照画素がマッピングされることによって、電流像が生成される。電流像は、表示装置 25 に表示

され得る。なお、上記の例では電流強度像における最大の輝度値を色の最大の明度に対応させ、最小の輝度値を最小の明度に対応させているが、この限りではない。ユーザは電流強度像の輝度分布に合わせて、より視認しやすいように当該対応を自由に変更してもよい。例えば、電流強度像の輝度が最大輝度値のほうに多く分布している場合は、最小の輝度値よりも大きい輝度値を最小の明度に対応させてもよい。また例えば、電流強度像の輝度が最小輝度値のほうに多く分布している場合は、最大の輝度値よりも小さい輝度値を最大に明度に対応させてもよい。

[0049] 図14に示す電流像では、電流強度像（図9参照）における電流密度の小さい領域（図9において黒で描かれている部分）が黒に近い色で描画されている。また、電流密度の大きい領域（図9において白で描かれている部分）では、電流方向像の色が認識されやすくなっている。これにより、画像において上下方向に流れる電流（シアン、黄）と、左右方向に流れる電流（赤、緑）とが、電流方向像に比べて確認しやすくなっている。

[0050] 本実施形態では、電流像の生成前及び生成後に、配色を変更（調整）することができる。図15に示されるように、例えば、コンピュータ24は、生成した電流像201と共に操作アイコン202を表示装置25に表示する。図示例の操作アイコン202では、円内に4つの異なる矢印画像202a, 202b, 202c, 202cが描かれている。矢印画像202a, 202b, 202c, 202cは、それぞれ異なる色によって描かれている。また、矢印画像202a, 202b, 202c, 202cは、それぞれ異なる方向を示している。矢印画像202a, 202b, 202c, 202cにおける、それぞれの色と方向とは、電流方向像における色と電流方向との関係に対応している。したがって、図11、図12(a)に示す対応関係の場合には、右を示す矢印画像202aが赤によって描かれ、上を示す矢印画像202bが黄によって描かれ、左を示す矢印画像202cが緑によって描かれ、下を示す矢印画像202dがシアンによって描かれる。また、操作アイコン202には、円内を各矢印画像に対応する電流方向の角度範囲に区切るライ

ン 2 0 3 が描かれている。

[0051] コンピュータ 2 4 は、入力装置 2 6 からの入力（例えばマウスによる操作や、回転角度の入力）があった場合に、入力された操作に応じて操作アイコン 2 0 2 を回転表示する。そして、コンピュータ 2 4 は、入力された操作に対応するように、電流方向と色との対応関係を変更する。例えば、初期状態が図 1 2（a）に示す対応関係の場合に、マウスの操作によって、操作アイコン 2 0 2 が右回りに 9 0 度（ $-\pi/2$ ）回転されたとする。この場合、図 1 2（b）に示されるように、テーブルは、角度テーブルに対して色テーブルが -90 度分ずれた状態に更新される。そして、コンピュータ 2 4 は、更新されたテーブルを参照して電流方向像を生成する。これにより、表示装置 2 5 には、更新された配色に変更された電流像 2 0 1 が表示される。操作アイコン 2 0 2 の回転操作は、表示装置 2 5 に電流強度像や電流方向像が表示されている状態で行われてもよい。また、入力装置 2 6 からの入力によって、電流像 2 0 1 を回転させてもよい。この場合、電流像 2 0 1 の回転角度に応じて、テーブルが更新されてもよい。例えば、電流像 2 0 1 が左回りに 9 0 度回転されると、図 1 2（b）に示されるテーブルに更新される。

[0052] 次に、電流方向像及び電流強度像の生成に関する変形例について説明する。上述した実施形態における電流方向像及び電流強度像の生成方法に代えて、以下の変形例における方法を利用することができる。また、本実施形態では、本明細書において例示する方法のみならず、他の方法によって生成される電流方向像及び電流強度像によって、電流像が生成され得る。

[0053] [電流方向像の生成に係る変形例 1]

位相像における位相値は、参照画素の電流方向に対して参照画素の右側で負の値をとり、参照画素の左側で正の値をとる。そこで、位相像における正の位相値から負の位相値の向きに対する勾配ベクトルを求めて、勾配ベクトルを 9 0 度回転させることによって、電流方向像を求めることができる。図 1 6（a）に示されるように、この変形例では、位相像 P が所定の大きさの窓領域 W によってスキャンされる。そして、窓領域 W の範囲内において、窓

領域の中心（参照画素）における電流方向が算出される。窓領域W内では、図16（b）に示されるように、窓領域Wが左右で半分に分割され、左右の勾配ベクトルが算出される。左半分の位相値の合計をLとし、右半分の位相値の合計をRとした場合、勾配xは、式（10）によって求められる。

[数10]

$$x = R - L \cdot \cdot \cdot (10)$$

[0054] また、図16（c）に示されるように、窓領域Wが上下で半分に分割され、上下の勾配ベクトルが算出される。上半分の位相値の合計をTとし、下半分の位相値の合計をBとした場合、勾配yは、式（11）によって求められる。

[数11]

$$y = B - T \cdot \cdot \cdot (11)$$

[0055] そして、式（10）及び式（11）から二次元の勾配ベクトル（x、y）が得られる。本変形例では、算出される電流方向像の精度を高めるために、さらに斜め方向についても演算を行う。

[0056] 図16（d）に示されるように、窓領域Wが左上と右下とで半分に分割され、左上から右下に向かう勾配ベクトルが算出される。左上半分の位相値の合計をLTとし、右下半分の位相値の合計をRBとした場合、勾配uは、式（12）によって求められる。

[数12]

$$u = RB - LT \cdot \cdot \cdot (12)$$

[0057] また、図16（e）に示されるように、窓領域Wが左下と右上とで半分に分割され、左下から右上に向かう勾配ベクトルが算出される。左下半分の位相値の合計をLBとし、右上半分の位相値の合計をRTとした場合、勾配vは、式（13）によって求められる。

[数13]

$$v = LB - RT \cdot \cdot \cdot (13)$$

[0058] そして、式（12）及び式（13）から二次元の勾配ベクトル（u、v）

が得られる。この勾配ベクトル (u, v) を 45 度回転させることによって、二次元の勾配ベクトル (u', v') が得られる。この二次元の勾配ベクトル (u', v') と二次元の勾配ベクトル (x, y) とによって、参照画素における勾配ベクトル $(x + u', y + v')$ が得られる。

[0059] そして、この勾配ベクトル $(x + u', y + v')$ を、式 (7) のように計算する。勾配ベクトルは、電流方向と 90 度のずれがあるため、電流方向は式 (14) によって求められる。求められた電流方向を参照画素ごとにプロットすることによって、電流方向像を得ることができる。

[数14]

$$\tan^{-1} \left(\frac{y+v'}{x+u'} \right) \pm \frac{\pi}{2} \cdots (14)$$

[0060] [電流強度像の生成に係る変形例 1]

この変形例では、上記の実施形態と同様に、ビオ・サバールの法則に基づいて電流強度像が生成される。上記実施形態と異なり、この変形例では、式 (4) を用いない代わりに、勾配法による残差の最小化が行われる。すなわち、ビオ・サバールの法則から導かれる数式に対して、適当な電流密度 J_x , J_y の値を代入し、磁束密度を算出する。この算出された磁束密度を実際の値と比較し、その差が最小になる電流密度 J_x , J_y を求める。勾配法としては、最急降下法、共役勾配法等を用いることができる。以下、具体的な方法について説明する。

[0061] まず、半導体デバイス D の計測によって得られた振幅像及び位相像から、ビオ・サバールの法則を適用可能な振幅像（以下、「振幅像改 b」とする）が生成される。参照画素 $p = (x, y)$ における振幅値を a_p とし、参照画素 $p = (x, y)$ における位相値を θ_p とすると、参照画素 p における振幅像改 b_p は、式 (15) によって得られる。

[数15]

$$b_p = a_p \cos(\theta_p + \alpha) \cdots (15)$$

[0062] また、上述した「電流方向像の生成に係る変形例 1」によって得られる電

流の方向を ϕ として、参照画素 p における電流方向を ϕ_p とする。そして、参照画素 p における電流密度の振幅像を q_p とにおいて、 $q_p = 1.0$ で初期化する。

[0063] そして、総和によって示されるビオ・サバルの法則（式（16））と、式（17）、（18）によって示される電流密度 J_x 、 J_y とにより、適当な窓領域でコンボリューション（畳み込み）を行う。

[数16]

$$B_z(x, y) = \sum_{y'} \sum_{x'} \frac{J_x(x', y') \cdot (y - y') - J_y(x', y') \cdot (x - x')}{((x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2)^{3/2}} \cdot \dots \quad (16)$$

[数17]

$$J_x(p = (x', y')) = q_p \cos \phi_p \cdot \dots \quad (17)$$

[数18]

$$J_y(p = (x', y')) = q_p \sin \phi_p \cdot \dots \quad (18)$$

[0064] この操作をAとすれば、逆行列問題に帰着できる。すなわち、式（19）における q を求めることによって電流強度を得ることができる。そして、求められた q の絶対値を、参照画素における電流強度像データとして、プロットすることによって、電流強度像を得ることができる。図17に示されるように、この電流強度像では、上述の実施形態と同様に、電流の強度（電流密度）が高いほど白に近く描かれる。また、図18は、本変形例と、上述した電流方向像の生成に係る変形例1とによって合成された電流像である。この電流像では、図14に示される電流像と同様に、上下方向に流れる電流（シアン、黄）と、左右方向に流れる電流（赤、緑）とが確認できる。

[数19]

$$Aq = b \cdot \dots \quad (19)$$

[0065] [電流強度像の生成に係る変形例2]

この変形例では、ビオ・サバルの法則による磁束密度の空間分布に基づいて電流強度像が生成される。図19（a）に示されるように、磁束密度の空間分布によれば、電流の流れている位置の直上において磁束密度が0であ

り、電流の流れている位置の周辺（近傍）において極大値及び極小値が形成される。磁束密度の観測によって得られる振幅像では、磁束密度が絶対値によって得られる。この場合、電流が流れている位置における電流密度を、近傍における極大値の値を A_{max} すると、参照画素 R における電流密度は、極大値 A_{max} と参照画素 R の振幅値との差となる。そこで、この変形例では、図 20 に示すように振幅像 A が所定の大きさの窓領域 W によってスキャンされる。そして、参照画素 R （窓領域 W の中心）での振幅値と窓領域 W 内の最大の振幅値（ A_{max} ）との差の絶対値が、参照画素における電流強度となる。得られた値を参照画素における電流強度像データとして、プロットすることによって、電流強度像を得ることができる。図 21 に示されるように、この電流強度像では、上述の実施形態と同様に、電流の強度（電流密度）が高いほど白に近く描かれる。

[0066] 上記した実施形態及び各変形例における振幅像、位相像、電流強度像、電流方向像及び電流像を生成する各処理は、例えば画像生成プログラム $P1$ を用いてコンピュータ 24 に実行させることができる。図 22 に示されるように、画像生成プログラム $P1$ は、記録媒体 50 におけるプログラム記録領域に記録されている。記録媒体 50 は、例えば $CD-ROM$ 、 DVD 、 ROM 等の記録媒体又は半導体メモリによって構成されている。画像生成プログラム $P1$ は、メインモジュール $M1$ と、振幅像データ生成モジュール $M2$ と、位相像データ生成モジュール $M3$ と、電流強度像データ生成モジュール $M4$ と、電流方向像データ生成モジュール $M5$ と、電流像データ生成モジュール $M6$ とを備えている。

[0067] メインモジュール $M1$ は、画像生成処理を統括的に制御する部分であり、コンピュータ 24 に振幅像データ生成モジュール $M2$ 、位相像データ生成モジュール $M3$ 、電流強度像データ生成モジュール $M4$ 、電流方向像データ生成モジュール $M5$ 及び電流像データ生成モジュール $M6$ を実行させる。振幅像データ生成モジュール $M2$ を実行することにより、コンピュータ 24 は、振幅像（振幅像データ）を生成するための振幅像データ生成部として機能す

る。また、位相像データ生成モジュールM3を実行することにより、コンピュータ24は、位相像（位相像データ）を生成するための位相像データ生成部として機能する。電流強度像データ生成モジュールM4を実行することにより、コンピュータ24は、電流強度像（電流強度像データ）を生成するための電流強度像データ生成部として機能する。電流方向像データ生成モジュールM5を実行することにより、コンピュータ24は、電流方向像（電流方向像データ）を生成するための電流方向像データ生成部（画像生成部）として機能する。電流像データ生成モジュールM6を実行することにより、コンピュータ24は、電流像（電流像データ）を生成するための電流像データ生成部（画像生成部）として機能する。なお、画像生成プログラムP1は、搬送波に重畳されたコンピュータデータ信号として通信ネットワークを介して提供されてもよい。

[0068] 以上説明した画像生成方法（画像生成装置1）では、半導体デバイスDに印加された刺激信号によって磁気が発生する。そして、刺激信号に基づいて生成される参照信号と、磁気に基づく検出信号との位相差に基づいて、位相差を示す位相成分を含んだ位相像データが生成される。位相差は磁場の方向によって変化するため、位相像データは磁場の方向の情報を含むことになる。磁場の方向は、電流の方向によって決まるため、位相像データに基づいて、電流の方向を判定することが可能となる。これにより、判定された電流の方向を用いて、電流の方向を示す画像を生成することができる。

[0069] また、電流方向像は、方向に応じて設定（配色）された複数の色によって、電流の方向が示されるので、電流の位置と方向とを視覚的に容易に把握することができる。また、複数の色は、電流の方向に対応して区分された4つの角度範囲（90度）に対してそれぞれ設定された（割り当てられた）異なる色（赤、黄、緑、シアン）を有している。半導体デバイスDにおける電流経路は、平面視において直交するように、X軸方向及びY軸方向に設計されることが多い。この場合、電流の方向は、X方向、-X方向、Y方向及び-Y方向の4つとなる。そのため、異なる4色を有することで、これらの4つ

の方向を識別しやすくなる。

[0070] また、電流方向像を生成するステップでは、電流の方向と複数の色との対応関係を変更することができる。上記実施形態では、コンピュータ 24 は、4 色の色データをもつ色テーブルと、4 つの異なる角度範囲に区分された角度範囲のデータをもつ角度テーブルと、を有する。そして、色テーブルと角度テーブルとの対応関係が変更可能となっている。この構成によれば、容易に配色の調整を行うことができる。また、色テーブルと角度テーブルとの対応関係を任意にずらすことによって、得られた画像の向きが傾いている場合でも、傾きに応じて配色の調整が可能となる。

[0071] また、検出信号から生成された、磁気の強度を示す強度像データに対して位相像データに基づく磁気方向のデータが付加されたデータを生成し、当該データに基づいて電流の強度を示す電流強度像を生成する。そして、電流強度像と電流方向像とに基づいて電流の強度及び方向を示す電流像を生成する。磁気の強度は電流の大きさに対応している。そのため、強度像データ（電流強度像）に対して磁気方向のデータ（電流方向像）を付加することによって、電流の大きさ及び方向を画像として表現することができる。

[0072] 以上、本発明の実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではない。

[0073] 例えば、参照信号はテストユニット 11 から出力されるとして説明したがこれに限定されず、半導体デバイス D から出力されてもよい。この場合、半導体デバイス D は、デバイス制御ケーブルを介して周波数解析部 12 に直接接続されていてもよい。また、参照信号は半導体デバイス D からテストユニット 11 を経由して周波数解析部 12 に入力されてもよい。刺激信号を印加された半導体デバイス D から、当該刺激信号に応じた参照信号が出力され、当該参照信号が周波数解析部 12 に入力される。

[0074] また、4 つの異なる色が 4 つの異なる角度範囲に対応している配色の例を示したが、これに限定されない。色は、4 色未満や、5 色以上であってもよい。また、区切られる角度範囲が、色によって異なってもよい。例えば

、それぞれ90度の範囲をもつ3色と、それぞれ30度の範囲をもつ3色との、6色によって配色されてもよい。また、電流方向を示す角度と色との関係は、色相環のようにグラデーション状として設定されてもよい。また、角度と配色との関係は、入力手段によって自由に変更可能であってよい。

[0075] また、色によって方向を示す例を示したが、これに限定されない。例えば、得られた電流強度像に対して、電流方向を示す矢印をプロットしてもよい。この場合、同じ電流方向をもつ隣接領域ごとに、矢印をプロットする構成であってもよい。また、所定の大きさ以上の電流密度の領域のみに対して矢印をプロットする構成であってもよく、矢印のサイズを電流強度の大小に対応させるようにしてもよい。また、例えば、色の代わりにディザパターンや幾何学的な模様によって電流方向を表現してもよい。

符号の説明

[0076] 1…画像生成装置、11…テストユニット（信号印加部）、13…光源、15…光スキャナ（照射光学系）、18…MO結晶（磁気光学結晶）、22…光検出器、24…コンピュータ（画像生成部）。

請求の範囲

- [請求項1] 半導体デバイスに流れる電流の方向を示す画像を生成する画像生成方法であって、
- 前記半導体デバイスに刺激信号を印加するステップと、
- 前記刺激信号の印加によって発生した磁気を検出し、検出信号を出力するステップと、
- 前記刺激信号に基づいて生成される参照信号と、前記検出信号との位相差に基づいて、前記位相差を示す位相成分を含んだ位相像データを生成するステップと、
- 前記位相像データに基づいて、電流の方向を示す電流方向像を生成するステップと、を含む画像生成方法。
- [請求項2] 前記電流方向像は、方向に応じて設定された複数の色によって、前記電流の方向が示される、請求項1に記載の画像生成方法。
- [請求項3] 前記複数の色は、少なくとも、電流の方向に対応して区分された4つの角度範囲に対してそれぞれ設定された異なる色を有している、請求項2に記載の画像生成方法。
- [請求項4] 前記電流方向像を生成するステップは、前記電流の方向と前記複数の色との対応関係を変更するステップを含む、請求項2又は3に記載の画像生成方法。
- [請求項5] 前記検出信号から生成された磁気の強度を示す強度像データに対して、前記位相像データに基づく磁気方向のデータを付加したデータを生成し、当該データに基づいて前記電流の強度を示す電流強度像を生成するステップをさらに含む、請求項1～4のいずれか一項に記載の画像生成方法。
- [請求項6] 前記電流強度像と前記電流方向像とに基づいて電流の強度及び方向を示す電流像を生成するステップをさらに含む、請求項5に記載の画像生成方法。
- [請求項7] 半導体デバイスに流れる電流の方向を示す画像を取得する画像生成

装置であって、

前記半導体デバイスに刺激信号を印加する信号印加部と、

前記刺激信号の印加によって発生した磁気に基づく検出信号を出力する磁気検出部と、

前記刺激信号に基づいて生成される参照信号と、前記検出信号との位相差に基づいて、前記位相差を示す位相成分を含んだ位相像データを生成し、前記位相像データに基づいて、前記電流の方向を示す電流方向像を生成するように構成される、画像生成部と、を備える画像生成装置。

[請求項8] 前記画像生成部は、方向に応じて設定された複数の色によって、前記電流の方向を示すように構成される、請求項7に記載の画像生成装置。

[請求項9] 前記複数の色は、少なくとも、電流の方向に対応して区分された4つの角度範囲に対してそれぞれ設定された異なる色を有している、請求項8に記載の画像生成装置。

[請求項10] 前記画像生成部は、前記複数の色のデータを含む色テーブルと、電流の方向に対応して区分された角度範囲のデータを含む角度テーブルと、を有し、

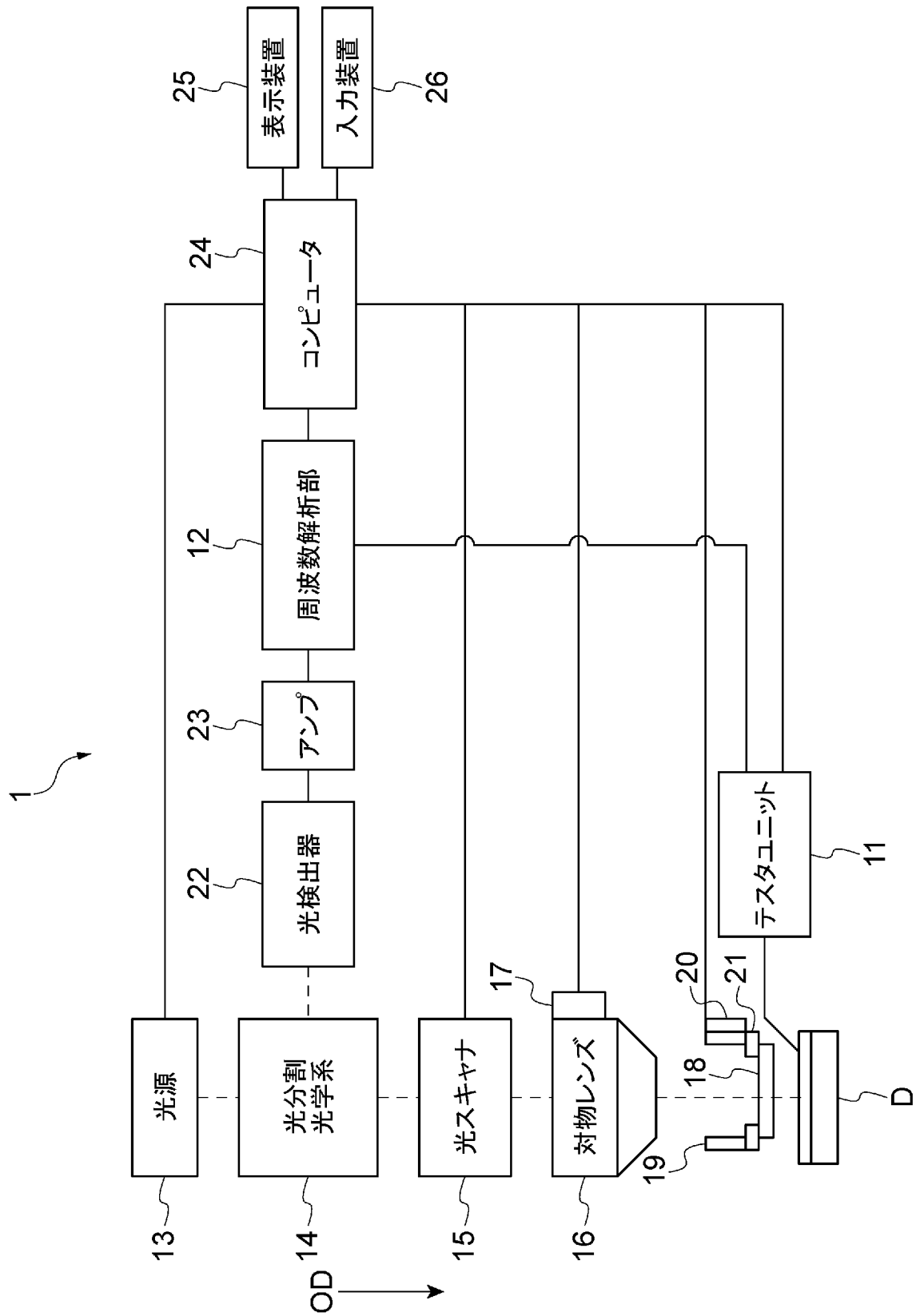
前記色テーブルと前記角度テーブルとの対応関係を変更可能に構成される、請求項8又は9に記載の画像生成装置。

[請求項11] 前記画像生成部は、前記検出信号から生成された磁気の強度を示す強度像データに対して、前記位相像データに基づく磁気方向のデータを付加したデータを生成し、当該データに基づいて電流の強度を示す電流強度像を生成するように構成される、請求項7～10のいずれか一項に記載の画像生成装置。

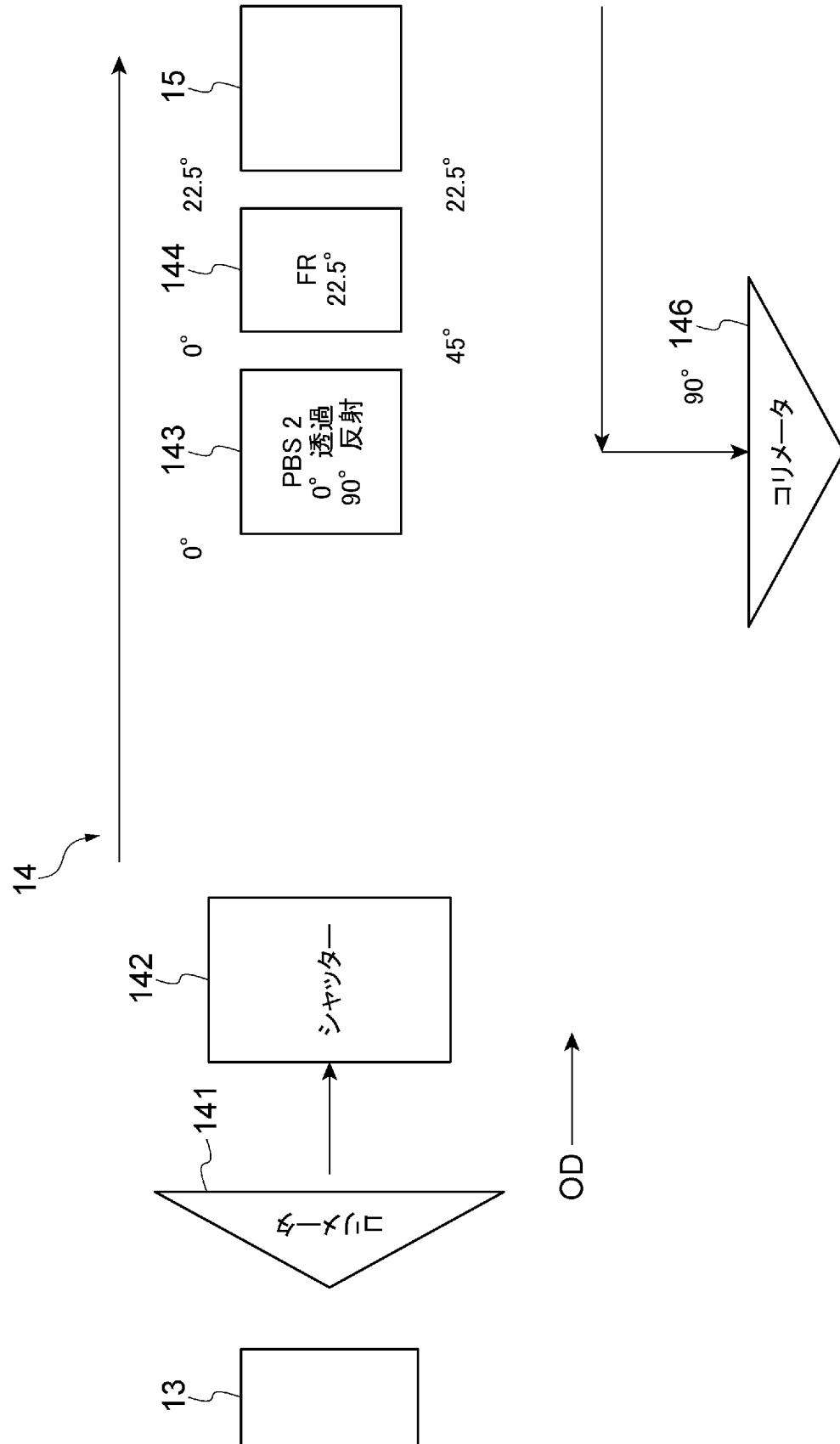
[請求項12] 前記画像生成部は、前記電流強度像と前記電流方向像とに基づいて電流の強度及び方向を示す電流像を生成するように構成される、請求項11に記載の画像生成装置。

- [請求項13] 前記磁気検出部は、光を発生する光源と、前記半導体デバイスに対向配置される磁気光学結晶と、光を前記磁気光学結晶に照射し、前記磁気光学結晶から反射された光を導光する照射光学系と、前記磁気光学結晶から反射された光を検出して、前記検出信号を出力する光検出器と、を有する、請求項7～12のいずれか一項に記載の画像生成装置。
- [請求項14] 半導体デバイスに対して刺激信号を印加することにより前記半導体デバイスに流れる電流の方向を示す画像を取得する処理をコンピュータに実行させるためのプログラムであって、
前記コンピュータを、
前記刺激信号の印加によって発生した磁気に基づく検出信号と、前記刺激信号に基づいて生成される参照信号との位相差に基づいて、前記位相差を示す位相成分を含んだ位相像データを生成する位相像データ生成部と、
前記位相像データに基づいて、前記電流の方向を示す電流方向像を生成する画像生成部として機能させる画像生成プログラム。
- [請求項15] 請求項14に記載の画像生成プログラムを記録するコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

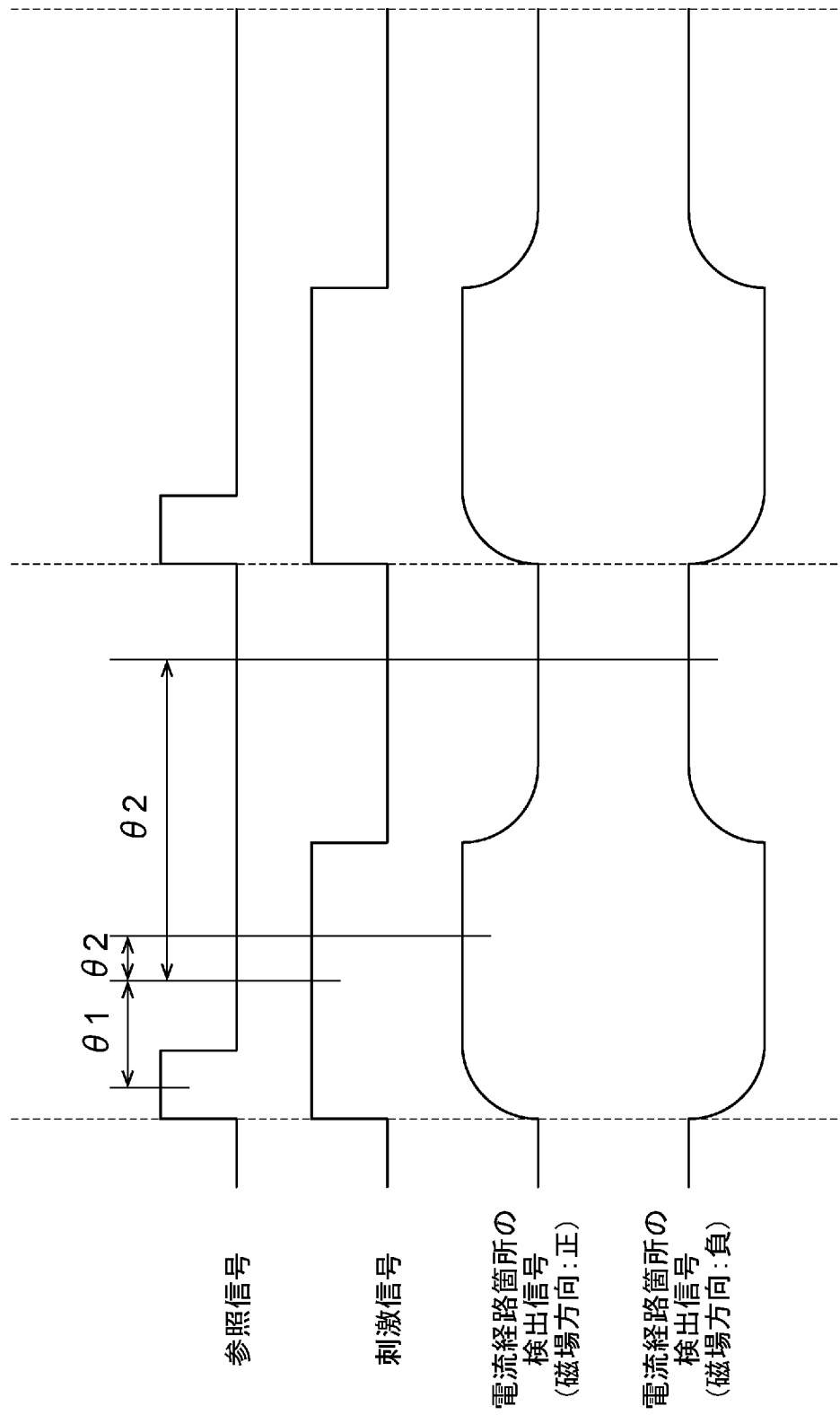
[図1]



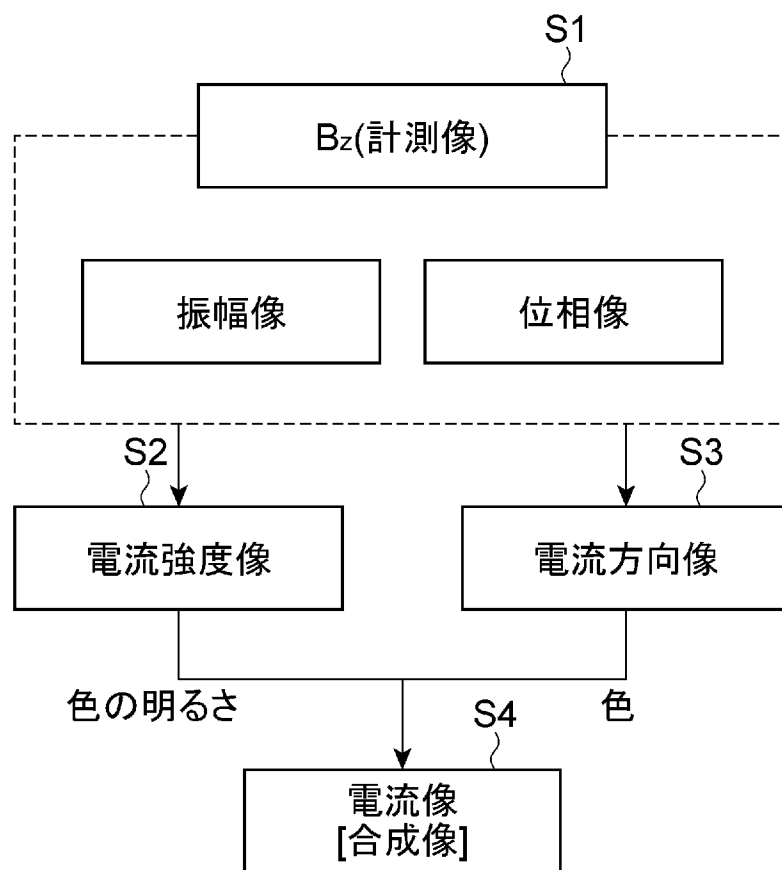
[図2]



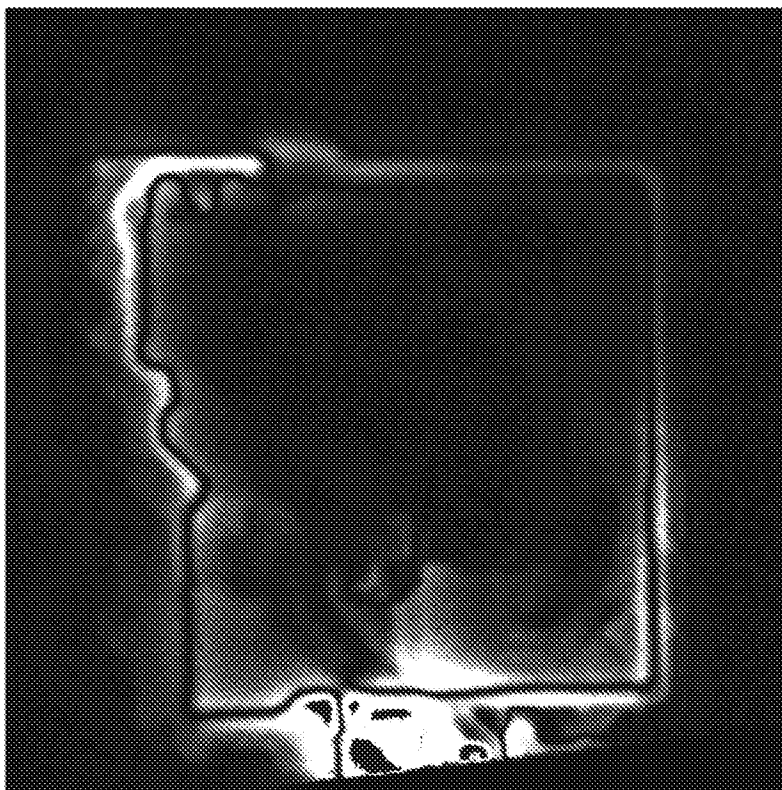
[図3]



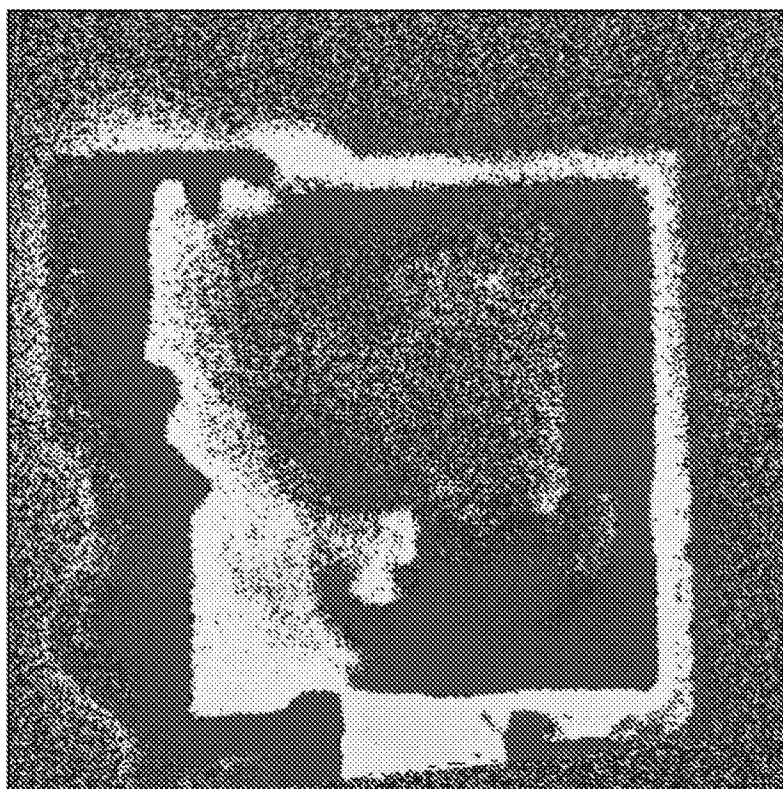
[図4]



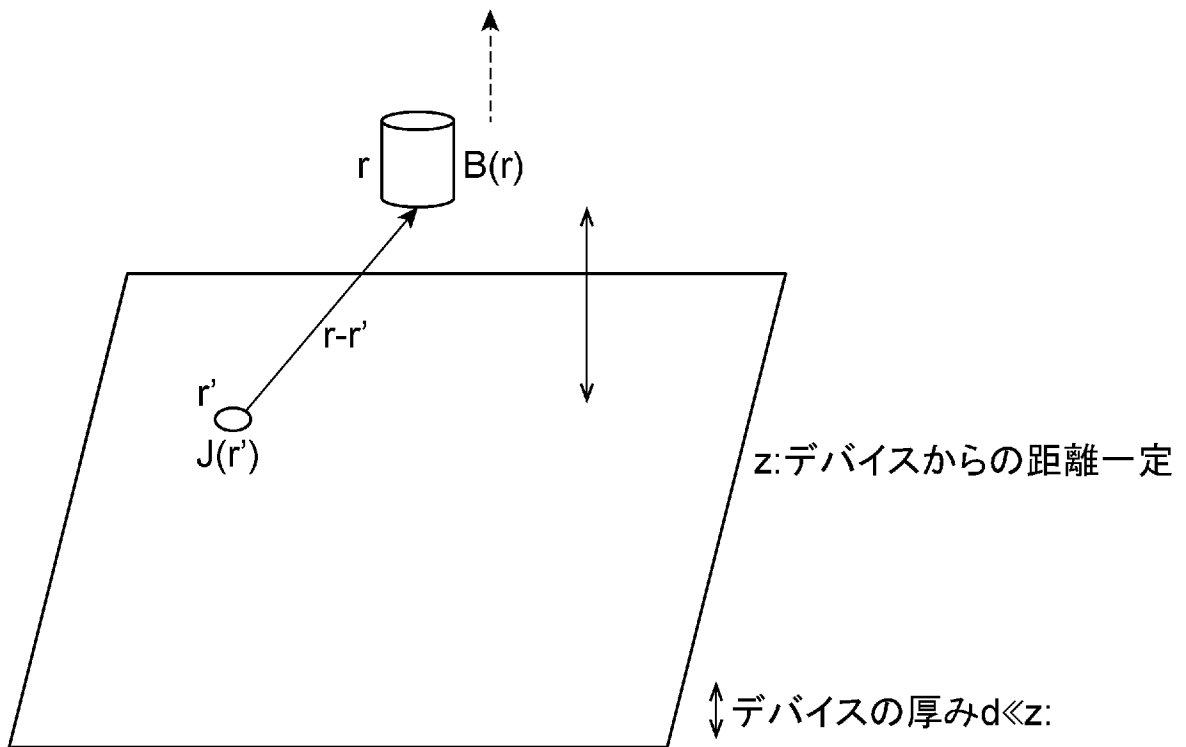
[図5]



[図6]

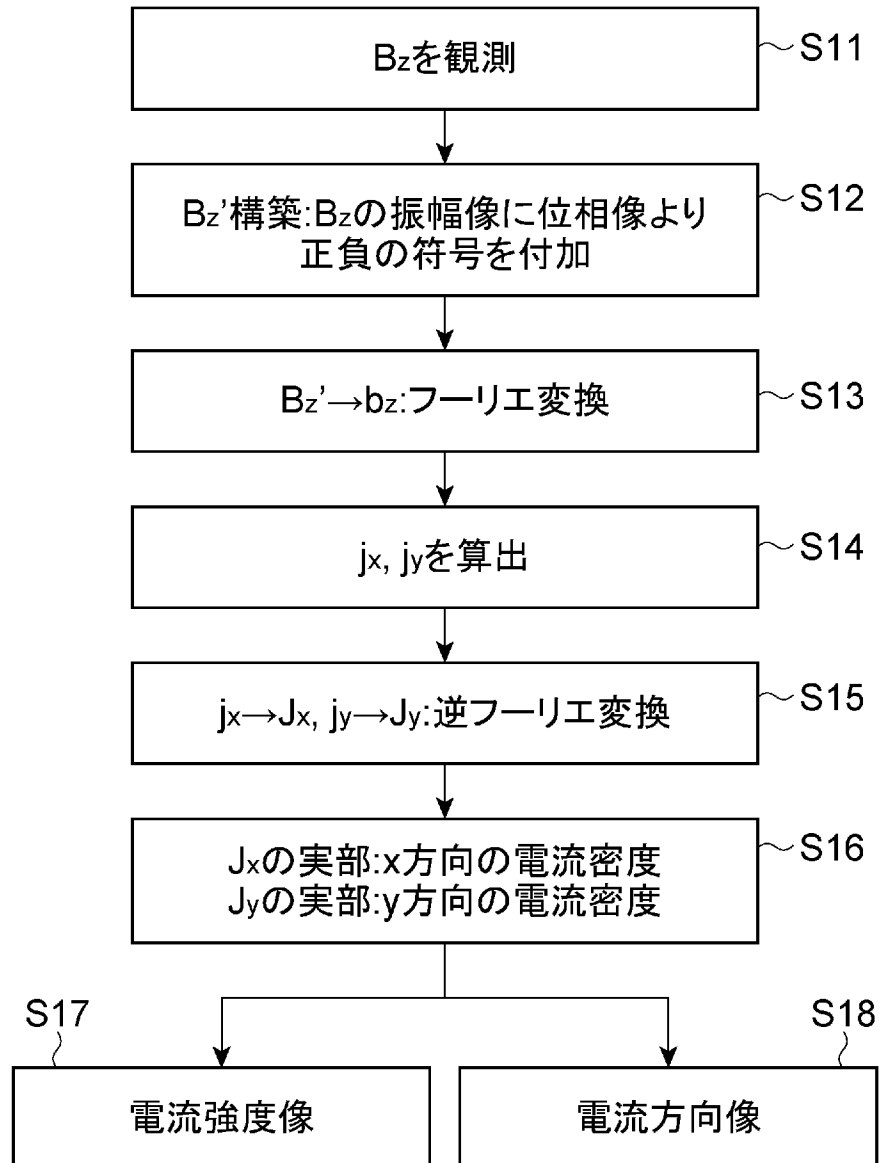


[図7]

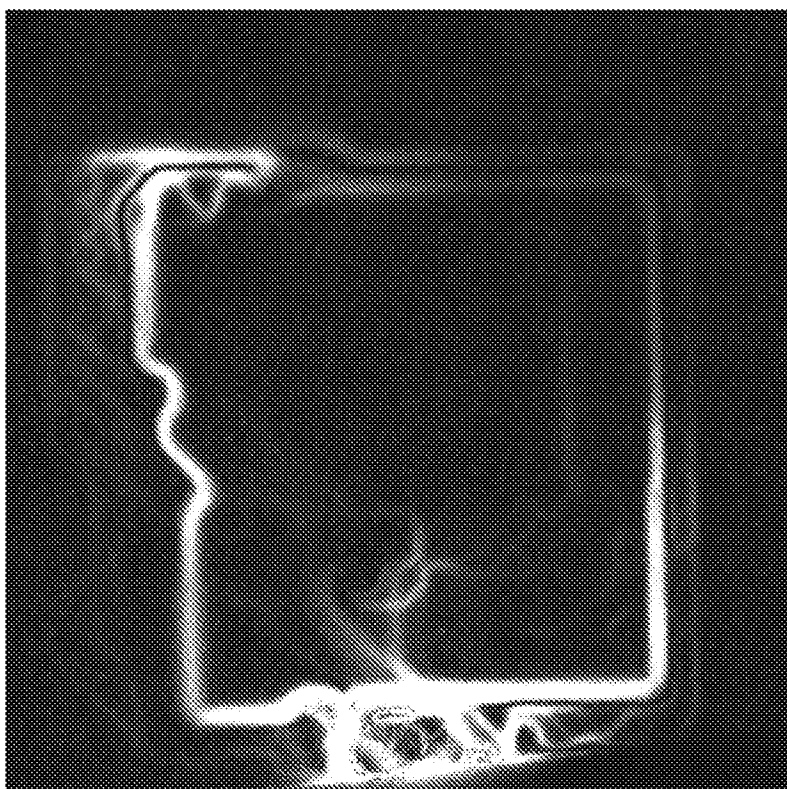


$$B(r) = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, J(r') = \begin{bmatrix} J_x(x', y') \\ J_y(x', y') \\ 0 \end{bmatrix}, r-r' = \begin{bmatrix} x-x' \\ y-y' \\ z \end{bmatrix}$$

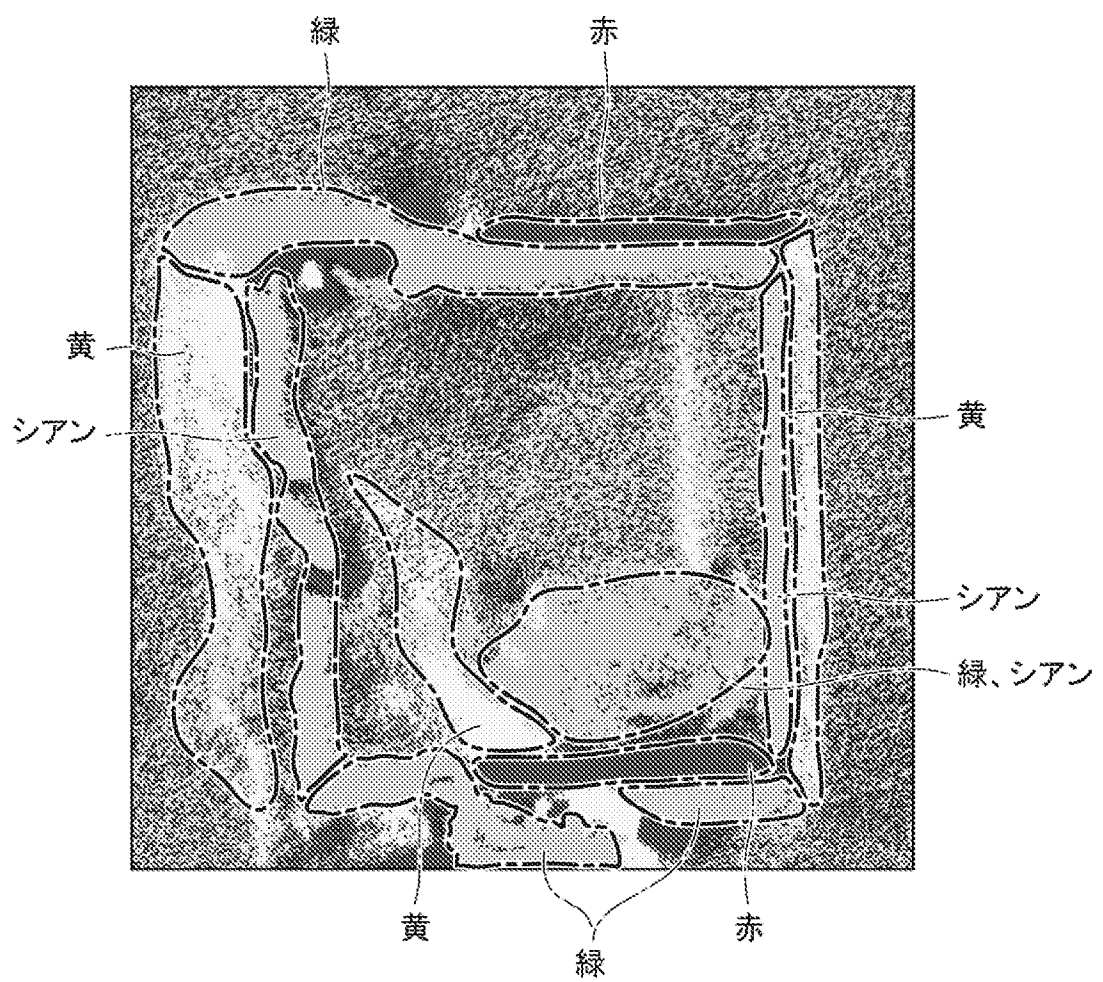
[図8]



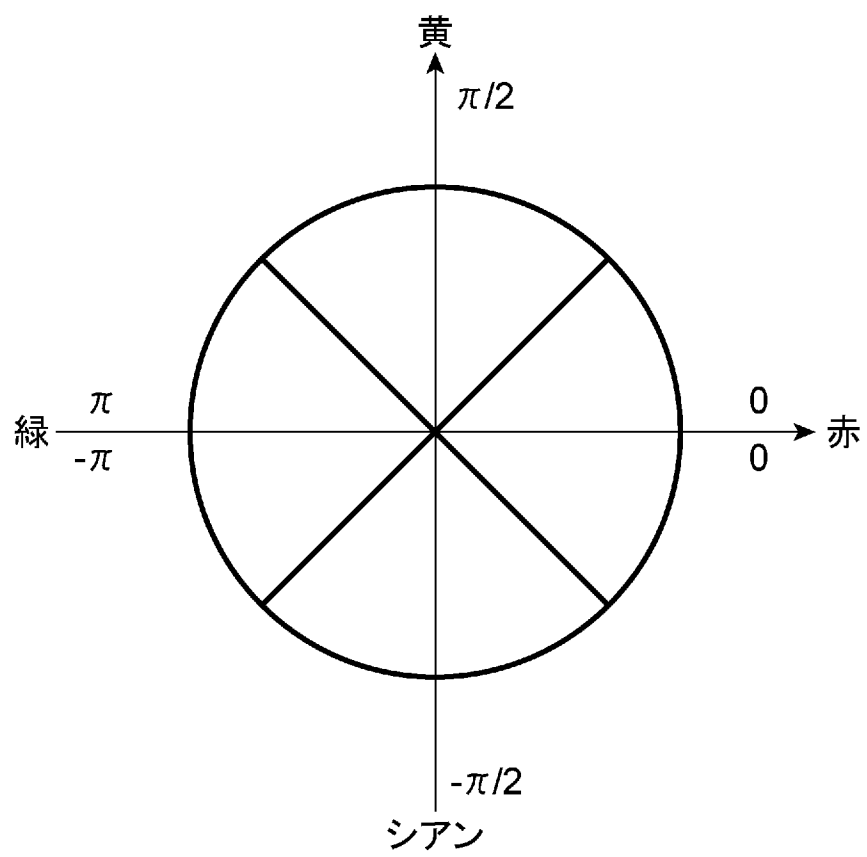
[図9]



[図10]



[図11]



[図12]

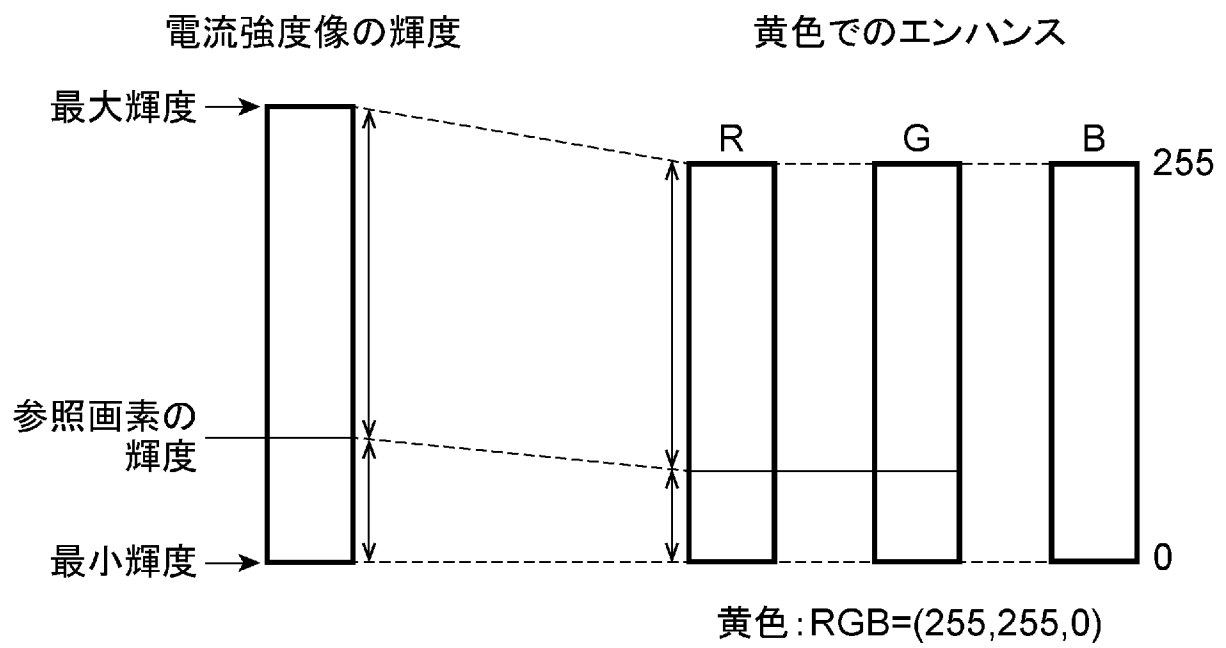
(a)

角度	色
π	緑
$5\pi/6$	緑
$2\pi/3$	黄
$\pi/2$	黄
$\pi/3$	黄
$\pi/6$	赤
0	赤
$-\pi/6$	赤
$-\pi/3$	シアン
$-\pi/2$	シアン
$-2\pi/3$	シアン
$-5\pi/6$	緑

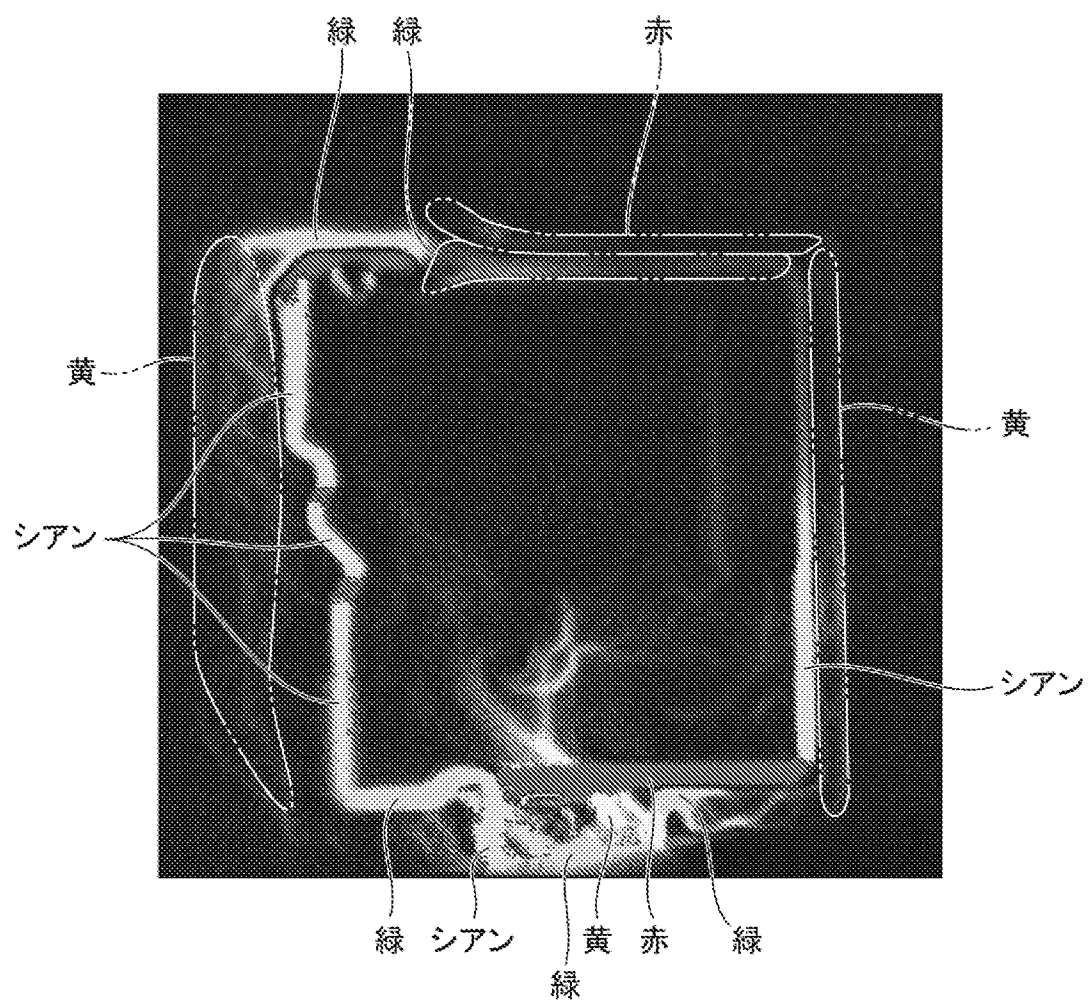
(b)

角度	色
π	シアン
$5\pi/6$	シアン
$2\pi/3$	緑
$\pi/2$	緑
$\pi/3$	緑
$\pi/6$	黄
0	黄
$-\pi/6$	黄
$-\pi/3$	赤
$-\pi/2$	赤
$-2\pi/3$	赤
$-5\pi/6$	シアン

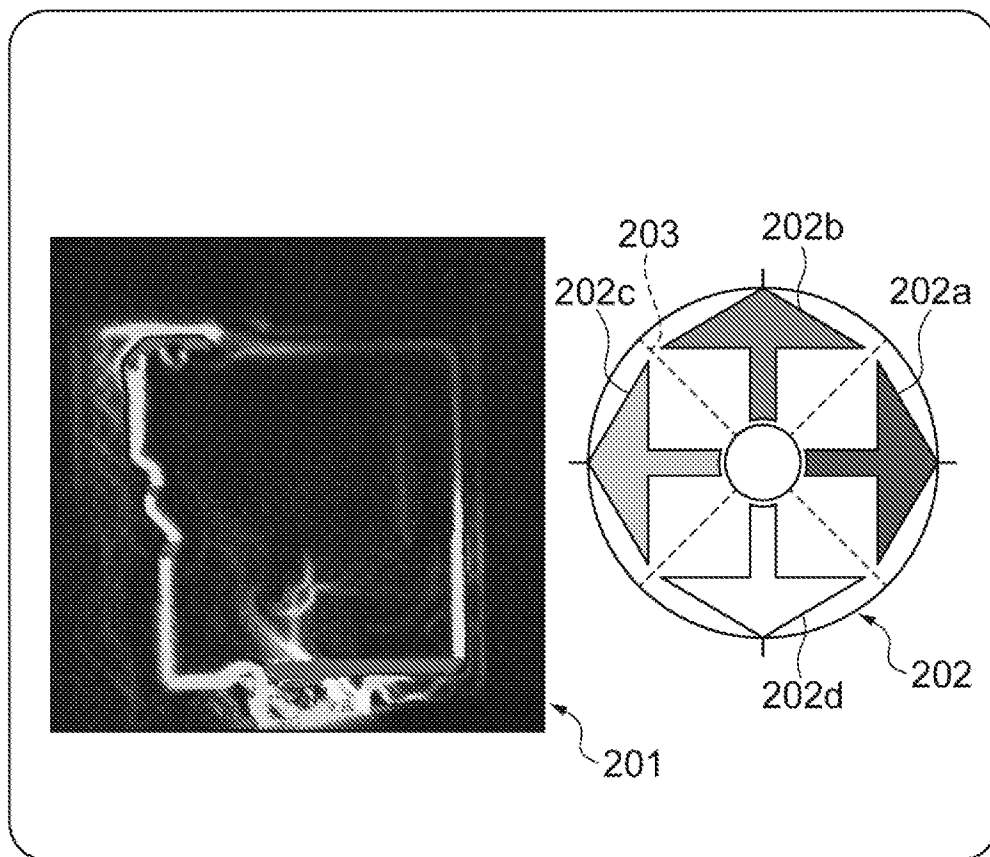
[図13]



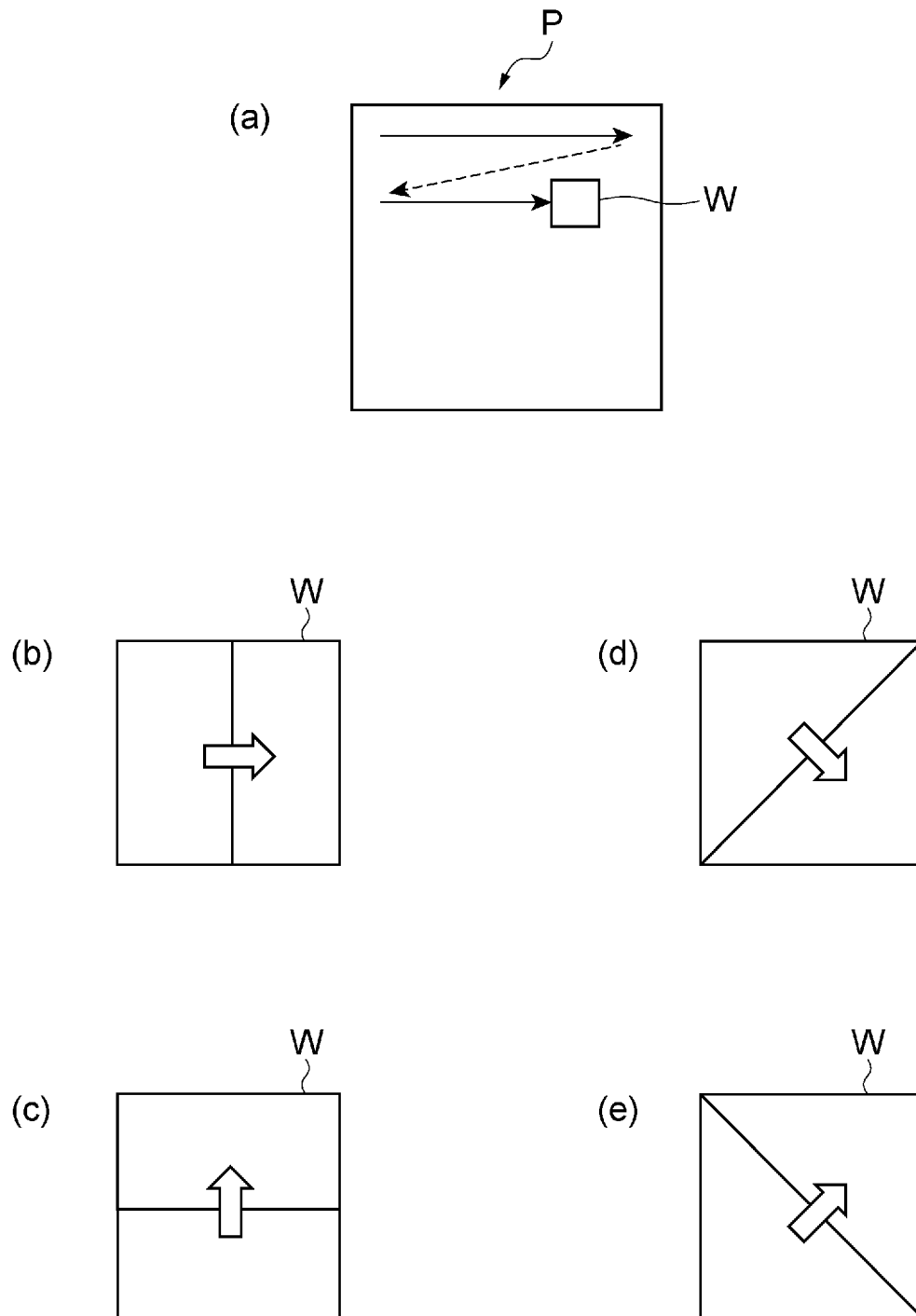
[図14]



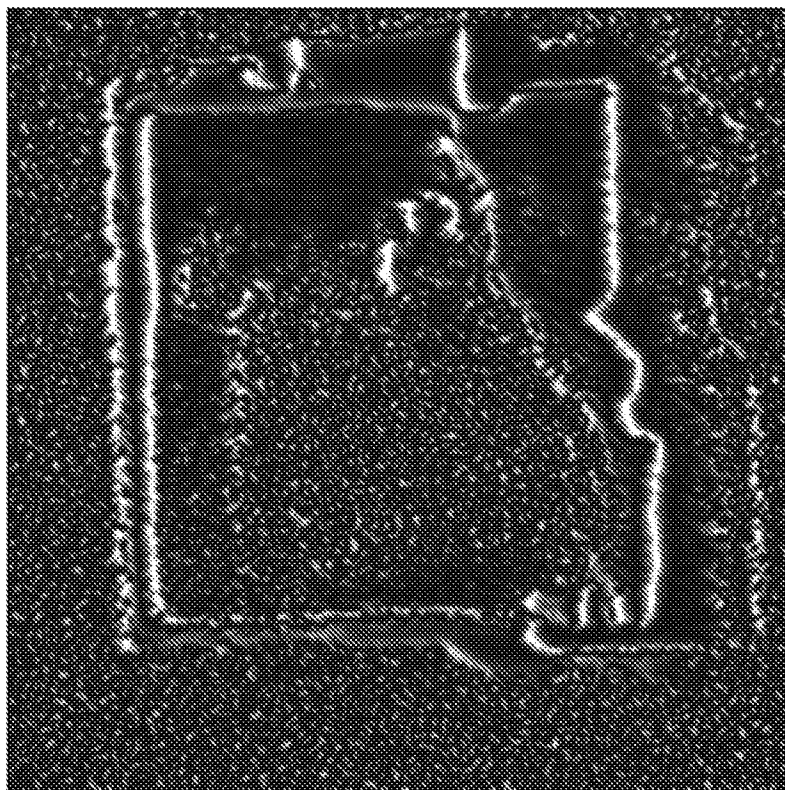
[図15]



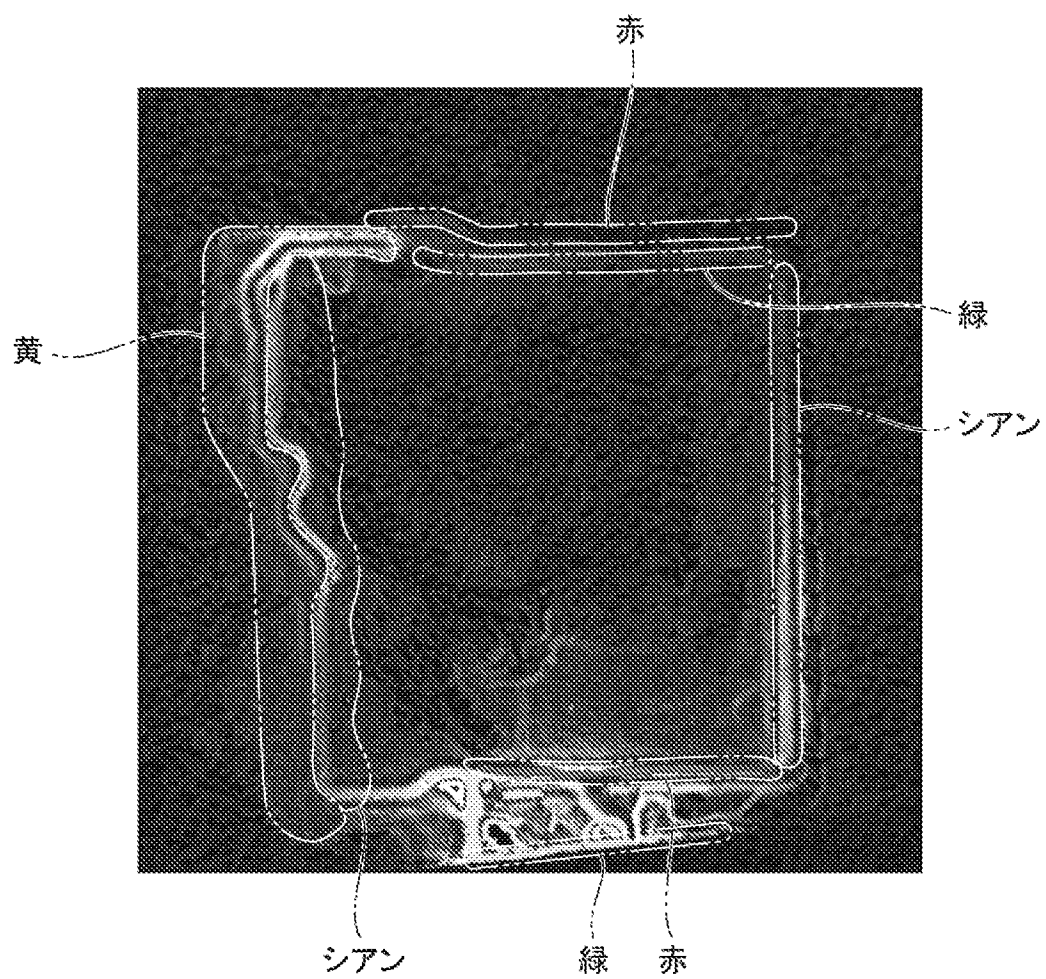
[図16]



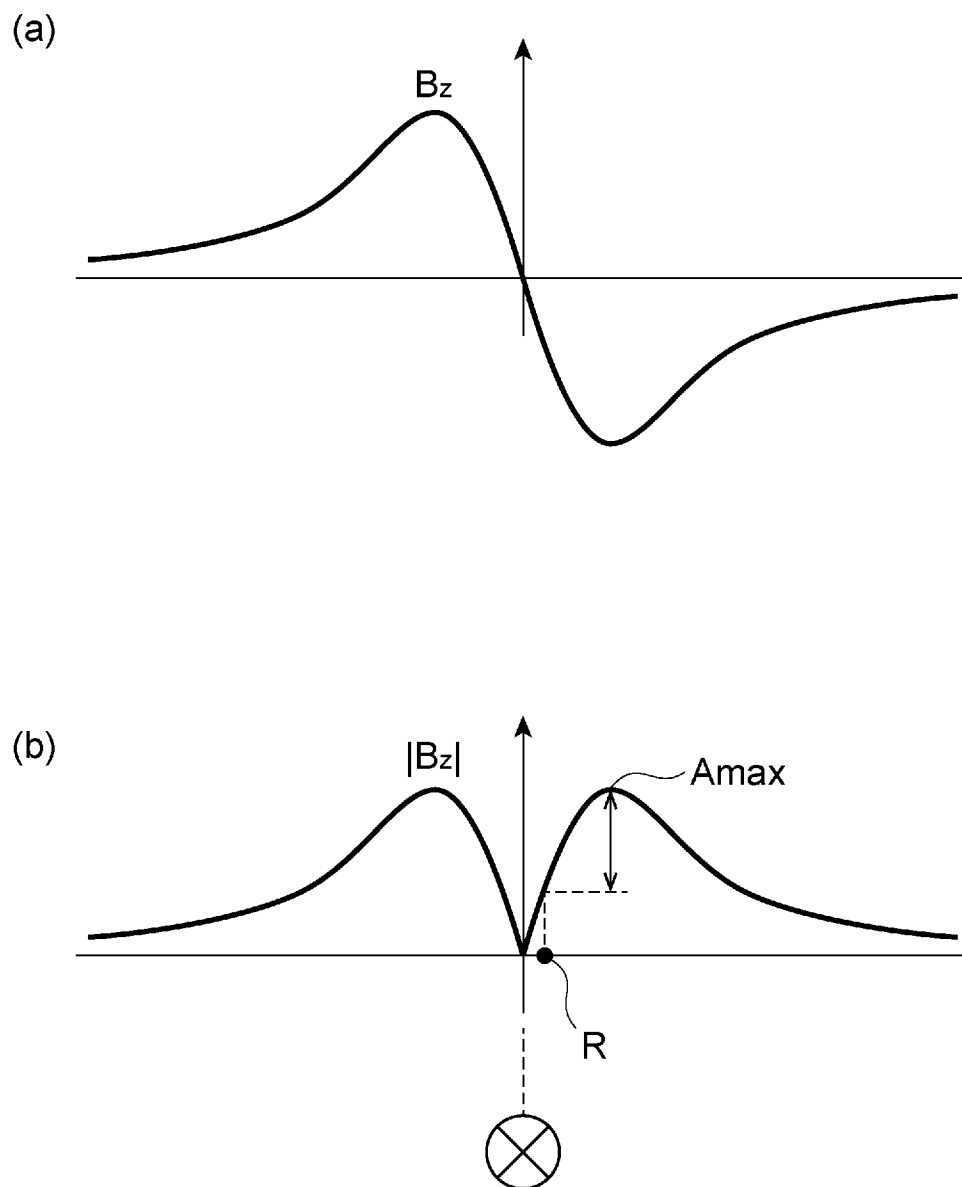
[図17]



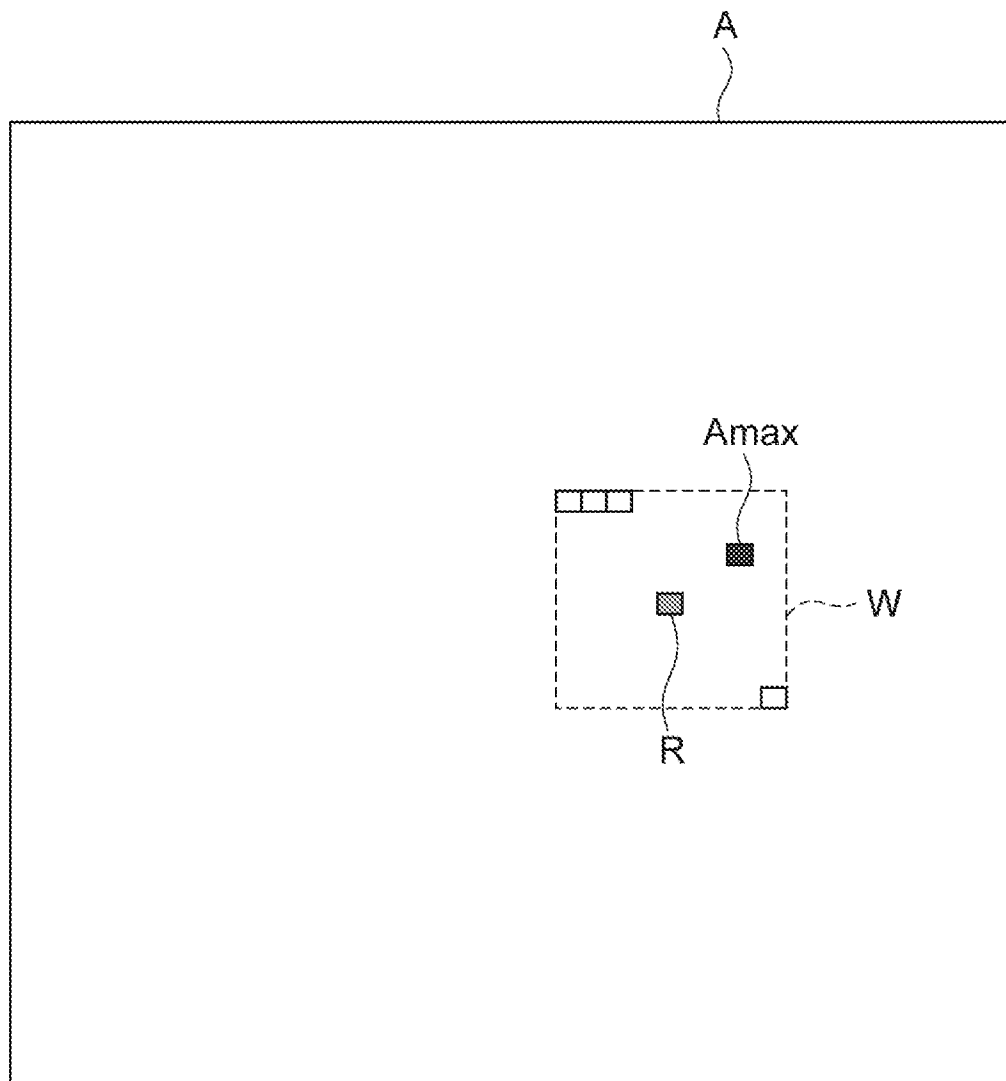
[図18]



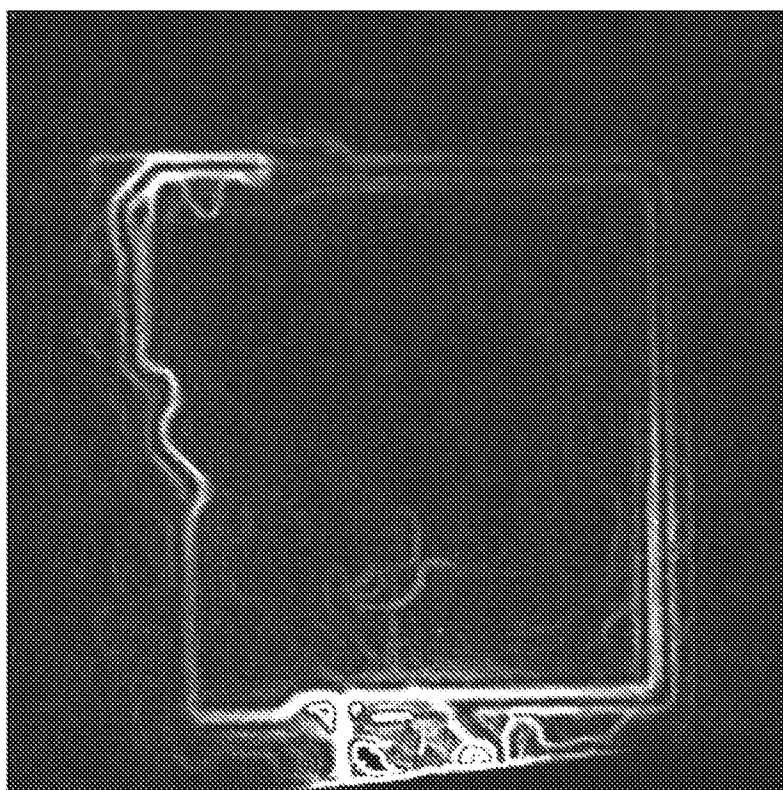
[図19]



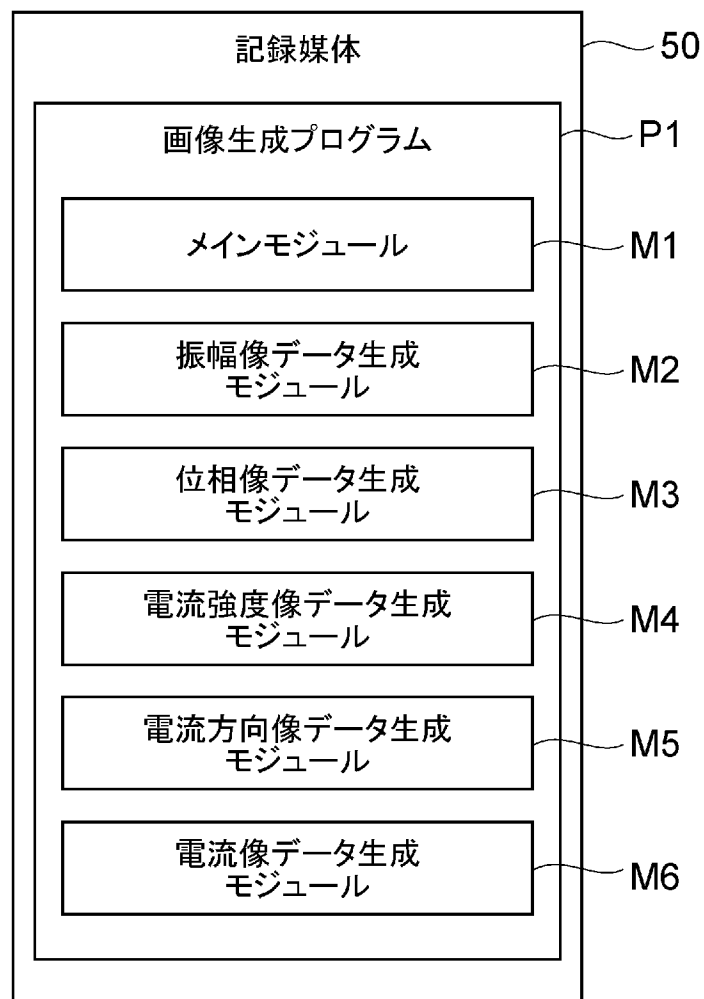
[図20]



[図21]



[図22]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/075983

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R19/14(2006.01)i, G01N21/21(2006.01)i, G01N27/72(2006.01)i, G01R31/26(2014.01)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)

G01R15/00, G01R19/00, G01R29/08, G01R31/02, G01R31/26, G01R31/28, G01R33/00-33/26, G01N21/21, G01N27/72

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	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 11-142453 A (Hitachi, Ltd.), 28 May 1999 (28.05.1999), paragraphs [0047] to [0054]; fig. 1 (Family: none)	1-15
Y	JP 2005-134169 A (Hitachi, Ltd.), 26 May 2005 (26.05.2005), paragraphs [0012], [0019] to [0020], [0034]; fig. 1, 8 (Family: none)	1-15
Y	WO 2005/022180 A1 (Aisin Seiki Co., Ltd.), 10 March 2005 (10.03.2005), description, page 10, lines 11 to 16; fig. 7 & US 2007/0018634 A1 paragraph [0061]; fig. 7 & EP 1679522 A1	5-6, 11-13

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"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

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
22 November 2016 (22.11.16)

Date of mailing of the international search report
06 December 2016 (06.12.16)

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/JP2016/075983

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	IWANAMI, Mizuki et al., Magnetic Near-Field Distribution Measurements over Fine Meander Circuit Patterns by Fiber-Optic Magneto-Optic Probe, 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003.08, Vol. 1, p. 347-352	13
A	ROTH, Bradley J. et al., Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution, Journal of Applied Physics, 1989.01, Vol. 65, No. 1, p. 361-372	1-15
A	JP 46-41157 B1 (Hitachi, Ltd.), 04 December 1971 (04.12.1971), column 6, lines 15 to 26; fig. 3 to 4 (Family: none)	1-15
A	US 6141093 A (ARGYLE, Bernell E.), 31 October 2000 (31.10.2000), column 8, line 22 to column 9, line 11; fig. 4 to 5 (Family: none)	1-15
A	JP 06-213976 A (International Business Machines Corp.), 05 August 1994 (05.08.1994), paragraphs [0001], [0011] to [0026]; fig. 1 to 5 & US 5451863 A column 3, line 52 to column 7, line 35; fig. 1 to 5 & EP 604721 A2	1-15
P,A	WO 2016/129458 A1 (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 18 August 2016 (18.08.2016), entire text; all drawings (Family: none)	1-15

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. G01R19/14(2006.01)i, G01N21/21(2006.01)i, G01N27/72(2006.01)i, G01R31/26(2014.01)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 (I P C))

Int.Cl. G01R15/00, G01R19/00, G01R29/08, G01R31/02, G01R31/26, G01R31/28, G01R33/00-33/26, G01N21/21, G01N27/72

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 6 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 6 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 6 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)

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
Y	JP 11-142453 A (株式会社日立製作所) 1999. 05. 28, 段落 0047-0054, 図 1 (ファミリーなし)	1-15
Y	JP 2005-134169 A (株式会社日立製作所) 2005. 05. 26, 段落 0012, 0019-0020, 0034, 図 1, 8 (ファミリーなし)	1-15
Y	WO 2005/022180 A1 (アイシン精機株式会社) 2005. 03. 10, 明細書第 10 頁第 11-16 行, 図 7 & US 2007/0018634 A1, 段落 0061, 図 7 & EP 1679522 A1	5-6, 11-13

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ 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

2 2 . 1 1 . 2 0 1 6

国際調査報告の発送日

0 6 . 1 2 . 2 0 1 6

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)
郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5
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)

荒井 誠

2 S

3 2 0 3

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 1 6

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
Y	IWANAMI, Mizuki et al., Magnetic Near-Field Distribution Measurements over Fine Meander Circuit Patterns by Fiber-Optic Magneto-Optic Probe, 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003.08, Vol. 1, p. 347-352	13
A	ROTH, Bradley J. et al., Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution, Journal of Applied Physics, 1989.01, Vol. 65, No. 1, p. 361-372	1-15
A	JP 46-41157 B1 (株式会社日立製作所) 1971.12.04, 第6欄第15-26行, 第3-4図 (ファミリーなし)	1-15
A	US 6141093 A (ARGYLE, Bernell E.) 2000.10.31, 第8欄第22行-第9欄11行, 図4-5 (ファミリーなし)	1-15
A	JP 06-213976 A (インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション) 1994.08.05, 段落0001, 0011-0026, 図1-5 & US 5451863 A, 第3欄第52行-第7欄35行, 図1-5 & EP 604721 A2	1-15
P, A	WO 2016/129458 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 2016.08.18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-15