

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4921673号
(P4921673)

(45) 発行日 平成24年4月25日(2012.4.25)

(24) 登録日 平成24年2月10日(2012.2.10)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 L 21/268 (2006.01)
B 2 3 K 26/073 (2006.01)H O 1 L 21/268 G
H O 1 L 21/268 J
H O 1 L 21/268 T
B 2 3 K 26/073

請求項の数 31 (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2001-560735 (P2001-560735)
 (86) (22) 出願日 平成12年12月28日(2000.12.28)
 (65) 公表番号 特表2003-524892 (P2003-524892A)
 (43) 公表日 平成15年8月19日(2003.8.19)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2000/035613
 (87) 国際公開番号 W02001/061407
 (87) 国際公開日 平成13年8月23日(2001.8.23)
 審査請求日 平成19年11月28日(2007.11.28)
 (31) 優先権主張番号 09/505,605
 (32) 優先日 平成12年2月16日(2000.2.16)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 500509313
 ウルトラテック, インコーポレイテッド
 アメリカ合衆国 カリフォルニア 951
 34, サン ノゼ, ザンカー ロード
 3050
 (74) 代理人 100078282
 弁理士 山本 秀策
 (74) 代理人 100062409
 弁理士 安村 高明
 (74) 代理人 100113413
 弁理士 森下 夏樹
 (72) 発明者 ハウリールク, アンドリュウ エム.
 アメリカ合衆国 カリフォルニア 940
 24-6505, ロス アルトス ヒル
 , エロイズ サークル 10645
 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザー熱加工装置および方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

1つ以上のワークピース領域を有するワークピースのレーザー熱加工を実施する装置であって、該装置は以下：

1000より多い空間モードを有し、かつ1ナノセカンドと1マイクロセカンドの間の時間パルス長を伴い±5%未満の放射度均一性を有する1つ以上の放射パルスを放出し得る、パルス化した固体レーザー光源；

該ワークピースを支持するためのワークピースステージ；および、

露光領域を有する照明光学系であり、該系は、該露光領域内で、該1つ以上の放射パルスを用いて、該1つ以上のワークピース領域のうちの少なくとも1つを照射するように、該レーザー光源と該ワークピースステージとの間に配置される、照明光学系、を備える、装置。

【請求項2】

請求項1に記載の装置であって、前記照明光学系が、前記レーザー光源から光軸に沿って、以下の順で：

ビーム輸送系；

ディフューザー；

光学積分器；

前記露光領域の大きさを規定するための可変開口絞り；および、

該露光領域を形成するための結像光学系、

10

20

を備える、装置。

【請求項 3】

前記レーザー光源が、 $\pm 5\%$ 未満のパルス間安定性を有する、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 4】

前記放射を減衰させるために、前記レーザー光源と前記ディフューザーとの間に配置された可変減衰器要素をさらに備える、請求項 2 に記載の装置。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の装置であって、前記可変減衰器によって供給される減衰量を制御するために、前記可変減衰器要素に作用可能に接続された可変減衰器制御ユニットをさらに備える、装置。

10

【請求項 6】

前記光学積分器と前記可変開口絞りとの間に配置されたビーム輸送光学系をさらに備える、請求項 2 に記載の装置。

【請求項 7】

前記可変開口絞りの大きさを制御するために、該可変開口絞りに作用可能に接続された可変開口絞り制御ユニットをさらに備える、請求項 6 に記載の装置。

【請求項 8】

前記照明光学系に関連して前記ワークピースステージを制御し、かつ配置するための、ワークピースステージ制御ユニットをさらに備える、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 9】

前記光学積分器が、該積分器を通して通過する前記放射のいくらかが少なくとも 4 回の反射を行うように設計された光トンネルである、請求項 2 に記載の装置。

20

【請求項 10】

請求項 1 に記載の装置であって、前記レーザー光源が、Nd:YAGレーザー、Nd:ガラスレーザー、アレキサンドライトレーザー、およびTi:サファイアレーザーからなるレーザー光源の群より選択された 1 つである、装置。

【請求項 11】

請求項 1 に記載の装置であって、該装置は以下：

前記ワークピースステージに電子的に接続されたコンピューター；および、

前記露光領域と該ワークピースとの間の整列状態を測定し、かつ該整列状態に対応する電子シグナルを該コンピューターに提供するために、該コンピューターに電子的に接続された整列システム、
をさらに備える、装置。

30

【請求項 12】

請求項 1 に記載の装置であって、該装置は以下：

ワークピースを前記ワークピースステージに、および該ワークピースステージから移動させるためのワークピース操作システム、
をさらに備える、装置。

【請求項 13】

前記ワークピース操作システムを介して、前記ワークピースステージに、および該ワークピースステージから移動されるべきワークピースを収納するための、ワークピース収納ユニットをさらに備える、請求項 12 に記載の装置。

40

【請求項 14】

1 つ以上のワークピース領域を有するワークピースのレーザー熱加工を実施する装置であって、該装置は、第一軸に沿って、以下の順で：

1000 より多い空間モードを有し、かつ 1 ナノセカンドと 1 マイクロセカンドの間の時間パルス長を伴うパルス化した放射を放出し得る、パルス化した固体レーザー光源；

ビーム輸送光学系；

ディフューザー；

該ディフューザーから光を受け取るように配置された光学積分器；

50

可変開口絞り；

± 5 %未満の放射度均一性を伴う露光領域を有する結像光学系；および、

該 1 つ以上のワークピース領域のうちの 1 つが、該露光領域内に含まれるように、該ワークピースを支持するための、ワークピースステージ、
を備える、装置。

【請求項 15】

請求項 14 に記載の装置であって、該装置は以下：

前記光源と前記光学積分器との間に配置された可変減衰器要素であって、該可変減衰器要素が、第一電子シグナルを介して、該可変減衰器要素を制御し得る減衰器制御ユニットに作用可能に接続された、可変減衰器要素；

第二電子シグナルを介して、前記可変開口絞りの大きさを制御するために、該可変開口絞りに作用可能に接続された、可変開口絞り制御ユニット；

第三電子シグナルを介して、前記露光領域に関連して前記ワークピースステージを制御し、かつ配置するために、該ワークピースステージに電子的に接続された、ワークピースステージ制御ユニット；ならびに、

第四、第五および第六電子シグナルのそれぞれを介して、該減衰器制御ユニット、該可変開口絞り制御ユニットおよび該ワークピースステージ制御ユニットの各々を制御するために、該減衰器制御ユニット、該可変開口絞り制御ユニットおよび該ワークピースステージ制御ユニットに電子的に接続された、コンピューター、
をさらに備える、装置。

【請求項 16】

請求項 15 に記載の装置であって、前記露光領域と前記 1 つ以上のワークピース領域のうちの 1 つとの間の整列状態を測定し、かつ該整列状態に対応する情報を含む第七電子シグナルを、前記コンピューターに提供するために、該コンピューターに電子的に接続された整列システムをさらに備える、装置。

【請求項 17】

請求項 16 に記載の装置であって、該装置は以下：

前記結像光学系と前記ワークピースステージとの間に配置されたビームスプリッター；

前記光源から該ワークピースステージまで移動する放射の一部分を該ビームスプリッターの第一面から受け入れるように、該ビームスプリッターを通過し、かつ前記第一軸に垂直である第二光軸に沿って配置された第一検出器であって、該第一検出器は、前記コンピューターに電子的に接続され、かつ該受け入れられた放射の一部分に応答して、第八電子シグナルを該コンピューターに伝達し得る、第一検出器；および、

該ワークピースから反射された放射の一部分を受け入れるように、該第二光軸に沿い、かつ該第一検出器に対向した該ビームスプリッターの第二表面に近接して配置された第二検出器であって、該第二検出器は、該コンピューターに電子的に接続され、かつ該受け入れられた反射された放射の一部分に応答して、第九電子シグナルを該コンピューターに伝達し得る、第二検出器、
をさらに備える、装置。

【請求項 18】

露光領域にわたってワークピースのレーザー熱加工を実施する方法であって、該方法は以下の工程：

a . 該ワークピースを該露光領域に対して整列させる工程；

b . 1000 より多い空間モードを有するレーザー光源からの放射度を有し、かつ ± 5 %未満のパルス間再現性を伴う 1 ナノセカンドと 1 マイクロセカンドの間の時間パルス長を有する放射パルスを放出し得る、実質的に非干渉性の 1 つ以上の放射パルスを提供する工程；

c . 該 1 つ以上の放射パルスの均一性が、該露光領域にわたって ± 5 %未満で変化するように、該 1 つ以上の放射パルスを均一化する工程；および、

d . 該露光領域にわたって、該 1 つ以上の放射パルスを用いて該ワークピースを露光す

10

20

30

40

50

る工程、
を包含する、方法。

【請求項 19】

請求項 18 に記載の方法であって、該方法は以下の工程：

e . 前記ワークピースから反射された前記 1 つ以上の放射パルスモニタリングする工程；および、

f . 該モニタリングする工程 e に基づいて、該ワークピースを露光する前記工程 d を制御する工程、
をさらに包含する、方法。

【請求項 20】

請求項 18 に記載の方法であって、前記 1 つ以上の放射パルスを均一化する前記工程 c が、

e . ディフューザーを通して該 1 つ以上の放射パルスを通過させる工程、および

f . 該 1 つ以上の放射パルスが、少なくとも 8 回反射表面から反射するように、該反射表面を有する光トンネルを通して、工程 e の該ディフューザーからの該 1 つ以上の放射パルスを通過させる工程
を包含する、方法。

【請求項 21】

e . 前記露光領域にわたる所望の放射度に達するように、前記工程 b の 1 つ以上の放射パルスを減衰させる工程をさらに包含する、請求項 18 に記載の方法。

【請求項 22】

前記レーザー光源が、10,000 より多い空間モードを有する、請求項 18 に記載の方法。

【請求項 23】

前記 1 つ以上の放射パルスの各々が、 0.1 J/cm^2 と 1 J/cm^2 との間の放射度を有する、請求項 18 に記載の方法。

【請求項 24】

e . 前記ワークピースを自動的に移動させ、そして該ワークピースを別のワークピースに置きかえる工程をさらに包含する、請求項 18 に記載の方法。

【請求項 25】

g . 前記露光領域の寸法を変化させる工程をさらに包含する、請求項 19 に記載の方法。

【請求項 26】

露光領域にわたってワークピースのレーザー熱加工を実施する方法であって、該方法は以下の工程：

a . 該ワークピースを該露光領域に対して整列させる工程；

b . 1 つ以上の放射パルスを生じさせるために、1000 より多い空間モードを有するレーザー光源を活発化させる工程；

c . パルス化した放射の均一化されたビームを形成するために、該 1 つ以上の放射パルスを均一化させる工程；

d . 可変開口絞りに該パルス化した放射の均一化させたビームを送達する工程；および、

e . 該パルス化した放射の均一化させたビームを用いて、該ワークピースを露光させるように、該ワークピースの上に該可変開口絞りを結像化する工程、
を包含する、方法。

【請求項 27】

f . 前記レーザー光源から前記ワークピースまで移動する前記均一化させたビームの一部分をモニタリングする工程をさらに包含する、請求項 26 に記載の方法。

【請求項 28】

f . 前記ワークピースから反射された、前記均一化させたビームの一部分をモニタリン

10

20

30

40

50

グする工程をさらに包含する、請求項 26 に記載の方法。

【請求項 29】

前記均一化させる工程 c が、

f. ディフューザーおよび光学積分器を通して前記 1 つ以上の放射パルスを通過させる工程

を包含する、請求項 26 に記載の方法。

【請求項 30】

前記 1 つ以上の放射パルスが、 $\pm 5\%$ 未満のパルス間安定性を有する、請求項 26 に記載の方法。

【請求項 31】

前記 1 つ以上の放射パルスは、 $\pm 5\%$ 未満の放射度均一性を有する、請求項 27 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

(発明の分野)

本発明は熱加工に関し、詳細には、高放射度の放射の短いパルスを用いてワークピースを均一に露光することによって、ワークピースの高速熱加工を実施する装置および方法に関する。

【0002】

(発明の背景)

高速熱加工(RTP)は、基板(「ワークピース」)の変化を起こすために、ワークピースを加熱する(その後冷却する)工程を包含する。ワークピースの RTP が要求される、いくつかの産業的用途(例えば、半導体における金属の焼戻しおよび合金形成またはドーパントの電子的活性化)が存在する。加熱炉においてゆっくりとワークピースを加熱することから、フラッシュランプからの放射フラッシュを用いてワークピースを露光することに及ぶ、当該分野で公知のいくつかの RTP 技術が存在する。

【0003】

特定の RTP 技術が、所定の用途に適するか否かは、所望の加工を実施するために、ワークピースが、どのように加熱される必要があるかということに主に依存する。例えば、特定の型の半導体素子製品を形成する場合に、特定の半導体ウェーハを焼戻すために、ホットプレートまたは放射ランプを用いて高温までウェーハを加熱し、次いで室温で冷却プレート上に据えることでウェーハを冷却することが、実行可能な RTP 技術である。しかし、ウェーハの小領域のみが極端に急速に(例えば、マイクロセカンド)加熱および冷却される必要がある用途は、この技術に適さない。なぜなら、ウェーハの熱塊は、このような急激な加熱および冷却が全く不可能であるからである。フラッシュランプが、このような急激な加熱および冷却に用いられ得るが、このフラッシュランプは、一般に、多数の半導体用途についてワークピースの変化を実施するために、ワークピースにエネルギー量を送達するのに必要な放射度および時間パルス長を有さない。

【0004】

高い潜在力を有し得る RTP 技術は、サブマイクロセカンドの加熱および冷却時間が要求される場合、パルス化したレーザーを使用する工程を包含し、ここでは「レーザー熱加工」または「LTP」と呼ばれる。RTP 技術の大部分は、基板平面におけるある最小レベルの熱均一性を要求する。基板を加熱するのに光学供給源またはレーザーを使用する場合、この熱均一性の要求は、照明均一性の要求に変換される。あいにく、この要求は、LTP のためのパルスレーザーの使用を妨げた。なぜなら、現在まで熟考されるこのパルス化したレーザーは、RTP を十分に実行するのに必要な照明均一性およびパルス間安定性に欠けているからである。

【0005】

一般的に、レーザー放射が加工されるべきワークピース(例えば、ウェーハ)の方に向けられる場合、ミクロおよびマクロの放射度の非安定性が生じる。このマクロの輝度の不均

10

20

30

40

50

一性の問題は、種々の現在一般的な均一化技術（例えば、光トンネル、ホモジナイザーロッドおよび「蠅の目アレイ（fly's-eye-array）」）を介して取り組まれている。しかし、レーザー光の干渉性特性によって生じるミクロの輝度の不均一性は、レーザーがRTP手段のための一般的な光源になるのを妨げている。エキシマーレーザーは、大部分の他のレーザー（例えば、ガス放電または半導体レーザー）よりも「非干渉性」であるため、産業において首尾よく利用されている一方で、このエキシマーレーザーは、パルス間安定性に欠けるため、全ての産業用途に適するわけではなく、そして特定のLTPに適さない。エキシマーレーザーに関する他の問題には、それらの大きいサイズ（「フットプリント」）およびそれらの高い維持コストが挙げられる。

【0006】

上で言及されるように、LTPは、半導体産業において高い潜在性用途を有する。集積電気回路の製造は、ドーパント（N型またはP型）を半導体（例えば、シリコン、ゲルマニウム、ガリウム砒素など）基板に導入して、その導電率を変化させるためのイオン注入を包含する。一般的に、この手順は、MOSFETトランジスタまたはベースの供給源またはドレイン、エミッター、BIPOLARトランジスタのコレクター、ダイオードの陰極、抵抗領域素子を打込む際に、あるいはコンデンサープレートとしてでさえ使用される。手短に言えば、半導体基板の導電率を変化させることが望ましい、多数の理由が存在する。ドーパント原子の打込みは、それらが打込まれる結晶基板の化学結合を崩壊させ、いくつかの場合において、領域を非結晶にし得る。これはつまり、この領域の結晶格子が崩壊されたということである。

【0007】

打込みによって形成された電子部品の良い電気効率を得るために、打込まれた領域は、焼き戻されなければならない。この焼き戻し加工は、前以て非結晶質にされた領域を取り除き、そしてより結晶性の構造体を再構築する。また、ドーパントは、これらの原子を半導体基板の結晶格子に取り入れることによって、「活発化」される必要がある。これは、比較的多量の熱エネルギーを、短時間でこの領域に供給し、次いで、熱加工を終了するために、この領域を急激に冷却することを要求する。

【0008】

首尾よい、頑強なLTP装置は、好ましくは、10の設計要求を満たす。1番目に、この装置は、完全に自動化され、かつウェーハの遠隔操作を含み、それによって多数の基板（「ワークピース」）は、ヒトの介入の必要性なしに加工され得る。2番目に、この装置は、全てのダイ領域（full die-by-die field）を露光する（つまり、部分的領域の露光はない）。3番目に、この装置は、1パルス当たりの十分な放射度を供給して、LTPの目標を達成する（例えば、1パルス当たり 0.1 J/cm^2 と 1.0 J/cm^2 との間の放射度レベルを要求する、ドーパント活発化または熱的焼き戻し）。4番目は、 $\pm 5\%$ 以内での露光領域にわたる照明均一性（マクロおよびミクロの均一性の両方）であり、それによって、対応する熱均一性は、同様に均一である。5番目の要求は、レーザーのパルス間エネルギー安定性（再現性）は、 $\pm 5\%$ 内であり（好ましくは、サブマイクロ秒パルスについて数ナノ秒のみ変化される）、それによって、領域間での結果は再現可能であることである。6番目に、ワークピースの各ダイ（つまり、ワークピース領域）は、 ± 50 ミクロン内（不活性KERF設計領域内）の精度で露光領域に整列され、それによって、適切な露光は、各領域内に含まれる。7番目に、露光領域のエッジにおける照明減退は、非常に激しく（つまり、 50 ミクロン未満の分解能）、それによって、ワークピース上に隣接した領域の露光は存在しない。8番目に、領域サイズは、LTP装置が用いられ得る種々の領域サイズを考慮するために、 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ から $22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ まで規定可能でなければならない。9番目に、この装置は、 0.1 J/cm^2 から 1.0 J/cm^2 のエネルギーを送達するようにプログラム可能である。10番目に、この装置は、LTPプロセスに関連した特定のキーパラメーター（例えば、ワークピースが溶解されているか否か、送達されたエネルギー量、ワークピースから反射されたエネルギー量およびビームプロファイル）をモニタリングするための診断性能を有する。

10

20

30

40

50

【0009】

均一な照明を提供する多数の先行技術の照明装置が存在するが、上で同定された要求を満たさない。例えば、米国特許第5,059,013号、発明の名称：「Illumination System to Produce Self-luminous Light Beam of Selected Cross-section, Uniform Intensity and Selected Numerical Aperture」は、選択された断面形状および均一輝度の光ビームを製造する照明系を開示し、この照明系は以下によって、選択された開口数に自己発光的に放出する：不均一で、非自己発光性のレーザー光ビームを供給すること；ビーム周囲近辺の不均一性を排除するようにビームを構成すること；半均一性光ビームを光ゲートに供給すること；光学トラップおよび赤外トラップを有するランプ光ビームもまた供給すること；レーザー光ビームまたはランプ光ビームを、光ビーム特徴づけサブシステムに選択的にゲーティングすること；選択された半形状の半均一性で非自己発光性の光ビームを構成して、選択された形状の半均一性で非自己発光性の光ビームを供給すること；選択された開口数に関連した焦点距離を有する、選択された形状の半均一性で非自己発光性の光ビームを、全反射によるビーム波形器の均一器の入力平面に向けて焦点を合わせ、この均一器内に複数の反射および相互に種々の部分のビームのオーバーラップを生じさせ、ビーム波形器の均一器の長さは、選択された輝度均一性に関連し、出口平面において、選択された形状の均一性の半自己発光性の光ビームを生じさせること；光ビームを拡散させること；選択された形状で均一性の自己発光性の光ビームを、収集レンズを通して通過させて、適用サブシステムの方に選択された開口数でビームを伝達すること。あいにく、この照明系は、かなり複雑であり、そして全反射であるホモジナイザーロッド内のレーザー干渉性効果から生じる、ミクロの不均一性の問題を対処しない。これは、±5%未満のマクロおよびミクロの均一性要求を述べる4番目の要求に背く。

【0010】

米国特許第5,357,365号、発明の名称：「Laser Beam Irradiating Apparatus Enabling Uniform Laser Annealing」は、高い精度および均一性でサンプルの全表面にわたってレーザー焼戻し可能なレーザービーム放射装置を記載する。レーザー源から出力されたレーザービームの光束は、ビーム拡大器によって拡大される。このビーム拡大器を通過したレーザービームの出力は、合成水晶の半波長プレートおよび合成水晶の偏光プリズムによって調整される。偏光プリズムから放出されたレーザービームは、鏡によって定められた位置に導かれ、そしてX軸回転鏡によってX軸の方向へ移動される。X軸回転鏡から反射されたレーザービームは、シリコンウェーハ表面の定められたビームスポット直径を有するように、その直径がf-レンズによって減少されており、そしてレーザービームスキニングは、一定速度において実行される。半波長プレートおよび偏光プリズムは、合成水晶から形成されるため、レーザービームの連続的放射によって生じる光学構成要素の熱変形は抑制され得、レーザービームのビームプロファイルは安定化され得、従って高度に均一でかつ高度に正確なレーザー焼戻しが可能となる。あいにく、この照明系は、かなり複雑であり、そしてワークピースにおいてサイズが減少される。つまり、小領域のみが露光され、かつワークピースを横切ってスキャンされる。このアプローチは、全ての領域の露光を提供する2番目の要求と矛盾する。

【0011】

(発明の要旨)

本発明は、熱加工に関し、詳細には、高放射度の放射の短いパルスを用いてワークピースを均一に照明することによって、ワークピースの高速熱加工を実施する装置および方法に関する。

【0012】

本発明の第一の局面は、1つ以上のワークピース領域を有するワークピースを加工するLTP装置である。この装置は、1000より多い空間モードを有し、かつ1ナノセカンド

10

20

30

40

50

と１マイクロ秒の間の時間パルス長を伴う１つ以上の放射パルスを放出し得る、パルス化した半導体レーザー光源、ワークピースを支持するためのワークピースステージ、および露光領域を有する照明光学系を備え、この系は、露光領域内で、±５％未満の放射度均一性を有する１つ以上の放射パルスを用いて、１つ以上のワークピース領域の少なくとも１つを照射するように、レーザー光源とワークピースホルダーとの間に配置される。

【００１３】

上記の本発明の第二の局面はこの装置であり、ここで、照明光学系は、レーザー光源から光軸に沿って、ビーム輸送系、ディフューザー、光学積分器、露光領域の大きさを規定するための可変開口絞り、および露光領域を形成するための結像光学系をこの順で備える。

【００１４】

本発明の第三の局面は、露光領域にわたってワークピースのレーザー熱加工を実施する方法である。この方法は、ワークピースを露光領域に対して整列させる第一の工程、次いで、１０００より多い空間モードを有するレーザー光源からの放射度を有し、かつ±５％未満のパルス間再現性を伴う１ナノ秒と１マイクロ秒の間の時間パルス長を有する放射パルスを放出し得る、実質的に非干渉性の１つ以上の放射パルスを提供する工程、放射パルスが、露光領域にわたって±５％未満で均一性を变化するように、放射パルスを均一化する工程、および露光領域にわたって、１つ以上の放射パルスを用いてワークピースを露光する工程、を包含する。

【００１５】

（発明の詳細な説明）

本発明は、熱加工に関し、詳細には、高放射度の放射の短いパルスを用いてワークピースを均一に照明することによって、ワークピースの高速熱加工を実施する装置および方法に関する。

【００１６】

図１を参照すると、本発明のＬＴＰ装置１０は、軸Ａ１に沿ったレーザー光源１４を備える。このレーザー光源１４は、好ましくは、パルス化したレーザー光（放射）を生じさせ得る、かなり複数モードの半導体レーザーである。このレーザー光源１４は、好ましくは、１０００より多い空間モードを有し、より好ましくは、１０，０００より多い空間モードを有し、それによって本質的には、空間的に非干渉性である。これは、ビーム均一性光学、スペックルまたは干渉縞を有する光学系を用いるときでさえ、１００％までの変調を伴う放射において、ミクロの均一性変動を生じ得るからである。これは、ビーム均一化光学内の本来のレーザービーム部分が他のレーザー部分と干渉性であり、かつスペックルを生じる場合に起こり、結果として、ミクロの均一性変動または変調を生じる。このような干渉効果から生じるミクロの均一性の変動（または変調）がレーザー光源１４における空間モードの数の増加によって減少され得ることが、本発明者らによって見出された。干渉効果に起因した放射度の不均一性の変調％は、空間レーザーモードの数、 M の関数として近似的に示され得、以下の関係に従う：

$$\text{変調}(\%) (\pm 1) = \pm M^{-1/2}$$

本発明のために、干渉効果に起因した変調の所定のレベルを生じるモードの数は、上記の式で与えられる。例えば、±３％の変調の±３の均一性要求について、±１＝±１％が要求される。この値を達成するためには、 $M = 10,000$ モードである。

【００１７】

レーザー光源１４は、さらに好ましくは、約１ナノ秒より長い時間パルス長を有するが、約１マイクロ秒よりは短く、１パルス当たり１００ｍＪ／ｃｍ^２と１０００ｍＪ／ｃｍ^２との間のエネルギー出力を有し、約０．３～１．５ミクロンの作動波長範囲を有し、±５％より良好なビーム均一性を有し、そして±５％未満のパルス間安定性を有する。

【００１８】

上記要求を満たす光源１４は、大部分の商業的な用途（高干渉性レーザーと呼ばれる）がたった１つのモードまたはわずかなモード（１０未満）を有するために、見出すのが非常

10

20

30

40

50

に困難である。エキシマーレーザーとして公知のレーザーのクラスは、十分な数のモードを有する；しかし、このレーザーのクラスは、代表的には、あまり適さず、そしてこの用途のパルス間安定性要求を阻害する。半導体レーザー光源は、十分な安定性を示す。あいにく、本発明の高い干渉性の半導体レーザー光源 14 の使用は、十分量のミクロの不均一性を導き、従って適さない。それにもかかわらず、本発明者らは、複数モードの半導体レーザーが、一般に利用可能な半導体レーザーにおいて存在するミクロの不均一性を削除することを認識した。このようなレーザーは、実際に開発された第一型であるが、それらは、いずれの場合においても、歴史的に実用的な用途をほとんど有していないため、一般に市販されていない。それにもかかわらず、本発明者らは、Continuum, Inc., Santa Clara, California により、16 ナノ秒 (FWHM) のパルス長および約 150 より大きな M^2 を有する、複数モードの Nd:YAG の二重レーザーを作製し得、それによって、適したレーザー光源 14 についての上記の好ましい要求を満たした。多数の空間モードを有して作動するために変調される場合、レーザー光源 14 としての機能を果たし得る例示的なレーザーとしては、Nd:YAG レーザー、Nd:ガラスレーザー、アレキサンドライトレーザー、および Ti:サファイア (Sapphire) レーザーが挙げられる。これらのレーザーは、これらの自然なレイジング周波数において作動され得るか、または、複数化された周波数 (例えば、二重、三重または四重周波数) であり得る。

【0019】

レーザー光源 14 は、光源制御ユニット 16 に電子的に接続され、次には、光源制御ユニットならびに以下に記載される他の制御ユニットおよび検出器を、同様に以下により詳細に記載されるように電子シグナルを介して制御するための、コンピューター 20 に電子的に接続される。例示的なコンピューター 20 は、例えば、多数の周知のコンピューター会社のいずれか 1 つ (例えば、Dell Computer, Austin, Texas) から入手可能なパーソナルコンピューターである。コンピューター 20 は、多数の市販のマイクロプロセッサのいずれか (例えば、Intel PENTIUM (登録商標) TM シリーズ、または AMD K6 TM もしくは KM TM プロセッサ)、記憶デバイス (例えば、ハードディスクドライブ) にこのプロセッサを接続するのに適したバス構造、ならびに適した入力および出力デバイスを好ましくは備える。

【0020】

図 1 を引き続き参照すると、装置 10 は、レーザー光源 14 に隣接しかつ軸 A1 に沿った、レーザー光源から放出されるパルス化したレーザー光を減衰させるための、可変減衰器要素 24 をさらに備える。可変減衰器要素 24 は、減衰器制御ユニット 28 に効果的に接続され、この減衰器制御ユニットはパルス化したレーザー光の減衰量を制御する。減衰器制御ユニット 28 はまた、電子シグナルを介してこの減衰器制御ユニットを制御する、コンピューター 20 に電子的に接続される。可変減衰器要素 24 は、例えば、中性密度を評価する減衰器ホイールであり得、そして減衰器制御ユニット 28 は、所望の減衰量に達するように、この減衰器ホイールを回転させ得るモーターコントローラーであり得る。

【0021】

装置 10 は、軸 A1 に沿いかつ可変減衰器要素 24 に隣接したビーム輸送系 32、ディフューザー 36 および出力端部 42 を有する光学積分器 40 の順でさらに備える。ディフューザー 36 は、そこに入射する光を分散するすりガラスまたは他の型の要素であり得る。光学積分器 40 は、そこに入射するレーザー光を、均一性を向上する様式において再結合される複数のセグメントに分散する、複数のレンズレット (lenslet) を含む蠅の目レンズであり得る。図 2 を参照すると、光学積分器 40 はまた、光トンネルであり得る。つまり、多角形断面および全反射によってそれを通して移動する光を反射する壁を有する固体ガラスロッド、またはそれを通して移動する光を反射するように設計された多角形断面および反射壁を有する中空ロッドであり得る。光学積分器 40 の好ましい設計は、入力光 (各々が 1 回の全反射を有する 2 本のビームが、図 2 の平面図において示される) の各平面における 4 ~ 10 回の全反射を支持し得る四角の断面および長さを有する、固体水

10

20

30

40

50

晶光トンネルである。この範囲の反射（「跳ねかえり」）の回数は、一般的には、ガウスのプロファイルを有するビームを用い、そして約±5%内にそれを均一化することが必要とされる。1mmから22mmの間の可変サイズの露光領域を支持するための例示的な光トンネルは、500mmの長さとし、5.7mm×5.7mmの断面積とを有し、融溶水晶または他の光学ガラスから作製され、かつBond Optics, Lebanon, New Hampshireから入手可能である。

【0022】

図1を引き続き参照すると、装置10は、軸A1に沿い、光学積分器40に隣接したビーム輸送光学系44、および可変開口絞り50をさらに備える。ビーム輸送系44は、光学積分器40から放出される光を捕獲するように設計されたF/#を有する。レーザービームの高放射度のために、可変開口絞り50は、熱的に抵抗性であり、かつ摩擦抵抗性である必要がある。好ましい実施形態において、可変開口絞り50は、4つの独立して作動可能なブレード（示されない）を備え、これはステンレス鋼、高反射アルミニウムまたはタングステンから作製され、そして長方形または正方形の開口部を形成するように配置される。可変開口絞り50は、（例えば、独立して作動可能なブレードを制御することによって）この可変開口絞り50のサイズを制御する、可変開口絞り制御ユニット56に効果的に接続される。開口絞り制御ユニット56は、次には、電子シグナルを介してこの開口絞り制御ユニットを制御する、コンピューター20に電子的に接続される。

【0023】

装置10は、可変開口絞り50に隣接して配置された結像光学系60、およびワークピースホルダーとしての機能を果たし、かつ加工されるべきワークピース74を支持し得るワークピースステージ70をさらに備える。結像光学系60は、ワークピース74の方への均一な露光領域64にわたって可変開口絞り50の結像を形成するように配置される。露光領域64は、好ましくは非常に鋭いエッジ、つまり、好ましくは約50μm以下のドロップオフ(drop off)を有する。従って、結像光学系60の分解能は、おおよそ要求されるエッジの鋭さ（例えば、おおよそ50μm未満）である。回折制限システムに関して、この分解能は、エアリーの円盤の半径、Rとして表され得、 $R = 1.22 \lambda / NA$ で与えられ、ここで、 λ は放射の波長であり、かつNAはワークピース側の結像光学系60の開口数である。50μmの分解能Rおよび波長 $\lambda = 542\text{nm}$ について、 $NA = 0.01$ である。多数の用途について、結像光学系60は、回折を制限される必要はなく、球面収差またはコマ収差のような幾何学的な光学収差によって制限され得る。しかし、照明均一性を維持するように、領域のひずみが約0.2%以下に保有されることが重要である。

【0024】

図1に引き続くと、ワークピース74は、表面74Sを有し、かつ代表的には、この表面にわたって配置された1つ以上のワークピース領域78を備える。ワークピース74は、例えば、ワークピース領域78にわたって配置された、複数の集積回路素子を有し、かつ熱的焼戻しを要求するシリコン半導体基板であり得る。ワークピースステージ70は、1つ以上のワークピース領域78にわたって露光されるようにワークピース74を配置するために、ワークピースステージの位置を制御するためのワークピースステージコントローラ80に電子的に接続される。ワークピースステージコントローラ80は、次には、電子シグナルおよびこのコントローラ80に適用される電子シグナルを介して、ワークピースステージを制御するコンピューター20に電子的に接続される。

【0025】

ビーム輸送系32、ディフューザー36、光学積分器40、可変開口絞り50および結像光学系60は、装置10内部に照明光学系の本質的な要素を形成する。

【0026】

装置10は、さらに好ましくは、加工されるべき特定のワークピース領域78と露光領域64とを整列させるために、ワークピースステージ70に隣接した整列システム100を備える。整列システム100は、ワークピース74の整列状態を測定し、その情報を含む

電子シグナルをコンピューター 20 に供給し、次には、必要な場合、ステージ 70 を再配置させるためにコントローラ 80 にこの電子シグナルを適用する。また好ましくは、結像光学系 60 とワークピースステージ 70 の間の光軸 A1 に沿って配置された、ビームスプリッター 108、ならびに軸 A1 と垂直にビームスプリッターを通過する軸 A2 に沿って配置されたモニタリング検出器 112 および 114 が装置 10 に備えられ、それによって、ワークピース 74 の方へ伝搬される光の一部分は、ビームスプリッターによって検出器 114 の方へ偏向され、そしてワークピースから反射された任意の光の一部分は、ビームスプリッターによって検出器 112 の方へ偏向される。検出器 112 および 114 は、コンピューター 20 に電子的に接続される。また、ビームスプリッター 108 ならびに検出器 112 および 114 は、光学積分器 40 の出力端部 42 とワークピース 70 との間の軸 A1 に沿ったどこにでも配置され得る。

10

【0027】

装置 10 はまた、好ましくは、コンピューター 20 に電子的に接続され、かつワークピースステージ 70 と効果的に連絡する、ワークピース操作システム 120 を備える。ワークピース操作システム 120 は、ワークピース収納ユニット 124 に、またはワークピース収納ユニット 124 から 1 つ以上のワークピース 74 を送達し得、そしてワークピースステージ 70 に、またはワークピースステージ 70 から 1 つ以上のワークピースを送達し得、それによってワークピースは、ワークピースステージから取り除かれてワークピース収納ユニットに収納され得るか、またはワークピース収納ユニットから取り除かれてワークピースステージ上に配置され得る。

20

【0028】

(LTP 方法の説明)

図 1 ならびに図 3 のフローチャート 300 および工程 310 ~ 420 を引き続き参照すると、装置 10 の操作およびそれに関連した方法が目下記載される。

【0029】

第一に、工程 310 において、ワークピース 74 がワークピースステージ 70 上に存在しない場合、コンピューター 20 は、ワークピース収納ユニット 124 からワークピースステージ 70 にワークピースの輸送を開始するために、電子シグナルをワークピース操作システム 120 に送信する。

【0030】

一旦、ワークピース 74 が、ワークピースステージ 70 に配置されると、次いで工程 320 において、コンピューター 20 は、露光領域 64 とのワークピース 74 上の 1 つ以上のワークピース領域 78 の整列を開始するために、電子シグナルを整列システム 100 に送信する。整列システム 100 は、ワークピース 74 の整列状態を測定し、そしてコンピューター 20 に整列情報を含む電子シグナルを送信する。コンピューター 20 は、次には、露光領域 64 に関して適切に整列され、かつ結像光学系 60 の最良焦点に整列されるように、ワークピースを配置するために、ワークピースステージ 70 を再配置するためのコントローラ 80 に電子シグナルを送信する。この整列工程は、ワークピース 74 の光学的最適な整列および焦点位置を達成するために、数回の反復が要求され得る。

30

【0031】

一旦、ワークピース 74 が適切に配置されると、次いで工程 330 において、ワークピースを加工するために要求される放射度量がコンピューター 20 に入力される。さらに、露光領域 64 のサイズおよび位置もまた、コンピューターに記録される。これらの値はまた、コンピューター 20 のメモリーに予め記憶され、かつこの工程で呼び出され得る。

40

【0032】

いずれの場合においても、工程 330 の放射度値に基づいて、工程 340 において、コンピューター 20 は、電子シグナルを減衰器制御ユニット 28 に送信し、次いで、ワークピース 74 における所望の放射度量を達成するための減衰を供給するために、可変減衰器要素 24 を調節する。好ましくは、同時に、工程 350 において、コンピューター 20 は、絞り 50 を変化させることによって露光領域 64 のサイズを調節するために、開口絞り制

50

御ユニット 5 6 に電子シグナルを送信する。

【 0 0 3 3 】

一旦、可変減衰器要素 2 4 および可変絞り 5 0 が適切に設定されれば、工程 3 6 0 において、コンピューター 2 0 は、光源制御ユニット 1 6 に電子シグナルを送信し、次いで、この電子シグナルを介してレーザー光源 1 4 を活発化させるとすぐに、レーザー光源が、軸 A 1 に沿って進む予め決定された放射度を有する 1 つ以上のレーザー放射パルス（つまり、パルス化した放射レーザービーム）を供給する。多数の半導体用途に関して、この放射度は、好ましくは 0.1 J/cm^2 から 1 J/cm^2 の範囲である。このレーザー放射は、可変減衰器要素 2 4 を通過し、そして、前に設定された量だけ減衰され、次いでビーム輸送系 3 2 を通過する。

10

【 0 0 3 4 】

ビーム輸送系 3 2 は、1 つ以上の放射パルスから所望の形状を形成し、そしてディフューザー 3 6 にビームを中継する。例えば、ビーム輸送系 3 2 は、レーザー放射の狭いビームを取り込み、そしてディフューザー 3 6 の全前表面を照射するためにそれを拡大する、ビーム拡大器であり得る。ディフューザー 3 6 を通過する際、この放射は、ある範囲の角度にわたって拡散される。次いで、この拡散放射は、光学積分器 4 0 に入る。光学積分器 4 0 が光トンネルである場合、この光は光トンネル壁から反射され、そして出力端部 4 2 において再結合される（ここで、この放射度分布は均一（またはほとんど均一）である）。

【 0 0 3 5 】

次いで、ビーム輸送光学系 4 4 は、光学積分器 4 0 の出力端部 4 2 から可変開口絞り 5 0 にこの光を送達する（つまり、中継する）。可変開口絞り 5 0 は、開口制御ユニット 5 6 に適用された電子シグナルを介して、ワークピース 7 4 上のワークピース領域 7 8 のサイズに対応するサイズまで、コンピューター 2 0 によってその開口部を設定される。結像光学系の倍率、高さ h の四角形開口部を有する可変開口部 5 0 および高さ h' の四角形領域サイズ 7 8 に関して、可変開口部高さ h は、 h' に設定されるのが好ましい。値の代表的な大きさは、1 と 10 との間である。

20

【 0 0 3 6 】

図 1 および図 3 のフロー図 3 0 0 を引き続き参照すると、工程 3 7 0 において、結像光学系 6 0 は、露光領域 6 4 にわたってワークピース 7 4 上に可変開口絞り 5 0 を通過する放射を結像し、そして露光領域と前もって整列されたワークピース領域 7 8 を露光する。露光領域 6 4 にわたる放射の均一性は、好ましくは $\pm 5\%$ 内であり、それによって、照射されたワークピース領域 7 8 は、均一に加熱される。露光領域 6 4 にわたる放射の任意の不均一性は、ワークピース 7 4 を含む物質の熱拡散長程度か、またはそれより小さいこともまた好ましい。この熱拡散長は、 $T \cdot k / (\rho \cdot C)$ の平方根で定義され、ここで、 T は、検討中の時間長（秒）であり、 k は熱伝導率（ $\text{J/秒} \cdot \text{cm} \cdot$ ）であり、 ρ は、密度（ gm/cm^3 ）であり、そして C は、熱容量（ $\text{J/gm} \cdot$ ）である。例えば、シリコンから構成されるワークピースに関して、代表的な熱拡散長は、10 ナノ秒から 1 マイクロ秒について 1 ~ 10 ミクロンである。

30

【 0 0 3 7 】

ワークピース 7 4 が適切に加工されるのを確実にするために、ワークピース 7 4 に入射し、かつワークピースから反射された放射をモニタリングするのが好ましい。従って、工程 3 8 0 において、結像光学系 6 0 を抜け出す放射の一部分は、ビームスリッター 1 0 8 によって検出器 1 1 4 に転送され、この検出器 1 1 4 は、それに入射した放射量に対応した第一検出器電子シグナルをコンピューター 2 0 に送信する。さらに、ワークピース 7 4 から反射された放射の一部分は、ビームスリッター 1 0 8 によって検出器 1 1 2 に転送され、この検出器 1 1 2 は、それに入射した放射量に対応した第二検出器電子シグナルをコンピューター 2 0 に送信する。第一検出器シグナルは、光源 1 4 から結像光学系 6 0 までの装置 1 0 の放射スループットについての情報を含む。第二検出器シグナルは、ワークピース 7 4 の表面 7 4 S についての情報を含む。例えば、表面 7 4 S が、高い放射度の放射を用いた露光に起因して溶融する場合、この表面の反射率は増加し、従って光源方向へ戻る

40

50

さらなる光が反射され、その一部分は検出器 1 1 2 によって検出される。従って、検出器 1 1 2 において検出された光量の急上昇は、ワークピース 7 4 の表面 7 4 S の状態変化に関し得る。第一および第二検出器電子シグナルをモニタリングすることによって、コンピューター 2 0 は、制御シグナルを、光源を制御するための光源コントローラー 1 6 に、可変減衰器要素 2 4 を制御するための減衰器制御ユニット 2 8 に、および / またはワークピースステージ 7 0 を制御するためのワークピースステージ制御ユニット 8 0 に（例えば、露光領域 6 4 に別のワークピース 7 8 を配置するために）供給し得る。

【 0 0 3 8 】

第一ワークピース領域 7 8 が露光された後、次いで工程 3 9 0 において、別のワークピース領域を露光するか否かが決定される。この決定が「イエス」の場合、工程 4 0 0 において、ワークピースステージ 7 0 は、このステージ 7 0、従ってワークピース 7 4、を移動させるために、ワークピースステージコントローラー 8 0 に送信された電子シグナルを介して、コンピューター 2 0 から指示を受け、それによって、別のワークピース領域 7 8 が、露光領域 6 4 に移動される。従って、工程 3 2 0 から 3 8 0 は、第二ワークピース領域、そして引き続きワークピース領域について繰り返される。

10

【 0 0 3 9 】

工程 3 9 0 における決定が「ノー」の場合、この方法は、別のワークピースが加工されるべきか否かを尋ねる、工程 4 1 0 に進む。この解答が「イエス」の場合、この方法は工程 3 1 0 に戻り、そして工程 3 1 0 から 3 9 0 が繰り返される。解答が「ノー」の場合、この方法は工程 4 2 0 の「終了」において終了される。

20

【 0 0 4 0 】

本発明は、好ましい実施形態と関連して記載されているが、そのように制限されないことが理解される。さらに、本発明は、半導体用途のための L T P 加工に対して特に適用可能であるが、本発明は、他の用途について有用であり、例としては、半導体素子の製造および加工における半導体素子の高速熱的焼戻し、記憶媒体における情報の記録、ならびに媒体表面および他のこのような表面を記録する必須条件が挙げられる。従って、本発明は、添付された特許請求の範囲に定義されるような、本発明の精神および範囲内に含まれ得るような全ての代替、変更および等価を包含することが意図される。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 図 1 は、本発明の L P T 装置の概略図である。

30

【図 2】 図 2 は、1 回反射（「跳ねかえり」）した 2 本の光線、および直線的に移動する 1 本の光線を有する、光トンネルを通して移動する 3 本の光線を示す、光トンネル光学積分器の概略光学図（側面図）である。

【図 3】 図 3 は、図 1 の装置を用いて L T P を実施する方法に関連した方法工程のフロー図である。

フロントページの続き

(72)発明者 ワン, ウェイジアン

アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 5 1 2 0 , サン ノゼ, ピア キャンパグナ 1 6 9 6

(72)発明者 ステイテス, デイビッド ジー.

アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 4 0 2 2 - 1 4 6 6 , ロス アルトス, ロス アルトス
スクエアー 3 8

(72)発明者 フォン, ユ チュエ

アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 4 5 3 9 , フレモント, キャユガ プレイス 2 8 7

審査官 宮澤 尚之

(56)参考文献 特開平 1 1 - 2 8 3 9 3 3 (J P , A)

特開平 0 7 - 1 2 4 7 7 6 (J P , A)

特開平 0 6 - 2 9 5 8 5 9 (J P , A)

特開平 1 0 - 3 2 3 7 8 6 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H01L 21/26-21/268

H01L 21/322-21/326

B23K 26/00-26/42