

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6044704号
(P6044704)

(45) 発行日 平成28年12月14日(2016.12.14)

(24) 登録日 平成28年11月25日(2016.11.25)

(51) Int.Cl.		F I			
GO 1 B	15/02	(2006.01)	GO 1 B	15/02	K
GO 1 N	23/04	(2006.01)	GO 1 N	23/04	
GO 1 N	23/20	(2006.01)	GO 1 N	23/20	

請求項の数 9 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2015-507765 (P2015-507765)	(73) 特許権者	000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(86) (22) 出願日	平成25年3月27日(2013.3.27)	(74) 代理人	100107766 弁理士 伊東 忠重
(86) 国際出願番号	PCT/JP2013/058961	(74) 代理人	100070150 弁理士 伊東 忠彦
(87) 国際公開番号	W02014/155557	(74) 代理人	100192636 弁理士 加藤 隆夫
(87) 国際公開日	平成26年10月2日(2014.10.2)	(72) 発明者	小▲高▼ 康稔 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
審査請求日	平成27年6月17日(2015.6.17)	審査官	岸 智史

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 試料測定装置、試料測定方法、半導体装置の評価方法、およびコンピュータプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

電子線を照射する照射源と、
前記電子線を測定領域に走査する走査系と、
シミュレーションにより求められた、異なる厚さの試料の電子線回折像の強度情報を格納するメモリと、
前記測定領域に試料のない状態で前記電子線を走査したときに得られるゼロディスクパターンで前記電子線の基準強度を取得する基準強度取得部と、
前記測定領域に試料を配置し、前記試料上に前記電子線を走査して、前記ゼロディスクパターンに対応する領域での透過電子線像の回折パターンの強度を取得する回折強度取得部と、
前記基準強度に対する前記回折パターンの強度の強度比を算出する強度比算出部と、
前記強度比を、前記シミュレーションにより得られた前記強度情報と比較し、かつ前記回折パターンの模様を前記シミュレーションで得られた強度分布と比較して、前記試料の厚さを決定する厚さ判定部と、
を備えることを特徴とする試料測定装置。

【請求項2】

前記厚さ判定部は、膜厚が10nm～200nmの範囲で、前記強度比を前記シミュレーションにより得られた前記強度情報と比較し、かつ前記回折パターンの模様を、前記シミュレーションで得られた前記強度情報の模様と比較して、前記試料の厚さを決定するこ

とを特徴とする請求項 1 に記載の試料測定装置。

【請求項 3】

前記回折強度取得部は、前記試料の前記透過電子線像の積分強度から、前記ゼロディスクパターンに対応する領域以外に広がる散乱成分を除去して、前記回折パターンの強度を取得することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の試料測定装置。

【請求項 4】

試料測定位置に試料を配置せずに電子線を走査して、前記電子線により形成されるゼロディスクパターンの透過電子線の基準強度を取得し、

前記試料測定位置に試料を配置し、前記試料上に前記電子線を走査して、前記ゼロディスクパターンに対応する領域での透過電子線像の回折パターンの強度を取得し、

前記基準強度に対する前記回折パターンの強度の強度比を算出し、

前記強度比を、シミュレーションで得られた透過電子線回折像の強度情報と比較し、かつ前記回折パターンの模様を前記シミュレーションで得られた強度分布と比較して前記試料の厚さを決定する

ことを特徴とする試料測定方法。

【請求項 5】

膜厚が 10 nm ~ 200 nm の範囲で前記試料の厚さを決定することを特徴とする請求項 4 に記載の試料測定方法。

【請求項 6】

前記試料の前記透過電子線像の積分強度から、前記ゼロディスクパターンに対応する領域以外に広がる散乱成分を除去して、前記回折パターンの強度を取得することを特徴とする請求項 4 または 5 に記載の試料測定方法。

【請求項 7】

半導体材料の試料の所定の領域内の転位分布像から、転位の総長さを算出し、

請求項 4 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の試料測定方法により前記試料の厚さを測定し、

前記所定の領域の面積、前記試料の厚さ、および前記転位の総長さから、転位密度を評価する

ことを特徴とする半導体装置の評価方法。

【請求項 8】

半導体デバイス構造を含む試料に電子線を走査して歪分布像を取得し、

請求項 4 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の試料測定方法により前記試料の厚さを測定し、

歪分布と、前記試料の厚さとに基づき応力計算を行い、

前記応力計算に基づいて半導体デバイスの歪評価を行なう

ことを特徴とする半導体装置の評価方法。

【請求項 9】

コンピュータに以下の処理を実行させるコンピュータプログラム：

試料測定領域に試料を配置せずに電子線を走査したときに得られるゼロディスクパターンでの透過電子線の基準強度を取得させる処理；

前記試料測定領域に試料を配置して前記試料上に電子線を走査したときの、前記ゼロディスクパターンに対応する領域での透過電子線像の回折パターンの強度を取得させる処理；

前記基準強度に対する前記回折パターンの強度の強度比を算出させる処理；および

前記強度比を、シミュレーションで得られた透過電子線回折像の強度情報と比較し、かつ前記回折パターンの模様を前記シミュレーションで得られた強度分布と比較して前記試料の厚さを決定させる処理。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電子線を用いた試料測定装置、試料測定方法、半導体装置の評価方法、および試料測定装置に試料測定を実行させるコンピュータプログラムに関する。

10

20

30

40

50

【背景技術】

【0002】

透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmitting Electron Microscope) や走査透過型電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscope) を用いた材料評価、デバイス評価では、透過方向の試料厚さの正確な測定が求められる。

【0003】

たとえば、原子分解能観察では試料厚さによって構造像や原子強度が変化するため、観察結果とシミュレーション結果の厳密な比較のために厚さのパラメータが必要となる。STEM観察でZ-contrastによる画像強度を用いて材料評価や結晶構造の定量的な評価を行う場合は、厚さによる強度キャリブレーションを行う。結晶欠陥密度や試料内部の歪量の測定では、観察廃位や電線が照射している領域の体積を見積もるため、厚さの測定が必要となる。エネルギー分散分光法 (EDS: Energy Dispersive x-ray Spectroscopy) を用いて厳密な定量分析を行う際にも、試料厚さにより特性X強度を校正する。

10

【0004】

従来は、電子エネルギー損失分光 (EELS: Electron Energy-Loss Spectroscopy) や収束電子線回折 (CBED: Convergent Beam Electron Diffraction) で、厚さの測定を行ってきた。

【0005】

EELS法は、入射電子が試料を構成する電子と相互作用する際に生じるエネルギー損失の量に応じて分光するものである。EELS法は、絶対厚さの計算に経験的なパラメータを使用するため、測定誤差が生じる。また、100nm以上の厚さ測定を行うことができない。EELS検出器では、取り込み角度を変更するための結像レンズ条件の変更が煩わしく、装置自体が高価であるという問題もある。

20

【0006】

CBED法は、ナノメートルサイズに収束した電子線を試料に照射して回折強度を得るものである。CBED法では、明瞭なCBEDパターンを観察するためには100nm以上の試料厚さが必要であり、100nm以下の厚さで正確な測定は困難である。また、電子線照射角度を低く(10mrad以下)しなければならない。さらに、2波励起条件にするために試料を傾斜させるが、この場合に試料の厚さを測定したい方向から直接測定できないという問題がある。

30

【0007】

EELS法やCBED法の上記問題点に鑑みると、経験的なパラメータに頼らず、レンズ条件や実験条件を変更せずに、ひとつの手法で試料の厚さを広い範囲で測定することのできる手法が望まれる。また、電子線照射角度を大きくできること(たとえば20mrad以上)が望ましい。

【0008】

CBEDにより得られた画像のツェルニケ(Zernike)モーメントを求めることで、試料の歪および厚さを測定する方法が知られている(たとえば、特許文献1参照)。

【先行技術文献】

【特許文献】

40

【0009】

【特許文献1】特開2012-21967号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

単一の手法で、試料の厚さを広い範囲にわたって精度良く測定することのできる手法と構成、およびこれを利用した半導体装置の評価方法を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

発明の一つの態様では、試料測定装置は、

50

電子線を照射する照射源と、
前記電子線を測定領域に走査する走査系と、
シミュレーションにより求められた、異なる厚さの試料の電子線回折像の強度情報を格納するメモリと、

前記測定領域に試料を配置し、前記試料上に前記電子線を走査して、前記測定領域での透過電子線像の零次回折パターンの強度を取得する零次回折強度取得部と、

前記測定領域に試料のない状態で前記電子線を走査したときの前記電子線の基準強度を取得し、前記基準強度に対する前記零次回折パターンの強度の強度比を算出する強度比算出部と、

前記強度比を、前記シミュレーションにより得られた前記強度情報と比較して、前記測定対象の試料の厚さを決定する厚さ判定部と、
を備える。

【発明の効果】

【0012】

単一の手法で試料の厚さを広い範囲にわたって精度良く測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】実施形態の試料測定の原理を説明するための図である。

【図2】実施形態の試料測定方法のフローチャートである。

【図3】試料なしで入射電子線の積分強度 (I_0) を測定して得られるゼロディスクパターンの図である。

【図4】試料のゼロディスク領域からの零次回折像の取得を示す図である。

【図5】測定した強度比と、あらかじめ取得したシミュレーション像との比較を示す図である。

【図6】シミュレーションにより取得した多様な厚さの $SrTiO_3$ [001] 試料の PA-CBED 像である。

【図7】シミュレーションにより取得した多様な厚さの Si [001] 試料の PA-CBED 像である。

【図8】実際に測定した多様な厚さの $SrTiO_3$ [001] 試料の PA-CBED 像である。

【図9】実際に測定した多様な厚さの Si [001] 試料の PA-CBED 像である。

【図10】実測像とシミュレーション像との比較結果を示すグラフである。

【図11】実施形態で用いる試料測定装置の概略構成図である。

【図12】図11の装置が行う測定フロー図である。

【図13】実施形態の試料測定方法を欠陥密度評価に適用する場合の図である。

【図14】実施形態の試料測定方法を歪評価に適用する場合の図である。

【図15】実施形態の方法による歪測定結果を示す図である。

【図16】CBEDおよびFEM法による歪分布像を、STEM法による歪分布像と対比した図である。

【図17】図16の歪分布像の模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

図1は、実施形態の試料測定の原理を説明する図である。実施形態では、試料がない状態で電子線走査により得られる透過電子線像（基準パターン）と、試料を配置して電子線を走査し基準パターンと同一の領域内で得られる透過回折パターンの比に基づいて、試料の厚さを決定する。

【0015】

図1(a)は、試料がない状態で、所定領域に入射電子線 E_{in} を走査して得られる透過電子線の基準パターンを示す。試料がないので、入射電子線はそのまま真空部分を透過し、ディスク状の透過電子線像 110 として検出される。試料のない真空部分を透過した

10

20

30

40

50

電子線により得られるパターンを、便宜上「ゼロディスクパターン」と称する。ゼロディスクパターン 110 は、入射電子線の総量、すなわち積分強度 I_0 を計測したものである。

【0016】

ゼロディスクパターン 110 の全照射電子線強度 I_0 を、基準強度 I_0 として用いる。ゼロディスクと同じ領域内で測定対象の試料の電子線回折像の強度を測定し、基準強度 I_0 に対する比をとることによって、試料の厚さを求める。

【0017】

図 1 (b) は、試料 100 の所定の領域に入射電子線 $E_{B_{in}}$ を走査して得られる回折パターン 120 を示す。試料 100 は、この例では $SrTiO_3[001]$ である。電子線は厚さ t を有する試料 100 を透過し、試料 100 中の原子で散乱され、干渉し合って回折パターン 120 を形成する。回折パターン 120 には、ゼロディスクパターン 110 に見られない特徴的な模様が現れる。

10

【0018】

回折パターン 120 の取得方法は任意であるが、実施形態では、10 mrad よりも高い電子線照射角度でも回折像を得ることのできる PA-CBED (Position Averaged Convergent Beam Electron Diffraction) 法を用いる。PA-CBED は、STEM 観察モードで、測定したい部分に電子線を走査しながら CBED 像を観察し、任意の範囲の平均的な原子配列の電子線回折像を取得する方法である。PA-CBED 法により得られる回折像を、適宜、「PA-CBED 像」と称する。

20

【0019】

図 1 (b) の状態では、電子線の散乱、干渉以外に多くの反射や吸収が励起され、図 1 (a) のゼロディスクに対応する領域（「ゼロディスク領域」と称する）115 の外側に菊池線や非弾性散乱成分が広がっている。そこで、後述するように、ゼロディスク領域 115 以外の不要な成分を除去した後に、基準強度 I_0 に対する比を求める。ゼロディスク領域 115 以外の不要な成分を除去した PA-CBED 像の強度を、「零次回折ディスク強度」あるいは「 $I_{zero-disk}$ 」と称する。

【0020】

基準強度 I_0 に対する零次回折ディスク強度 ($I_{zero-disk}$) の比を、試料厚さに対応するパラメータとして求める。このパラメータを、あらかじめ試料の異なる厚さごとにシミュレーションで計算された強度 I_{calc} と比較することで、測定した試料の厚さを決定する。また電子線回折により得られる画像が、厚さに応じて特徴的な模様を有することから、各厚さでシミュレーションにより得られる強度分布とのパターンマッチングを併用することで、より正確な厚さ決定を行う。

30

【0021】

図 2 は、実施形態の試料測定方法のフローチャートである。まず、試料のない状態で、所定領域（ゼロディスク）の入射電子線の積分強度を測定して基準強度 I_0 を取得する (S101)。ここで得られるゼロディスクパターン 110 を図 3 に示す。この状態は、図 1 (a) に対応する。

【0022】

次に、測定装置に試料を配置し、ゼロディスクに対応する領域の PA-CBED 像の積分強度 $I_{zero-disk}$ を取得する (S103)。PA-CBED 像の積分強度 $I_{zero-disk}$ は、バックグラウンドノイズを除去してゼロディスク領域 115 のみから得られる零次回折ディスク強度である。ゼロディスク領域 115 での零次回折ディスク強度 $I_{zero-disk}$ の取得を図 4 に示す。

40

【0023】

図 4 (a) で、試料上に電子線を走査して、PA-CBED 像 120 を検出する。この状態は、図 1 (b) に対応する。PA-CBED 像 120 は、ゼロディスク領域 115 の外側に広がる不要な成分を含んでいる。そこで、測定した PA-CBED 像 120 の積分強度から、ゼロディスク領域 115 以外の領域の不要成分（菊池線、非弾性散乱成分など

50

を含むバックグラウンドノイズ)を除去し、図4(b)の零次回折ディスク130の強度 $I_{\text{zero-disk}}$ を抽出する。零次回折ディスク130の強度 $I_{\text{zero-disk}}$ の抽出方法としては、測定後に不要成分を除去する代わりに、PA-CBED像取得の際に円形の絞りを挿入して、ゼロディスク領域以外の情報をカットする構成としてもよい。

【0024】

次に、ゼロディスクパターン110の積分強度(基準強度) I_0 に対する、試料の零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ の比 ($I_{\text{zero-disk}} / I_0$) を求める(S105)。この比は、同一の領域で、ある厚さの試料が挿入されたことによる透過電子線強度の変化を表わす。

【0025】

次に、S105で求めた比 ($I_{\text{zero-disk}} / I_0$) を、あらかじめシミュレーションで得られた各厚さでの回折強度計算値 I_{calc} と比較して、試料の厚さを決定する(S107)。シミュレーションによる回折強度計算値 I_{calc} は、特定の結晶構造を有する試料の各厚さでの回折強度分布の計算値を、真空でのゼロディスク領域の強度分布の積算値で除算した値を示す。

【0026】

実測により算出した $I_{\text{zero-disk}} / I_0$ 値を、シミュレーション像の回折強度計算値 (I_{calc}) と比較することで、試料の厚さが特定される。シミュレーション値との比較の後に、回折パターンの模様を比較(パターンマッチング)して、さらに正確に試料厚さを決定してもよい。たとえば、 $I_{\text{zero-disk}} / I_0$ の値で5nmの精度で厚さ測定を行い、さらに回折パターンの模様を、相関関数を用いて比較し、一致度の高いシミュレーションパターンに用いた厚さから数値を判定することにより、1nmの精度で測定することが可能となる。

【0027】

通常のCBED法では、ディスク内に現れるパターンをフィッティングすることにより厚さを測定するが、100nm以下の厚さになるとパターン形状が不明瞭になるため、測定が困難になる。

【0028】

他方、一般的なEELS法では、試料の厚さが100nm以上になると、電子線の多重散乱の影響により、ゼロロス電子(エネルギー損失せずに試料を透過する電子)の強度が著しく減少し、膜厚測定の精度が低下する。

【0029】

これに対し、実施形態の方法では、試料を透過した電子線回折像からゼロディスク領域以外の不要成分を除去して零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ を取得し、基準強度 I_0 に対する零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ の比をとっているため、試料厚さの大小にかかわらず、実測による厚さ方向の情報をパラメータ化することができる。

【0030】

図6は、シミュレーションにより得られたSrTiO₃[001]試料の各厚さでのPA-CBED像、図7は、シミュレーションにより得られたSi[111]試料の各厚さでのPA-CBED像である。試料の厚さに応じて、回折パターンの模様が変化することがわかる。

【0031】

図8は、実測により得られたSrTiO₃[001]試料のPA-CBED像、図9は、実測により得られたSi[111]試料のPA-CBED像である。いずれも、バックグラウンドノイズが除去された、ゼロディスク領域のみの零次回折像である。実測による場合も、シミュレーションと同様に、試料厚さの変化に応じて回折パターン内の模様が変化していることがわかる。

【0032】

図8および図9で得られたPA-CBED(零次回折)像の強度分布を、ゼロディスクパターン(試料厚さ $t = 0$)の基準強度 I_0 で除算することで、強度比が求まる。なお、

10

20

30

40

50

シミュレーションと実測の双方で、加速電圧を200kV、電子線収束半角度を20mradとした。

【0033】

図10は、図6および図7のシミュレーション像と、図8および図9の実測像を比較した結果を示す。横軸は試料の厚さ(nm)、縦軸は基準パターン積分強度に対する試料の回折パターン積分強度の比($I_{\text{zero-disk}}/I_0$)である。それぞれの試料厚さで実測した強度比が、シミュレーション結果と非常に良く一致していることがわかる。

【0034】

実測で得られる強度比とシミュレーションによる強度比が高い一貫性をもつことから、あらかじめシミュレーションで計算した試料厚さと強度比との関係を、検量線として用いることができる。

10

【0035】

測定精度を上げるために、各厚さでの特徴的な模様を比較してもよい。強度比の比較では、厚さ測定の精度は ± 2.5 nmであるが、PA-CBEDパターンの模様を比較することにより、 ± 1 nmまで誤差を低減することができる。また、単一の手法で、EELS法でカバーされる100nm以下の領域と、CBED法でカバーされる100nm以上の領域の双方において、試料厚さを正確に求めることが可能になる。

【0036】

図11は、実施形態の試料測定装置10の概略図である。試料測定装置10は、電子顕微鏡40と、情報処理装置22を含む。

20

【0037】

電子顕微鏡40において、電子線照射源11の電子銃から照射される電子線EBは、2段以上の収束レンズ12、13と収束レンズ絞り14によって収束される。収差補正装置16、対物レンズ17によって、収束電子線の極微小プローブが形成される。収差補正装置16の使用は任意であり、用いなくてもよい。収束した微小プローブは、走査コイル15により偏光され、試料100上を移動する。電子線の収束半角度は10mradより大きく30mrad以下、好ましくは、20mrad以上、30mrad以下である。

【0038】

投影レンズ18は、試料100を透過、散乱した電子線の取り込み角度を制御する。電子線は、一定の取り込み角でSTEM(Scanning)検出器19に取り込まれ、STEM像が得られる。電子線を走査しながらSTEM検出されたPA-CBED像を観察することで、厚さ測定を行う任意の範囲を設定することができる。

30

【0039】

STEM検出された電子線の散乱角は、制限絞り20によって制限される。電子線は、電子線回折像取得装置21で受光され、回折像が取得される。電子線回折像取得時のカメラ長は、投影レンズ18の励磁条件により決定される。実施形態では、電子線回折像の中心のゼロディスク領域の画像を取得すればよいので、電子線回折像取得装置21の受光部分にゼロディスクが入る条件に制限絞り20が設定される。

【0040】

電子線回折像取得装置21で取得された画像は、情報処理装置22に入力される。情報処理装置22には、記憶装置23と表示装置24が接続されている。情報処理装置22、記憶装置23、および表示装置24は一体に構成されていてもよい。表示装置24に、強度比の比較結果や、PA-CBEDパターンの模様の比較結果を表示してもよい。

40

【0041】

情報処理装置22は、メモリ31、零次回折ディスク強度($I_{\text{zero-disk}}$ 抽)取得部33、強度比($I_{\text{zero-disk}}/I_0$)算出部34、厚さ判定部35を有する。

【0042】

試料100がない状態で測定されたゼロディスクパターンの強度情報と、試料100が挿入されて測定されたPA-CBED像の強度情報は、順次情報処理装置22のメモリ31に格納される。

50

【 0 0 4 3 】

零次回折ディスク強度取得部 3 3 は、試料 1 0 0 を透過した電子線回折像の強度情報からバックグラウンドノイズを除去して、ゼロディスク領域に対応する積分強度だけを抽出する。電子線回折像取得装置 2 1 の直上に円形絞りを挿入してゼロディスク以外の情報を遮断する場合は、情報処理装置 2 2 に入力される電子線回折像の強度情報の積分値が、そのまま $I_{\text{zero-disk}}$ となる。

【 0 0 4 4 】

強度比算出部 3 4 は、規準強度 I_0 に対する試料の零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ の比を計算する。

【 0 0 4 5 】

厚さ判定部 3 5 は、強度比算出部 3 4 で算出された強度比を、メモリ 3 1 に格納されているシミュレーション画像の強度情報と比較して、試料の厚さを決定する。また、メモリ 3 1 に格納されているシミュレーション画像の模様と、零次回折ディスクの模様を、パターン認識により比較して厚さを判断してもよい。

【 0 0 4 6 】

メモリ 3 1 には、上記の処理を行なうプログラムを格納してもよい。プログラムは、情報処理装置 2 2 に以下の動作を行わせる。すなわち、試料がない状態でのゼロディスク領域の規準強度 I_0 を取得させ、資料がある状態で同じゼロディスク領域内の零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ を取得させ、規準強度 $I_{\text{zero-disk}}$ に対する零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ の比 ($I_{\text{zero-disk}} / I_0$) を算出させ、強度比をシミュレーションで得られた回折パターンの強度を比較させ、比較結果に基づいて試料の厚さを決定させる。

【 0 0 4 7 】

図 1 2 は、図 1 1 の試料測定装置 1 0 で行われる動作のフローである。まず、試料測定装置 1 0 に評価試料を挿入する (S 2 0 1)。STEM 検出器 1 9 での検出結果をモニタしながら、試料の傾斜を調整し (S 2 0 2)、投影レンズ 1 8 の励磁条件に応じたカメラ長を決定する (S 2 0 3)。試料測定装置 1 0 の電子顕微鏡 4 0 の光軸を調整し (S 2 0 5)、再度、試料傾斜を調整して電子線照射角を設定する (2 0 5)。

【 0 0 4 8 】

その後、試料を向いて (S 2 0 6)、電子線走査範囲を設定し (S 2 0 7)、真空部分 (ゼロディスク領域) での電子線強度 (規準強度) I_0 を測定する (S 2 0 8)。ステップ S 2 0 6 ~ S 2 0 8 が、図 2 のステップ S 1 0 1 に対応する。

【 0 0 4 9 】

次に、試料測定装置 1 0 に評価試料を挿入し (S 2 0 9)、電子線回折像を撮影し (S 2 1 0)、ゼロディスク領域に対応する領域の零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ を抽出する (S 2 1 1)。ステップ S 2 0 9 ~ S 2 1 1 が、図 2 のステップ S 1 0 3 に対応する。

【 0 0 5 0 】

次に、規準強度 I_0 に対する試料の零次回折ディスク強度 $I_{\text{zero-disk}}$ の比を求める (S 2 1 2)。この工程は、図 2 のステップ S 1 0 5 に対応する。

【 0 0 5 1 】

次に、強度比 $I_{\text{zero-disk}} / I_0$ を、あらかじめシミュレーションで計算した電子線回折像の強度 I_{calc} と比較し (S 2 1 3)、試料の厚さを判定して (S 2 1 4)、処理を終了する。ステップ S 2 1 3 ~ S 2 1 4 は、図 2 のステップ S 1 0 7 に対応する。

【 0 0 5 2 】

図 1 3 は、上述した試料測定法を半導体装置の評価に適用する例を説明する図である。図 1 3 では、半導体装置の欠陥評価のために試料の厚さを測定する。

【 0 0 5 3 】

結晶中に分布する転位や欠陥の量を表す方法として、転位密度 がある。転移密度 は体積 1 cm^3 中に存在する転位線の長さの総計で表わされる。転位密度 の単位は、 $\text{cm} / \text{cm}^3 = \text{cm}^{-2}$ であり、その値は結晶領域 1 cm^2 内を貫通する転位の個数を示す。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 4 】

図 1 3 の評価では、透過型電子顕微鏡を含む試料測定装置 1 0 で、2 次元的な転位および欠陥分布像を取得し、そこから転位線のトータルの長さを測定する。たとえば、図 1 3 (a) に示すように、化合物半導体 (たとえば G a N) の試料 4 1 を挿入し、所定面積 ($a \times b$) 内に電子線 E B を走査して、欠陥分布像を取得する。図 1 3 の試料 4 1 で紙面の縦方向に現れる黒線が転位線に相当する。

【 0 0 5 5 】

この例では、 $a = 2.25 \mu\text{m}$ 、 $b = 3.4 \mu\text{m}$ であり、試料 4 1 の観察範囲は、 $2.25 \mu\text{m} \times 3.4 \mu\text{m} = 7.56 \mu\text{m}^2$ である。電子顕微鏡像から測定した転位線のトータルの長さは、 $450 \mu\text{m} = 4.5 \times 10^{-2} \text{cm}$ となった。

10

【 0 0 5 6 】

次に、電子顕微鏡で観察した範囲の体積を求める。図 1 3 (b) に示すように、試料 4 1 のない状態でゼロディスクパターン 1 1 0 の基準強度 I_0 を測定する。試料 4 1 を挿入して、ゼロディスク領域での零次回折ディスク 1 3 0 の強度 $I_{\text{zero-disk}}$ を測定する。強度比 $I_{\text{zero-disk}} / I_0$ を、同じ材料 (G a N)、同じ照射面でのシミュレーション画像の強度 I_{calc} と比較することで、試料 4 1 の厚さを特定する。この例では、試料 4 1 の厚さは 200nm であった。

【 0 0 5 7 】

観察範囲の体積を計算すると、 $7.65 \times 10^{-8} \text{cm}^2 \times 200 \times 10^{-7} \text{cm} = 1.53 \times 10^{-12} \text{cm}^3$ となる。転位線のトータルの長さから観察範囲の体積から転位密度を計算すると、 $4.5 \times 10^{-2} / 1.53 \times 10^{-12} = 2.94 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ となる。

20

【 0 0 5 8 】

このように、実施形態の方法で試料厚さを測定することで、局所的な転位密度を正確に測定することが可能になる。

【 0 0 5 9 】

図 1 4 ~ 図 1 7 は、実施形態の試料測定方法を半導体評価に適用する別の例を示す。この例では、半導体装置の歪評価を行なう。

【 0 0 6 0 】

材料やデバイスの物性、電気特性は、その材料やデバイス内部に生じる歪による応力に影響される。そのため、材料やデバイス内部の応力の正確な測定が求められる。たとえば C M O S トランジスタの性能を向上、あるいは制御するため、トランジスタのチャンネル部分に圧縮応力もしくは引っ張り歪を誘起する構造が取られている。

30

【 0 0 6 1 】

図 1 4 は、実施形態の試料測定方法の歪評価への適用を示す概略図である。トランジスタは有限の厚さによって歪量が増えるため、試料の厚さを正確に計測する必要がある。一般に、デバイス構造像は S T E M により二次元的に観察することができる。歪分布を測定する場合は H A B F (High Angle Bright Field) - S T E M 法による観察を行って、定性的な歪分布を得る。H A B F - S T E M 法で得られる厚さ 200nm の試料の歪分布図と、その模式図を、図 1 6 (a) と図 1 7 (a) にそれぞれ示す。

【 0 0 6 2 】

H A B F - S T E M 法により、濃度が薄くなる方向に歪量が減少する分布像を得ることができる。H A B F - S T E M 場合、歪量は定性的に検出できるが、圧縮応力と引っ張り応力の識別ができない。また、また定量的な情報を得ることができない。そこで、C B E D 法による歪測定を行う。

40

【 0 0 6 3 】

C B E D 法では、図 1 4 (a) に示すように、試料の厚さ t 方向に収束電子線 E B を照射して歪量を測定する。図 1 4 (b) の白矢印で示すように、たとえば、ゲート 5 2 の直下から 1 5 点測定し、応力源の実測値とする。C B E D 法では、材料・デバイスの結晶構造の変化による歪量しか測定できない。

【 0 0 6 4 】

50

そこで、内部応力に変換するために、有限要素法（FEM: Finite Element Method）による応力の計算を行う。FEMは試料の厚さをパラメータとして使用するため、実施形態による試料測定法を用いて、デバイス全体を含む試料の厚さ分布を計測する。

【0065】

実施形態の方法により珪素工した試料の厚さ分布と、CBED法による歪測定結果（結晶の湾曲量）とに基づいてFEM計算を行う。FEM計算により得られた歪像とその模式図を、図16（b）および図17（b）にそれぞれ示す。

【0066】

実施形態の方法で正確に測定された試料厚さに基づいてFEM計算すると、得られる応力分布像（図16（b）、図17（b））が、定性的なHABF-STEM像（図16（a）、図17（a））とよく一致していることがわかる。双方の歪像で、デバイスのチャネル領域の歪量はゲート直下で大きく、ゲートから離れるに従って小さくなっている。

【0067】

図15は、CBED法およびFEM計算によって得られた歪測定結果を示すグラフである。NMOSとPMOSのそれぞれにおいて、歪評価が行なわれている。

【0068】

チャネル領域の歪量の絶対値が、ゲート直下で最大であり、ゲート直下から離れるにしたがって小さくなっている。また、NMOSとPMOSで湾曲方向が反対になっていることがわかる。これは、NMOSにおいてはNiSi（図14（b）参照）により発生した応力の影響によるもの、PMOSではSiGeにより発生した応力の影響によるものであると考えられる。

【0069】

このように、実施形態の試料測定方法を利用することで、半導体装置の歪評価を正確に行なうことができる。

【0070】

以上述べたように、実施形態の試料測定方法によると、高価なEELSスペクトロメータを用いなくても、厚さ測定が可能になる。試料がない状態で取得したゼロディスクパターンの強度を基準として測定するため、測定条件や装置に依存せず、電子線回折像取得装置12と情報処理装置22で試料の厚さを特定することができる。

【0071】

また、近年STEM観察の主流となっている収差補正STEM観察では、電子線照射角度を広くとるため、試料厚さの測定ごとに照射角度を低く設定し、試料を傾斜する必要があった。これに対し、実施形態の試料測定装置10および試料測定方法では、いったん傾斜角を設定すると厚さ測定ごとに試料傾斜を変更する必要がなく、晶体軸入射で厚さ測定ができる。

【0072】

さらに、EELS法とCBED法の双方の測定可能領域をカバーし、単一の手法で広い範囲にわたる厚さ測定を実施することができる。

【符号の説明】

【0073】

- 10 試料測定装置
- 11 電子線照射源
- 22 情報処理装置
- 31 メモリ
- 33 零次回折ディスク強度取得部
- 34 強度比算出部
- 35 厚さ判定部
- 40 電子顕微鏡

10

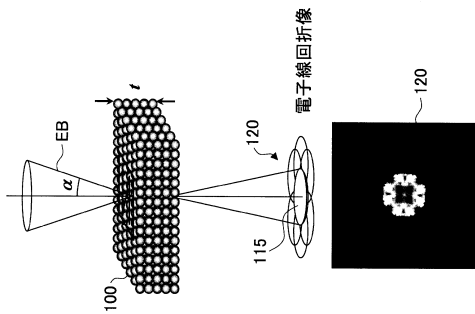
20

30

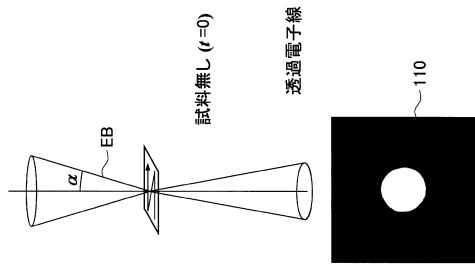
40

【 図 1 】

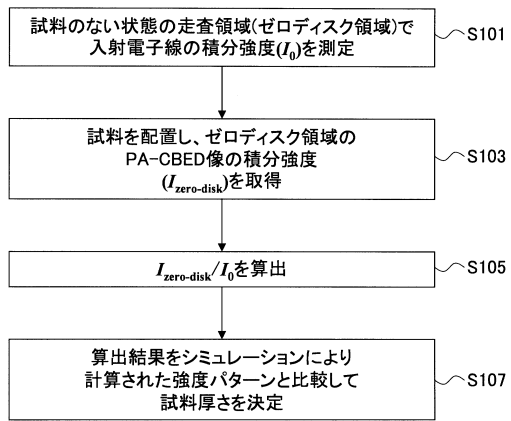
(b) SrTiO₃[001] PA-CBEDパターン



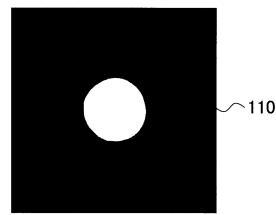
(a) ゼロディスクパターン



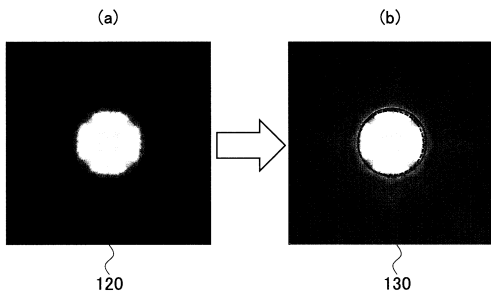
【 図 2 】



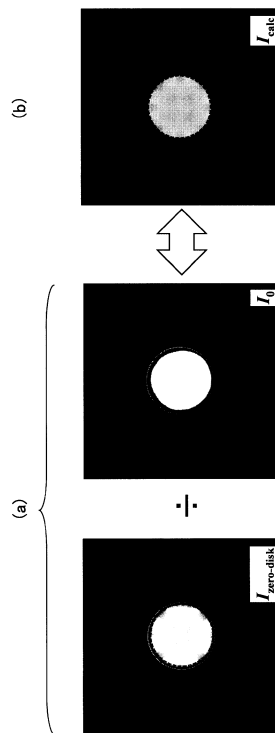
【 図 3 】



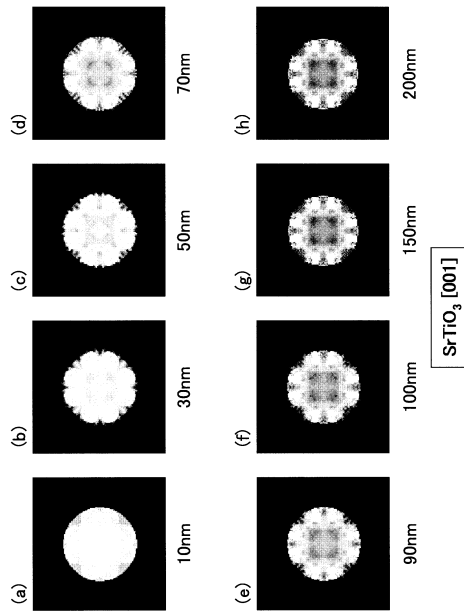
【 図 4 】



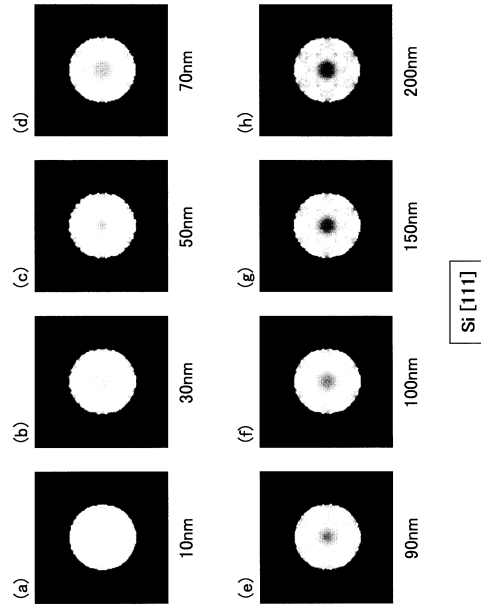
【 図 5 】



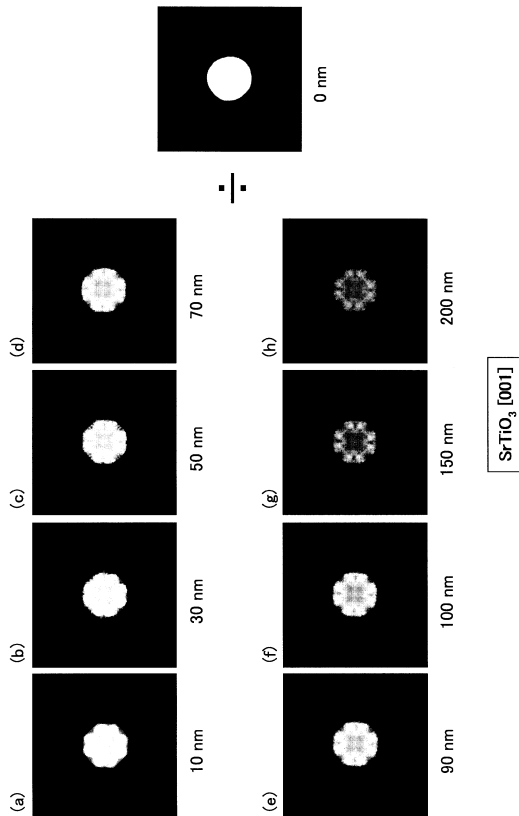
【 図 6 】



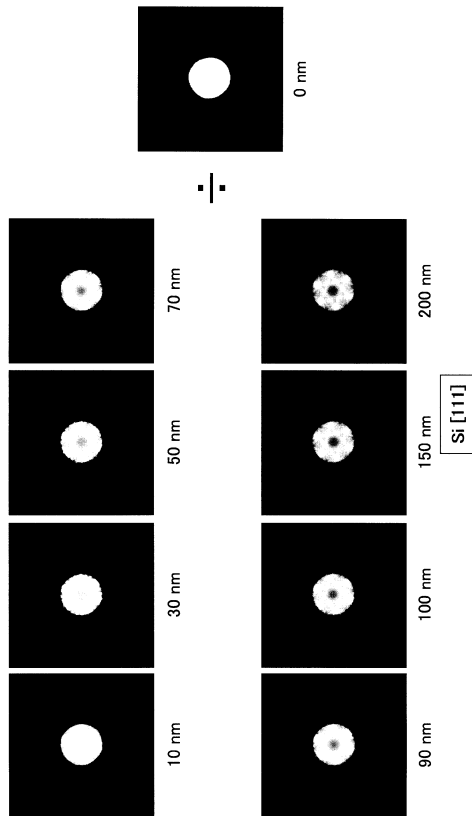
【 図 7 】



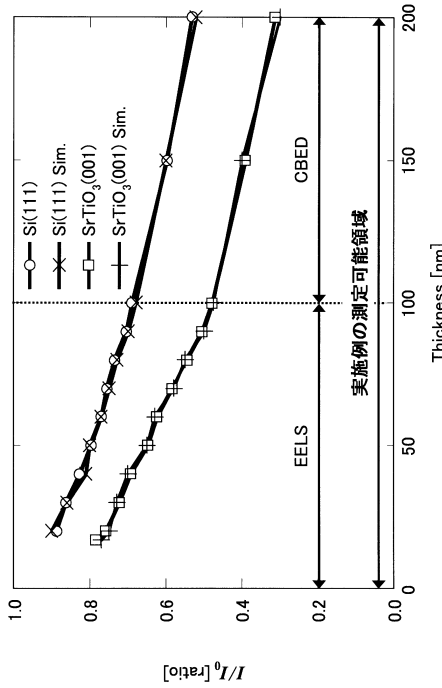
【 図 8 】



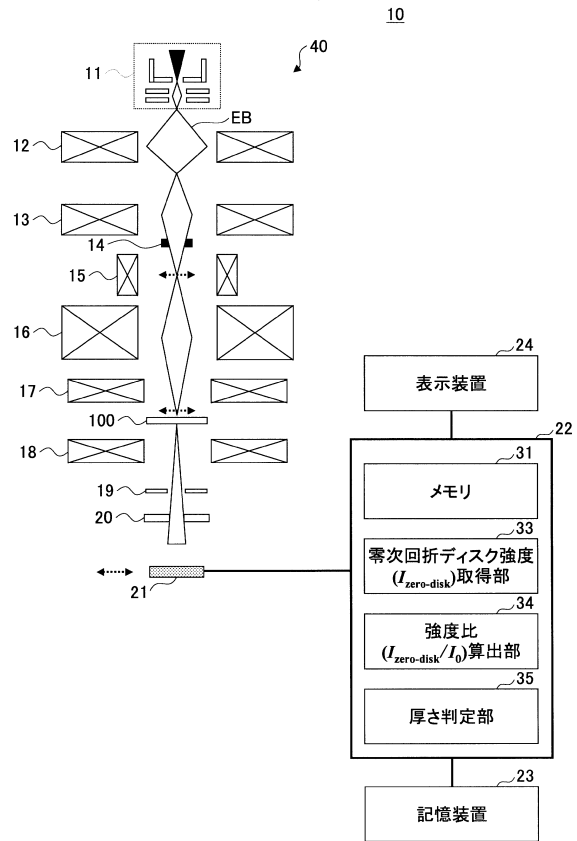
【 図 9 】



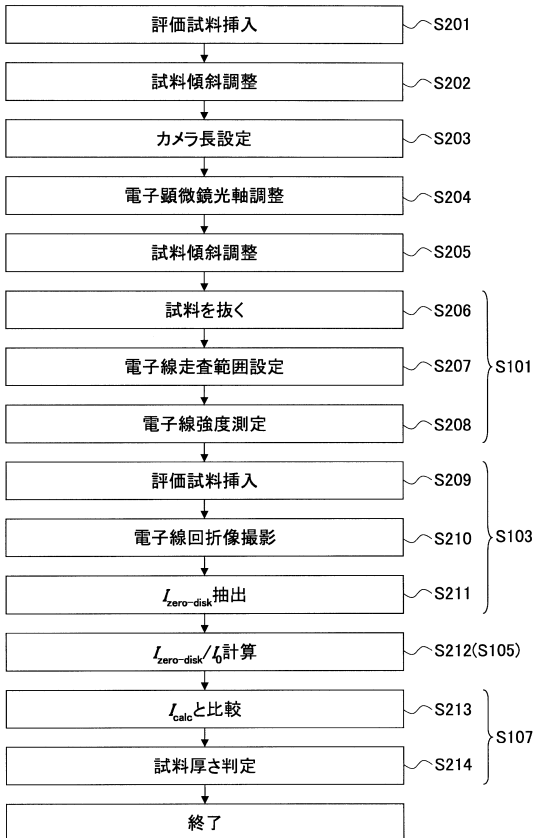
【図10】



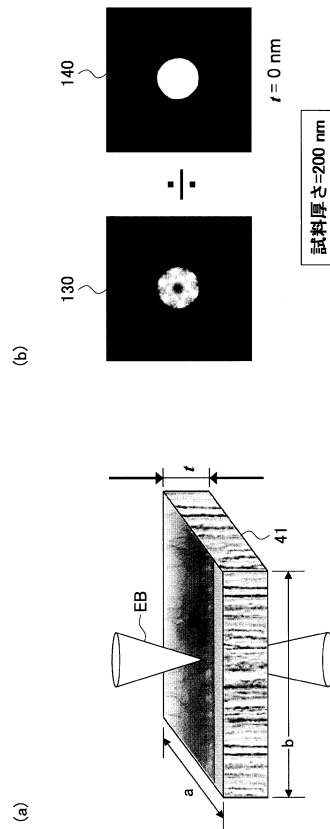
【図11】



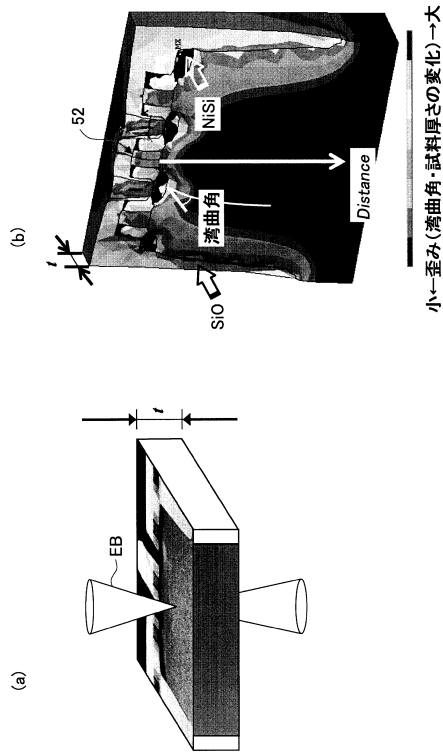
【図12】



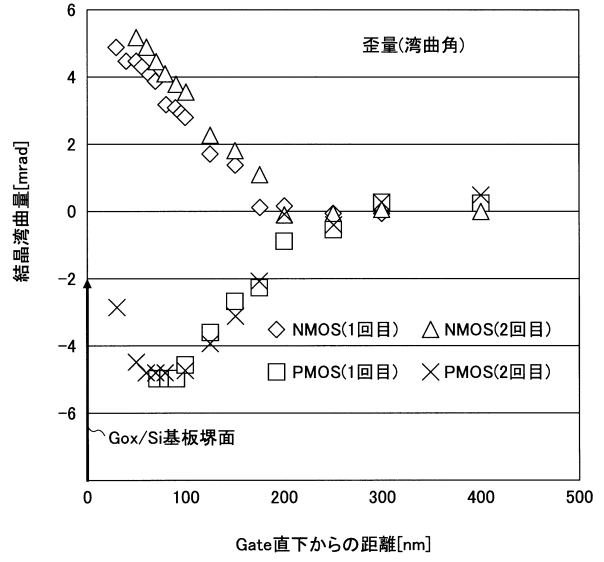
【図13】



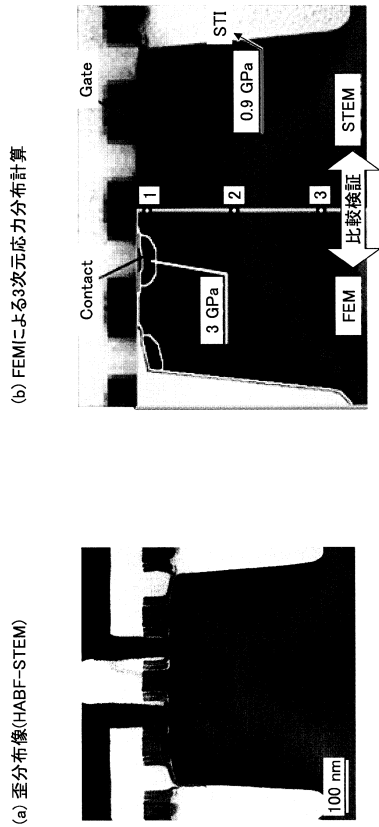
【 図 1 4 】



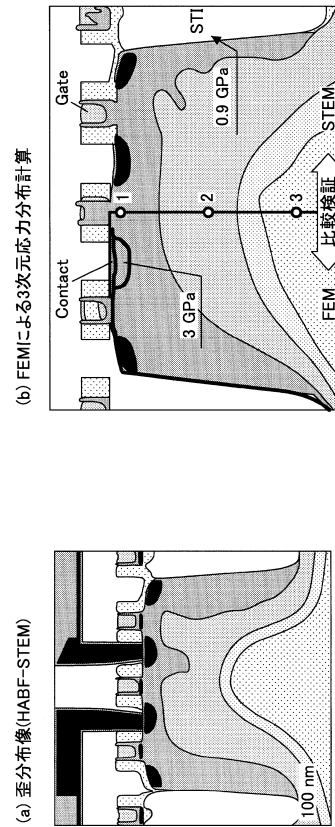
【 図 1 5 】



【 図 1 6 】



【 図 1 7 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特表2012-507728(JP,A)
特開2006-242914(JP,A)
特開2012-132688(JP,A)
特開2004-286639(JP,A)
特開2003-249186(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 15/00 - 15/08
G01N 23/00 - 23/227
H01L 21/64 - 21/66
H01J 37/00 - 37/295