

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6129837号
(P6129837)

(45) 発行日 平成29年5月17日(2017.5.17)

(24) 登録日 平成29年4月21日(2017.4.21)

(51) Int.Cl. F I
H O 1 L 21/20 (2006.01) H O 1 L 21/20

請求項の数 21 (全 12 頁)

| | | | |
|---------------|-------------------------------|-----------|---|
| (21) 出願番号 | 特願2014-528670 (P2014-528670) | (73) 特許権者 | 390040660 |
| (86) (22) 出願日 | 平成24年8月31日(2012.8.31) | | アプライド マテリアルズ インコーポレ イテッド |
| (65) 公表番号 | 特表2014-528162 (P2014-528162A) | | APPLIED MATERIALS, I NCORPORATED |
| (43) 公表日 | 平成26年10月23日(2014.10.23) | | アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95 054 サンタ クララ パウアーズ ア ベニュー 3050 |
| (86) 国際出願番号 | PCT/US2012/053527 | | |
| (87) 国際公開番号 | W02013/033637 | (74) 代理人 | 100109726 |
| (87) 国際公開日 | 平成25年3月7日(2013.3.7) | | 弁理士 園田 吉隆 |
| 審査請求日 | 平成27年8月26日(2015.8.26) | (74) 代理人 | 100101199 |
| (31) 優先権主張番号 | 61/530,265 | | 弁理士 小林 義教 |
| (32) 優先日 | 平成23年9月1日(2011.9.1) | | |
| (33) 優先権主張国 | 米国 (US) | | |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 結晶化法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板を処理する方法であって、

第 1 のレーザから基板の処理エリアに第 1 の融解レーザパルスを送達することと、

第 2 のレーザから前記基板の処理エリアに第 2 の融解レーザパルスを送達することと、

第 1 の凝固期間後に、第 3 のレーザから前記基板の処理エリアの小結晶部分に第 1 の凝固制御レーザパルスを送達することと、

第 2 の凝固期間後に、第 4 のレーザから前記基板の処理エリアの小結晶部分に第 2 の凝固制御レーザパルスを送達することとを含み、

前記第 1 の凝固期間と第 2 の凝固期間は、前記基板の処理エリアに大結晶部分とともに前記小結晶部分が形成されるように選択されている、方法。

10

【請求項 2】

前記第 1 の凝固期間は、前記処理エリアの温度が核形成点未満に降下する時間よりも短い持続時間を有する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記第 1 の凝固制御レーザパルスは、前記処理エリアの温度を核形成点より高い温度に高めるエネルギー含量を有する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記第 1 の凝固制御レーザパルス及び前記第 2 の凝固制御レーザパルスはそれぞれ前記小結晶部分を融解する全エネルギー含量を有する、請求項 1 に記載の方法。

20

【請求項 5】

前記第 1 の凝固期間中に前記処理エリアの第 1 の再凝固部分が形成され、前記第 1 の再凝固部分の温度は、前記第 1 の凝固制御レーザーパルスが送達されるときに、約 200 より高くない、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記第 2 の凝固期間中に前記処理エリアの第 2 の再凝固部分が形成され、前記第 2 の再凝固部分の温度は、前記第 2 の凝固制御レーザーパルスが送達されるときに、約 200 より高くない、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

基板を熱処理する方法であって、

前記基板の第 1 の処理エリアを識別するステップと、

前記第 1 の処理エリアにパルスエネルギーを送達することによって前記基板の前記第 1 の処理エリアを融解する融解ステップと、

前記第 1 の処理エリアの第 1 の部分を再凝固化して、大結晶部分及び小結晶部分を形成する再凝固化ステップと、

前記第 1 の処理エリアにエネルギーパルスを送達することによって前記小結晶部分を再組織化する再組織化ステップと、

前記第 1 の処理エリアが少なくとも約 8 μm の寸法の大きな結晶を有する結晶固体になるまで前記再凝固化ステップと前記再組織化ステップを繰り返す反復ステップと、

前記第 1 の処理エリアに実質的に隣接する後続の処理エリアを識別する識別ステップと

、
前記基板の全ての所望の処理エリアが処理されるまで、前記融解ステップ、前記再凝固化ステップ、前記再組織化ステップ、前記反復ステップ、及び前記識別ステップを繰り返すステップとを

含む方法。

【請求項 8】

各処理エリアは約 5 μs 以下で処理される、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記基板の周囲温度を約 100 未満に維持することをさらに含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

前記小結晶部分を再組織化する再組織化ステップは、前記小結晶部分を融解することを含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 11】

前記第 1 の融解レーザーパルスは、エネルギーが 0.45 J/cm で、持続時間が 26 ns である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 12】

前記第 2 の融解レーザーパルスは、エネルギーが 0.45 J/cm^2 で、持続時間が 26 ns である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 13】

前記第 1 の凝固期間は、持続時間が 700 ns である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 14】

前記第 1 の凝固制御レーザーパルスは、エネルギーが 0.45 J/cm^2 で、持続時間が 26 ns である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 15】

前記第 2 の凝固期間は、持続時間が 1200 ns である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 16】

前記第 1 の凝固制御レーザーパルスは、エネルギーが 0.26 J/cm^2 で、持続時間が 26 ns である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 17】

さらに、前記基板の周囲温度を100 未満に維持することを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項18】

さらに、基板への前記第1の融解レーザパルスの送達、前記第2の融解レーザパルスの送達、前記第1の凝固制御レーザパルスの送達、前記第2の凝固制御レーザパルスの送達が繰り返される、請求項1に記載の方法。

【請求項19】

基板を処理する方法であって、

第1のレーザから基板に、エネルギーが 0.45 J/cm^2 で、持続時間が 26 nsec の第1のレーザパルスを送達することと、

第2のレーザから前記基板に、エネルギーが 0.45 J/cm^2 で、持続時間が 26 nsec の第2のレーザパルスを送達することと、

700 nsec の第1の凝固期間後に、第3のレーザから前記基板に、エネルギーが 0.45 J/cm^2 で、持続時間が 26 nsec の第3のレーザパルスを送達することと、

1200 nsec の第2の凝固期間後に、第4のレーザから前記基板に、エネルギーが 0.26 J/cm^2 で、持続時間が 26 nsec の第4のレーザパルスを送達することを含む、方法。

【請求項20】

さらに、前記基板の周囲温度を100 未満に維持することを含む、請求項19に記載の方法。

【請求項21】

さらに、基板への前記第1レーザパルスの送達、前記第2のレーザパルスの送達、前記第3のレーザパルスの送達、前記第4のレーザパルスの送達が繰り返される、請求項19に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本明細書に記載の実施形態は半導体デバイスの製造に関する。より詳細には、本明細書に記載の実施形態は、エネルギーデバイス、メモリデバイス、論理デバイス又はフォトニックデバイス用の結晶半導体層を形成することに関する。

【背景技術】

【0002】

論理デバイス、メモリデバイス、エネルギーデバイス及びフォトニックデバイスにおける数多くの応用形態のために、結晶半導体材料が使用されることが増えている。一般的に言うと、微結晶材料及び単結晶材料など大きな粒径の結晶材料は、小さな粒径の材料又はアモルファス材料よりも光学的、熱的及び電気的な抵抗が小さい。アモルファス材料は通常、対応する結晶材料よりも低い温度において融解し、通常、低い導電率を有し、通常、光透過性及び光吸収性が低い。

【0003】

結晶デバイスを作るために、種々の形のエピタキシ、アニーリング及び堆積を含む、数多くの方法が一般的に用いられる。これら全てのプロセスの中で共通するテーマは時間である。プロセスが遅いほど、堆積された原子又はその場所から移動された原子が固体マトリックス内で最も低いエネルギー位置を見つけるのにより多くの時間がある。

【0004】

電子デバイスのサイズが縮小し続けるにつれて、結晶半導体の望ましい電気的特性がさらに魅力的になりつつある。具体的には、ムーアの法則が将来にわたって進行することが、大規模結晶化及び再結晶化から恩恵を受けるフラッシュメモリ及びDRAMなど垂直方向に集積されるモノリシック3Dデバイスの開発を推し進めている。さらに、導電性構成要素の寸法が小さくなるにつれて、それらの構成要素の固有抵抗が製造業者にとって課題になりつつあり、それらの導電性構成要素を構成する金属及び合金の結晶構造が、盛んに

10

20

30

40

50

調査される分野になりつつある。したがって、当該技術分野において、半導体処理において用いられる材料を結晶化する、量産に対応し、費用効率が高い方法が必要とされている。

【発明の概要】

【0005】

本明細書に記載の実施形態は、アモルファス半導体層、又は小さな結晶を有する半導体層を用いる基板を処理して、基板内に大きな結晶を形成する方法を提供する。基板の処理エリアが識別され、処理エリアにパルスエネルギーを送達する段階的融解プロセスを用いて融解される。その後、処理エリアは、そのエリアにパルスエネルギーを送達する段階的結晶化プロセスを用いて再結晶化される。段階的結晶化プロセス中に送達されるパルスエネルギーは、融解された材料が凝固するにつれて、小さな結晶を大きな結晶に変換するように選択される。

10

【0006】

本発明の先に記載された特徴を細部にわたって理解することができるように、複数の実施形態を参照することによって、先に手短かに要約された本発明のさらに詳細な説明を行うことができ、それらの実施形態のうちの幾つかが添付の図面において例示される。しかしながら、本発明は他の同様に実効的な実施形態を受け入れることができるので、添付の図面が本発明の典型的な実施形態のみを示すこと、それゆえ、本発明の範囲を限定するものと見なされるべきでないことに留意されたい。

20

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図1】少なくとも1つの実施形態による方法を要約する流れ図である。

【図2】少なくとも1つの実施形態による装置の概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

理解するのを容易にするために、複数の図面に共通する同一の要素を示すために、可能であれば同一の参照番号が使用されている。1つの実施形態において開示される要素は、具体的に記載されなくても、他の実施形態においても有益に利用される場合もあると考えられる。

【0009】

図1は、少なくとも1つの実施形態による方法100を要約する流れ図である。図1の方法を用いて、半導体材料の結晶化度又は結晶粒径を高めることができる。本明細書に記載の方法が用いられる場合がある半導体材料は、ケイ素及びゲルマニウムなど元素半導体と、種々の配合のシリコン-ゲルマニウム(Si_xGe_y)など元素半導体の組み合わせと、III-V族半導体及びII-VI族半導体など化合物半導体とを含む。本明細書に記載の方法から恩恵を受ける場合がある化合物半導体の例は、限定はしないが、CIGS材料、ガリウムヒ素、インジウムガリウムヒ素、インジウムリン、インジウムアンチモン、インジウムアルミニウムガリウムヒ素、ガリウムリン、テルル化亜鉛、窒化ガリウム/アルミニウム/インジウム、炭化ケイ素、及び他の類似の組み合わせを含む。

30

【0010】

先に言及されたいずれかの材料からなる基板が、パルスレーザーエネルギー、又はフラッシュランプ若しくは電子ビームエネルギーなど他のタイプのパルスエネルギーを基板に送達するように動作可能なエネルギーデバイス内に配置される。102において、基板をパルスレーザーエネルギーに暴露して、基板の第1の処理エリアを融解する。ある場合には、レーザーエネルギーの単一のパルスで十分である場合があるが、場合によっては、2つ以上のパルスが送達される場合もある。単一のパルスを用いて処理エリアを融解する場合、基板の周囲温度を高めて、処理エリアの急速加熱から生じる熱応力を低減することができる。高い周囲温度は通常、約400 未満、例えば、約100 ~ 約400 など約500 未満である。幾つかの実施形態では、周囲温度は室温以下とすることができる。

40

【0011】

50

処理エリアを融解するために、フルエンス及び持続時間などパルスレーザエネルギーの特性が選択される。通常、処理エリアを融解するために送達されるエネルギー含量は基板表面を融除することになるエネルギー量よりわずかに低い。一実施形態では、それぞれのパルスが約 0.45 J/cm^2 のフルエンス及び約 26 nsec の持続時間を有し、約 31 nsec の持続時間だけ離間した、周波数逡倍 Nd:YAG レーザからの 532 nm レーザ光の2つのパルスを用いて、シリコン基板の一部を融解することができる。場合によっては、パルス列を用いて、処理エリアを融解することができる。

【0012】

104において、処理エリアの少なくとも一部を再凝固化して、大結晶部分及び小結晶部分を形成する。再凝固化は、融解相と結晶シードとを接触させることによって開始することができる。結晶シード付近の温度が液体材料の凝固点付近まで降下するとき、凝固先端が、3次元において関連付けられる表面など処理エリアを通して伝搬し始める。凝固先端が伝搬する速度は通常、約 $10 \text{ m/秒} \sim 30 \text{ m/秒}$ であり、融解相から基板のバルクの中に熱を除去する速度によって制限され、それゆえ、基板をより低い周囲温度に維持することによって速められる。

【0013】

基板が最も有益に維持される周囲温度は、処理される材料によって決まる。本明細書に記載の温度の大部分はシリコン、ドーパされたシリコン、及び大部分がシリコンである合金に関連するが、他の材料には他の温度が関連することは理解されたい。例えば、銅及びゲルマニウムは類似の融解点を有し、その融解点はシリコンより低く、ガリウムを含む化合物半導体は、シリコンより著しく低い融解点を有する場合がある。一方、炭化ケイ素は、シリコンよりも高い融解点を有する。さらに、異なる材料は異なる熱伝導率及び熱容量又は比熱容量を有し、冷却速度に影響を及ぼす。例えば、ガリウムヒ素は、相対的に悪い熱伝導体であるので、ガリウムヒ素を結晶化するのに、その融解点に対して低い雰囲気がある場合がある。したがって、実施形態によっては、室温基板雰囲気、又は室温未満の雰囲気が望ましい場合があるが、他の実施形態では、高い雰囲気が有用な場合がある。

【0014】

凝固プロセスは通常、結晶形成のプロセスよりも速く進行し、その相違は融解相と固相との間の大きな温度差によって大きくなる。凝固先端が進行するにつれて、大結晶エリアがシード材料から第1の距離まで発達し、小結晶エリアが、シード材料から、第1の距離とは異なる第2の距離まで発達する。大部分の従来技術のプロセスでは、融解相と固相との間の温度差は、基板を高い周囲温度に維持し、融解相からの熱の除去速度を下げることによって管理される。本発明人は、凝固先端及び小結晶エリアに適切なエネルギー量を送達するために選択された持続時間及びエネルギー含量を有するエネルギーのパルスを送達することによって、小結晶エリアを優先的に加熱することにより小結晶エリアと融解相との間の温度差を小さくすることができ、結晶化及び凝固の速度がより厳密に一致しうることを見出した。凝固先端に適切な特性を有するエネルギーパルスを送達することによって、実質的に任意の周囲基板温度において大結晶の再結晶化を迅速に実行することができる。

【0015】

106において、レーザパルスが処理エリアに送達される。レーザパルスは、凝固制御パルスとすることができ、小結晶エリアを融解することができるか、又はレーザパルスは小結晶エリアの温度を融解相の温度に近い温度まで、例えば、融解相温度の約 10°C 以内まで優先的に上げることができる。レーザパルスは104の再凝固化中に発達した小結晶エリアの質量に基づいて選択されたエネルギー含量及び持続時間を有する。持続時間は、基板への電力送達が最も効率的になるように選択される。効率的なゾーンより高い電力を送達する結果として、基板からかなりの電力が反射し、及び/又は基板を損傷するようになる。

【0016】

レーザーパルスによって送達されるエネルギー含量は、小結晶エリアの温度を融解温度に近い温度まで上げるように選択される。その温度は融解温度よりわずかに高いか、又はわずかに低い場合があるので、小結晶エリア、又はその一部が融解するか、もう少しで融解するようになる。レーザーパルスのエネルギー含量は、小結晶エリアの残りの部分を大結晶に変換するエネルギーを与えながら、小結晶エリアの所望の割合を融解するように選択することができる。周囲基板温度に応じて、小結晶エリアは、液体エリアに隣接する融解温度に近い温度から、液体エリアから離れたより低い温度までの温度勾配を有することになる。いくつかの実施形態では、小結晶エリアの温度は、レーザーパルスの送達前に液体エリアから離れた点において約 200 未満とすることができる。各パルスによって送達するエネルギー含量の決定は一般的に、基板の吸収特性と、それらの特性が温度及び相とともにいかに変化するかを考慮に入れる。

10

【0017】

108において、融解エリアが再び再凝固化され、同じく凝固制御パルスとすることができる第2のレーザーパルスが、第2の再凝固化中に発達した小結晶エリアに送達される。この段階的結晶化プロセスは、所望のエリアが再結晶化され、大粒結晶になるまで、何度も繰り返すことができる。第2の凝固制御パルスのエネルギー含量は、第1の凝固制御パルスのエネルギー含量とは異なる場合があり、後続の凝固制御パルスは、各サイクルで処理されることになる小結晶の質量に応じて、第1又は第2の凝固制御パルスとは異なるエネルギー含量を有する場合がある。

【0018】

20

110において、第1の処理エリアとは異なる後続の処理エリアが識別され、対象に設定され、融解及び被制御再凝固化のプロセスが繰り返される。基板全体が処理され、結晶固体材料になるまで、処理エリアを次々識別し、処理することができる。所望により、各処理エリアを先行する処理エリアと重ね合わせて、以前の処理エリアを結晶シード源として用いることができる。他の実施形態では、各処理エリアを先行する処理エリアから離間して、熱応力を管理することができる。

【0019】

いくつかの実施形態では、エネルギーのパルスを基板に送達して、凝固先端の界面エネルギーを核形成点又はエピタキシ点より高く維持することができる。結晶学的凝固プロセスとすることができる、そのような凝固プロセスでは、一連の低エネルギーパルスが送達され、それにより、界面付近の境界層内の冷却速度を約 500 K / μ sec 以下に制限する。冷却速度がこのレベルよりはるかに高いと、結果として、小結晶成長の核となる凝固先端界面に沿って低エネルギーの場所が発達する。凝固先端に加えられる各エネルギーのパルスは、冷却速度を下げ、界面エネルギーを維持し、大結晶の成長を維持する。

30

【0020】

一実施形態では、1 cm² ダイが約 700 μ sec で自然に凝固することになる。上記のパルスレーザー融解及び再結晶プロセスを用いるとき、そのような 1 cm² ダイを凝固させて大きな結晶にするのを、実質的に任意の基板周囲温度において約 5 μ sec 以下の持続時間まで加速することができる。したがって、各ダイを処理するために基板を位置決めするのに余分な時間が必要とされる可能性はあるが、公称 700 cm² の円形基板（例えば、300 mm ウエハ）の表面にわたって形成されるアモルファス半導体層を 3.5 msec の処理時間で約 8 μ m 以上の寸法の大きな結晶に変換することができる。基板を周囲温度において処理することができるので、基板を処理する前の加熱及び平衡時間、又はその後のかなりの冷却時間は不要である。

40

【0021】

本明細書に記載の方法は、任意のサイズ及び形状の基板に適用することができる。直径 200 mm、300 mm、450 mm、12 インチの円形ウエハを本明細書に記載のように処理することができる。任意のサイズの長方形パネル、例えば、Gen 8.5（すなわち、2200 mm x 2600 mm）までのソーラーパネル又はディスプレイパネルなど、非円形基板も、本明細書において与えられる方法に従って処理することができる。先に言

50

及されたように、本明細書に記載の方法によれば、モノリシック3D基板も処理することができる。モノリシック3D基板を処理する際に、一度の処理において基板の複数の層を結晶化することができる。

【0022】

一実施形態では、少なくとも1つの結晶シリコンアイランドが形成された基板を気相又は液相堆積プロセスにかけて、その上にアモルファスシリコン層を形成する。アモルファスシリコン層は約7 μm の均一な厚みに堆積される。こうして形成されたアモルファス層を有する基板は、レーザ処理デバイスの作業面に位置決めされる。基板は、室温に近い周囲温度、例えば、約20℃に維持される。基板上のダイパターンがレーザビームの断面形状と位置合わせされるように回転させることによって、基板が必要に応じて位置合わせされる。位置合わせ後に基板を室温付近に維持することは、熱膨張効果に起因する位置合わせドリフトの可能性を小さくする。あるいは、基板を加熱し、プロセスのエネルギーシグナチャ全体を減少させてもよい。大部分の実施形態では、基板雰囲気は、約200℃未満に維持されることになる。

【0023】

アモルファス層の第1のダイが処理のために識別され、例えば、x y 位置決め制御に従って作業面を移動させることによって、第1の処理ダイがレーザ源と位置合わせされるように基板が位置決めされる。第1の処理ダイは、結晶シリコンシード上に形成されたアモルファス層のエリアである。0.45 J/cm²のフルエンス及び26 nsecの持続時間を有する第1のレーザパルスが第1の処理ダイに送達される。31 nsecの休止持続時間後に、同じフルエンス及び持続時間を有する第2のレーザパルスが第1の処理ダイに送達される。2つのレーザパルスは、結晶シードを融解することなく、アモルファスシリコン材料を実質的に融解する。

【0024】

融解したシリコンは、700 nsecの第1の凝固持続時間にわたって凝固することができる。その後、同じフルエンス及び持続時間を有する第3のレーザパルスが第1の処理ダイに送達される。第3のレーザパルスは、融解したシリコン内に成長する任意の小さな結晶を熱的に処理し、それらの結晶を大きな結晶に変換させる。その後、融解したシリコンは、1200 nsecの第2の凝固持続時間にわたって凝固することができる。0.26 J/cm²の低減されたフルエンス及び先行するパルスと同じ持続時間を有する第4のレーザパルスが第1の処理ダイに送達される。第4のレーザパルスは、第1の処理ダイの大結晶シリコンへの変換を完了する。

【0025】

その後、隣接するダイを処理の対象に設定するために基板が移動され、そのプロセスが繰り返される。隣接するダイが結晶シードを含まない場合には、先行して処理されたダイとの接触が、結晶化のシードとしての役割を果たす。このようにして、アモルファス層全体を大結晶シリコンに変換することができる。

【0026】

方法100について、大粒結晶及び小粒結晶が形成され、レーザパルスを送達して小粒結晶を大粒結晶に変換する104及び108において凝固期間を用いて述べる。他の実施形態では、凝固期間後にレーザパルスを送達することができ、凝固期間は小結晶が生成される前に終了する。上記のように、凝固及び結晶化速度は、基板の周囲温度によって異なる。例えば、凝固先端の界面エネルギーが核形成点まで降下し、小結晶の発達を開始する前に、凝固制御パルスを送達することができる。そのような短い凝固期間後に複数の凝固制御パルスを送達することによって、小結晶を生成することなく、再結晶化できるようになる場合がある。そのような段階的結晶化法は、50 μm 以上の粒径を有する結晶材料をもたらすことができる。一連のそのようなパルスの各パルスによって送達されるエネルギー含量は、凝固速度を実質的に遅くすることなく、凝固先端を、次の凝固期間にわたって核形成点よりも高いエネルギーに維持するために必要とされるエネルギーによって決まる。したがって、各エネルギーパルスはその界面にエネルギーを加え、その界面のエネルギ

10

20

30

40

50

ーを核形成点より望ましい量だけ高くする。7 μm 厚のアモルファス層を再結晶化するために、約26 nsecのパルス持続時間にわたって約0.2 J/cm²未満のフルエンスを有するレーザパルスを約100 nsecごとに送達することによって、大結晶凝固先端の成長を約10 m/秒の自然凝固速度に近い速度に維持することが予想される。

【0027】

一態様では、上記のパルスレーザエネルギープロセスは、原子が高い方のエネルギー位置から低い方のエネルギー位置に移動するときに放出されるエネルギーを利用して、そのプロセスを維持すると考えられる。レーザエネルギーのパルスは小結晶又はアモルファス領域内の原子に運動量を与え(momentize)、それにより原子の運動を開始し、その運動は、原子がレーザパルスによって与えられる運動エネルギーに打ち勝つだけの十分に大きなエネルギー井戸を見つけるまで継続すると考えられる。そのエネルギー井戸に達する各原子によって放出されるエネルギーは、固体材料内で熱エネルギーになる。この熱エネルギーは、まだ運動量を与えられていないマトリックス内の他の原子まで伝搬する。場合によっては、放出された熱エネルギーによって、さらなる原子が運動量を与えられるようになり、固体の小結晶及びアモルファスエリアを再組織化するプロセスを継続する。こうして、標準的な条件下で小結晶又はアモルファスエリアを融解するのに通常では十分でないレーザパルスによってエネルギーが送達される場合があるが、再組織化プロセスからの熱エネルギーが存在するので、外部から加えられるさらなるエネルギーが再組織化プロセスを推し進めるのを助ける。

【0028】

再組織化において原子に運動量を与えるそのようなモデルは融解と同様である。なぜなら、低い運動エネルギーの状態の原子、すなわち、「固体」原子が、より高い運動エネルギーの状態、すなわち、「液体」原子に引き上げられ、それにより、原子が「融解する」ためである。その後、原子がその運動エネルギーに打ち勝つだけの十分に大きなエネルギー井戸を見つけるときに、それらの原子は「凝固する」。多数の原子に運動量を与えることは、材料内で検出可能な液相を生成又は維持することができ、一方、少数の原子に運動量を与えることは、原子がより低いエネルギー位置への途中にある小さな領域によって特徴付けられる非常に局所的な再組織化相のみを生成する場合がある。「融解する」及び「凝固する」の文脈において、その運動エネルギーに打ち勝つ低いエネルギー井戸を見つける原子によって放出される熱エネルギーは、潜熱の一種と考えることができる。

【0029】

大規模では、材料内の再組織化相を維持することにより、大結晶が急速に成長する爆発的結晶化又は爆発的成長のプロセスを推し進めることができると考えられる。エネルギーパルスを用いてエネルギーの増分を加えることができ、これは、その増分が進行中の再組織化によって放出される熱エネルギーに加えられるとき、新たな原子に運動量を与え、より低いエネルギー位置に移動させるのに十分なものである。そのようなプロセスが、再成長先端又は凝固先端におけるエネルギーを、エピタキシ点より高いが、その付近にある窓内に維持することによって維持される場合には、相対的に速い速度、例えば、シリコン内で約10 m/秒でアモルファス材料又は小結晶から大結晶を成長させることができる。

【0030】

凝固制御パルスを用いてエネルギー入力速度を制御して、標準的な条件下で小結晶又はアモルファス材料を融解することになるエネルギーを送達することができる。ただし、標準的な条件は、再組織化の熱エネルギーが利用可能でない条件を意味する。他の実施形態では、エネルギー入力を制御して、標準的な条件下では小結晶又はアモルファス材料を融解しないが、再組織化の熱エネルギーに、爆発的成長のプロセスを維持するだけの十分なエネルギーを加えることになるエネルギーを送達することができる。

【0031】

幾つかの実施形態では、融解相を維持し、小結晶の形成を回避するエネルギーパルスを送達することができる。そのような実施形態の場合、凝固すると放出される熱エネルギー、すなわち、潜熱が融解相及び固相の中に伝搬するという類似の熱的現象が生じると考え

られる。その熱エネルギーは、外部から加えられるエネルギーとともに、融解相の液体状態を維持するのを助長する。

【0032】

再成長プロセスを効率的に支援するエネルギー入力速度は、一般的に、結晶化先端における局所的なエネルギーバランスによって決まる。先端の両側にある材料のエネルギーは、主に基板バルクの中への伝導によって除去されつつあり、その速度は基板材料の熱伝導率によって制御される。一例では、基板バルクは、酸化ケイ素上にあるシリコンとすることができる。シリコンは熱エネルギーを相対的に良好に伝導し、一方、酸化ケイ素は相対的に断熱性である。酸化ケイ素は、熱エネルギーがシリコンから離れる速度を下げ、酸化物が厚くなるほど、薄い酸化物よりもエネルギー損を抑制する。したがって、効率的、すなわち、爆発的再成長プロセスを維持するために入力される外部エネルギーは、相対的に厚い、例えば、約 $2.5 \mu\text{m}$ 厚よりも厚い酸化物層上のシリコンの場合、相対的に薄い、例えば、約 $1.0 \mu\text{m}$ 未満の酸化物層の場合よりも小さい。なぜなら、厚い酸化物層ほど、シリコンからのエネルギーの漏出を遅らせるためである。

10

【0033】

基板の周囲加熱は、また再成長プロセスを実効的に助長するエネルギー入力速度に影響を及ぼす。周囲エネルギーが基板に加えられると、再成長先端におけるエネルギー損が遅くなるので、再成長プロセスを低速のレーザエネルギー入力で維持することができる。融解相が凝固して小結晶になる速度は、周囲加熱の存在によって下げられ、それにより再成長プロセスが長い時間をかけて伝搬できるようになる。

20

【0034】

パルスフルエンス、パルス持続時間及びパルスタイミングは全て処理エリアへのエネルギー入力速度に影響を及ぼす。酸化物が厚くなり、例えば、 $2 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ であり、周囲加熱がほとんどない場合、上記の条件は再成長プロセスを助長し、そのプロセスは $8 \mu\text{m}$ 以上の寸法の結晶をもたらすことができる。上記の凝固制御パルスのタイミングは、そのプロセスに著しい影響を及ぼすことなく、約 100 nsec の窓内で変動することができる。パルス間の休止持続時間を長くしても、プロセスの全持続時間が長くなること以外に、そのプロセスへの物理的影響はほとんどない。なぜなら、そのプロセスによって生成される種々の融解相は凝固して小結晶になり、小結晶が各パルスによって再びエネルギーを加えられ、再成長の増大が助長されるためである。パルス間の休止持続時間を約 50 nsec 以上短くすると、全体的な平衡状態を超えて熱入力速度が速くなり、結果として材料内に熱エネルギーが蓄積し、結晶化を遅らせる。パルス速度を十分に速くすることによって、結晶化を停止又は逆転することができる。

30

【0035】

酸化物が薄いほど、例えば、 $500 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ であり、かつ周囲加熱がほとんどない場合、熱損失が速くなるので、再成長プロセスに対するエネルギー入力速度も速くなる。そのような実施形態の場合に、 300 nsec ごとに凝固制御パルスを送達して、著しく熱エネルギーを蓄積することなく、再成長プロセスを推し進めることができる。フルエンスも表面融除点近くまで、例えば、約 0.6 J/cm^2 まで高めることができる。

【0036】

40

図2は、本明細書に記載の方法を実践するために用いることができる装置200の概略図である。装置200は、エネルギー源202と、集光器204と、整形器206と、作業面208とを有する。エネルギー源202は、図2に示されるエネルギージェネレータ202A~Dによって例示されるように、複数のエネルギージェネレータを有することができる。代替的には、エネルギー源202は、単一のエネルギージェネレータを有することができるか、又は図2に示される4つのエネルギージェネレータ202A~Dよりも多い、又は少ないエネルギージェネレータを有することができる。いくつかの実施形態において異なる電力、持続時間及びタイミングを有するエネルギーパルスを送達できるように、複数のエネルギージェネレータが有益である場合がある。エネルギー含量、持続時間及びタイミングに関して調整可能である単一のエネルギージェネレータでも十分な場合があ

50

る。一実施形態では、各エネルギージェネレータ202A～Dは、約100MW～約500MWの電力を有する、Nd:YAGレーザなど固体レーザである。

【0037】

エネルギー源202によって放出されるエネルギーは、一般的に、持続時間、エネルギー含量及びタイミングに関して制御可能である。コントローラ212は、エネルギー源202のエネルギージェネレータ202A～Dのそれぞれと通信する。図2の実施形態において、各エネルギージェネレータ202A～Dはqスイッチレーザでポンピングされ、コントローラは、パルス送達を制御するために各レーザのqスイッチと電氣的に通信する電子タイマを有する。コントローラ212を各エネルギージェネレータ202A～Dのポンピングデバイスに結合することによってフルエンスを制御することができる。コントローラ212は、4つのエネルギージェネレータ202A～Dからエネルギーパルス214A～Dを生成するようにプログラムすることができ、各パルスは異なるフルエンス及び持続時間を有し、各パルスは互いとの関連で特定の時点で放出される。

10

【0038】

パルス214A～Dは集光器204の中に進み、集光器は、作業面上に位置決めされた基板に中継するために、パルス214A～Dを単一の出力光軸216に位置合わせする。集光器204はエネルギー源202からエネルギーパルス214A～Dを受光するために複数の入力光軸を有する。集光器204は一般的に、入射エネルギーパルス214A～Dを光軸216に導く、レンズ、ミラー、プリズム及びフィルタ等の種々の光学デバイスを有する。

20

【0039】

光軸216に位置合わせされたエネルギーは整形器206に入る。整形器は、エネルギージェネレータ202A～Dからの固有のエネルギーパルスを所望の空間電力分布及び時間的形狀を有する整形されたパルスに変換する、レンズ、ミラー、プリズム及びフィルタ等の光学デバイスを有する。整形器206は、2つ以上の別々のパルスを合成して、複合的な形狀を有する1つの合成パルスを形成することができる。したがって、整形器206は、処理エリアを均一に処理するために、基板の処理エリアに一致する形狀を有し、かつ均一な電力分布を有するエネルギー場を生み出す。

【0040】

整形されたエネルギー218は、作業面208上に位置決めされた基板を処理する。作業面208は通常、矢印210によって示されるように移動可能であり、それにより、整形器206から現れるエネルギーの向かい側に基板の種々の処理エリアを位置決めできるようにする。

30

【0041】

装置200は、作業面208上で処理される基板からの音響信号を受信するために作業面208に近接して位置決めされるオプションの音響センサ220を含むことができる。再結晶化は、材料の比体積を非常に急速に変更し、形成される固体のタイプに応じて特徴的な音響信号を生成することができる。この音響信号を検出し、コントローラ212に送信して、大結晶固体の形成を確認することができる。反射率計、高温計及び放射計など他のセンサを単独で、又は他のセンサとともに用いて、基板の相変化を観測し、かつ基板内の相変化の伝搬を観測することができる。

40

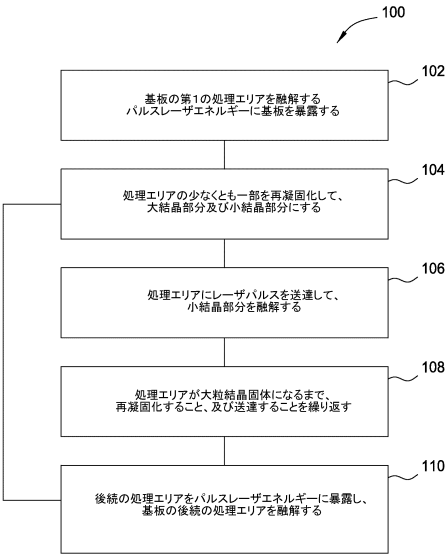
【0042】

本明細書に記載の方法を実行するために用いることができる装置200の実施形態は、本願譲受人に譲渡された米国特許出願公開第2009/0032511号に記載されている。

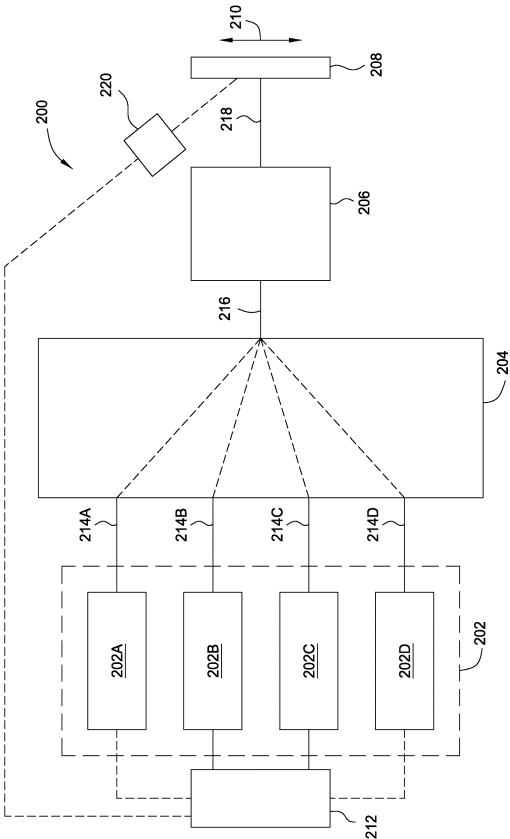
【0043】

これまでの説明は本発明の実施形態を対象にしているが、本発明の基本的な範囲から逸脱することなく、本発明の他のさらなる実施形態を考案することができる。

【図 1】



【図 2】



フロントページの続き

- (72)発明者 アダムス, ブルース イー.
アメリカ合衆国 オレゴン 33315, ポートランド, サウスウェスト 13番 アヴェニ
ュー 3411
- (72)発明者 ハンター, アーロン ミュアー
アメリカ合衆国 カリフォルニア 95060, サンタ クルーズ, エメライン アヴェニ
ュー 430
- (72)発明者 モファット, スティーヴン
イギリス国 チャンネル諸島 ジェーイー3 8キューエー, セント ブリレード ジャー
ジー, リュ ドゥ ラ コルビエール, ヴィル カヌー, ザ バーン

審査官 右田 勝則

- (56)参考文献 特開2006-086447(JP,A)
特開平09-063974(JP,A)
特開2001-319891(JP,A)
特表2002-524874(JP,A)
特開2003-037079(JP,A)
国際公開第2004/040628(WO,A1)
特開2001-110723(JP,A)
特開平06-132219(JP,A)
特開2001-126987(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L 21/20