

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7635493号
(P7635493)

(45)発行日 令和7年2月26日(2025.2.26)

(24)登録日 令和7年2月17日(2025.2.17)

(51)国際特許分類		F I	
G 0 1 N	23/20058(2018.01)	G 0 1 N	23/20058
G 0 1 N	23/2055(2018.01)	G 0 1 N	23/2055 3 1 0
G 0 1 N	23/2206(2018.01)	G 0 1 N	23/2206
G 0 1 N	23/2251(2018.01)	G 0 1 N	23/2251
G 0 1 N	23/205(2018.01)	G 0 1 N	23/205
請求項の数 12 外国語出願 (全17頁)			
(21)出願番号 特願2020-114612(P2020-114612)		(73)特許権者 501233536	
(22)出願日 令和2年7月2日(2020.7.2)		エフ イー アイ カンパニ	
(65)公開番号 特開2021-9148(P2021-9148A)		F E I C O M P A N Y	
(43)公開日 令和3年1月28日(2021.1.28)		アメリカ合衆国 オレゴン 9 7 1 2 4 -	
審査請求日 令和5年5月30日(2023.5.30)		5 7 9 3 ヒルズボロ ドーソン・クリー	
(31)優先権主張番号 16/460749		ク・ドライヴ 5 3 5 0 エヌイー	
(32)優先日 令和1年7月2日(2019.7.2)		(74)代理人 100107766	
(33)優先権主張国・地域又は機関 米国(US)		弁理士 伊東 忠重	
		(74)代理人 100070150	
		弁理士 伊東 忠彦	
		(74)代理人 100135079	
		弁理士 宮崎 修	
		(72)発明者 バヴェル, ステュスカル	
		アメリカ合衆国 9 7 1 2 4 - 5 7 9 3	
		オレゴン州, ヒルズボロ ノースイス	
		最終頁に続く	

(54)【発明の名称】 電子後方散乱回折パターンを取得するための方法およびシステム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

試料を画像化する方法であって、
荷電粒子ビームを関心領域（ R O I ）の複数の衝撃点に向け、前記複数の衝撃点から散乱した粒子を検出することにより信号を取得して、前記試料の前記 R O I を反復走査することと、
前記反復走査中に、前記複数の衝撃点の各衝撃点の前記信号の信号品質を算定し、前記 R O I の各単一走査後に各衝撃点の前記信号品質に基づいて前記 R O I の信号品質を更新することであって、衝撃点の前記信号品質は、前記衝撃点から構造情報を抽出するために取得した信号の品質を示すものであって、前記衝撃点から散乱した前記検出された粒子に基づいて算定される、更新することと、
前記 R O I の前記信号品質と閾値信号品質とを比較して、前記 R O I の前記信号品質が前記閾値信号品質よりも高い場合に前記 R O I の前記信号品質に応じて前記反復走査を終了することと、
前記反復走査中に検出された前記粒子に基づいて前記 R O I の構造画像を形成することと、を含む、方法。

【請求項 2】

前記構造画像の各画素は、前記複数の衝撃点のうちのある衝撃点に対応し、前記反復走査中に検出された前記粒子に基づいて前記 R O I の前記構造画像を形成することは、各衝撃点について、前記反復走査中に前記衝撃点から散乱した前記検出された粒子のすべてに

基づいて回折パターンを形成することと、対応する回折パターンに基づいて前記 R O I の前記構造画像の各画素値を判定することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記反復走査中の前記複数の衝撃点の各衝撃点の前記信号品質に基づいて、前記反復走査の走査パターンを調整することをさらに含む、請求項 1 または 2 に記載の方法。

【請求項 4】

各衝撃点の前記信号品質は、前記反復走査中に単調に向上する、請求項 1 ～ 3 のいずれかに記載の方法。

【請求項 5】

前記反復走査の各走査後に荷電粒子ビームのドリフトを補正することをさらに含む、請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載の方法。

【請求項 6】

前記複数の衝撃点から散乱した粒子を検出することは、検出器に衝突した各散乱粒子にตอบสนองして、前記衝突した散乱粒子のエネルギーまたはタイムスタンプ、および前記検出器上の前記衝突した散乱粒子の位置を記録することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

試料を画像化するためのシステムであって、
試料に向けて荷電粒子ビームを生成するための荷電粒子源と、
前記試料からの散乱粒子を検出するための検出器と、
非一時的媒体に格納されたコンピュータ可読命令を有するコントローラと、を備え、前記コントローラは、

荷電粒子ビームを R O I 内の複数の衝撃点に向け、前記複数の衝撃点の各衝撃点から散乱した粒子を検出することで信号を取得して第 1 の走査を実行し、

前記衝撃点から散乱した前記検出された粒子に基づいて、前記複数の衝撃点の各衝撃点の前記信号の信号品質を算定し、前記信号品質は、前記衝撃点から構造情報を抽出するために取得した信号の品質を示すものであり、

各衝撃点の前記信号品質に基づいて前記 R O I の信号品質を算定し、

前記 R O I の前記信号品質は閾値信号品質よりも低い場合に、

前記 R O I の前記信号品質を算定した後、前記荷電粒子ビームを前記 R O I 内の前記複数の衝撃点のうちの 1 つ以上に向けて、前記 R O I 内の前記複数の衝撃点のうちの前記 1 つ以上から散乱した粒子を検出することで第 2 の走査を実行し、かつ

前記第 1 の走査および前記第 2 の走査中に検出された前記粒子に基づいて前記 R O I の構造画像を形成するように構成されている、システム。

【請求項 8】

前記 R O I を含む前記試料の領域を画像化するための検出器をさらに備え、前記コントローラは、前記第 1 の走査の前に第 1 の試料画像を取得し、前記第 1 の走査と前記第 2 の走査との間に第 2 の試料画像を取得し、かつ前記第 2 の走査の前に、前記第 1 の試料画像と前記第 2 の試料画像とを比較して、荷電ビームのドリフトを補正するようにさらに構成されている、請求項 7 に記載のシステム。

【請求項 9】

前記コントローラは、前記第 1 の走査中に検出された粒子に基づいて第 1 の試料画像を形成し、前記第 2 の走査中に検出された前記粒子に基づいて第 2 の試料画像を形成し、かつ前記第 2 の走査の前に、荷電ビームのドリフトを補正するようにさらに構成されている、請求項 7 または 8 に記載のシステム。

【請求項 10】

前記第 1 の走査中の前記複数の衝撃点の各衝撃点における前記荷電粒子ビームの滞留時間は、100 マイクロ秒未満である、請求項 7 ～ 9 のいずれかに記載のシステム。

【請求項 11】

前記コントローラは、前記 R O I の更新された信号品質が前記閾値信号品質よりも高くなるまで、前記第 2 の走査中に前記複数の衝撃点のうちの前記 1 つ以上から散乱した前記

10

20

30

40

50

検出された粒子に基づいて各衝撃点の前記信号品質を更新し、かつ各衝撃点の前記更新された信号品質に基づいて前記 R O I の前記信号品質を更新するようにさらに構成されている、請求項 7 ~ 1 0 のいずれかに記載のシステム。

【請求項 1 2】

前記構造画像の各画素は、前記複数の衝撃点のうちのある衝撃点に対応し、前記衝撃点から散乱した前記検出された粒子に基づいて各衝撃点の前記信号品質を算定することは、前記検出器上における各検出された粒子の相対位置に基づいて、各衝撃点に対応する回折パターンを形成することと、構造情報を抽出するために、前記対応する回折パターンの品質に基づいて各衝撃点の前記信号品質を算定することを含む、請求項 7 ~ 1 1 のいずれかに記載のシステム。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本説明は、一般に、後方散乱電子を取得するための方法およびシステムに関し、より詳細には、データ駆動型電子後方散乱回折パターン取得に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

電子ビームなどの荷電粒子ビームを試料に照射すると、試料から様々な種類の放射物が発生する可能性がある。その中でも、後方散乱電子は、荷電粒子ビームと試料原子との間の弾性散乱相互作用によって試料の相互作用体積から反射または後方散乱する高エネルギー電子で構成される。後方散乱電子は、二次元電子後方散乱回折 (E B S D) パターンの形で検出器によって収集される。相互作用体積における結晶方位などの構造情報は、E B S D パターンの分析と解釈を通じて求めることができる。

20

【発明の概要】

【0 0 0 3】

一実施形態では、試料を画像化する方法は、荷電粒子ビームを R O I 内の複数の衝撃点に向け、複数の衝撃点の各衝撃点から散乱した粒子を検出することによって第 1 の走査を実行することと、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて複数の衝撃点の各衝撃点の信号品質を算定することと、各衝撃点の信号品質に基づいて R O I の信号品質を算定することと、R O I の信号品質は閾値信号品質よりも低い、算定することと、R O I の信号品質を算定した後、荷電粒子ビームを R O I 内の複数の衝撃点のうちの 1 つ以上に向け、R O I 内の複数の衝撃点のうちの 1 つ以上から散乱した粒子を検出することによって第 2 の走査を実行することと、第 1 の走査および第 2 の走査中に検出された粒子に基づいて R O I の構造画像を形成することを含む。このようにして、各衝撃点における荷電粒子ビームの滞留時間を短縮することができる。さらに、E B S D パターンの取得は、取得されたデータの品質に基づいて終了することができ、それによって、総データ取得時間および荷電粒子ビームによる試料損傷を低減することができる。

30

【0 0 0 4】

上記の概要は、発明を実施するための形態でさらに説明される概念の選択を簡略化した形で紹介するために提供されていることを理解されたい。特許請求される主題の主要なまたは本質的な特徴を特定することを意味するものではなく、その範囲は、発明を実施するための形態に続く特許請求の範囲によって一意に定義される。さらに、特許請求される主題は、上記または本開示の任意の部分で言及された任意の欠点を解決する実装に限定されない。

40

【図面の簡単な説明】

【0 0 0 5】

【図 1】例示的な実施形態による、電子後方散乱回折 (E B S D) パターン取得のための画像化システムを示す。

【図 2】E B S D パターンに基づいて構造画像を形成する手順の例を示す。

【図 3】データ駆動型の E B S D パターン取得に基づいて構造画像を形成する方法のフロ

50

ーチャートである。

【図 4 A - 4 F】時間の経過とともに形成される衝撃点の E B S D パターンである。

【図 5 A - 5 B】関心領域を画像化するための異なる走査パターンを示す。

【図 6】E B S D パターンを取得するための例示的なタイムラインを示す。

【0006】

同様の参照番号は、図面のいくつかの図を通して対応する部分を指す。

【発明を実施するための形態】

【0007】

以下の説明は、電子後方散乱回折 (E B S D) パターンを取得し、E B S D パターンに基づいて試料の構造画像を生成するシステムおよび方法に関する。E B S D パターンは、図 1 に示す画像化システムによって取得することができる。一例では、図 2 に示すように、E B S D パターンは、試料の衝撃点に衝突する荷電粒子ビームに反応して検出された散乱電子に基づいて生成される。E B S D パターンに基づいて、衝撃点における結晶方位情報などの構造情報を抽出することができ、構造情報は、構造画像の画素を形成する。関心領域 (R O I) を荷電粒子ビームで走査することにより、R O I の構造画像を生成することができる。

【0008】

従来、E B S D パターンは、平面蛍光体または直接電子検出器によって検出することができる。たとえば、滞留時間の間に衝撃点を照射した後、E B S D パターンのフレームが 2 次元マトリックス (すなわち、フレーム) として検出器から読み取られる。各 E B S D パターンを取得するための滞留時間は、0.1 ~ 100 ms の範囲とすることができる。滞留時間を長くすると、E B S D パターンの信号対雑音比が高くなるため、構造情報を確実に抽出できる。ただし、高輝度信号は検出器を飽和させる可能性がある。滞留時間が長いと、総データ取得時間も長くなり、試料に放射線損傷をもたらす可能性がある。E B S D パターン読み出しのフレームレートが 5000 fps であっても、R O I のすべての E B S D パターンの取得には数分かかる場合がある。さらに、荷電粒子ビームは、データ取得プロセス中にドリフトする可能性がある。構造画像の画素ごとのずれが不均一であるため、ビームのドリフトを補償することは困難な場合がある。さらに、E B S D パターン取得とともにエネルギー分散型 X 線分光法 (E D S) を実行すると、滞留時間が長い場合、E D S 検出器が飽和する可能性がある。

【0009】

上記の問題に対処するために、図 3 にデータ駆動型 E B S D パターン取得に基づいて試料の構造画像を生成する方法を示す。従来の単一フレーム読み出しの代わりに、各電子に関連するデータが、検出器に当たる電子に即座に反応して読み出される。試料の R O I は、R O I の信号品質が閾値レベルに達するまで、短い滞留時間で反復走査される。このようにして、単一走査中の R O I の各衝撃点における荷電粒子ビームの滞留時間は、単一フレーム読み出し方法と比較して 2 桁超短縮することができる。さらに、総データ取得時間は試料に依存するため、試料への放射線損傷をさらに減らすことができる。図 4 A ~ 4 F は、R O I の反復走査中に単一の衝撃点から散乱した粒子に基づいて生成された E B S D パターンの例を示す。衝撃点の信号品質 (この場合、E B S D の品質) は、時間の経過とともに向上する。R O I の各単一走査の走査パターンなどの画像化パラメータは、各衝撃点の信号品質に基づいて調整できる。図 5 A および 5 B は、同じ R O I の異なる単一走査のための R O I の走査パターンの例を示す。図 6 は、E B S D パターンを取得するためのタイムラインの例を示す。

【0010】

図 1 を参照して、走査型電子顕微鏡 (S E M) などの例示的な荷電粒子画像化システム 10 が、E B S D パターンを取得するために使用され得る。画像化システム 10 は、試料チャンバ 120 上に載置された電子ビームカラム 110 を含み得る。電子ビームカラム 110 は、放射軸 104 に沿って、たとえば 500 eV ~ 30 keV の選択可能なエネルギーを有するエネルギー電子のビームを生成するための電子源 102 を含む。電子ビームは

10

20

30

40

50

、レンズ（１０６、１０８、１１８）、偏向器（１１２、１１４）、およびビーム絞り開口（１１６）によって操作されて、試料１２６上に微細に集束されたスポットを形成し得る。

【００１１】

試料チャンバ１２０は、任意で、その内部に試料を導入し、試料を試料ホルダ１２４に配置するためのエアロック１２２を備えることができる。試料ホルダ１２４は、試料を回転させる、または並進する／ずらすことができ、それによって試料表面上のＲＯＩは、選択可能な傾斜角の下で微細に集束された電子ビームによって照射され得る。試料チャンバ１２０は、試料から放出された粒子を受け取るための１つ以上の検出器をさらに含む。検出器は、Ｘ線を検出するためのＥＤＳ検出器１４０、後方散乱電子を検出するためのＥＢＳＤ検出器（１２８または１３８）、および二次電子を検出するためのエバーハート・ソーンレー検出器１３０を含み得る。ＥＢＳＤ検出器は、位置敏感型検出器であってもよい。たとえば、検出器に衝突する単一の電子のイベントに対応して、衝突の時間、検出器上の相対的な衝撃位置、および電子のエネルギーなどのイベントに関するデータが、検出器からコントローラ１３２に送信されてもよい。一例では、ＥＢＳＤ検出器は画素化検出器である。電子ビームカラム１１０と試料チャンバ１２０の両方を高真空ポンプに接続して、囲まれた容積を真空にすることができる。

10

【００１２】

試料の様々な画像を取得するために、試料を放射軸１０４に対して異なる角度で配置してもよい。たとえば、ＳＥＭ画像は、入射ビームに面する試料１２６の表面を位置決めすることにより、検出器１３０を介して取得することができる。すなわち、試料軸は、放射軸１０４と整列している。ＥＢＳＤパターンは、放射軸１０４に対して約７０度の角度で試料を配置することにより、ＥＢＳＤ検出器１２８を介して取得することができる。ＥＢＳＤパターンは、放射軸１０４に対して４５度未満の角度で試料を配置することにより、ＥＢＳＤ検出器１３８を介して取得することができる。いくつかの実施形態では、ＳＥＭ画像はまた、放射軸に対してある角度で試料を配置することによって取得されてもよい。

20

【００１３】

いくつかの実施形態では、（磁気または静電）レンズおよび電子源の動作に必要な電圧および／または電流は、カラムコントローラ１３４によって生成／制御され、コントローラ１３２は、偏向器の偏向信号を生成し、検出器の信号をサンプリングする。コントローラ１３２は、試料の画像などの情報を表示するための表示部１３６に接続されてもよい。コントローラ１３２はまた、入力デバイス１４１からのオペレータ入力を受け取ることができる。入力デバイスは、マウス、キーボード、またはタッチパッドでもよい。コントローラは、試料ホルダ１２４を動かすことにより、入射ビームに対して試料を並進させる、ずらす、または傾斜させることができる。コントローラ１３２は、偏向器１１２および／または１１４を介してビームを調整することにより、荷電粒子ビームで試料を走査することができる。

30

【００１４】

コントローラ１３２は、コンピュータ可読命令を格納するためのプロセッサ１３５および非一時的メモリ１３７を含み得る。非一時的メモリに格納されたコンピュータ可読命令を実行することにより、コントローラは、本明細書に開示された様々な方法を実施することができる。たとえば、コントローラ１３２は、複数の検出器から受信した信号を処理し、試料のＳＥＭ画像、ＥＢＳＤパターン、または結晶方位画像を再構成するように構成され得る。コントローラ１３２はまた、各種検出器から受信した信号を処理するように構成されたフィールドプログラマブルゲートアレイ（ＦＰＧＡ）を含み得る。

40

【００１５】

例としてＳＥＭシステムについて説明しているが、当然のことながら、画像化システムは、透過型電子顕微鏡（ＴＥＭ）、走査型透過電子顕微鏡（ＳＴＥＭ）、集束イオンビーム走査電子顕微鏡（ＦＩＢ－ＳＥＭ）などのデュアルビームツールなど、その他の荷電粒子顕微鏡システムであってもよい。ここで説明しているＳＥＭシステムは、後方散乱電子

50

の取得に適した画像化システムの一例にすぎない。

【0016】

図2は、図1の画像化システムを使用して取得されたEBSDPターンに基づいてROI202の構造画像を形成する例示的な手順を示す。電子ビーム201は、放射軸104に沿って試料126を照射する。電子ビーム201は、試料表面のROI202内の衝撃点205で試料126に衝突する。衝撃点は、照射された選挙が相互作用する試料の体積であってもよい。ROI内には複数の衝撃点がある。ここでは一例として、衝撃点205のみを示している。試料126は、EBSDPターン取得の間、放射軸104に対して固定された角度で配置される。たとえば、試料表面に垂直である試料軸210は放射軸104に対して70度に配置することができ、それによってビームは20度の浅い角度で試料表面に衝突する。別の例では、試料軸と放射軸との間の角度は、45度未満とすることができる。衝撃点205が電子ビームで照射されている間、衝撃点からの後方散乱電子がEBSDP検出器によって検出される。衝撃点205から検出された後方散乱電子に基づいて、二次元EBSDPターン203を形成することができる。EBSDPターン203を分析することにより、衝撃点205における結晶方位および結晶位相などの情報を判定することができる。結晶方位は、EBSDPターン203で測定された菊池バンドから算出することができる。一例では、結晶方位は、既知のEBSDPターン（またはそのシミュレーションされたバージョン）を観察されたEBSDPターンと照合することによって判定される。別の例では、結晶方位は、菊池バンドの間で測定された角度を、標準的な結晶学的原理を使用して求めた理論的な面間角度と比較することによって算出される。結晶方位は、色分けして、結晶方位画像207における画素209として示すことができる。ROI206内の複数の衝撃点を走査することにより、2D結晶方位画像207を生成することができる。結晶方位画像207の各画素は、矢印208で示されるように、ROI202内の1つの衝撃点に対応する。

【0017】

図3は、EBSDPターンを取得し、EBSDPターンに基づいて試料の構造画像を生成するための方法300を示す。方法300は、図1のコントローラ132などの画像化システムのコントローラの非一時的メモリに格納されたコンピュータ可読命令を実行することによって実施することができる。EBSDPターンは、荷電粒子ビームで試料のROIを反復走査することにより、位置敏感型EBSDP検出器を使用して取得される。ROIの各単一走査後に、ROI内の各衝撃点の信号品質に基づいて、ROIの信号品質が更新される。閾値信号品質よりも高いROIの信号品質に応じて、EBSDPターンの取得を終了することができる。さらに、ROIの各単一走査後にビームのドリフトを補正してもよい。ROIの構造画像は、EBSDPターンに基づいて構築することができる。

【0018】

ステップ301で、画像化パラメータが設定される。画像化パラメータは、一次ビームエネルギー、荷電粒子ビームの電流密度、および単一走査中のROI内の各衝撃点における荷電粒子ビームの滞留時間を含み得る。滞留時間は、試料のタイプに基づいてあらかじめ決めることができる。たとえば、試料が放射線による損傷を受けやすい場合は、滞留時間を短くすることができる。別の例では、試料が多相材料の場合、滞留時間を長くすることができる。また、滞留時間は、荷電粒子ビームの電流密度が上昇したことに対応して減少させてもよい。たとえば、滞留時間は100マイクロ秒未満である。一例では、滞留時間は1マイクロ秒である。画像化パラメータは、構造画像の解像度、またはROIの走査解像度を含み得る。たとえば、構造画像の解像度の設定には、走査のステップサイズ、または隣接する衝撃点間の距離の決定が含まれる。画像化パラメータは、EBSDPターンの取得を終了するための閾値信号品質を含み得る。

【0019】

ステップ302で、試料画像が任意で取得されてもよい。試料画像の画像化領域は、ROIと同じでもよく、それより大きくてもよい。一実施形態では、試料画像は、試料からの二次電子に基づいて形成されたSEM画像であってもよい。別の実施形態では、試料画

10

20

30

40

50

像は、荷電粒子ビームで試料を走査することなく取得された、試料の光学画像であってもよい。

【0020】

ステップ304で、荷電粒子ビームは、試料のROI内に配置された衝撃点に向けられる。

【0021】

ステップ306では、荷電粒子ビームが試料に対して静止している間に、後方散乱粒子（電子など）が、EBSD検出器などの検出器によって検出される。たとえば、検出器に衝突する各粒子に反応して、検出器は粒子のエネルギー、タイムスタンプ、および位置情報のうちの1つ以上をコントローラまたはコントローラ内のFPGAに出力する。タイムスタンプは、粒子が検出器に衝突する時間である。位置情報は、粒子が検出される検出器上の相対位置である。一例では、電子エネルギーは、閾値レベルよりも高い検出器からの信号出力の持続時間に基づいて決定される。一例では、記録された電子のエネルギーまたはタイムスタンプ、および電子の位置に基づいて、EBSDパターンの単一フレームを形成することができる。荷電粒子ビームは、滞留時間中に1つの衝撃点を照射し、その後ROIの異なる位置に配置された別の衝撃点を照射することができる。

10

【0022】

いくつかの実施形態では、画像化システムは、試料の衝撃点から放射されたX線を取得するためのEDS検出器を含み得る。EDS検出器は、滞留時間中に衝撃点を照射した後、当該衝撃点に対応する累積X線エネルギースペクトルをコントローラに出力する。

20

【0023】

ステップ308で、方法300は、荷電粒子ビームによるROIの単一走査が完了したかどうかを判定する。一実施形態では、ステップ304以降、ROI内のすべての衝撃点が荷電粒子ビームで照射または走査されている場合、ROIの単一走査が完了する。別の実施形態では、同一の衝撃点が荷電粒子ビームで再び照射されようとする場合、ROIの単一走査が完了する。ROIの単一走査の完了に応じて、ステップ314で衝撃点の信号品質が算定される。ROIの単一走査が完了していない場合は、ステップ312でROI内の別の衝撃点を照射するように入射ビームが調整される。

【0024】

ステップ314で、各衝撃点の信号品質が算定される。衝撃点の信号品質とは、構造情報を抽出するために衝撃点から取得した信号の品質を示す。一例において、特定の衝撃点の信号品質は、方法300の開始以降、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて算定してもよい。別の例では、特定の衝撃点の信号品質は、ROIの複数の単一走査中に、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて算定してもよい。さらに別の例では、特定の衝撃点の信号品質は、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて形成された回折パターンの品質であってもよい。ROIが衝撃点のX行Y列のマトリックスを含む場合、ROI内の各衝撃点の信号品質は、 $SQ_{impact\ point}(x, y)$ として表すことができ、ここで、 (x, y) はROI内の衝撃点の座標であり、 $x \in [1, X]$, $y \in [1, Y]$ である。各衝撃点の信号品質は、ROIの各単一走査中または各単一走査後に更新することができる。各衝撃点の信号品質は、方法300の実行中に単調に向上することがある。

30

40

【0025】

一実施形態では、ステップ316において、反復走査中に検出されたすべての電子に基づいて、EBSDパターンなどの回折パターンが各衝撃点に対して形成される。一例では、回折パターンは、検出された電子のエネルギーおよび検出器上のそれらの相対的な位置に基づいて形成することができる。言い換えると、時間 t で画素化検出器の座標 (i, j) に衝突する衝撃点から散乱した粒子のエネルギーは、次のように表すことができる。

【数1】

$$E_{i,j}^{xy}(t)$$

50

ここで、 (x, y) は R O I 内の衝撃点の座標である。画像化時間 T に形成された、R O I の (x, y) の位置にある衝撃点に対応する回折パターンは、次のように表すことができる。

【数 2】

$$D_{x,y}(i,j) = \int_{t=0}^T E_{i,j}^{x,y}(t) dt$$

。

別の例では、回折パターンは、衝撃点から検出された電子の数と検出器上の検出された電子の相対位置とに基づいて形成されてもよい。言い換えると、時間 t で画素化検出器の座標 (i, j) に衝突する衝撃点から散乱する粒子の数は、次のように表すことができる。

【数 3】

$$N_{i,j}^{x,y}(t)$$

ここで、 (x, y) は R O I 内の衝撃点の座標である。画像化時間 T に形成された、R O I の (x, y) の位置にある衝撃点に対応する回折パターンは、次のように表すことができる。

【数 4】

$$D_{x,y}(i,j) = \int_{t=0}^T N_{i,j}^{x,y}(t) dt$$

。

【0026】

ステップ 317 で、回折パターンの品質が算定される。回折パターンの品質は、対応する衝撃点の信号品質である。回折パターンの品質とは、結晶方位などの構造情報を抽出するための回折パターンの品質を示す。一実施形態では、回折パターンの品質は、回折パターン内の画素値を統計的に分析することによって判定される。たとえば、回折パターンの品質は、回折パターンにおける画素値のエントロピーまたは標準偏差である。回折パターンの品質は、エントロピーの減少または標準偏差の減少とともに向上する。別の例では、回折パターンの品質は、回折パターンの変換を統計的に分析することによって判定される。変換は、ハフ変換またはラドン変換であり得るが、これらに限定されない。別の実施形態では、回折パターンの品質は、回折パターン内のバンドのインデックスの品質に基づいて判定してもよい。たとえば、インデックスの品質は、E B S D パターンで検出されたバンドと理論的に計算されたバンドとを比較することで判定できる。検出されたバンドと理論上のバンドは、検出されたバンドと理論上のバンドとの間の平均偏差を測定することによって比較できる。別の実施形態では、回折品質は、E B S D パターン内のバンドのコントラストに基づいて判定してもよい。

【0027】

図 4 A ~ 4 F は、R O I の反復走査中に形成された 1 つの衝撃点の例示的な E B S D パターンを示す。図 4 A から図 4 F へと時間が長くなるにつれて、衝撃点が荷電粒子によって照射される回数が増加する。衝撃点から散乱した検出粒子の総数または蓄積エネルギーは、時間とともに増加する。したがって、時間が長くなるほど、E B S D パターンのバンドを識別しやすくなり、構造情報をより正確に抽出できるようになる。言い換えれば、E B S D パターン品質（または対応する衝撃点の信号品質）は、時間とともに単調に向上する。

【0028】

いくつかの実施形態では、衝撃点の信号品質は、単一の R O I 走査中に算定されてもよい。たとえば、衝撃点の信号品質は、ステップ 306 で衝撃点から散乱した粒子を収集した直後に算定されてもよい。言い換えれば、単一走査が完了する前に、走査と並行して衝撃点の信号品質が算定される。

【0029】

ステップ 318 で、R O I 内の各衝撃点の信号品質に基づいて、R O I の信号品質を算定

10

20

30

40

50

することができる。たとえば、R O I の信号品質 SQ_{ROI} は、すべての衝撃点の最小信号品質であってもよい。すなわち、

【数 5】

$$SQ_{ROI} = \min_{x \in [x_1, x_2], y \in [y_1, y_2]} \{SQ_{impact\ point}(x, y)\}$$

別の例では、R O I の信号品質は、すべての衝撃点の信号品質の中央値または平均値であってもよい。

【0030】

ステップ 320 で、R O I の信号品質は、閾値信号品質と比較される。一実施形態では、閾値信号品質はステップ 301 で決定される。たとえば、閾値信号品質は、試験中の試料の特性に基づいて調整されてもよい。閾値信号品質は、照射損傷に対する試料の耐性の増大とともに増大させてもよい。閾値信号品質は、試料のフェーズ数の増加とともに増大させてもよい。閾値信号品質よりも高い R O I の信号品質に応じて、ステップ 328 で R O I の構造画像が生成される。R O I の信号品質が閾値信号品質よりも低い場合、ビームのドリフトを補正した後に、R O I の別の単一走査を実行することができる。次の単一走査中に、衝撃点のうちの 1 つ以上の信号品質は新しく検出された粒子に基づいて更新することができ、R O I の信号品質は衝撃点の各々の信号品質に基づいて更新することができる。

10

【0031】

ステップ 324 で、試料画像を取得することができる。一実施形態では、試料画像を取得することは、ステップ 302 と同一タイプの試料画像を取得することを含み得る。別の実施形態では、試料画像を取得することは、R O I の前回の単一走査で検出された粒子に基づいて試料画像を生成することを含み得る。たとえば、試料画像の画素値は、R O I 内の対応する衝撃点が荷電粒子ビームで照射されたときに検出器が受け取る総線量とすることができる。言い換えれば、試料画像は次のように表すことができる。

20

【数 6】

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[\int_{t=T_1}^{T_2} E_{ij}^{xy}(t) dt \right]$$

ここで、前回の単一走査は時間 T_1 から時間 T_2 までであり、検出器は $M \times N$ 画素を有する。

30

【0032】

ステップ 326 で、荷電粒子ビームのドリフトは、ステップ 324 で得られた試料画像に基づいて補正することができる。たとえば、ステップ 324 の試料画像を、R O I の単一走査の前に取得された試料画像と比較する。次に、2 つの試料画像間のずれに基づいて、荷電粒子ビームを試料に対してずらす。一例では、荷電粒子ビームは、偏向器（図 1 の偏向器 112 および 114 など）を調整することによってずらされる。別の例では、試料位置は、試料ホルダー（図 1 の試料ホルダー 124 など）を使用してずらす、または移動させる。ビームのドリフトを補正した後、R O I の別の単一走査が実行される。

【0033】

ステップ 328 で、R O I の次の単一走査のために、1 つ以上の画像化パラメータを任意で調整することができる。たとえば、走査パターンおよび滞留時間を含む画像化パラメータは、各衝撃点の信号品質に基づいて調整されてもよい。別の例では、複数の衝撃点のうち、信号品質が閾値レベルよりも低い 1 つ以上を選択して、R O I の次の単一走査で走査/照射してもよい。その一方、複数の衝撃点のうちの残りは走査/照射しない。

40

【0034】

いくつかの実施形態では、R O I の各単一走査の走査パターンは同じである。つまり、R O I 内の衝撃点は同じシーケンスで走査される。たとえば、走査パターンは、ラスタ走査であってもよい。別の実施形態では、R O I の異なる単一走査の走査パターンは異なっている。走査パターンは、各衝撃点の信号品質に基づいて決定してもよい。特定の

50

衝撃点の信号品質が閾値レベルよりも高くなると、ROIの次の単一走査でその衝撃点の照射を停止してもよい。このようにして、信号品質が低い衝撃点のサブセットのみが次の単一走査で画像化される。走査パターンを変更することにより、ROIの構造画像の品質を維持しながら、総画像化時間を短縮することができる。衝撃点の信号品質は、ステップ314に示すように算定/更新してもよい。たとえば、衝撃点の信号品質は、時間とともに衝撃点から散乱する粒子に基づいて決定/更新してもよい。

【0035】

図5Aおよび5Bは、ROI501の異なる単一走査の走査パターンの例を示す。ROI501は、複数の衝撃点502（円で示される衝撃点の位置）を含む。図5Aに示されるように、ROIの最初の単一走査は、破線503で示されるラスタ走査であってもよく、走査方向は矢印で示される。各衝撃点における滞留時間は同じである。各衝撃点で後方散乱電子のエネルギーを収集した後、衝撃点の対応する信号品質を算定することができる。図5Bでは、衝撃点の信号品質は、カラーバー504に従って色分けされている。衝撃点の信号品質が低いほど、衝撃点の信号品質は高くなる。図5Bに示すように、ROIの次の走査では、信号品質が閾値505よりも低い衝撃点のみが荷電粒子ビームで照射される。各衝撃点の信号品質に基づいて、新しい走査パターン506が決定される。

【0036】

いくつかの実施形態では、ROIの各単一走査の滞留時間は、ROIの信号品質に基づいて調整してもよい。たとえば、閾値変化率よりも高いROIの信号品質の変化率に応じて、滞留時間を短縮してもよい。別の例では、滞留時間は、ROIの信号品質と閾値未満の閾値信号品質との間の差に応じて短縮してもよい。

【0037】

このように、EBSDパターンの取得はデータ駆動型である。つまり、取得は、ROIの信号品質など、取得したデータの品質のフィードバックに基づいて制御される。EBSDパターン取得のための画像化パラメータは、各衝撃点の信号品質に応じて調整することもできる。単一走査内の各衝撃点の滞留時間は短縮することができ、各衝撃点における荷電粒子ビームの累積滞留時間も短縮することができる。結果として、従来の方法と比較して、総データ取得時間および荷電粒子ビームの試料への放射損傷を低減することができる。さらに、ROIの各単一走査の継続時間が短縮されるので、ビームのドリフトは容易かつ効果的に補正することができる。

【0038】

図6は、図1の画像化システムを使用したデータ駆動型EBSDパターン取得のタイムラインの例を示す。プロットのx軸は時間である。時間は、x軸の矢印で示されるように増加する。プロット610は、データ取得のための開始信号を示している。データ取得は、信号値が1のときに開始され、信号値が0のときに終了する。プロット620は、電子が画素化検出器に衝突する個々の入射を示している。プロット630は、EBSD検出器からコントローラまたはコントローラのFPGAへのデータフローを示している。プロット640は、ROIの信号品質を示している。ROIの信号品質は、y軸の矢印で示すように向上する。

【0039】

T4で、データ取得が開始される。T4からT5まで、荷電粒子ビームがROIを走査している間、検出器は後方散乱電子を検出し続ける。検出器に衝突する電子の各入射に応じて、データパケットが検出器からコントローラに転送される。データパケットには、電子のエネルギーおよび/またはタイムスタンプ、ならびに画素化検出器内の電子の位置が含まれる。たとえば、検出器に衝突する電子の入射621に応じて、データパケット631がコントローラに転送される。データパケット631は、入射621の電子のエネルギーおよび/またはタイムスタンプ、ならびに電子が受け取られる検出器内の位置を含む。

【0040】

T5で、ROIの最初の単一走査が完了する。ROIの信号品質は、T4からT5で検出された粒子に基づいて算定される。ROIの信号品質は、閾値信号品質641よりも低

10

20

30

40

50

い。

【 0 0 4 1 】

T 5 から T 6 まで、荷電粒子ビームが 2 回目に R O I を走査する。検出器は、検出器によって検出された各電子に応じて、データパケットをコントローラに渡し続ける。T 6 で、R O I の 2 回目の単一走査が完了する。R O I の信号品質は、T 4 から T 6 で検出された粒子に基づいて更新される。R O I の更新された信号品質は、閾値信号品質 6 4 1 よりも低い。

【 0 0 4 2 】

T 6 から T 7 まで、荷電粒子ビームは 3 回目に R O I を走査する。検出器は、検出器によって検出された各電子に応じて、データパケットをコントローラに渡し続ける。T 7 で、R O I の 3 回目の単一走査が完了する。R O I の信号品質は、T 4 から T 7 で検出された粒子に基づいて更新される。閾値信号品質 6 4 1 よりも高い R O I の更新された信号品質に応じて、データ取得を T 7 で終了する。R O I の構造画像は、T 4 から T 7 で検出されたすべての粒子に基づいて構築することができる。

【 0 0 4 3 】

いくつかの実施形態では、各 R O I 走査の継続時間は同じであってもよい。他の実施形態では、各単一の R O I 走査の継続時間は、時間の増加とともに減少させてもよい。

【 0 0 4 4 】

このようにして、試料の R O I は、R O I の信号品質が所定の閾値信号品質レベルよりも高くなるまで、荷電粒子ビームで反復走査される。検出器は、画像処理全体を通して、各粒子を検出するとすぐに粒子情報をコントローラに送信し続ける。したがって、総データ取得時間は、従来の E B S D パターン取得の場合のように、フレーム読み出し時間によって制限されることはない。

【 0 0 4 5 】

R O I の各単一走査後に R O I の信号品質を算定することの技術的效果は、取得したデータの品質を評価できることである。さらに、取得されたデータの品質に応じて、反復走査を終了して、総データ取得時間を短縮することができる。そのため、データ取得時間はデータ駆動型であり、試料に依存する。R O I を反復走査することの技術的效果は、試料の放射損傷を軽減できることであり、ビームのドリフトは、各 R O I 走査の後に効果的に補正することができる。また、短い滞留時間で衝撃点を照射した後、EDS データを読み出すことができる。R O I の信号品質に応じて画像化パラメータを調整することの技術的效果は、取得したデータの品質を維持しながら、R O I の単一走査の時間を短縮することである。

【 0 0 4 6 】

一実施形態では、試料を画像化する方法は、荷電粒子ビームを R O I 内の複数の衝撃点に向け、複数の衝撃点の各衝撃点から散乱した粒子を検出することによって第 1 の走査を実行することと、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて複数の衝撃点の各衝撃点の信号品質を算定することと、各衝撃点の信号品質に基づいて R O I の信号品質を算定することとあって、R O I の信号品質は閾値信号品質よりも低い、算定することと、R O I の信号品質を算定した後、荷電粒子ビームを R O I 内の複数の衝撃点のうちの 1 つ以上に向け、R O I 内の複数の衝撃点のうちの 1 つ以上から散乱した粒子を検出することによって第 2 の走査を実行することと、第 1 の走査および第 2 の走査中に検出された粒子に基づいて R O I の構造画像を形成することとを含む。方法の第 1 の例では、方法は、第 2 の走査中に複数の衝撃点のうちの 1 つ以上から散乱した検出された粒子に基づいて複数の衝撃点のうちの 1 つ以上の信号品質を更新することと、複数の衝撃点のうちの 1 つ以上の信号品質に基づいて R O I の信号品質を更新することとを含み、R O I の更新された信号品質は、閾値信号品質よりも高い。方法の第 2 の例は、任意で第 1 の例を含み、さらに、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて複数の衝撃点の各衝撃点の信号品質を算定することは、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて各衝撃点の回折パターンを形成することと、対応する回折パターンに基づいて各衝撃点の信号品質を算定することとを含む

10

20

30

40

50

。方法の第3の例は、任意で第1および第2の例のうちの1つ以上を含み、さらに、複数の衝撃点の各衝撃点から散乱した粒子が検出器によって検出され、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて各衝撃点の回折パターンを形成することは、検出器上の検出された粒子の各々の位置を記録することと、検出された粒子の各々の位置に基づいて回折パターンを形成することを含む。方法の第4の例は、任意で第1～第3の例のうちの1つ以上を含み、さらに、対応する回折パターンに基づいて各衝撃点の信号品質を算定することは、対応する回折パターンの品質に基づいて各衝撃点の信号品質を算定することを含む。方法の第5の例は、任意で第1～第4の例のうちの1つ以上を含み、さらに、構造画像の各画素がROI内の複数の衝撃点のうちのある衝撃点に対応することを含む。方法の第6の例は、任意で第1～第5の例のうちの1つ以上を含み、さらに、第1の走査および第2の走査中に検出された粒子に基づいてROIの構造画像を形成することは、第1の走査および第2の走査中に衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて各衝撃点の回折パターンを形成することと、特定の衝撃点の回折パターンに基づいてその衝撃点に対応する構造画像の画素値を判定することを含む。方法の第7の例は、任意で第1～第6の例のうちの1つ以上を含み、第1の走査と第2の走査との間に荷電粒子ビームのドリフトを補正することをさらに含む。方法の第8の例は、任意で第1～第7の例のうちの1つ以上を含み、さらに、複数の衝撃点の各衝撃点から散乱した粒子を検出することは、各散乱粒子が検出器に衝突することに応じて、衝突した散乱粒子のエネルギーまたはタイムスタンプ、および検出器上の衝突した散乱粒子の位置を記録することを含む。方法の第9の例は、任意で第1～第8の例のうちの1つ以上を含み、第2の走査の前に各衝撃点の信号品質に基づいて複数の衝撃点のうちの1つ以上を選択することをさらに含む。

10

20

【0047】

一実施形態では、試料を画像化する方法は、荷電粒子ビームをROIの複数の衝撃点に向け、複数の衝撃点から散乱した粒子を検出することにより試料の関心領域（ROI）を反復走査することと、反復走査中に、複数の衝撃点の各衝撃点の信号品質を算定することと、ROIの各単一走査後に各衝撃点の信号品質に基づいてROIの信号品質を更新することと、特定の衝撃点の信号品質はその衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて算定される、更新することと、ROIの信号品質が閾値信号品質より高くなると反復走査を終了することと、反復走査中に検出された粒子に基づいてROIの構造画像を形成することを含む。方法の第1の例において、構造画像の各画素は、複数の衝撃点のうちのある衝撃点に対応し、反復走査中に検出された粒子に基づいてROIの構造画像を形成することは、各衝撃点について、衝撃点から散乱した検出された粒子のすべてに基づいて回折パターンを形成することと、対応する回折パターンに基づいてROIの構造画像の各画素値を判定することを含む。方法の第2の例は、任意で第1の例を含み、反復走査中の複数の衝撃点の各衝撃点の信号品質に基づいて、反復走査の走査パターンを調整することをさらに含む。方法の第3の例は、任意で第1および第2の例のうちの1つ以上を含み、さらに、各衝撃点の信号品質が反復走査中に単調に向上することを含む。

30

【0048】

一実施形態では、試料を画像化するためのシステムは、試料に向けて荷電粒子ビームを生成するための荷電粒子源と、試料から散乱した粒子を検出するための検出器と、非一時的媒体に格納されたコンピュータ可読命令を有するコントローラとを備え、コントローラは、荷電粒子ビームをROI内の複数の衝撃点に向け、複数の衝撃点の各衝撃点から散乱した粒子を検出することで第1の走査を実行し、衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて、複数の衝撃点の各衝撃点の信号品質を算定し、各衝撃点の信号品質に基づいてROIの信号品質を算定し、ROIの信号品質は閾値信号品質よりも低く、ROIの信号品質を算定した後、荷電粒子ビームをROI内の複数の衝撃点のうちの1つ以上に向けて、ROI内の複数の衝撃点のうちの1つ以上から散乱した粒子を検出することで第2の走査を実行し、かつ第1の走査および第2の走査中に検出された粒子に基づいてROIの構造画像を形成するように構成されている。システムの第1の例では、システムは、ROIを含む試料の領域を画像化するための検出器をさらに備え、コントローラは、第1の走査の

40

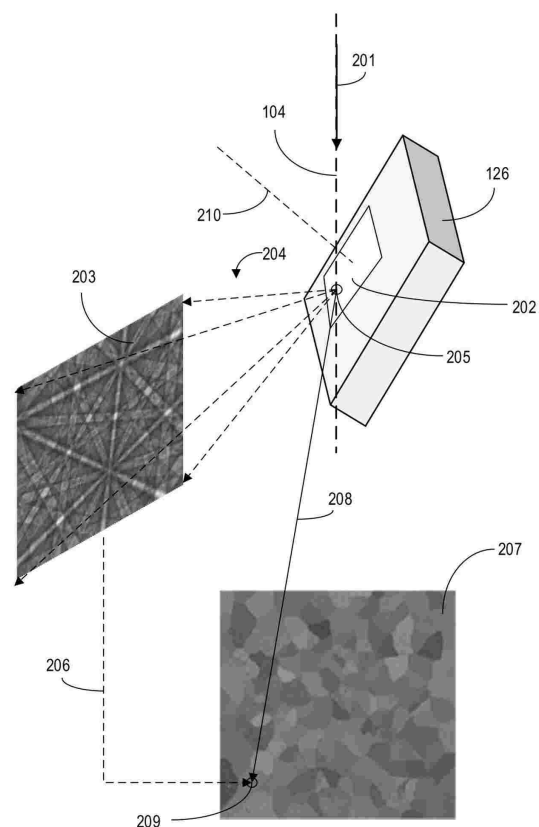
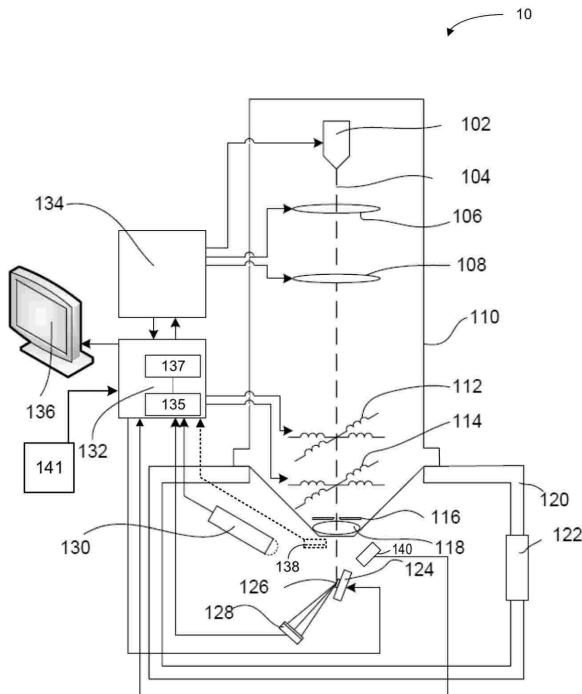
50

前に第 1 の試料画像を取得し、第 1 の走査と第 2 の走査との間に第 2 の試料画像を取得し、かつ第 2 の走査の前に、第 1 の試料画像と第 2 の試料画像とを比較して、荷電ビームのドリフトを補正するようにさらに構成されている。システムの第 2 の例は、任意で第 1 の例を含み、さらに、コントローラは、第 1 の走査中に検出された粒子に基づいて第 1 の試料画像を形成し、第 2 の走査中に検出された粒子に基づいて第 2 の試料画像を形成し、かつ第 2 の走査の前に、第 1 の試料画像と第 2 の試料画像とを比較して、荷電ビームのドリフトを補正するようにさらに構成されている。システムの第 3 の例は、任意で第 1 および第 2 の例のうちの 1 つ以上を含み、さらに、第 1 の走査中の複数の衝撃点の各衝撃点における荷電粒子ビームの滞留時間は、100 マイクロ秒未満である。システムの第 4 の例は、任意で第 1 および第 3 の例のうちの 1 つ以上を含み、さらに、コントローラは、第 2 の走査中に複数の衝撃点のうちの 1 つ以上から散乱した検出された粒子に基づいて各衝撃点の信号品質を更新し、各衝撃点の更新された信号品質に基づいて R O I の信号品質を更新するようにさらに構成され、R O I の更新された信号品質は閾値信号品質よりも高い。システムの第 5 の例は、任意で第 1 および第 4 の例のうちの 1 つ以上を含み、さらに、構造画像の各画素は、複数の衝撃点のうちのある衝撃点に対応し、その衝撃点から散乱した検出された粒子に基づいて各衝撃点の信号品質を算定することは、検出器上における各検出された粒子の相対位置に基づいて、各衝撃点に対応する回折パターンを形成することと、構造情報を抽出するために、対応する回折パターンの品質に基づいて各衝撃点の信号品質を算定することを含む。

【図面】

【図 1】

【図 2】



10

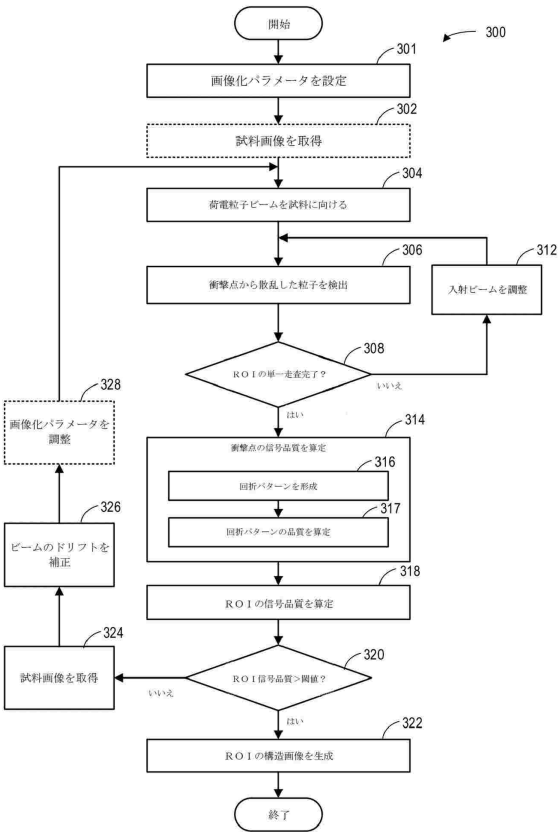
20

30

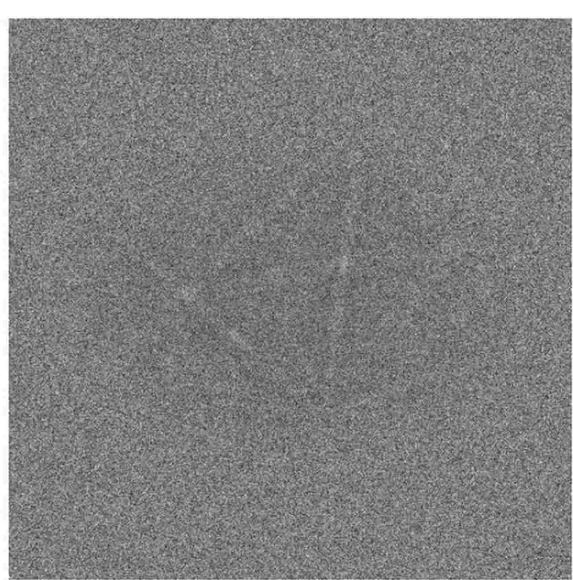
40

50

【図 3】



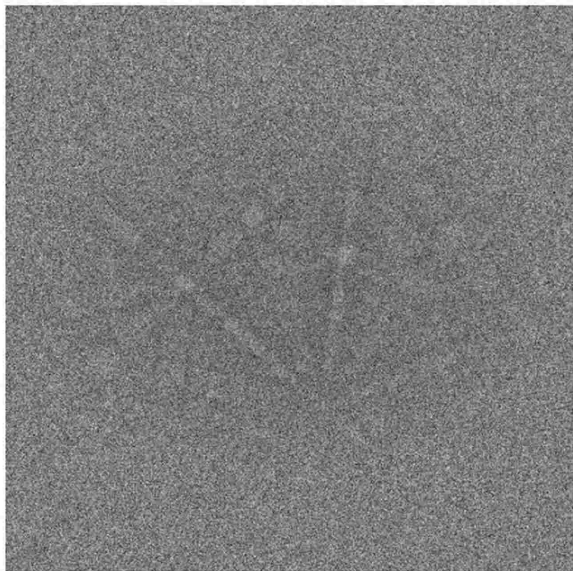
【図 4 A】



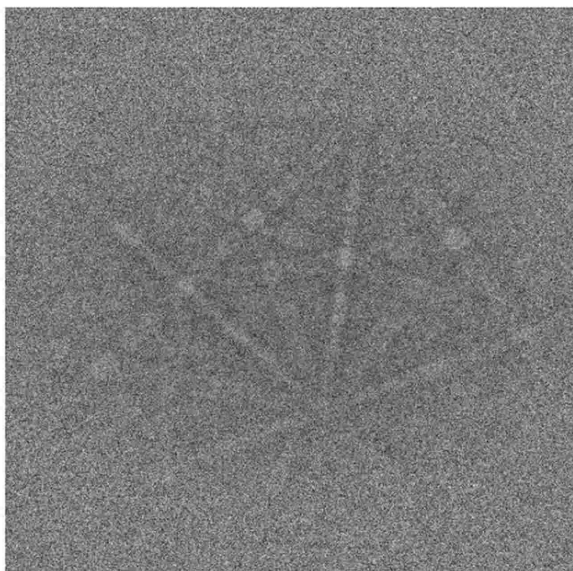
10

20

【図 4 B】



【図 4 C】

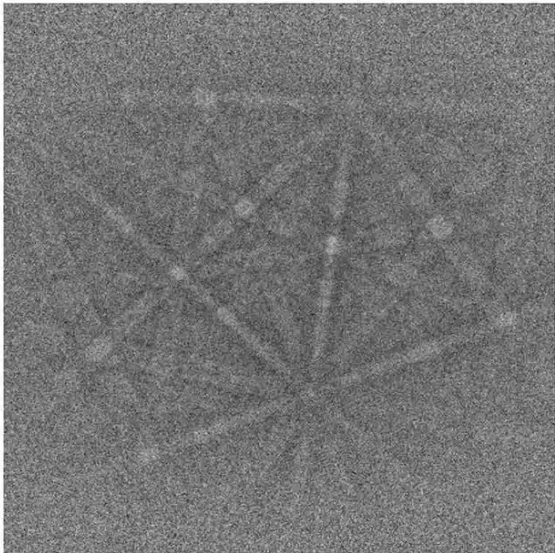


30

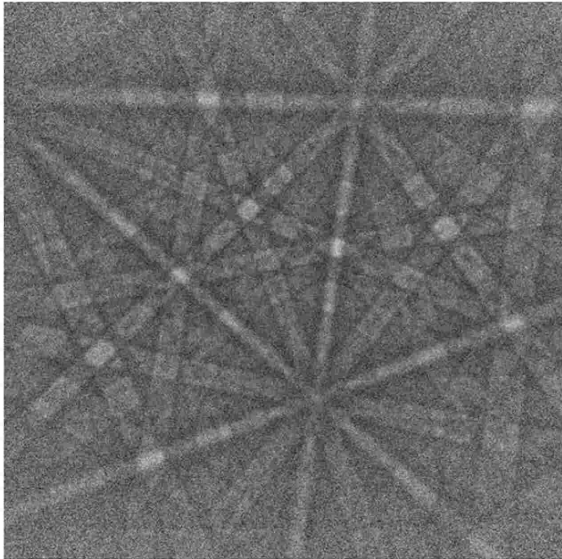
40

50

【図 4 D】

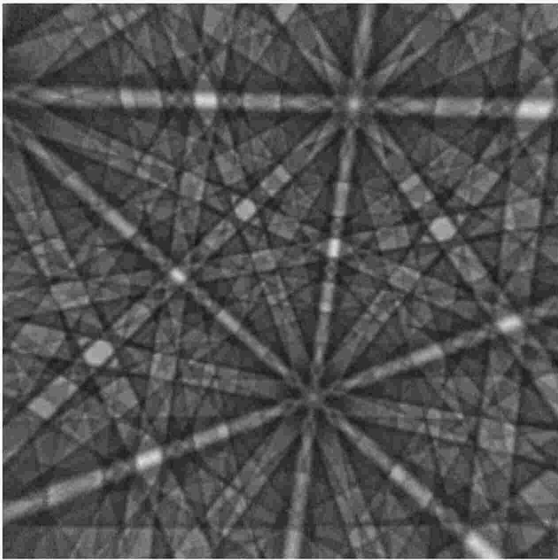


【図 4 E】

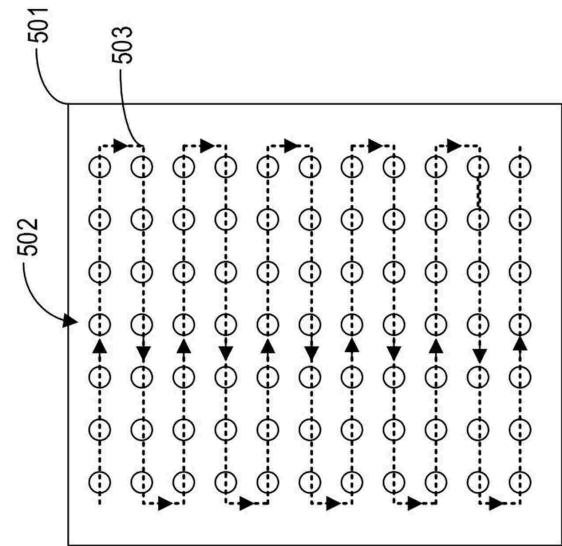


10

【図 4 F】



【図 5 A】



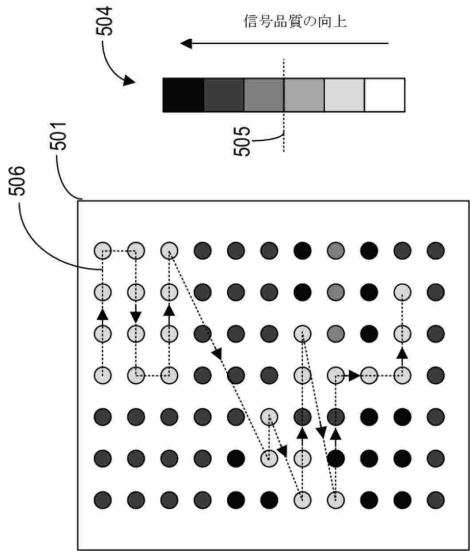
20

30

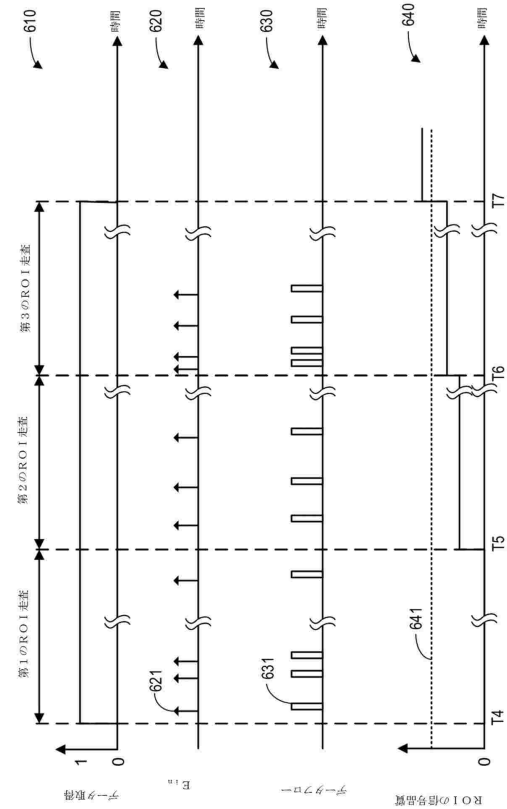
40

50

【図 5 B】



【図 6】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

ト・ドーソン・クリーク・ドライヴ 5350

(72)発明者 クリストファー ジェイ・ステファンズ

アメリカ合衆国 97124-5793 オレゴン州, ヒルズボロ ノースイースト・ドーソン・ク
リーク・ドライヴ 5350

審査官 比嘉 翔一

(56)参考文献 特開2013-019900(JP,A)

特開2016-045206(JP,A)

特開2018-190705(JP,A)

特開昭60-143749(JP,A)

米国特許出願公開第2016/0356729(US,A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G01N23/00 - G01N23/2276

H01J37/00 - H01J37/36

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDream3)