

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3867524号
(P3867524)

(45) 発行日 平成19年1月10日(2007. 1. 10)

(24) 登録日 平成18年10月20日(2006. 10. 20)

(51) Int. Cl.

F I

GO 1 N 23/20 (2006. 01)

GO 1 N 23/20

HO 1 J 37/22 (2006. 01)

HO 1 J 37/22 5 O 1 J

HO 1 J 37/295 (2006. 01)

HO 1 J 37/295

請求項の数 3 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2001-204311 (P2001-204311)
 (22) 出願日 平成13年7月5日(2001. 7. 5)
 (65) 公開番号 特開2003-14667 (P2003-14667A)
 (43) 公開日 平成15年1月15日(2003. 1. 15)
 審査請求日 平成16年8月6日(2004. 8. 6)

(73) 特許権者 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (74) 代理人 100100310
 弁理士 井上 学
 (72) 発明者 高口 雅成
 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地
 株式会社日立製作所中央研究所内
 (72) 発明者 中村 邦康
 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地
 株式会社日立製作所中央研究所内
 (72) 発明者 梅村 馨
 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地
 株式会社日立製作所中央研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電子線を用いた観察装置及び観察方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電子銃と、

該電子銃からの電子線の放射角度を制限するコンデンサしぼりと、

該電子線を試料に照射するための第1の照射レンズと、

電子線を試料上で走査するための偏向コイルと、

試料と相互作用した電子線の拡大像・回折像を形成する対物レンズと、

該拡大像、該回折像をさらに拡大し、観察面に結像させる第2の照射レンズと、

一次電子線光軸に対して対称位置の回折点に対応する位置に配置された一対の位置検出器と、

当該位置検出器の出力信号の差を出力する信号処理回路と、

該出力信号の差から計算される前記試料の歪み量または応力が表示される表示装置とを具備することを特徴とする電子線を用いた観察装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の観察装置において、

前記観察装置は、前記検出器の一次電子線光軸に対する相対角度調整手段を有することを特徴とする観察装置。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 に記載の観察装置において、

前記観察装置は、前記検出器を電子線経路上から退避させる手段を有することを特徴と

する観察装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、電子顕微鏡で観察される回折像を用いた結晶性試料の観察装置及び観察方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

透過電子顕微鏡を用い、結晶性試料を20万倍程度以上に拡大観察して得られる格子像の任意微小領域をフーリエ変換し、得られた点パターン間距離の基準位置との相対変化量から歪みを測定、マッピング表示する技術に関する例についてが特開2000-65762の結晶歪み測定方法、結晶歪み測定装置及び記録媒体に開示されている。

【0003】

また、試料に収束した電子線が発生するCBE D像中に現れるHOLZ (High Order Laue Zone) 線交点位置を画像処理にて自動抽出し、この位置変化量を歪み量強度として色分け、等高線表示する技術が、特開平10-162768の収束電子線回折図形を用いた格子歪み評価方法および評価装置に開示されている。HOLZ線は高次の回折像の一種であり、線間隔は格子面間隔に対応することが古くから知られている。即ち、線間隔の変化から歪み、応力に換算できる。電子線は通常10nm以下に収束されるため、この分解能で応力を測定できる。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

前項第1の開示例は、応力・歪みに対する感度が不十分であるという問題があった。即ち、格子像における格子点は格子間隔に比べて大きく、5%程度の格子点位置変化がないとフーリエ変換像には歪み量が反映されない。従って、シリコン系半導体デバイス内で発生している歪みは大きくても3%程度、多くは1%以下であり、本測定法の検出限界以下であった。即ち、より微小な歪み量や応力を測定できる高感度化が課題であった。

【0005】

前項第2の開示例、即ち収束電子線回折についての課題は以下の通りである。CBE D法で扱う高次回折パターンでは、ごく微小な格子歪みが敏感に回折パターンに反映するため、応力・歪み感度は大変優れている。また、測定時の電子線は10nm以下に収束されており、空間分解能も十分に優れている。しかし、透過した低次回折パターンの回折点内に現れる低強度な高次回折パターンを観察する必要があるため、試料を極薄膜化し、さらにエネルギーフィルタを活用して非弾性散乱バックグラウンドを最大限低減させる必要があり、それでも試料厚さは100nm程度に抑えられる。試料をこの様に極薄膜にするため、薄膜化過程で応力や歪みが大きく緩和されてしまい、このため、試料が元々有していた情報を得ることが極めて難しいという問題があった。また、エネルギーフィルタを必要とする際はコスト高になるという問題もあった。さらに、高次回折情報であるため、電子線照射ダメージの影響を大変受け易いという問題もあった。このように、本技術から、厚い試料での低次回折像観察法が求められていた。

【0006】

以上を纏めると、半導体デバイスの応力・歪み評価に必要な条件は、高空間分解能、高応力・歪み感度、観察試料の厚膜化と低次回折像の観察の両立であり、これらのうち一つでも欠けていると実用技術とはならない。実用的な応力・歪み測定技術を確立した後、デバイス内部の応力分布を高分解能で2次元的に可視化することが解決すべき課題となる。これを用いデバイス作製時における応力低減プロセスを開発するためのラインからの抜き取り検査アルゴリズムの確立とこれを可能とする装置本体、サンプリング等の周辺技術の確立が次なる課題となる。

【0007】

【課題を解決するための手段】

まず高分解能を実現するため、電子線による回折像を用いる。特に10nm以下の電子線を照射するため、電子顕微鏡のコンデンサ絞りで電子線を微小に絞るナノディフラクション光路を取る。ナノディフラクション光路を取った場合、同時に試料に細い電子線を平行に照射することも出来る。ここでの平行性は、0.5mrad以下とする。これはC B E D法が10mrad以上の大きな照射角を有する電子線を非平行照射するのと大きな違いである。電子線を平行照射することで、回折像のスポット径が十分に小さくなり、格子面間隔をスポット間隔から得る際に高精度に測定できるようになり、応力・歪み感度を向上できる。厚い試料を観察するためには、試料内での吸収の少なく強度の強い222方向以下に回折された低次回折点を観察することにする。これにより厚い試料の観察が可能となり、試料薄膜化時の応力・歪みの緩和は大きく抑えられることになる。この様に低次回折像をナノディフラクション光路で結像することで、10nm以下の高分解能、0.5%以下の高感度、従来に比べ、10倍以上の厚い試料での観察が両立できるようになる。

10

【0008】

さらにデバイスの応力・歪み分布を可視化するため、以下の手段を施す。すなわち、上記回折像測定を例えば1ビットのトランジスタ内で数10点測定する。同一ビットの基板部でも回折像を測定する。そして、基準と成る格子面間隔は基板部で測定し、各測定点で測定された格子面間隔との差が歪み量となる。応力は格子面の歪み量と比例関係にあり、比例定数は元素や面方位ごとに固有である。従って、基板に対して垂直方向と水平方向にある回折点間の变化を各々2次元的に電子顕微鏡写真上に重畳させて記述することにより、応力・歪みの2次元分布を、デバイスの構造に対応させて可視化できる。

20

【0009】

応力低減プロセス確立のためには、ラインを流れるウエハから目的のビットのトランジスタを抽出する。ここで着目するプロセスの前後から試料を抽出することで、該当箇所での応力・歪みの蓄積の様子を把握できる。また、プロセスAの後、ある試料はプロセスB、別の試料はプロセスCで作製する。ここで、プロセスB後、プロセスC後の試料を抜き取り、応力・歪み量を測定することで、プロセスBとプロセスCの応力・歪みに対する長短を把握することが出来、これを繰り返すことで応力低減プロセスを見出すことができるようになる。

【0010】

【発明の実施の形態】

30

[実施例1]

透過電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope; 以下TEM)で結晶性試料を観察する場合、電子線と試料が回折・干渉現象により、結晶構造、組成等に起因した拡大像と結晶構造に対応した形の回折像を得ることが出来る。従来のTEMにおける結像メカニズムを図2を用いて説明する。電子源135から放射された電子線は放射角をコンデンサしぼり120で制限されたあと第1コンデンサレンズ121と第2コンデンサレンズ122で縮小され、対物レンズ前磁場123で平行に試料124上に照射される。試料に照射された電子線の一部はそのまま相互作用なしに透過するが、残りの一部の電子線は結晶面で回折される。この時、結晶面間隔を d 、回折角を θ 、電子線波長を λ とすると、ブラッグの回折の条件式と呼ばれる、 $2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$ ($n=1,2,3,\dots$) が成り立つ方向に回折された電子線は干渉効果により強度が増大し、この条件を満たさない方向への電子線の強度は極めて少ないという現象が古くから知られている。試料から無限遠位置で上記条件を満たした電子線同士が干渉して回折像を形成するが、TEMでは試料直下の対物レンズ後磁場125により回折像が後方焦点面126に結像される。回折像は電子線の軸に垂直な面に2次元的に分布している。回折像は上記ブラッグの条件を満たした形状のパターンであるため、これを解析することにより結晶構造や結晶面間隔を評価することが出来る。TEMにおいては、対物しぼりが後方焦点面126位置に設置される。また、試料の像が対物レンズ後磁場125により結像される。この像を第1中間像127と呼ばれ、TEMではここに制限視野しぼりが設置される。この様に、対物レンズ下に回折像と拡大像の2種の像が形成されており、以下の中間レンズ128や投射レンズ131の電流条件で何れの像を結像させるか、また倍率等の決定をすることが出来る

40

50

。図 2 (a)では、第 1 中間像127を中間レンズ128で第 2 中間像129に拡大結像し、さらにこれを投射レンズ131で観察面132上に拡大像133として結像させている。図 2 (b)では、後方焦点面126の回折像を図 2 (a)と異なった励磁電流条件の中間レンズ128で中間回折像130に拡大結像し、さらにこれを投射レンズ131で観察面132上に電子回折像134として結像させている。

【 0 0 1 1 】

回折像から結晶構造に関する情報を得られることを先に述べたが、次に図 3 を用いて回折像から結晶の歪みや応力を測定する方法を説明する。電子線60が試料61に入射すると、電子線は結晶面で回折される。試料に歪みが無い場合の結晶面を結晶面(a)64と結晶面(b)65とし、応力により歪みが発生した結果、結晶面(b)65が歪み結晶面66に移動したものとす 10
る。各結晶面で回折された電子線は電子レンズ62で屈折し、この結果回折像63が形成される。ここで、歪みが無い場合の回折像における回折点間距離をaとする。結晶面間隔dと回折点間距離aは反比例の関係にある。従って、回折点間距離の変化量を Δa とすると、格子歪み $d/d = \Delta a/a$ の関係が成り立つ。また、応力は歪み量に材料や結晶面の種類に固有な比例係数である弾性定数 k を掛けたものであるため、 $P = k \cdot d/d = k \cdot \Delta a/a$ である。従って、回折像から歪み量や応力を測定できることが分かる。

【 0 0 1 2 】

数ミクロン程度の比較的広い面積に照射した電子線で形成される回折像から格子面間隔を測定することは従来から可能であった。本発明では、図 4 で説明するナノディフラクション法と呼ばれる電子線照射法による回折像から低次回折点間距離を測定し、これから歪みや 20
応力を算出する方法、及び自動で解析・表示する方法以降が新規な点である。近年の半導体デバイス等での応力評価では、10nm程度以下の高分解能性が重要であり、ナノディフラクション法は、10nm程度の微小部で良好な回折像をとることができる。図 3 に示す回折像63に現れる回折点間隔を精密に測ることが、格子面間隔の変化を精密に測定することにつながる。一方、回折点の直径は、試料への電子線の照射角に反比例している。従って、試料に電子線を可能な限り平行照射することが重要である。図 4 において、電子線はFE電子銃1から放射される。電子源には、細い針の先端に高電圧を印加して電子線を引き出すフ 30
ィールドエミッション(FE)型電子銃が望ましい。何故ならば、放射領域が狭く、エネルギー幅が小さいため、電子レンズで微小に収束できるためである。ここでFE電子銃1としては、冷陰極型とショットキーエミッション型の両方が含まれる。FE電子銃1から放射された電子線はコンデンサしぼり120で放射角を制限され、コンデンサレンズ50と対物レンズ前磁場123で成形されて試料124に照射される。試料を透過した拡大像、回折像は、検出器51で検知される。本発明では、図 4 のようにコンデンサレンズ50で対物レンズ前磁場123の前で一度収束点を形成し、対物レンズ前磁場123で拡大して試料面上に平行照射する。このとき、従来法では、コンデンサしぼり120には300 μ m 径程度の孔を有するものを用いる。これは十分な電子線量を試料に照射する事で、十分な明るさの透過像を得るためである。しかし、コンデンサしぼり120が大きい孔の場合、電子線は従来光路52を通るため、試料上には平行に照射できるものの照射領域が100nm以上と大きくなってしま 40
う。そこで、本発明では30 μ m 径程度の小さいコンデンサしぼりを用いる事で電子線をナノ回折光路53のように試料上に照射することにした。これにより、目標の10nm径程度の照射領域に電子線を平行照射できるようになる。照射角はレンズ径の収差等の影響を含めても0.4mrad以下と小さくできる。

【 0 0 1 3 】

次に、ナノディフラクション法を適用して得られた回折像とこれの解析法について説明する。シリコン系半導体デバイスの断面像観察を行う場合、通常電子線は<110>方向から入射することになるため、回折像70が典型的には図 5 に示されるような形状として観察される。回折なしに透過した電子線が収束する000点を中心に多くの回折点71が現れるが、解析に重要である点は、基板平行方向の220点、基板垂直方向の002点である。即ち、000点を対称中心として、等価な 2 つの220点間距離が(220)面間距離、即ちデバイスの横方向格子間隔72を表す。また、等価な 2 つの002点間距離が(002)面間距離、即ちデバイスの縦方 50

向格子間隔73を表す。従って、これらの格子間隔の変化を追跡することで、結晶面の歪みを測定する事ができる。例えば回折像70を1000×1000画素程度の電子顕微鏡用CCDカメラで撮影した場合、格子間隔を図6に示した方法で精密に測定できる。図6には、縦方向格子間隔73の強度プロファイルを示す。基板部プロファイル80は、デバイスを形成していない基板部分に電子線を照射して撮影した回折像から得られたプロファイルである。同様に、応力を受けていると考えられるデバイス構造近傍のシリコン結晶に照射して得られた回折像からのプロファイルが被応力部プロファイル81である。図6に示したように、各々のプロファイルには、000点ピーク82を中心とし、002点ピーク83と00-2点ピーク84が極大値となるプロファイルが現れる。プロファイルのピーク部をガウス分布、もしくはポアソン分布等でフィッティングすることで、ピーク頂点位置を正確に求める事にする。こうして、基板部プロファイル80からの002点間距離は663画素、被応力部プロファイル81からの002点間距離は671画素と求められたとすると、両者の差は-8画素である。歪み量は格子間隔変化量-8画素を基板部002点間距離663画素で割り算した値となる。即ち歪み量は-1.2%である事が分かる。また、歪み量の符号がマイナスであることは、格子間隔が伸びた事を意味しており、引張応力による歪みであることが分かる。同様に符号がプラスの場合は圧縮応力による歪みであることが分かる。

【0014】

拡大像の形成方法と電子線検出方法により、4つの方法が考えられる。以下、図7～図10にて説明する。図7は、拡大像や回折像をTEMで結像し、両者とも画素検出器で検知する方式を表した図である。本方式では、場所探しや構造観察のために拡大像を得る際は、照射レンズ2を調整し、電子線をTEM光路101で試料124に照射させる。次にナノディフラクションを撮影する際は照射レンズ2の励磁電流を大きくし、電子線をナノ回折光路102で試料124に照射させる。そして、拡大像、回折像とも、撮像管やCCD(charge-coupled devices; 電荷結合素子)、ラインセンサのように、電子線が入射した位置と入射強度を出力情報とする画素検出器104にて撮像する。本方式では、撮像結果を簡便にTVモニタやパソコンで表示、解析できる点であるが、2種の光路を頻繁に切り替えていく複雑さが欠点であった。図8は、拡大像や回折像を透過電子顕微鏡で結像し、拡大像を画素検出器104、回折像を位置検出器103で検知する方式を表した図である。格子面間隔測定には、回折点の2点間距離を測定する事を図6にて述べた。従って、各々の回折点に専用の位置検出器103を配置する。位置検出器103とは、電子線や光線が入射した位置を2次元で電圧表示する検出器であり、PSD(Position sensitive detector)とも呼ばれる。一次電子線方向に対して対称位置の回折点を測定できる位置に一对の位置検出器103を配置する。従って、2つの位置検出器103からの出力電圧の差を信号処理回路11で信号処理して再出力する事により、格子面間隔の変化量、即ち歪み量や応力に対応した電圧の信号が得られる。信号処理回路11から歪み量や応力に対応した電圧の信号が直接得られるため、図6で示したプロファイル測定と解析が不要となり、高速観察が実現できるというメリットが出てくる。拡大像については、図7と同様に画素検出器104で撮像する。本方式では、2種の光路を頻繁に切り替えていく複雑さについては同様の欠点として残存する。次に、ナノディフラクションを撮影するために、電子線は10nm以下に収束されている事を利用し、この収束電子線を試料面上でスキャンし、スキャンコイル信号(照射位置情報)と検出信号(信号強度)の同期を取って結像する走査型透過電子顕微鏡(以下、STEM)の適用例を考案した。図9では、回折像は図7同様に画素検出器104で撮像する。拡大像は走査透過電子顕微鏡で一般に用いられる暗視野型検出器18、もしくは明視野型検出器15で撮像する。これらの検出器は、入射した電子線の強度を信号電圧として出力するものであり、表示装置13にてSTEMスキャンコイル3の信号電圧と同期を取って試料の拡大像を形成する。画素検出器104からは図5のような回折像が得られ、これから図6のようなプロファイルを測定する必要がある。従って、歪み、応力値を高速に検出することは難しいが、図7、8の例と異なり、照射レンズ2の条件は変える必要が無い点が操作の安定性や測定位置の再現性の観点からメリットである。さらに、暗視野型検出器18と画素検出器104は物理的に両立し、共通の走査電子で拡大像と回折像を同時に観察できることから、回折像を測定した位置と構造の拡大

10

20

30

40

50

像との対応付けが高精度に可能であるという大きなメリットがある。一方、明視野型検出器15を使用する際は、拡大像を観察する間は画素検出器104を電子線経路上から退避させる必要があり、拡大像と回折像を同時に観察することは出来ない。図10は、回折像を位置検出器103、拡大像を明視野型検出器15で検出する方法である。この方式では、図9同様、共通の走査電子線で回折像と拡大像が同時に観察される。また、照射レンズ2の条件を変える必要が無く、位置検出器8から直接歪み量や応力に対応した電圧の信号が得られるため、観察が極めて高速になり、さらに拡大像と歪み、応力の2次元分布像間のずれが全く無いという大きなメリットがある。拡大像を図9で示す位置に配置された暗視野型検出器18で撮像することも可能である。

【0015】

以上、ナノディフラクションによる微小部の歪み、応力測定法とこのための電子線照射・検出方法について述べてきた。図1にて装置構成を纏めて説明する。FE電子銃1から放射された電子線は照射レンズ2にて平行な微小プローブに成形され試料6上に照射される。このとき、微小プローブ部を試料上での異なった位置に照射する際には、STEMスキャンコイル3でビームを振るか、試料ステージ21で試料を振るかの何れかの方式が考えられる。試料を透過した電子線は第1投射レンズ4にて像の倍率を変化させ、第2投射レンズ5にて検出器上にフォーカスさせる。尚、第1投射レンズ4と第2投射レンズ5の役割を逆にすることも可能である。回折電子7は位置検出器8で電子線の入射位置を計測するか、画素検出器10で入射位置と強度を計測する。一方で画像情報を有する電子線は画素検出器10で入射位置と強度を計測するか、明視野型検出器15もしくは暗視野型検出器18で強度を計測する。ここで、暗視野型検出器18や画素検出器10は電子線経路上にあって他の検出器の邪魔になることがあることから、電子線経路外に退避させるために各々、光軸出入機構20、光軸出入機構17を設けることにする。また、試料6のセットされる方向により、回折像が電子線方向の垂直面内で回転するため、回折像と位置検出器8の相対角度関係を調整するため、ローテーション機能9を設け、位置検出器8を電子線方向の垂直面内で回転させることにする。位置検出器8は2個で1セットとし、例えば回折像における220点と-220点の位置に設置するものとする。ここで4個を1セットとし、さらに002点と00-2点位置に設置し、2方向の歪み、応力を同時に測定する事も有効である。位置検出器8の出力信号は信号電圧が電子線の入射位置を示しており、回折点間隔を求めるためには、信号処理回路11にて、2個の位置検出器8の信号電圧差を求める。このとき、位置検出器8の信号電圧差をアナログ差分回路で求めても良いし、一度信号をデジタル変換し、メモリ上で両信号電圧差を計算しても良い。また、差分電圧をデジタル数値で出力しても良いし、アナログ変換して再度アナログ信号として出力しても良い。何れの方法でも、回折点間距離に相当した電圧値が表示装置13に伝送され、ここでSTEMスキャンコイル3の信号電圧値と同期を取って2次元表示することで、歪みや応力量に対応した2次元マッピングを得ることが出来る。一方、対応する試料6の拡大像は暗視野検出器回路19、明視野検出器回路16、信号処理回路12を経て表示装置13に表示される。画素検出器10で回折像を検出する場合は、信号処理回路12で回折点プロファイルの測定、プロファイルのガウス分布フィッティングと回折点間処理の画像処理による算出を行い、回折点間距離に相当する電圧信号もしくは電圧値を出力し、表示装置13に伝送するものとする。本装置では、厚い試料を観察した場合に回折像のバックグラウンドとして発生する非弾性散乱電子コントラストを除去するため、各種検出器の上方にエネルギーフィルタ14を設置するものとした。

【0016】

次に、応力測定アルゴリズムを説明する。図15にてTEMを用いた測定、図16にてSTEMを用いた測定について説明する。TEMを用いた場合、はじめに処理201に示すように、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の厚さに試料を薄膜加工する。電子顕微鏡の試料作成に有効であり広く用いられているFIB(Focused Ion Beam)法が適当である。従来法のCBED法では、高次電子回折像から格子間隔変化を求めていたが、高次であるため強度が弱く、試料が厚い場合は内部での吸収のため回折像の像質が著しく不十分になった。このため、試料厚さを $0.1\mu\text{m}$ 以下とし、

10

20

30

40

50

回折像観察が行われてきた。しかし、試料加工時の応力緩和の点では、試料は厚いほうが望ましく、本発明は低次回折像から歪み、応力を算出できるようにしたことから、目標の $0.1\mu\text{m}$ 以上の観察を可能にした。次に処理202に示すように、電子顕微鏡の試料ステージに試料をセットし、電子線を結晶面に対し厳密に平行入射するよう試料ステージで方位合わせをする。次に回折像を撮像する。ここで試料が傾斜していると回折点強度のアンバランスが発生し、回折点間距離測定の精度が下がる事が分かっており、これを防ぐために方位合わせは必須である。こうして処理203に示すように図4に図示されるナノ回折光路53を形成し、処理204に示すように、投射レンズを調整することで、焦点の合ったカメラの受光面積に合った大きさの回折像を形成しCCD等の画素検出器上に結像させる。回折点間距離を正確に測定するためには、受光面上でできるだけ回折点が離れている事が望ましく、例えば正方形の受光面を持ったCCDで回折像を撮像する際は、間隔を測定される回折点ペアを受光面の対角線上に並ぶように、試料を回転するか、投射レンズを調整して回折像を回転するか、画素検出器を回転させることにする。こうしてナノディフラクション法による回折像を撮影した後、試料への照射条件を変え、電子ビームを広げ、TEMの拡大像で視野を確認し、次に測定点を探す。ここで、結晶試料と電子線の相対位置を変化させる。目的視野位置に電子線を振っても良いが、むしろ処理205に示すように、ステージで電子線経路上に視野を移動させる方が回折像の歪み等を防ぐ点で望ましい。こうして拡大像と回折像を相互に切り替え観察を繰り返していき、処理206に示すように目標点数を満足した後は、取得した回折像の解析を行い、結晶の有する特性、すなわち歪みや応力を求める工程に移る。まず、処理208に示すように、目的の回折点間距離を測定し、基準値からのずれを求める事で歪み量 d/d を算出する。次に処理209に示すように、元素や結晶構造、結晶面ごとに異なる弾性定数を歪み量に掛ける事で、応力を算出する。例えば、シリコンの(220)面の場合、弾性定数 $k = 1300\text{MPa}$ 、シリコンの(002)面の場合、弾性定数 $k = 1700\text{MPa}$ である。即ち、シリコンの(220)面で回折点が 0.1% シフトしていた場合、応力は 130MPa であることが分かる。最後に図12、図13、図14のような形にデータ整理を行い、処理210に示すように、歪みや応力の2次元分布を可視化する。即ち、拡大像上に歪みや応力といった特性値を合成して表示する。表示法としては、例えば、図12のような2方向にクロスした矢印表示(処理211)や、図13のような等高線表示(処理212)、図14のようなカラー表示(処理213)があり、適宜コンピュータ上で表示を切り替えるのとする。STEMを用いた場合、図16の処理221に示したように、試料作製についてはTEM同様FIBで平坦かつ厚めの薄膜を作成し、処理222のように厳密に方位合わせをする。次に処理223のように、STEM像で試料構造を確認した後、実施例3で述べるように、観察領域のトリミング位置を指定する(処理223)。その後、処理224に示すように、回折像を位置検出型検出器位置に入射するようにアライメントする。位置検出型検出器の出力をスキャンコイルの電圧値、即ち照射位置情報と同期を取ってデジタル変換して(処理225)、対になる検出器の電圧差を数値計算する方法と(処理226)、電圧差分をアナログ回路で処理し、改めて電圧差に対応した信号を出力しても良い(処理227)。尚、照射レンズや対物レンズの収差のため、ビームスキャンに合せて回折像がスキャンしてしまう場合は、回折像の位置ずれ量を相互相関法や位相限定相関法の画像処理で検出し、回折像のスキャンを打ち消すデスキャンを偏向コイル等にフィードバックする処理228を行う。次に、基準点となる位置を拡大像上でカーソル位置指定し(処理229)、ここでの格子間隔を基準として歪み、応力を算出する(処理230)。最後にスキャンコイルの電圧値、即ち照射位置情報と同期を取って上記歪み応力量の2次元表示を行う(処理231)。ここでも表示コンピュータ上で、構造像の表示(処理232)、2方向クロスの矢印表示(処理233)、等高線表示(処理234)へ適宜変換して表示する事とする。

【0017】

以上の処理工程は以下のように纏めて表現される。

【0018】

図10で示される回折像を位置検出器103、拡大像を明視野型検出器15で検出する方法では、試料を試料ステージに載置する工程と、電子線を結晶試料の所定の領域を走査させながら照射する工程と、照射された電子線を用い所定の領域の拡大像を取得する工程と、前記

10

20

30

40

50

電子線を結晶試料の所定の領域に照射し試料から放射される回折像を一对の第1の検出器で検出する工程と、を具備することを特徴としている。ここで第1の検出器とは、位置検出器であり、電子線や光線が入射した位置を2次元で電圧表示する機能を有する。

【0019】

図7で示される回折像と拡大像を画素検出器で検出する方法では、試料を試料ステージに載置する工程と、電子線を収束する工程と、結晶試料の第1の領域に照射する工程と、照射された電子線を用い結晶試料から放射される第1の回折像を第2の検出器で検出する工程と、結晶試料と電子線の相対位置を変化させる工程と、電子線を結晶試料の第2の領域に照射する工程と、照射された電子線を用い結晶試料から放射される第2の回折像を前記第2の検出器で検出する工程と、拡大像を得るための電子線の試料への照射条件を変える工程と、前記第1と第2の領域を含む如く拡大像を取得する工程と、前記第1と第2の領域の回折像から結晶試料の特性を得る工程と、前記拡大像上に前記特性値を合成し表示する工程と、を具備することを特徴としている。ここで第2の検出器とは、電子線や光線が入射した位置と入射強度を出力する機能を有する。

10

図9に示される回折像を画素検出器、拡大像を明視野型検出器又は暗視野型検出器のいずれか一方又は両方で検出する方法では、試料を試料ステージに載置する工程と、電子線を結晶試料の所定の領域を走査させながら照射する工程と、照射された電子線を用い結晶試料から放射される第1の回折像を画素検出器で検出する工程と、結晶試料と電子線の相対位置を変化させる工程と、電子線を結晶試料の第2の領域に照射する工程と、照射された電子線を用い結晶試料から放射される第2の回折像を前記画素検出器で検出する工程と、前記第1と第2の領域を含む如く拡大像を第3の検出器で検出する工程と、前記第1と第2の領域の回折像から結晶試料の特性を得る工程と、を具備することを特徴としている。ここで第2の検出器とは、STEMに装着される明視野型検出器か暗視野型検出器であり、入射した電子線や光線の強度に比例した信号電圧を出力する機能を有する。

20

【0020】

図8に示される回折像を位置検出器、拡大像を画素検出器で検出する方法では、試料を試料ステージに載置する工程と、電子線を収束する工程と、結晶試料の第1の領域に照射する工程と、照射された電子線を用い結晶試料から放射される第1の回折像を第1の検出器で検出する工程と結晶試料と電子線の相対位置を変化させる工程と、電子線を結晶試料の第2の領域に照射する工程と、照射された電子線を用い結晶試料から放射される第2の回折像を前記第1の検出器で検出する工程と、拡大像を得るための電子線の試料への照射条件を変える工程と、前記第1と第2の領域を含む如く拡大像を取得する工程と、前記第1と第2の領域の回折像から結晶試料の特性を得る工程と、前記拡大像上に前記特性値を合成し表示する工程と、を具備することを特徴としている。

30

[実施例2]

本実施例では、実施例1で記載した装置を用い、半導体デバイスにおける歪み、応力の測定方法と表示方法について説明する。透過電子顕微鏡、走査透過電子顕微鏡では、電子線が試料を透過する際の相互作用を情報として利用しているため、試料の対象個所を薄膜化する必要があり、薄膜化方法はイオンビームを用いる方法等多くが実用化されている。こうした方法を用いて、切りだし薄膜化した半導体のトランジスタ構造断面図を図11に示す。典型的なトランジスタでは、素子分離層41で挟まれた領域のシリコン基板44上に、プラグ40、ゲート42が形成されており、図中の応力発生場43の結晶が大きく歪んでいる場合が多い。このような場合、基板深部は元々のシリコン結晶状態である事が多く、ここを格子間隔の基準点とし、図中に示したように複数の点に電子線を照射して回折像もしくは格子間隔に対応した電圧の信号を取得する。次に図中に示した測定点でも同様の測定を行う事で、基準点に対して、格子間隔の変化量を算出する。同時に測定箇所を含む試料構造を表す拡大像を取得しておく。

40

【0021】

こうして得られた拡大像上に、格子間隔の変化量、すなわち歪み量を図12のように表示する。即ち、歪み量に比例した長さの歪み量強度表示矢印31を構造像写真32上に書く

50

。ここで矢印の長さや歪み量の関係をスケールバー33にて明示する。ここでは、基板平行方向、垂直方向の2所の矢印をクロスさせており、クロスポイントが電子線照射位置を示す。また、内向きの矢印対が圧縮歪み、外向きが引張歪みを示すものとする。構造像写真82上には、基準点表示34も合わせて記載しておく。さらに、歪みと応力は比例関係にあることから、矢印長さを応力として表示する事も出来る。この場合、スケールバーは応力量を規定するものとする。

【0022】

結果の表示方法には他の例が考えられる。例えば図12データを元に、等しい歪みもしくは応力量を示す場所を等歪み線、もしくは図13に示す等応力線85でつなぐことができる。ここでも等応力線85や応力値表示を構造像写真32上に書くものとした。本方法では、1枚の写真上には1方向の歪み、応力分布しか記載できないが、歪み、応力値の変化や分布形状がより明瞭になるというメリットがある。図14における応力カラーマップ90では、応力強度をカラースケールバー91で規定される色で表示させた。本方法では、カラースケールバー91に応力値と歪み量の両方を併記できるメリットがあるほか、引張と圧縮応力が入り混じる場合に分かりやすい表示である。

[実施例3]

操作画面の実施例を図17に示す。操作画面は大きく操作部と結果表示部に分かれている。操作部には、データ収集開始・停止ボタン300が設けられている。観察方式選択プルダウンメニュー301により、図8から図10の4方式のどれかを選ぶことにする。また、電子線照射位置を替える際に、ビームを振るかステージで試料を振るかの選択を走査方式選択プルダウンメニュー302で選択する。また、取得画像の解像度は、電子線スキャン幅やカメラの画素選択、ピンニング等で可変であり、これを解像度選択プルダウンメニュー303で選択する。同様にスキャン速度を走査速度選択プルダウンメニュー304で選択する。ここで、解像度を増やすほど画像取得に時間がかかる。また、走査速度を遅くするほど像のS/Nは向上するが画像取得に時間がかかるようになり、目的に応じた最適値に設定する必要がある。さらに回折像の焦点合せや回折像の大きさを、照射レンズ1制御・表示バー305や照射レンズ2制御・表示バー306で調整する。位置検出器の設置角度を図1記載のローテーション機能9で調整することを実施例1で述べたが、これはPSD角度遠隔操作制御バー307で調整できる。

【0023】

結果表示部では、複数種の画像を並列表示できる。各種構造像や各種応力表示のうちどれを表示するかは、結果画面表示切替ボタン308で選択する。また、1画像で1方向の歪み、応力結果しか表示できない場合、その方向を応力表示方向選択プルダウンメニュー309で選択する。材料や格子面の種類により弾性定数が異なることは既に述べた。これらの値をデータベースとして保有し、測定後は、材料・面方位選択プルダウンメニュー310で条件を設定することで、歪み量から応力に自動的に変換できるものとする。画像の階調や輝度に応じて適当な画像の明るさ・コントラスト調整が必要であり、表示画像輝度調整バー311で画像のゲインとオフセット量を調整する。本実施例では、結果表示部313にSTEM明視野像を表示し、結果表示部314に応力マップを表示している。例えば先に構造像を観察し、目的視野を確定した後、スキャンエリア指定ポイント319を指定するものとする。実際の試料では、応力は基板部のみ測定する事が多く、他の構造物、特に酸化膜のような非晶質領域の応力を測定する事は無い。従って目的外領域でのスキャンをしないよう、スキャンエリア指定ポイント319を結んでできる閉領域以外ではスキャンコイルをブランキングすることで走査時間短縮が可能となる。こうして構造像と対応した応力マップは表示される。ここで、両画面に共通して表示されるスポット測定カーソル315位置の座標と応力値をスポット測定位置・測定値表示316に表示させると、全体像のみならず、関心のある局所についての定量的な議論が可能となり極めて有効である。この時は、走査ビームはスキャンせず、カーソル指定箇所に固定とし、回折点間距離から換算した歪み、応力値をスポット測定位置・測定値表示316に表示させる。走査ビームストップと測定開始・停止は、スポット測定開始ボタン317で指示する。構造像のスケールバーのして、結果表示部スケ

ールバー318が表示されるほか、応力マップ下には、カラスケールバー91やスケールバー83が表示される。最後にデータをコンピュータのハードディスクに保管(セーブ)する際、データに関する覚え書きをテキストファイルで添付して保管できるようにする。このためにコメント入力欄312が操作画面上に設けられている。

[実施例4]

汎用200-300kV電子顕微鏡では、電子線が透過できる厚さ、すなわち $1\mu\text{m}$ 以下に試料を薄膜化する必要があり、歪みや応力は元の状態から変化し緩和してしまう。緩和を極力抑えるには、なるべく厚い試料を作製することで可能となる。近年、FIB(Focused Ion Beam)、即ち収束イオンビームで目的箇所を切出す技術が進んでおり、図18に示した形状の電子顕微鏡試料400が容易に作製できる。電子顕微鏡試料400の大きさは約 $10\times 10\times 2\mu\text{m}$ であり、特に観察領域は $0.1\text{--}0.3\mu\text{m}$ 程度の厚さである。電子顕微鏡試料400はピンセット等で容易にハンドリングできるようにメッシュ401上にタングステンデポ接着剤402で固定してある。試料薄片部403は試料支持部404に挟まれ保持されている。このとき、先ず、試料薄片部403の試料支持部404に挟まれる幅はなるべく狭くする。この幅が広すぎる場合、試料薄片部403の変形等による新たな応力発生の可能性があるためであり、例えば図11に示した構造のトランジスタ1ビット分を測定するだけの場合、この幅は $1\mu\text{m}$ 程度にできるし、複数ビットのトランジスタを同一条件で測りたい場合は薄片部幅を $5\mu\text{m}$ 程度にする事を心がける。試料薄片部403は一定の厚さになるように加工し、仕上げ加工時の照射イオンエネルギーを下げる事でダメージ層厚さをできるため薄くする等の処理を行う。

[実施例5]

電子線検出器の構造について図19、図20で説明する。図19は画素検出器について示す。電子線を直接CCDやラインセンサのような半導体の画素検出器500で検出する事ができない。これは電子線入射によるダメージで検出器が劣化してしまうためである。従って、図19(a)のように、電子線をダメージに強いシンチレータ502で回折電子線503を光に変換し、オプティカルファイバ501で画素型検出器500の受光面に結像させる。ここで回折電子線503はシンチレータ内で散乱により広がるため、通常 $100\mu\text{m}$ 以下に研磨して薄膜化する。従って、画素検出器500上に直接張る事が難しく、オプティカルファイバ501で結像させる。オプティカルファイバ501と画素検出器500を接触できない場合は、図19(b)のように、シンチレータ502からの光像を光学レンズ505で画素検出器500受光面上に結像する。このとき、光学レンズの焦点深度が深い場合はシンチレータ502を薄膜化しなければ像がボケてしまう。このため、薄膜化したシンチレータ502には支持基板となるガラス基板504が必要となる。光学レンズの焦点深度がシンチレータ502内での電子線の進入深さより十分浅い場合はシンチレータ502の薄膜化は不要である。

【0024】

複数の位置検出器を用いた回折像観察の場合、検出系は図20に示した構造となる。シンチレータ502を直接位置検出器506に貼りつけられる場合は、図20(a)のような単純な構造となる。この場合、シンチレータ502は薄膜化される。シンチレータ502を直接位置検出器506に貼りつけられない場合は、図20(b)のように、ガラス基板504上に薄膜化されて貼りつけられたシンチレータ502から放射された蛍光507を光学レンズ505で位置検出器506上に結像する。図20(b)は回折像全体を1枚のシンチレータで光像に変換し、これを1つのレンズでスポット後との位置検出器506で撮影する例だが、設置スペースや光学レンズ収差低減の関係で、スポットごとにシンチレータと光学レンズを設ける場合もある。これは図20(c)に示す構造となり、非回折透過電子はファラデーカップ508で完全停止させ、位置検出器506近傍でX線等のバックグラウンドが発生しないようにする。位置検出器506は、電子線に対しての位置、即ち図中に示したx、y、方向に移動できるようにする。特に検出器が真空中に設置される場合は遠隔で電氣的に移動できるようにする。

[実施例6]

図21にて、STEM方式での最適な電子線照射条件について説明する。電子線の収束径と照射角は対物レンズ前磁場123のレンズ条件で決まる。即ちレンズ電流を変化させると、レンズ電流(a)で試料124に平行照射となり、照射角は収差限界で残存する最低限まで小さく

10

20

30

40

50

できる。この状態からレンズ電流を大きくしていくと、照射角は大きくなるもののビーム径が小さくなり、レンズ電流(b)で同じく収差限界で残存する有限最小径のプロープが得られる。このことは、スポット径が最小になる最適な回折像条件と、最も高分解能な条件のSTEM拡大像条件が異なることを意味している。ナノディフラクション結像させた場合、レンズ電流(a)では $d = 10\text{nm}$ 以下にできることから、このプロープをスキャンさせてSTEM像を形成しても、 10nm 程度の分解能、すなわち半導体デバイス試料の構造が分かる程度の分解能は得られる。従って、図16の処理223で示される、構造像の事前観察時はレンズ電流(b)条件とし、その後の回折像観察ではレンズ電流(a)に切り替えるアルゴリズムを追加すると、高感度歪み応力測定と高分解能STEM拡大像の両立が可能となる。

[実施例7]

電子顕微鏡を用いた歪み、応力評価には、試料加工時の緩和の問題がある。即ち、加工により試料内部に閉じ込められていた歪み、応力が開放されてしまう。このため、既に述べた通りなるべく試料を厚い形状のまま観察することが有効である。半導体デバイス開発において、応力低減プロセスを確立するためには、様々は条件で作成した試料を統一形状に加工し、歪み、応力分布を測る方法が有効である。即ち試料形状が同一である場合は、歪み、応力の緩和量も概ね揃っており、両者を比較した場合、結果の違いはプロセス条件の違いによるものである確度が極めて高い。例えば図14の左右の応力分布像は、異なったプロセス条件で作成した試料を同一形状に加工して観察した結果であり、明確な違いが認められる。

【0025】

このように、ラインを流れるウエハから目的のビットのトランジスタを抽出する。ここで着目するプロセスの前後から試料を同一形状に加工して評価することで、該当箇所での応力・歪みの蓄積の様子を把握できる。また、プロセスAの後、ある試料はプロセスB、別の試料はプロセスCで作製する。ここで、プロセスB後、プロセスC後の試料を抜き取り、応力・歪み量を測定することで、プロセスBとプロセスCの応力・歪みに対する長短を把握することが出来、これを繰り返すことで応力低減プロセスを見出すことができるようになる。

【0026】

【発明の効果】

本発明により、装置と操作専門技術を顧客と分析機関で共有化し、分析に要するコスト、時間を低減することができるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明を説明する電子顕微鏡の基本構造を示す図。

【図2】本発明を説明する電子線の光路図。

【図3】電子線が試料を透過する際の回折を示す図。

【図4】ナノディフラクションの光路図。

【図5】ナノディフラクションパターンの一例を示す図。

【図6】ナノディフラクションパターンの回折強度プロファイルを示した図。

【図7】TEMに画素検出器を配置した図。

【図8】TEMに画素検出器と位置検出器を配置した図。

【図9】STEMにSTEM検出器と画素検出器を配置した図。

【図10】STEMにSTEM検出器と位置検出器を配置した図。

【図11】本発明に関わる半導体デバイスの断面を示す図。

【図12】本発明の表示の一例を示す図。

【図13】本発明の表示の一例を示す図。

【図14】本発明の表示の一例を示す図。

【図15】TEM回折像から画素検出器を用いて応力分布を求めるフローチャート図。

【図16】STEM回折像から位置検出器を用いて応力分布を求めるフローチャート図。

【図17】操作画面の一例を示した図。

【図18】応力測定用試料構造を示した図。

10

20

30

40

50

【図 19】画素検出器の構造を示した図。

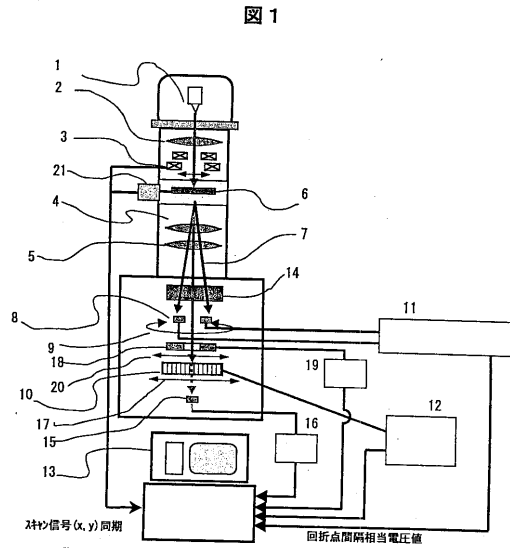
【図 20】位置検出器の構造を示した図。

【図 21】試料への電子線の照射条件と照射角、プローブ径の関係を示した図。

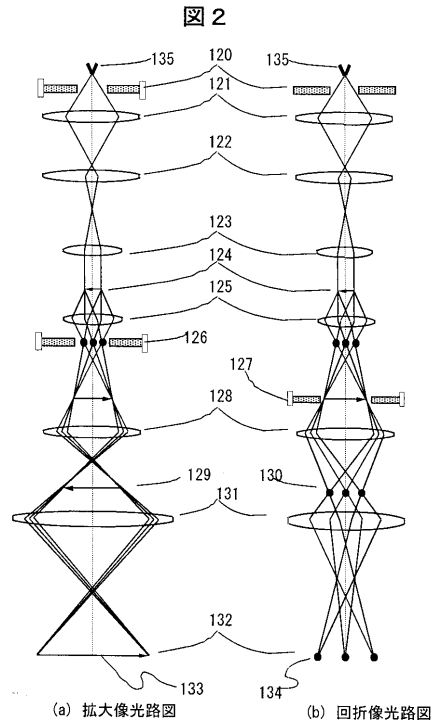
【符号の説明】

- 1 : FE電子銃、2 : 照射レンズ、3 : STEMスキャンコイル、4 : 第1投射レンズ、
 5 : 第2投射レンズ、6 : 試料、7 : 回折電子、8 : 位置検出器、
 9 : ローテーション機構、10 : 画素検出器、11 : 信号処理回路、12 : 信号処理回路、
 13 : 表示装置、14 : エネルギーフィルタ、15 : 明視野型検出器、
 16 : 明視野検出器回路、17 : 光軸出入機構、18 : 暗視野型検出器、10
 19 : 暗視野検出器回路、20 : 光軸出入機構、21 : 試料ステージ、
 31 : 歪み量強度表示矢印、32 : 構造像写真32、33 : スケールバー、
 34 : 基準点表示、40 : プラグ、41 : 素子分離層、42 : ゲート、
 43 : 応力発生場、44 : シリコン基板、
 50 : コンデンサレンズ、51 : 検出器、52 : 従来光路、53 : ナノ回折光路、
 60 : 電子線、61 : 試料、62 : 電子レンズ、63 : 回折像、64 : 結晶面(a)、
 65 : 結晶面(b)、66 : 歪み結晶面、
 70 : 回折像、71 : 回折点、72 : 横方向格子間隔、73 : 縦方向格子間隔、
 80 : 基板部プロファイル、81 : 被応力部プロファイル、82 : 000 点ピーク、
 83 : 002点ピーク、84 : 00-2点ピーク、85 : 等応力線、86 : 応力値表示、20
 90 : 応力カラーマップ、91 : カラースケールバー、
 100 : 結像レンズ、101 : TEM光路、102 : ナノ回折光路、103 : 位置検出器、
 104 : 画素検出器、
 120 : コンデンサしぼり、121 : 第1コンデンサレンズ、
 122 : 第2コンデンサレンズ、123 : 対物レンズ前磁場、124 : 試料、
 125 : 対物レンズ後磁場、126 : 後方焦点面、127 : 第1中間像、
 128 : 中間レンズ、129 : 第2中間像、130 : 中間回折像、131 : 投射レンズ、
 132 : 観察面、133 : 拡大像、134 : 電子回折像、135 : 電子源、
 201 - 213 : 処理、221 - 234 : 処理、
 300 : データ収集開始・停止ボタン、301 : 観察方式選択プルダウンメニュー、30
 302 : 走査方式選択プルダウンメニュー、303 : 解像度選択プルダウンメニュー、
 304 : 照射レンズ1制御・表示バー、305 : 照射レンズ2制御・表示バー、
 307 : PSD角度遠隔操作制御バー、308 : 結果画面表示切替ボタン、
 309 : 応力表示方向選択プルダウンメニュー、
 310 : 材料・面方位選択プルダウンメニュー、311 : 表示画像輝度調整バー、
 312 : コメント入力欄、313 : 結果表示部、314 : 結果表示部、
 315 : スポット測定カーソル、316 : スポット測定位置・測定値表示、
 317 : スポット測定開始ボタン、318 : 結果表示部スケールバー、
 319 : スキャンエリア指定ポイント、
 400 : 電子顕微鏡試料、401 : メッシュ、402 : タングステンデポ接着材、40
 403 : 試料薄片部、404 : 試料支持部、
 500 : 画素検出器、501 : オプティカルファイバ、502 : シンチレータ、
 503 : 回折電子線、504 : ガラス基板、505 : 光学レンズ、
 506 : 位置検出器、507 : 蛍光、508 : ファラデーカップ。

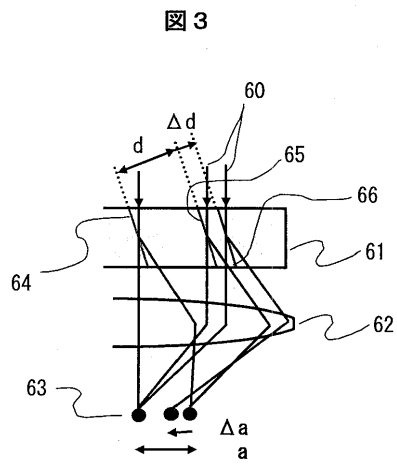
【図 1】



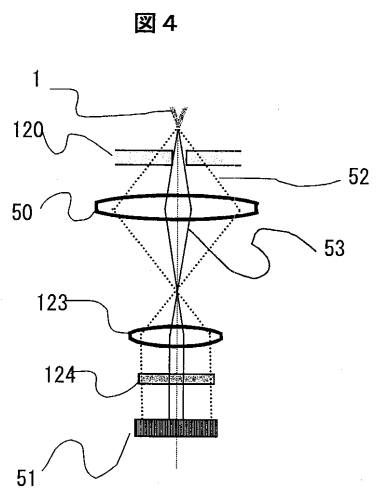
【図 2】



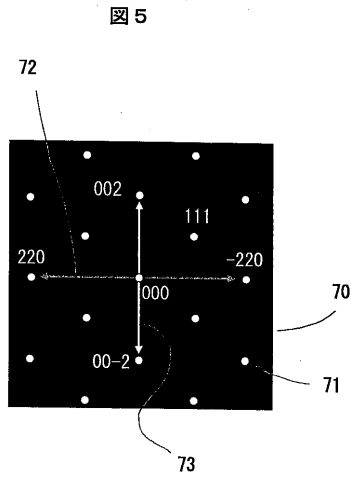
【図 3】



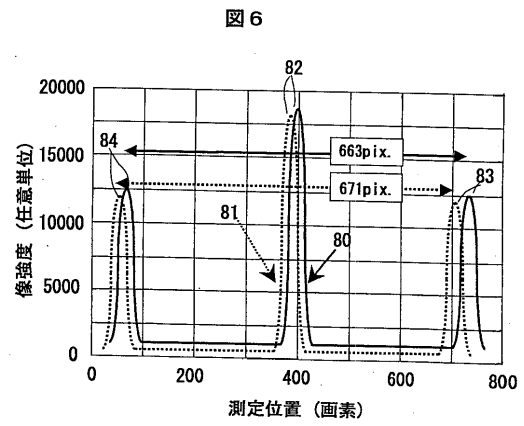
【図 4】



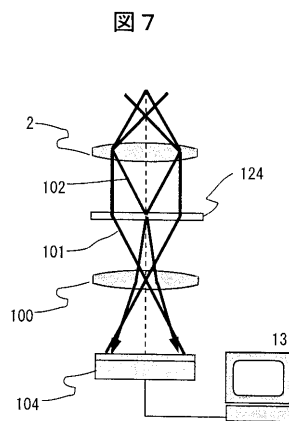
【 図 5 】



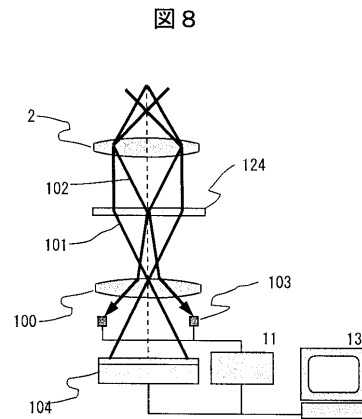
【 図 6 】



【 図 7 】

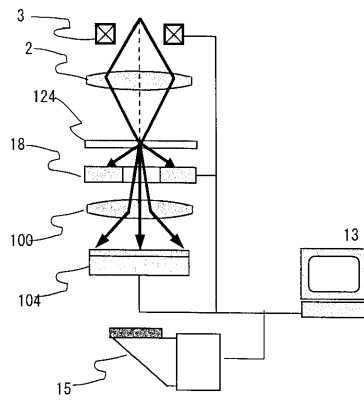


【 図 8 】



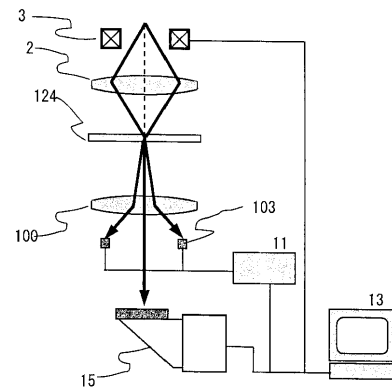
【図 9】

図 9



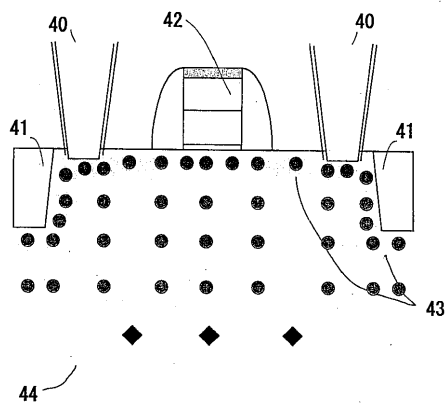
【図 10】

図 10



【図 11】

図 11

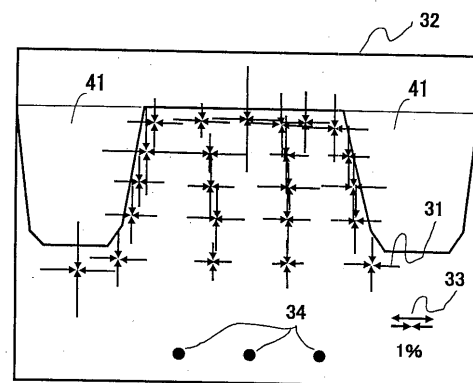


● 測定点
◆ 基準点

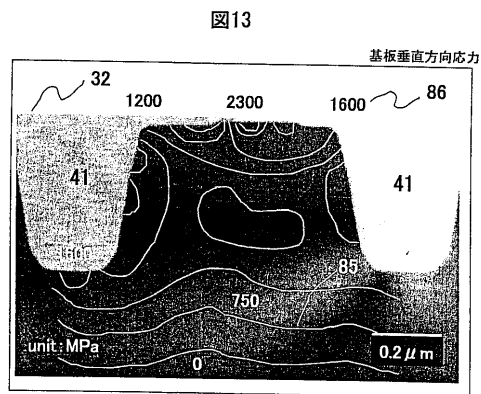
40: プラズマ
41: 素子分離層
42: MOSゲート
43: 応力発生層
44: シリコン基板

【図 12】

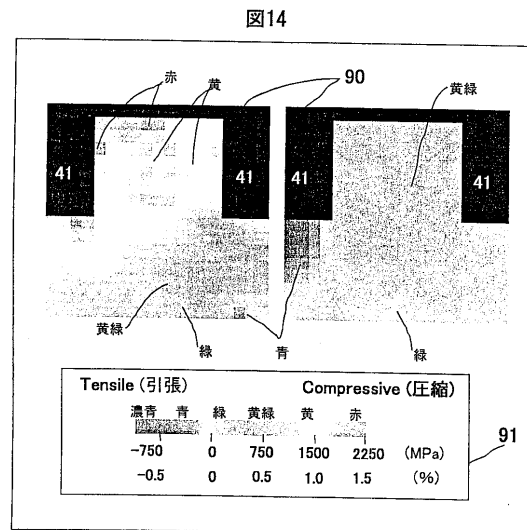
図 12



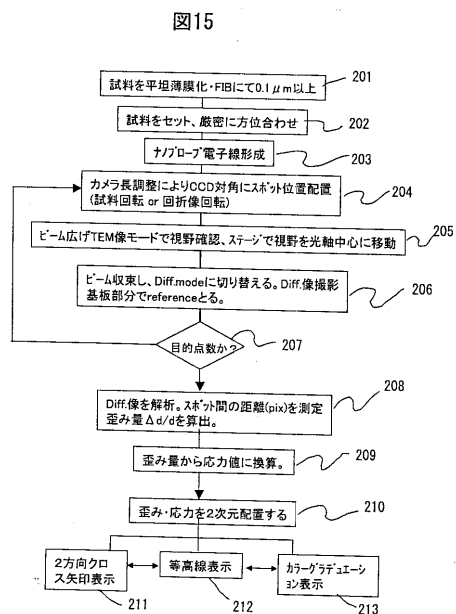
【図 13】



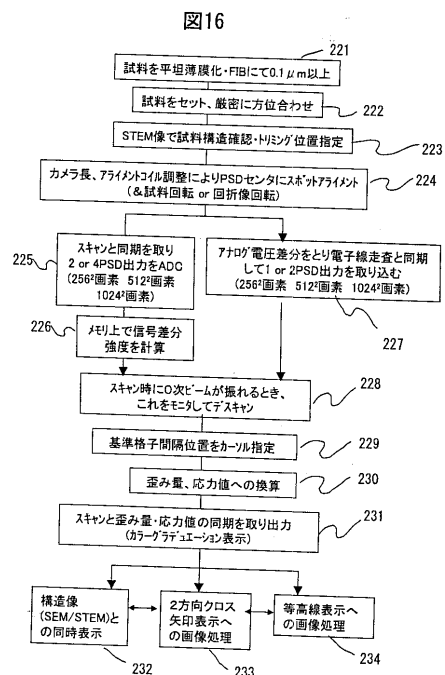
【図 14】



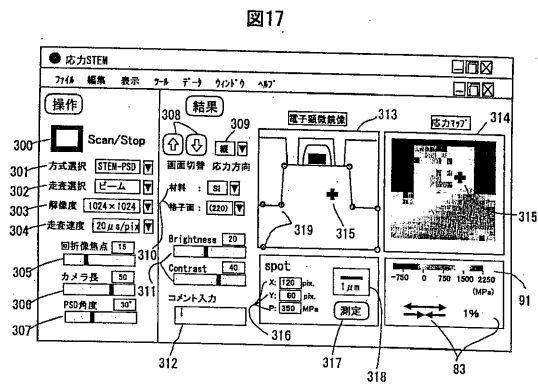
【図 15】



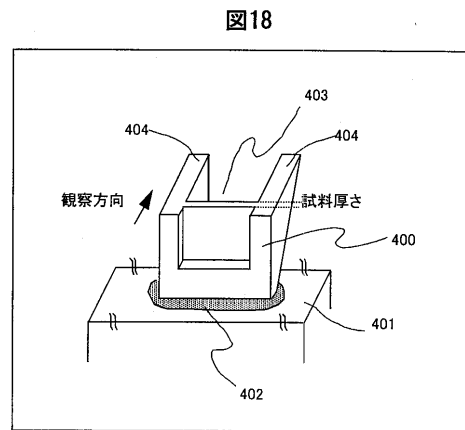
【図 16】



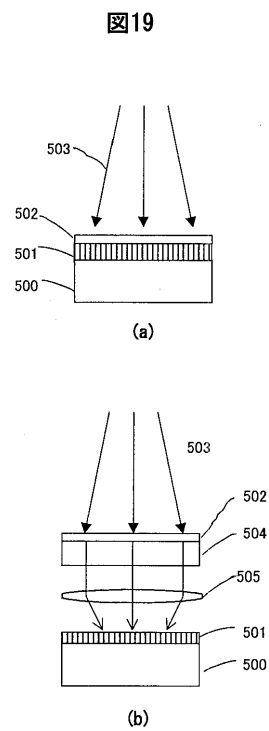
【図 17】



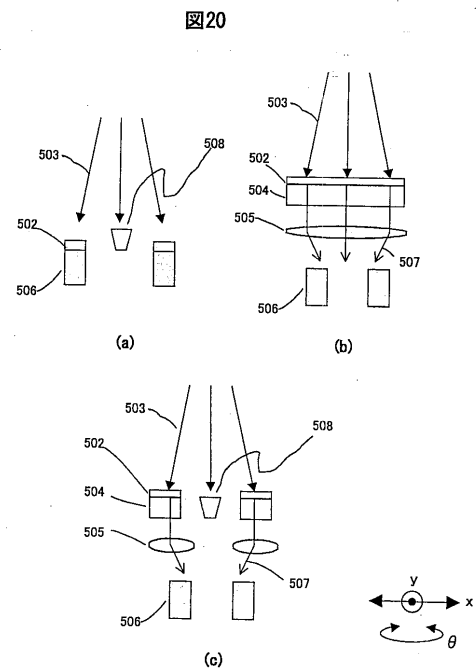
【図 18】



【図 19】

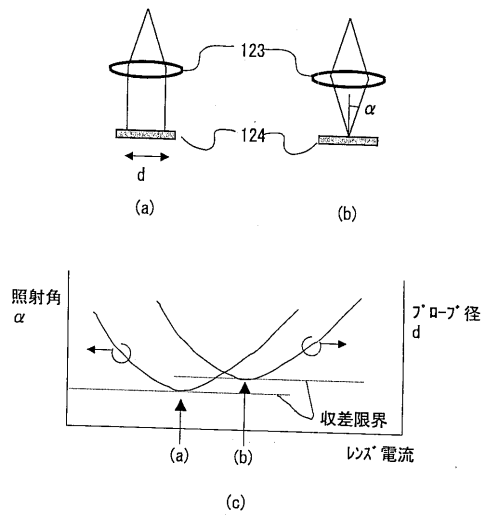


【図 20】



【図 21】

図21



フロントページの続き

- (72)発明者 谷口 佳史
茨城県ひたちなか市市毛 8 8 2 番地 株式会社日立製作所計測器グループ内
- (72)発明者 市橋 幹雄
茨城県ひたちなか市市毛 8 8 2 番地 株式会社日立製作所計測器グループ内

審査官 高 場 正光

- (56)参考文献 特開平 1 0 - 0 4 8 1 5 8 (J P , A)
特開平 0 8 - 2 2 7 6 8 1 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 1 2 3 7 7 4 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 0 6 5 7 6 2 (J P , A)

- (58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
G01N23/00-23/227
H01J37/26-37/295