

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6150887号
(P6150887)

(45) 発行日 平成29年6月21日 (2017. 6. 21)

(24) 登録日 平成29年6月2日 (2017. 6. 2)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 21/66 (2006. 01)	HO 1 L 21/66 L
HO 1 L 21/268 (2006. 01)	HO 1 L 21/268 T
HO 1 L 21/20 (2006. 01)	HO 1 L 21/20
GO 1 N 21/956 (2006. 01)	GO 1 N 21/956 A

請求項の数 14 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2015-517763 (P2015-517763)	(73) 特許権者	514323268
(86) (22) 出願日	平成25年6月20日 (2013. 6. 20)		コヒーレント レーザーシステムズ ゲー
(65) 公表番号	特表2015-528201 (P2015-528201A)		エムペーハー ウント コンパニー カー
(43) 公表日	平成27年9月24日 (2015. 9. 24)		ゲー
(86) 国際出願番号	PCT/EP2013/062883		ドイツ国 デー ー 3 7 0 7 9 ゲッティン
(87) 国際公開番号	W02013/190040		ゲン, ハンス・ベックラー・シュトラ
(87) 国際公開日	平成25年12月27日 (2013. 12. 27)		セ 1 2
審査請求日	平成28年4月5日 (2016. 4. 5)	(74) 代理人	100078282
(31) 優先権主張番号	61/663, 435		弁理士 山本 秀策
(32) 優先日	平成24年6月22日 (2012. 6. 22)	(74) 代理人	100113413
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 森下 夏樹
(31) 優先権主張番号	13/907, 637	(74) 代理人	100181674
(32) 優先日	平成25年5月31日 (2013. 5. 31)		弁理士 飯田 貴敏
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100181641
			弁理士 石川 大輔

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 エキシマレーザアニーリングプロセスのための監視する方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半導体層を評価するための光学装置であって、前記半導体層は、少なくとも部分的に、前記層上にエネルギー密度を有する複数のレーザ放射パルスへの暴露によって結晶化され、前記結晶化は、第 1 の方向に第 1 の群の周期的表面特徴を前記層上に生成し、前記第 1 の方向に垂直な第 2 の方向に第 2 の群の周期的特徴を生成し、前記第 1 および第 2 の群の周期的特徴の特性は、前記半導体層が暴露された前記レーザ放射パルスの前記エネルギー密度に依存し、前記装置は、

前記層の表面に垂直な光ビームを送達するように配列された光源であって、前記光源は、前記光の部分前記第 1 および第 2 の群の周期的特徴によって回折されるように、前記結晶化された半導体層の面積を照射する、光源と、

前記光ビームの軸と整合されたアレイ検出器であって、前記アレイ検出器は、前記第 1 および第 2 の群の周期的特徴によって、前記照射された面積から回折される光を捕獲するように配列されている、アレイ検出器と、

前記検出器によって捕獲された光に基づいて、前記半導体層が暴露された前記パルスの前記半導体層上の前記エネルギー密度を判定するように配列されている、処理電子機器とを備える、装置。

【請求項 2】

少なくとも部分的に、基板上に半導体層を結晶化するための光学装置であって、前記装置は、

10

20

前記結晶化を生じさせるために、複数のレーザ放射パルスの前記基板上の前記半導体層に送達するためのレーザおよび投射光学系と、

前記層に入射する前記レーザ放射パルスのエネルギー密度を選択的に変動させ、前記層の結晶化の程度を制御するための可変減衰器と、

前記基板および前記基板上の前記半導体層を前記入射レーザ放射パルスに対して平行移動方向に平行移動させるための平行移動ステージであって、前記半導体層の結晶化および平行移動は、第1の方向に第1の群の周期的表面特徴を前記層上に生成し、前記第1の方向に垂直な第2の方向に第2の群の周期的特徴を生成し、前記第1および第2の群の周期的特徴の特性は、前記半導体層が暴露された前記レーザ放射パルスの前記エネルギー密度に依存する、平行移動ステージと、

10

前記層の表面に垂直な光ビームを送達するように配列された光源であって、前記光源は、前記光の部分が前記第1および第2の群の周期的特徴によって回折されるように、前記結晶化された半導体層の面積を照射する、光源と、

前記光ビームの軸と整合されたアレイ検出器であって、前記アレイ検出器は、前記第1および第2の群の周期的特徴によって、前記照射された面積から回折される光を捕獲するように配列されている、アレイ検出器と、

前記検出器によって収集された光に基づいて、前記半導体層が暴露された前記パルスの前記半導体層上の前記エネルギー密度を判定するように配列された処理電子機器であって、前記処理電子機器は、前記判定されたエネルギー密度が前記結晶化のための最適エネルギー密度(OED)を上回るまたは下回る場合、前記パルスの前記半導体層上の前記エネルギーがほぼ前記OEDとなるように、前記可変減衰器を選択的に調節する、処理電子機器と

20

を備える、装置。

【請求項3】

前記第1の方向は、前記半導体層の平行移動方向にある、請求項2に記載の装置。

【請求項4】

前記半導体層は、シリコン層である、請求項2に記載の装置。

【請求項5】

半導体層を評価するための方法であって、前記半導体層は、少なくとも部分的に、前記層上にエネルギー密度を有する複数のレーザ放射パルスへの暴露によって結晶化され、前記結晶化は、それぞれ、互いに対して垂直な第1および第2の方向に、第1および第2の群の周期的表面特徴を前記層上に生成し、前記第1および第2の群の周期的特徴の特性は、前記半導体層が暴露された前記レーザ放射パルスの前記エネルギー密度に依存し、前記方法は、

30

前記層の表面に垂直な光のビームを送達し、前記光の第1および第2の部分が、それぞれ、前記第1および第2の群の周期的特徴によって回折されるように、前記結晶化された半導体層の面積を照射することと、

前記光ビームの軸と整合されたアレイ検出器であって、前記アレイ検出器は、前記第1および第2の群の周期的特徴によって、前記照射された面積から回折される光を捕獲するように配列されている、アレイ検出器を用いて前記第1および第2の回折された光部分の振幅を別個に測定することと、

40

前記第1および第2の回折された光部分の前記測定された振幅から、前記レーザ放射パルスの前記層上の前記エネルギー密度を判定することと

を含む、方法。

【請求項6】

少なくともゼロ次光の部分が前記検出器に到達することを遮断するための手段をさらに含む、請求項1に記載の装置。

【請求項7】

前記ゼロ次光を遮断するための手段は、90度の相対回転での偏光板と分析器セットとの組み合わせによって規定されている、請求項6に記載の装置。

50

【請求項 8】

前記ゼロ次光を遮断するための手段は、前記捕獲された光の中心軸に沿って位置付けられた停止部によって規定されている、請求項 6 に記載の装置。

【請求項 9】

少なくともゼロ次光の部分が前記検出器に到達することを遮断するための手段をさらに含む、請求項 2 に記載の装置。

【請求項 10】

前記ゼロ次光を遮断するための手段は、90度の相対回転での偏光板と分析器セットとの組み合わせによって規定されている、請求項 9 に記載の装置。

【請求項 11】

前記ゼロ次光を遮断するための手段は、前記捕獲された光の中心軸に沿って位置付けられた停止部によって規定されている、請求項 9 に記載の装置。

【請求項 12】

少なくともゼロ次光の部分は、前記検出器に到達することを遮断される、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 13】

前記ゼロ次光は、90度の相対回転での偏光板と分析器セットとの組み合わせを使用して、前記検出器に到達することを遮断される、請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

前記ゼロ次光は、前記捕獲された光の中心軸に沿って位置付けられた停止部によって、前記検出器に到達することを遮断される、請求項 12 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

(優先権主張)

本出願は、2012年6月22日に出願された米国仮出願第61/663,435号および2013年5月31日に出願された米国特許出願第13/907,637号に対して優先権を主張する。上記文献の完全な開示内容は、参照することによって本明細書において援用される。

【0002】

(本発明の技術分野)

本発明は、一般に、パルス状レーザ照射による薄いシリコン(Si)層の熔融および再結晶化に関する。本方法は、特に、再結晶化された層を評価するための方法に関する。

【背景技術】

【0003】

(背景技術の議論)

シリコン結晶化は、多くの場合、薄膜トランジスタ(TFT)アクティブマトリクスLCDおよび有機LED(AMOLED)ディスプレイの製造において使用される、ステップである。結晶シリコンは、ディスプレイの電子回路が、従来のリソグラフィックプロセスによって形成される、半導体ベースを形成する。一般に、結晶化は、長さ方向(長軸)に沿って均一強度プロファイルを有し、また、幅方向(短軸)に均一または「トップハット」強度プロファイルを有する、長い線に成形されたパルス状レーザビームを使用して行われる。本プロセスでは、基板(および、その上のシリコン層)が、レーザ放射パルスの送達源に対して平行移動される間、ガラス基板上の非晶質シリコンの薄い層が、レーザ放射のパルスによって繰り返し熔融される。ある最適エネルギー密度(OED)における、繰り返しパルスを通じた熔融および再固化(再結晶化)は、所望の結晶マイクロ構造が、膜内に得られるまで生じる。

【0004】

光学要素が、レーザパルスを放射の線に形成するために使用され、結晶化は、放射の線の幅を有する条線において生じる。試行の度に、放射パルスの強度を線に沿って高度に均

10

20

30

40

50

ーに保つように行われる。これは、結晶マイクロ構造を条線に沿って均一に保つために必要である。光学パルスの好ましい源は、電磁スペクトルの紫外線領域内の波長を有するパルスを送達する、エキシマレーザである。エキシマレーザパルスを使用する、前述の結晶化プロセスは、通常、エキシマレーザアニーリング (ELA) と称される。プロセスは、繊細であって、OEDの許容誤差は、数パーセントまたはさらに $\pm 0.5\%$ 程度とわずかであり得る。

【0005】

ELAには、2つのモードが存在する。一方のモードでは、レーザビームに対するパネルの平行移動速度は、「トップハット部分」のビーム幅が、あるパルスから次のパルスまで95%も重複し、したがって、任意の無限小面積が、合計約20パルスを受信するほど十分に低速である。高度ELAまたはALEAと称される別のモードでは、平行移動速度は、はるかに拘束であって、パネルにわたっての単回通過において、照射された「線」は、最小重複を有し、その間に非結晶化空間さえ残し得る。均等材料を生成するために、ELAプロセスにおけるもの未満であり得る合計パルス数を用いて、複数回の通過が、パネル全体が照射されるように行われる。

【0006】

いずれのELAモードが採用されても、生産ラインにおけるパネル上に結晶化された膜の評価は、現在、目視検査によって、オフラインで行われている。本検査は、完全に主観的であって、その経験を通して、パネルの観察された特徴と、例えば、結晶化ビームにおける1%未満のエネルギー密度のわずかな変化を相関させることが可能である、高度に訓練された経験の豊富な検査者に依拠する。製造環境では、視覚的分析およびプロセスエネルギー密度の変化が必要であるかどうかを確立するプロセスは、典型的には、結晶化が行われてから約1時間から1時間半の間に生じ、容認可能パネルの生産ライン処理量に対応する悪影響を伴う。

【0007】

ELAプロセスの評価の客観的方法の必要性がある。好ましくは、本方法は、少なくとも、生産ライン上で実装可能であるべきである。より好ましくは、本方法は、評価によって提供されるデータに応答して、プロセスエネルギー密度を自動的に調節するために、フィードバックループ内における準リアルタイム評価のために使用可能であるべきである。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0008】

(本発明の要約)

本発明は、少なくとも部分的に、層上に、エネルギー密度を有する複数のレーザ放射パルスへの暴露によって結晶化された半導体層の結晶化の進度を評価することを対象とする。結晶化は、それぞれ、相互に垂直な第1および第2の方向に、第1および第2の群の周期的表面特徴を層上に生成し、第1および第2の群の周期的特徴の形成は、半導体レーザが暴露されたレーザ放射パルスのエネルギー密度に依存する。

【0009】

本発明の一側面では、評価方法は、光の第1および第2の部分が、それぞれ、第1および第2の群の周期的特徴によって回折されるように、結晶化された半導体層の面積に光を送達することを含む。第1および第2の回折された光部分の振幅は、別個に測定される。レーザ放射パルスの層上のエネルギー密度は、第1および第2の回折された光部分の測定された振幅から判定される。

本願明細書は、例えば、以下の項目も提供する。

(項目1)

少なくとも部分的に、層上にエネルギー密度を有する複数のレーザ放射パルスへの暴露によって結晶化された半導体層を評価するための光学装置であって、前記結晶化は、第1の方向に、第1の群の周期的表面特徴を前記層上に生成し、前記第1の群の周期的特徴の形成は、前記半導体層が暴露された前記レーザ放射パルスの前記エネルギー密度に依存し

10

20

30

40

50

、前記装置は、

光の第 1 の部分が、前記第 1 の群の周期的特徴によって回折されるように、前記結晶化された半導体層の面積に前記光を送達するように配列される、光源と、

照明された面積から回折された前記第 1 の光部分を検出し、前記検出された回折された第 1 の光部分から、前記半導体層が暴露された前記パルスの前記半導体層上の前記エネルギー密度を判定するように配列される、検出器および処理電子機器と

を備える、装置。

(項目 2)

前記光の第 2 の部分が、第 2 の群の周期的特徴によって回折され、前記光のそのような第 2 の部分もまた、前記検出器および処理電子機器によって検出されるように、前記層上に、前記第 1 の方向とある角度における第 2 の方向に、前記第 2 の群の周期的表面特徴をさらに有する、項目 1 に記載の装置。

(項目 3)

前記第 1 および第 2 の方向間の角度は、約 90 度である、項目 2 に記載の装置。

(項目 4)

前記半導体層は、シリコン層である、項目 1 に記載の装置。

(項目 5)

少なくとも部分的に、基板上に半導体層を結晶化するための光学装置であって、前記装置は、

前記結晶化を生じさせるために、複数のレーザ放射パルスを前記基板上の前記半導体層に送達するためのレーザおよび投射光学系と、

前記層に入射する前記レーザ放射パルスのエネルギー密度を選択的に変動させ、前記層の結晶化の程度を制御するための可変減衰器と、

前記基板および前記基板上の前記半導体層を前記入射レーザ放射パルスに対して平行移動方向に平行移動させるための平行移動ステージであって、前記半導体層の結晶化および平行移動は、第 1 の方向に、第 1 の群の周期的表面特徴を前記層上に生成し、前記第 1 の群の周期的特徴の形成は、前記半導体層が暴露された前記レーザ放射パルスの前記エネルギー密度に依存する、平行移動ステージと、

光の第 1 の部分が、前記第 1 の群の周期的特徴によって回折されるように、前記結晶化された半導体層の面積に前記光を送達するように配列される、光源と、

照明された面積から回折された前記第 1 の光部分を検出し、前記検出された回折された第 1 の光部分から、前記半導体層が暴露された前記パルスの前記半導体層上の前記エネルギー密度を判定し、前記判定されたエネルギー密度が、前記結晶化のための最適エネルギー密度 (OED) を上回るまたは下回る場合、前記パルスの前記半導体層上の前記エネルギーが、ほぼ前記 OED となるように、前記可変減衰器を選択的に調節するように配列される、検出器および処理電子機器と

を備える、装置。

(項目 6)

前記半導体層の結晶化および平行移動はさらに、前記光の第 2 の部分が、第 2 の群の周期的特徴によって回折されるように、前記第 1 の方向に対してある角度における第 2 の方向に、前記第 2 の群の周期的表面特徴を前記層上に生成し、前記検出器および処理電子機器は、前記照明された面積から回折された前記第 1 および第 2 の光部分を検出し、前記検出された回折された第 1 および第 2 の光部分から、前記半導体層が暴露された前記パルスの前記半導体層上の前記エネルギー密度を判定するように配列される、項目 5 に記載の装置。

(項目 7)

前記第 1 および第 2 の方向間の角度は、約 90 度である、項目 6 に記載の装置。

(項目 8)

前記第 1 の方向は、前記半導体層の平行移動方向にある、項目 6 に記載の装置。

(項目 9)

10

20

30

40

50

前記半導体層は、シリコン層である、項目 5 に記載の装置。

(項目 1 0)

前記光源は、前記半導体層に対して直角入射で前記光を送達する、項目 5 に記載の装置。

(項目 1 1)

前記光源は、前記半導体層に対して非直角入射で前記光を送達する、項目 5 に記載の装置。

(項目 1 2)

少なくとも部分的に、層上にエネルギー密度を有する複数のレーザ放射パルスへの暴露によって結晶化された半導体層を評価するための方法であって、前記結晶化は、それぞれに対して垂直な第 1 および第 2 の方向に、第 1 および第 2 の群の周期的表面特徴を前記層上に生成し、前記第 1 および第 2 の群の周期的特徴の形成は、前記半導体層が暴露された前記レーザ放射パルスの前記エネルギー密度に依存し、前記方法は、

光の第 1 および第 2 の部分が、それぞれ、前記第 1 および第 2 の群の周期的特徴によって回折されるように、前記結晶化された半導体層の面積に前記光を送達することと、

前記第 1 および第 2 の回折された光部分の振幅を別個に測定することと、

前記第 1 および第 2 の回折された光部分の前記測定された振幅から、前記レーザ放射パルスの前記層上の前記エネルギー密度を判定することと

を含む、方法。

【 0 0 1 0 】

本明細書に組み込まれ、その一部を成す、付随の図面は、本発明の好ましい実施形態を図式的に図示し、前述の一般的説明および後述の発明を実施するための形態とともに、本発明の原理を説明する役割を果たす。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 1 】

【図 1】図 1 は、E L A 結晶化シリコン層の走査レーザ顕微鏡画像の高速フーリエ変換 (F F T) に対する圧延および横方向におけるパルスエネルギー密度の関数として、測定されたピーク振幅を図式的に図示するグラフである。

【図 2】図 2 は、A - E L A 結晶化シリコン層の走査レーザ顕微鏡画像の F F T に対する圧延および横方向におけるパルスエネルギー密度の関数として、測定されたピーク振幅を図式的に図示するグラフである。

【図 3】図 3 は、A - E L A 結晶化シリコン層の走査レーザ顕微鏡画像の高速フーリエ変換 (F F T) に対する圧延および横方向におけるパルス数の関数として、測定されたピーク振幅を図式的に図示するグラフである。

【図 4】図 4 は、E L A 結晶化シリコン層のある面積の偏光顕微鏡画像であって、結晶化の間、層の圧延方向 (R D) に対して横方向かつ平行に形成されるリッジを図示する。

【図 5】図 5 は、図 4 のものに類似する、結晶化された層のある面積のコノスコープ顕微鏡画像であって、それぞれ、横方向および圧延方向リッジから回折された光によって形成された光の水平および垂直帯域を描写する。

【図 6】図 6 は、E L A 結晶化層の横方向および圧延方向リッジから回折された光に対するパルスエネルギー密度の関数として、測定された振幅を図式的に図示するグラフである。

【図 7】図 7 は、4 1 0、4 1 5、および 4 2 0 m J / c m² の E D に対する A - E L A 結晶化層の横方向および圧延方向リッジから回折された光のパルス数の関数として、測定された振幅を図式的に図示するグラフである。

【図 8】図 8 および 8 A は、E L A 結晶化層の横方向および圧延方向リッジから回折された光の振幅を別個に測定するための、本発明による装置の一好ましい実施形態を図式的に図示する。

【図 8 A】図 8 および 8 A は、E L A 結晶化層の横方向および圧延方向リッジから回折された光の振幅を別個に測定するための、本発明による装置の一好ましい実施形態を図式的

10

20

30

40

50

に図示する。

【図9】図9は、ELA結晶化層の横方向および圧延方向リッジから回折された光の測定された振幅にตอบสนองして、シリコン層上のパルスエネルギー密度を調節するために、可変減衰器と協働する図8の装置を含む、本発明によるELA装置の一好ましい実施形態を図式的に図示する。

【図10】図10は、図9の装置に類するが、図8の装置が、ELA結晶化層の横方向および圧延方向リッジから回折された光の振幅を別個に測定するために、本発明による装置の別の好ましい実施形態によって置換される、本発明によるELA装置の別の好ましい実施形態を図式的に図示する。

【発明を実施するための形態】

10

【0012】

(本発明の詳細な説明)

薄いSi膜のELA処理は、表面粗度の形成につながる。突出が、固化に応じたSiの拡張の結果として、形成される。それらは、特に、側方成長の際に衝突する3つ以上の固化正面間に形成される。突出は、多くの場合、ランダムに位置しない。むしろ、それらは、集合的に、文献では、レーザ誘発周期的表面構造(LIPSS)と称される、リップル形成のプロセスのため、整合される。リップルは、したがって、一連の整然と整合された突出から成る。リップル形成は、膜の部分的溶融が達成される、エネルギー密度窓(範囲)内でのみ観察される。典型的には、リップル周期性は、XeClエキシマレーザの場合、ほぼ入射光の波長、例えば、約290 - 340 nmである。これらの小寸法のため、リップルは、従来の光学顕微鏡検査技法を使用して分解することができない、またはできたとしても、ほとんどできない。

20

【0013】

典型的には、光輝場型光学顕微鏡検査において観察されるものは、ELA処理された膜の表面が、より明るい領域とともに散在した細長いより暗い着色領域から成る状態である。より暗い領域の細密検査は、それらが、より高い突出を有する、より強いリップル(秩序のある)領域から成り、その間に、あまり秩序のないおよび/またはより低い突出を有する領域が存在することを示す。より秩序のある領域は、本明細書では、リッジと称される一方、その間の領域は、谷と称される。本発明の発見は、リッジの形成が、リップルの形成に相関されて現れ、リッジの典型的配向がリップル方向に垂直な方向にあるということである。本発明の方法および装置は、ELAプロセスの結果として形成される、薄いSi膜(層)内のリッジからの光回折を測定することに依拠する。本方法は、ELAプロセスを準リアルタイムで監視または制御するために使用され得る、リップルの程度の間接測定をもたらす。加えて、本方法は、リッジからの回折を測定するために使用されるより従来の光学顕微鏡検査技法と比較して、比較的到低速である顕微鏡検査技法を使用するにもかかわらず、リップル自体により直接的に目を向けるように説明される。

30

【0014】

リップルは、一般に、一方向のみに形成されない。リップルは、主に、走査方向と平行方向と、また、走査方向と垂直方向(線方向)とに形成される。リップルは、周期的であって、本明細書では、冶金学に一般的専門用語を使用して、その周期性の方向によって説明され、圧延方向(RD)は、走査方向に対応し、横方向(TD)は、線方向に対応する。故に、走査方向に配向されるリップルは、横方向に周期的であるため、それらは、TDリップルと呼ばれる。同様に、線方向に配向されるリップルは、圧延方向に周期的であって、RDリップルと呼ばれる。

40

【0015】

LIPSS理論によると、TDリップルは、光の波長にほぼ等しい間隔を有する一方、RDリップルは、約 $\lambda / (1 + \sin \theta)$ 離間され、 $\lambda / (1 - \sin \theta)$ 間隔が、典型的には、主要であって、 θ は、層上へのレーザ放射の入射角であって、ELAでは、典型的には、約5度以上である。リップル形成は、粒子構造が表面周期性に追従する傾向にあるため、均一多Si膜を得る際に有益である。リップルが存在するとき、理想的には、約

50

$\lambda / (1 - \sin \theta)$ に定寸される長方形粒子から成る、非常に秩序のある膜が、形成される。より低いエネルギー密度 (ED) では、粒子は、より小さく、より高い ED では、粒子は、より大きい。本明細書では、超側方成長 (SLG) と称される、リップル領域サイズより大きい粒子が、成長されるとき、表面リフローは、突出高さの低減をもたらす、膜の秩序が徐々に失われるであろう。

【0016】

リップルによって生じる表面周期性とレーザパルスの ED との間の数値関係を判定するための第 1 の実験では、結晶化された膜のレーザ走査顕微鏡 (LSM) 画像が、高速フーリエ変換 (FFT) によって分析され、変換は、RD および TD 方向において行われた。FFT におけるピークは、ある表面周期性の存在を示し、ピークの場所は、表面周期性の方向に対応する。TD 変換は、約 $1 / \lambda$ において鋭いピークをもたらす、強い TD 周期性を示す。RD 変換は、約 $(1 - \sin \theta) / \lambda$ において、あまり鋭くなく、TD 変換のものより低い振幅、すなわち、約 $(1 - \sin \theta) / \lambda$ 間隔を伴うあまり顕著ではない RD リップルとともにピークを示した。

10

【0017】

図 1 は、ELA プロセスにおける合計 25 の重複パルスに対するパルス中のミリジュール / 平方センチメートル (mJ / cm^2) 単位のエネルギー密度 (ED) の関数として、対応する RD および TD 変換ピークの振幅を図式的に図示するグラフである。RD 周期性は、TD 周期性が最大であるものより若干高い ED において、最大で現れることが分かる。ここでは、約 $420 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ の OED が、示され、RD および TD 方向の両方における周期性は、ED がより高くなるのに伴って、(比較的) 急減する。ここでは、ED は、本明細書に定義されるように、ビーム中の電力を測定し、トップハットの両側のいかなる勾配も無視し、それをビームのトップハット幅で除算することに関わる業界において一般的アプローチを使用して判定されることに留意されたい。

20

【0018】

図 2 は、図 1 のグラフに類似するが、25 パルスの A-ELA プロセスによる結晶化に対するグラフである。ここでは、RD リップルは、ELA より強い周期性を示し、そのピーク周期性は、ELA プロセスの場合よりも良好に定義される。

【0019】

図 3 は、幾分、実験的に判定された OED より低い、 $420 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ の ED におけるパルス数の関数として、RD および TD ピーク振幅を図式的に図示するグラフである。周期性は、約 22 のパルス数まで、TD 方向に安定して増加することが分かる。RD 方向では、約 15 パルスが送達されるまで、周期性の成長は殆ど見られない。

30

【0020】

図 4 は、反射光内の偏光顕微鏡画像である。横方向に配向されるリッジ (RD 方向におけるリップル、または周期性ベースの定義に従って言い換えると、「TD-リップル」に相関する) が、明らかに認められ得る。圧延方向に配向されるリッジ (「RD リップル」に相関する) は、前述の FFT 分析から予期されるであろうように、あまり顕著ではないが、依然として、明白である。

【0021】

リップルと異なり、リッジは、厳密には、周期性ではない。しかしながら、リッジは、典型的には、約 $1.5 \mu\text{m}$ ~ 約 $3.0 \mu\text{m}$ 、またはリップル間隔より約 1 桁大きい範囲に及び得る、特性間隔を有する。リップルの専門用語に従って、リッジは、周期性の方向において参照される、すなわち、RD リッジは、横方向に配向され、および TD リッジは、圧延方向に配向される。

40

【0022】

FFT 分析は、それ自体で、結晶化された層を評価する一手段を明らかに提供する。しかしながら、前述の情報を生成するために要求されるステップは、概して、低速であって、ELA または A-ELA によって結晶化された層の近リアルタイムオンライン監視または評価のために、そのような分析の使用を助長しないであろう。故に、直接、リップル自

50

体を測定する試みではなく、R DおよびT Dリップルと関連付けられた垂直に配向されたリッジ群と関連付けられた回折現象を分析する可能性を調査することを決定した。

【 0 0 2 3 】

図5は、図4に描写されるもの等の層のコノスコープ顕微鏡画像である。これは、対物レンズの後焦点面の画像が記録されることを可能にするために、接眼レンズが除去された市販の顕微鏡を使用して撮影された。本実施例では、画像は、単純な携帯域電話のカメラを用いて記録された。顕微鏡は、透過光構成において使用された。第1の偏光板は、試料前方の照明光経路内に位置し、第2の偏光板（分析器）は、第1の偏光板に対して90度における偏光方向で、試料の後方に位置付けられた。

【 0 0 2 4 】

コノスコープ画像の中心は、顕微鏡システムの光学軸に対応し、光学軸（中心スポット）からの距離は、光が進行する角度に対応する。故に、コノスコープ画像は、顕微鏡内の光の方向に関する情報を提供する。

【 0 0 2 5 】

コンデンサ絞りが、最小アパーチャに近接して設定され、試料への入射光の角度分散を限定し、その結果、アパーチャの画像をコノスコープ画像の中心に制限した。画像の残りは、結晶化によって形成されたT DおよびR Dリッジ群から回折された光によって形成される。偏光板および分析器はともに、画像の残りに対する中心スポットの輝度を最小限にするように作用する。90 - 度の相対回転では、2つの偏光板は、コノスコープ画像において、アイソジャイアとして知られる一対の消光交差帯域を形成する。偏光板および分析器をとともに試料に対して回転させることによって、アイソジャイアは、回折帯域から離れるように回転され、その帯域の消光を最小限にすることができる。

【 0 0 2 6 】

図5にグレースケールで表される実際の画像は、カラー画像である。水平帯域は、青みがかった色であって、垂直帯域は、緑がかった色である。帯域の着色は、非常に均一であり得、それらの波長では、高回折効率を、および他の波長では、低回折効率を示すと考えられる。帯域の着色の均一性は、リッジの可変間隔の結果であると考えられる。水平および垂直帯域のスペクトル間に、ある程度のスペクトル重複が存在し得る。

【 0 0 2 7 】

顕微鏡対物レンズは、20 X対物レンズであった。強度勾配が高い中心スポットの断片的エッジは、画像画素サイズの指標を与える。暗色四分円中のより大きい正方形は、J P E G画像圧縮のアーチファクトである。

【 0 0 2 8 】

図の水平方向には、R Dリッジ（T Dリップルに関連する）による回折から生じる強い光の帯域が存在する。図の垂直方向には、T Dリッジ（R Dリップルに関連する）による回折から生じるより弱い光の帯域が存在する。透過光は、画像の中心に明るいスポットを形成する。

【 0 0 2 9 】

図1および図2のグラフから予期されるであろうように、パルスE DがO E Dを下回るにつれて、R Dリッジ回折帯域の輝度に対するT Dリッジ回折帯域の相対的輝度は、E Dの減少に伴って、急減する。パルスE DがO E Dを上回って上昇すると、R Dリッジ回折帯域の輝度と比較したT Dリッジ回折帯域の相対的輝度は、ほぼ同一のままであるが、E Dの増加に伴って、両方とも、急減する。回折帯域の輝度の測定は、したがって、E DがO E Dを上回るまたは下回るかどうかと、その程度を判定する有力な方法を提供する。

【 0 0 3 0 】

図6は、E L Aプロセスにおける25の重複パルスによって結晶化されたシリコン層面積に対するパルスE Dの関数として、R Dリッジ回折強度（実線曲線）およびT Dリッジ回折強度（破線曲線）を図式的に図示するグラフである。リッジの強度は、直接、測定されなかった。代わりに、回折帯域強度の測定が、帯域が異なる色を有し、色情報が、依然として、通常顕微鏡画像内に存在するという観察に基づいて考案された。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 1 】

市販のラスタグラフィックエディタが、それぞれ、R DリッジおよびT Dリッジの回折の測定として、偏光画像の青色および緑色チャンネルの平均輝度を判定するために使用された。本アプローチの不利点は、画像色チャンネルが、2つの信号間に非常に大きなクロストークが存在するような帯域輝度を認めるための最適化フィルタリングを提供しないことである。また、非回折中心スポットの信号は、より高い雑音レベルを有するように、これらの色チャンネル上に重畳される。その場合でも、差異は、点曲線によって図6に描写されるように、緑色チャンネル輝度と青色チャンネル輝度の比率が最大に達するとき、O E Dが認められる傾向を明かに示す。

【 0 0 3 2 】

代替として、C M O SアレイまたはC C Dアレイによって記録されるコノスコープ画像は、図5の画像と同様に、適切なソフトウェアを使用して、電子的に処理され、回折帯域からのみ、測定データを集めることができる。これは、空間情報が、本質的に、これから独立するため、測定が、画像内の回折された光帯域の実際の色および回折効率に鈍感となるであろうという利点を有する。実際の回折効率は、膜厚および堆積パラメータの関数となり得る。

【 0 0 3 3 】

図7は、連続して、結晶化されている層の同一の面積に送達されるパルスのパルス数およびE Dの関数として、R Dリッジ回折強度（実線曲線）およびT Dリッジ回折強度（破線曲線）を図式的に図示するグラフである。ここでの傾向は、図3のグラフに類似する。各場合における3つのE D値は、 $410\text{ mJ} / \text{cm}^2$ 、 $415\text{ mJ} / \text{cm}^2$ 、および $420\text{ mJ} / \text{cm}^2$ である、すなわち、1%のE Dにわたってほぼ間隔がなく選択される。15パルスが堆積された後、E Dの1%変化は、信号振幅の約20%の変化を引き起こすことが分かる。約22パルスでは、回折された信号変化は、E Dの2%変化に対して、依然として、約5%以上である。これは、明らかに、本発明の方法の感度を明らかに例証する。

【 0 0 3 4 】

図8は、結晶化されたシリコン層を評価するための本発明による装置の一好ましい実施形態20を図式的に図示する。ここでは、評価されている結晶化されたシリコン層22は、ガラスパネル24上に支持される。K o e h l e r照明用に設定された顕微鏡26は、白色光のビーム29を送達するランプまたは光源28を含む。コンデンサ絞り30は、ビーム29の光円錐の開口数の制御を提供する。

【 0 0 3 5 】

部分的に反射および部分的に透過性の光学要素32（ビームスプリッタ）が、図8に描写されるように、層に対して直角入射において、ビーム29を層22上に指向させる。光ビームの一部34は、層22から反射され、一部36 Tは、回折される。添え字Tは、ここで使用されるように、光が、層の結晶の間に形成された前述の横方向（T D）リッジによって回折されることを意味する。図8 Aは、図8の平面に垂直な平面における装置20を描写し、層の結晶化の間に形成される前述の圧延方向（R D）リッジによって回折された光36 Rを図示する。

【 0 0 3 6 】

反射および回折された光は、要素32を通して透過される。反射された光は、停止部38によって遮断される。回折された光は、停止部38を迂回し、検出器ユニット50内の光学検出器要素52上に入射する。電子プロセッサ54は、検出器ユニット50内に提供され、検出器によって受信された回折された光の振幅を判定するために配列される。

【 0 0 3 7 】

検出器要素52は、前述のように、C C DアレイまたはC M O Sアレイ等の画素化検出器であって、回折された光のコノスコープ画像を記録することができ（図7参照）、そこから、回折された光強度が、空間分析により、プロセッサ54によって判定されることができる。代替として、検出器要素は、1つ以上のフォトダイオード要素であって、総回折

10

20

30

40

50

光を記録することができる。この場合、随意のフィルタ要素 39 および 40 が、前述のように、TD および RD 回折された光の特定の色に対応するように選択された通過帯域を有するように提供される。これらは、矢印 A によって図 8 に示されるように、回折された光経路の内外を移動されることができる。

【0038】

いずれの場合も、別のスペクトルフィルタ（図示せず）が、源 28 からの光の帯域幅を回折されるそれらの色に限定するために提供されることができる。これは、停止部 38 を迂回し、回折された光と混合可能な層 22 から散乱される光（図示せず）による雑音を低減させるであろう。

【0039】

図 8 および 8A では、光源 28 のためのコレクタレンズ光学系、（無限補正）対物レンズ光学系、およびチューブレンズ光学系を含む、顕微鏡 26 の光学系は、例証の便宜上、図示されない。加えて、顕微鏡は、コノスコブ画像を直接観察するための Bertrand レンズおよび「接眼部」（または、接眼レンズ）を具備することができる。顕微鏡内のそのような光学系の形態および機能は、光学分野の当業者に周知であって、その詳細な説明は、本発明の原理を理解するために必要ではない。

【0040】

反射光顕微鏡の代替として、透過光顕微鏡が、使用されてもよい。そのような顕微鏡設定は、ビームスプリッタを有していないが、試料の前方に別個の集光レンズを要求する。最良結果のために、ビーム停止部 38 が、試料の後方の対物レンズの後焦点面またはその任意の共役平面に設置されてもよい。反射光顕微鏡検査の場合、ビーム停止部は、また、入射光を遮断しないように、ビームスプリッタの後方に位置する、対物レンズの後焦点面に対する共役平面に設置されるのが最良である。

【0041】

リッジからの回折はまた、偏光板および/またはビーム停止部の不在下でも観察されたことに留意されたい。回折帯域はまた、依然として、対物レンズおよび/または集光レンズの除去後も観察され得る。そのようなレンズは、したがって、検査中の膜内の領域の輝度および選択性の観点から、測定を最適化するためのツールとして見なされるべきである。それらは、本明細書に説明される装置の重要要素ではない。

【0042】

図 9 は、本発明によるエキシマレーザアニリング装置の一好ましい実施形態 60 を図式的に図示する。装置 60 は、レーザビーム 65 を送達するエキシマレーザ 64 を含む。ビーム 65 は、可変減衰器 66 を通して、反射鏡 70 を介して成形ビーム 69 を投射光学系 72 に送達する、ビーム成形光学系 68 に透過される。投射光学系は、前述のように、非直角入射において、ビームを層 22 上に投射する。層 22 を含む、ガラスパネル 24 は、投射されたレーザビームに対して方向 RD に、層およびパネルを移動させる、平行移動ステージ 62 上に支持される。

【0043】

前述の装置 20 は、層 22 の上方に位置付けられる。処理ユニット 54 は、検出器要素 52 によって観察された TD リッジ回折および RD リッジ回折光成分の振幅と、図 6 および図 7 の曲線等の実験曲線から作成された電子ルックアップテーブルとから、層が OED を上回るまたは下回るパルスを用いて結晶化されたかどうかを判定する。

【0044】

典型的には、投射されたレーザビーム（パルスエネルギーまたはプロセス ED）中のエネルギー密度は、最初は、公称 OED で制御される。しかしながら、送達されたエネルギー密度は、経時的にドリフトし得、通常、OED の見掛けドリフトとして記録される。OED が、公称より低い値にドリフトしたと考えられる場合、ED は、OED を下回るであろう。すなわち、前述のように、両方向に、より低い密度のリッジが存在し、故に、両回折信号は、大きさが低減されるであろう。信号は、次いで、処理ユニット 54 から減衰器 66 に送信され、層に送達されるパルスエネルギーを低減させる。OED が、公称より高い

10

20

30

40

50

値にドリフトしたと考えられる場合、E Dは、瞬時O E Dを下回るのである。すなわち、前述のT Dリッジに対してより低い密度のR Dリッジが存在し、故に、両R Dリッジ回折の大きさは、減少する一方、T D回折の大きさは、同一のままである。信号は、次いで、処理ユニット5 4から減衰器6 6に送信され、層に送達されるパルスエネルギーを適切に増加させる。

【0045】

前述の補正プロセスは、当然ながら、図9のフィードバック配列を使用して、自動的に行われる必要はない。代替として、処理ユニット5 4は、オペレータに対して、モニタ上に表示するために、見掛O E Dドリフトに関する情報を送達することができ、オペレータは、層2 2に送達されるパルスエネルギーを自動で調節することができる。

10

【0046】

図10は、本発明によるエキシマレーザアニリング装置の別の好ましい実施形態6 0 Aを図式的に図示する。装置6 0 Aは、図9の装置6 0に類似するが、その回折測定装置2 0は、レーザビーム8 2等の指向性光源8 0を含む、代替回折測定装置2 1によって置換される。レーザからの光は、図10に描写されるように、非直角入射において、層2 2上に入射し、反射ビーム8 2 Rおよび回折光8 4を生成する。図8および図9の装置2 0を参照して前述のように、T DリッジおよびR Dリッジから回折された光ビームが存在するのである。反射されたビーム8 2 Rは、随意に、停止部3 8によって遮断され、回折された光は、検出器要素5 2によって検出され、検出器要素5 2の形態に応じて、前述のように、処理ユニット5 4によって処理されることができる。

20

【0047】

本発明の方法および装置は、したがって、例えば、E D 1 0、5、またはさらにわずか $2\text{ mJ} / \text{cm}^2$ 離れた、それぞれ異なるE Dにおいて、複数回の走査を含有するパネルから、O E Dを見出すために使用されてもよい。本発明による顕微鏡は、レーザアニリング装置のアニリングチャンバの内側に搭載されてもよい。顕微鏡は、倍率を変更するために、ズームレンズアセンブリを含んでもよい。パネルは、顕微鏡の真下で走査され、パネルが、条件あたり1つまたは複数の場所において測定されることを可能にすることができる。顕微鏡は、加えて、横方向に移動するためのステージを具備してもよい。自動集束配列が追加されてもよいが、これは、E L Aプロセスより大きい焦点深度を有するため、コノスコープ画像には必要ではないであろう。完全に結晶化されたパネルはまた、さらなるパネルの結晶化が、必要に応じて、中断され得るように、プロセスの品質を検出するために、1つ以上の場所において（オンラインまたはオフラインのいずれかにおいて）測定されることができる。十分な測定が実施される場合、欠陥（ムラ）のマップが、得られ得る。

30

【0048】

本発明は、E L AおよびA - E L A結晶化シリコン層の評価を参照して説明されたが、本発明は、他の半導体材料の結晶化された層の評価にも適用可能であることに留意されたい。一例として、ゲルマニウム（G e）またはG eおよびシリコン合金の層が、評価されてもよい。

【0049】

要するに、本発明は、好ましいおよび他の実施形態の観点から前述されたが、本発明は、説明および描写される実施形態に限定されない。むしろ、本発明は、添付の請求項によってのみ限定される。

40

【 図 1 】

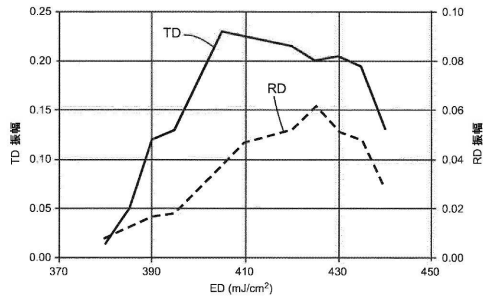


FIG. 1

【圖 2】

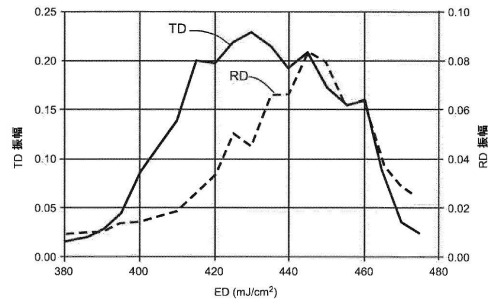


FIG. 2

【 図 5 】

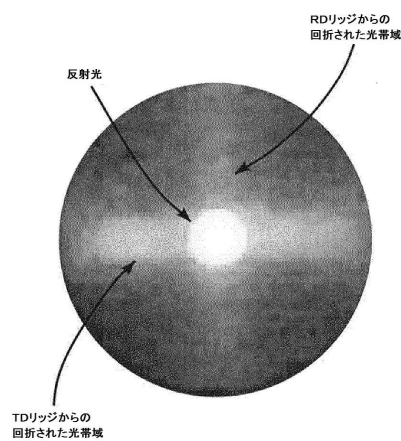


FIG. 5

【 図 3 】

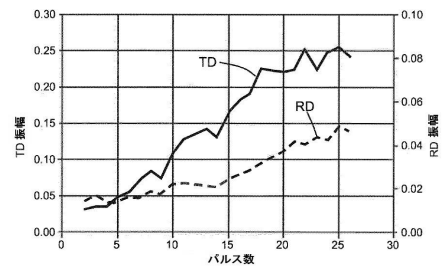


FIG. 3

【圖 4】

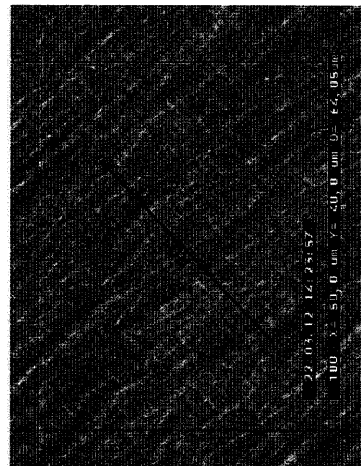


FIG. 4

【 図 6 】

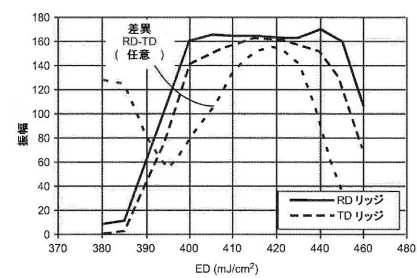


FIG. 6

【圖 7】

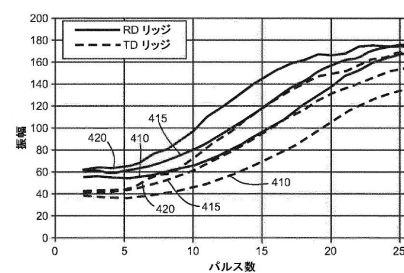


FIG. 7

【図 8】

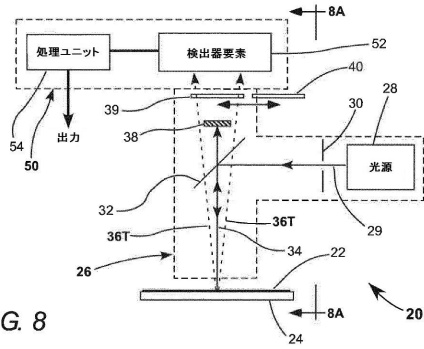


FIG. 8

【図 8 A】

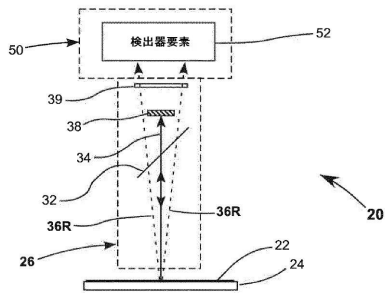


FIG. 8A

【図 9】

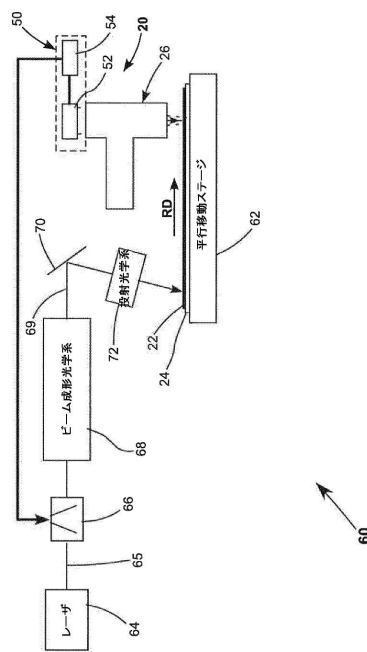


FIG. 9

【図 10】

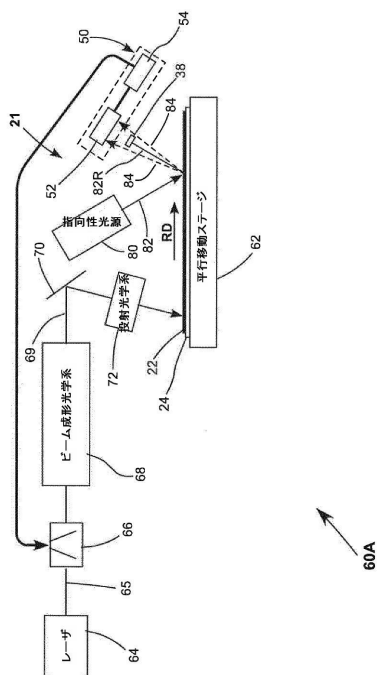


FIG. 10

フロントページの続き

(74)代理人 230113332

弁護士 山本 健策

(72)発明者 ファン デア ヴィルト, パウル

ドイツ国 デー - 3 7 0 8 1 ゲッティンゲン, レオナルト - ネルソン - シュトラーセ 2 0

審査官 高 須 甲斐

(56)参考文献 特開 2 0 0 4 - 1 7 2 4 2 4 (J P , A)

特開 2 0 0 8 - 2 6 8 1 4 1 (J P , A)

特開 2 0 0 5 - 1 9 1 1 7 3 (J P , A)

特開 2 0 0 3 - 3 1 8 2 4 0 (J P , A)

特開平 1 0 - 3 0 0 6 6 2 (J P , A)

特開 2 0 0 1 - 1 1 0 8 6 1 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

H 0 1 L 2 1 / 6 6

H 0 1 L 2 1 / 2 6 8

H 0 1 L 2 1 / 2 0

G 0 1 N 2 1 / 9 5 6