明　細　書

発明の名称 ： 結晶半導体膜の製造方法および製造装置

技術分野

[0001] この発明は、半導体膜上に、断面長方形形状のパルスレーザを複数回照射（オーバラップ照射）しつつ移動させて非晶質膜の結晶化や結晶膜の改質を行う結晶半導体膜の製造方法および製造装置に関するものである。

背景技術

[0002] 一般的にＴＶやＰＣディスプレイで用いられている薄膜トランジスタは、アモルファス（非結晶）シリコン（以降ａ－シリコンという）により構成されているが、何らかの手段でシリコンを結晶化（以降ｐ－シリコンという）して利用することでＴＦＴとしての性能を格段に向上させることができる。現在は、低温度でのＳｉ結晶化プロセスとしてエキシマレーザアニール技術がすでに実用化されており、スマートフォン等の小型ディスプレイ向け用途で頻繁に利用されており、さらに大画面ディスプレイなどへの実用化がなされている。

[0003] このレーザアニール法では、高いパルスエネルギーを持つエキシマレーザを非結晶半導体膜に照射することで、光エネルギーを吸収した半導体が溶融または半溶融状態になり、その後冷却され凝固する際に結晶化する仕組みである。この際には、広い領域を処理するために、ラインビーム形状に整形したパルスレーザを相対的に短軸方向に走査しながら照射する。通常は、非結晶半導体膜を設置した設置台を移動させることでパルスレーザの走査が行われる。

上記パルスレーザの走査においては、非結晶半導体膜の同一位置にパルスレーザが複数回照射（オーバーラップ照射）させるように、所定のピッチでパルスレーザを走査方向に移動させている。それにより、サイズの大きい半導体膜のレーザアニール処理を可能にしている。

[0004] そして、従来のラインビームを用いたレーザアニール処理では、レーザパ

ルスの走査方向のビーム幅を例えば０．３５～０．４ｍｍ程度に固定し、パルス毎の基板送り量をビーム幅の３％～８％程度に設定しており、複数の薄膜トランジスタの性能の均一性を確保するには、レーザの照射回数をできるだけ増やすことが必要であると考えられている。

例えば、ＬＣＤ（Liquid Crystal Display）用の半導体膜では、オーバーラップ率を９２～９５％（照射回数１２～２０回、ビーム幅が０．４ｍｍの場合には走査ピッチ３２～２０μｍ）、ＯＬＥＤ（Organic light-Emitting Diode）用の半導体膜では、オーバーラップ率９３．８～９７％（照射回数１６～３３回、ビーム幅が０．４ｍｍの場合は走査ピッチ２５～１２μｍ）に設定している。

[0005] このようなレーザアニール処理では、通常は、ビーム断面の強度分布を平坦形状にして短軸方向、長軸方向の処理の均一性を図っている。これに対し、特許文献１では、レーザのエネルギーのバラツキに従って、結晶化不良領域が生成されるとして、十分な結晶化処理後に、より低いエネルギーでレーザを照射することで、十分な結晶あるいは活性化が成された部分を維持しながらエネルギー強度のバラツキによって膜質が悪化した部分の再結晶化あるいは再活性化を行う方法が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開平１０－１２５４８号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 特許文献１で課題とされているレーザエネルギーのバラツキは、レーザ光源の出力のバラツキに起因するものである。このレーザ光源の出力のバラツキは、発振回路の改良やレーザ光源そのものの改良などにより相当な改善がなされてきており、出力のバラツキに起因する結晶化の不良という課題は次第に小さいものになっている。しかも多数回のオーバーラップによれば、同

一の照射面にはパルスレーザが重畳して何回も照射されるため、出力のバラツキによって生じた結晶化不良領域が再溶融して結晶化され、不良領域の解消が図られる。

[0008] しかし、本発明者らの注意深い観察によれば、現状でもパルスレーザの照射によって結晶化された半導体には照射ムラが認められ、これが原因になってデバイスとした際に性能に影響が生じていることが分かっている。

本願発明者らの研究によれば、上記照射ムラは、ラインビームの走査方向（通常は短軸方向）のエッジ部（走査方向後端側）にポリシリコン膜の盛り上がりが形成されることが原因と考えられる。この部分はレーザ照射による半導体膜の溶融部とレーザが照射されておらず固体のままである部分の境目に相当する。この盛り上がりは、照射エネルギーの強度に比例して大きくなると考えられる。すなわち、照射エネルギーが大きくなるに従い半導体膜の膜厚方向に溶融が進み、また膜全体が溶融した後も液体となった半導体膜層の温度が増大する。この液相部分が温度低下に伴い結晶化する際に、より先行して温度が低下し始める固液界面すなわちラインビーム短軸エッジ部に液体が吸い寄せられつつ固化するため、盛り上がりが生じると考えられる。また、レーザのエネルギー変動、ラインビーム短軸形状の変化、ビームに対して相対移動する半導体膜の位置の乱れなどが、前記「盛り上がり部」の高さや間隔の乱れとなって照射ムラと認知される。

したがって、照射エネルギー密度を低くしてパルスレーザを照射すれば上記照射ムラを低減できることになるが、そのためには同一の照射面上により多くの照射回数でレーザを照射する必要があり、生産効率が悪くなる。また、照射パルスエネルギー密度が低くなりすぎると、結晶粒径が十分に大きくならないという問題が生じる。

[0009] 本発明は、上記事情を背景としてなされたものであり、生産性の低下を極力抑えた上でパルスレーザの走査方向エッジ部による半導体膜上の照射ムラを解消することができる結晶半導体膜の製造方法および製造装置を提供することを目的の１つとする。

課題を解決するための手段

[0010] すなわち、本発明の結晶半導体膜の製造方法のうち、第１の本発明は、非単結晶半導体膜上に、パルスレーザを短軸方向に相対的に走査しつつオーバーラップ照射して結晶化を行う結晶半導体膜の製造方法において、

前記パルスレーザの照射によって前記非単結晶半導体膜に微結晶化が生じる照射パルスエネルギー密度よりも低く、かつ複数回数Ｎ回の照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度をＥ０として、

前記照射パルスエネルギー密度Ｅ０と同じ照射パルスエネルギー密度Ｅ１で前記パルスレーザが照射される第１ステップと、

前記照射パルスエネルギー密度Ｅ１よりも低く、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上となる照射パルスエネルギーＥ２で前記パルスレーザが照射される第２ステップとを有し、

同一照射面に対する前記第１ステップと前記第２ステップにおける合計照射回数がＮ回以上であることを特徴とする。

[0011] 第２の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１の本発明において、前記結晶化に適した照射パルスエネルギーが、複数回数Ｎ回の照射によって結晶粒径成長が飽和する照射パルスエネルギー密度Ｅとして、Ｅ×０．９８～Ｅ×１．０３の範囲内であることを特徴とする。

[0012] 第３の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１または第２の本発明において、前記照射パルスエネルギー密度Ｅ２がＥ１×０．９５以上であることを特徴とする。

[0013] 第４の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１～第３の本発明のいずれかにおいて、前記合計照射回数がＮ×１．５以下であることを特徴とする。

[0014] 第５の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１～第４の本発明のいずれかにおいて、前記第１のステップによって前記パルスレーザを走査しつつ同一照射面に対するＮ１回の複数回照射を順次行い、その後、前記所定面に対し、前記第２のステップによって前記パルスレーザを走査しつつ同一照

射面に対するＮ２回の複数回照射を順次行い、前記Ｎ１＋Ｎ２を前記合計照射回数としてＮ回以上とすることを特徴とする。

[0015] 第６の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第５の本発明において、前記Ｎ１を前記Ｎ２以上の回数にすることを特徴とする。

[0016] 第７の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１～第６の本発明のいずれかにおいて、前記パルスレーザが、走査方向のビーム断面強度分布において、走査方向後端にかけた走査方向後方側が、走査方向前方側の強度よりも低い強度を有しており、前記走査方向前方側で前記強度に従って前記第１ステップの照射がなされ、前記走査方向後方側で前記強度に従って前記第２ステップの照射がなされることを特徴とする。

[0017] 第８の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第７の本発明において、前記走査方向前方側の走査方向幅が、前記走査方向後方側の走査方向幅以上であることを特徴とする。

[0018] 第９の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１～第８の本発明のいずれかにおいて、前記パルスレーザの波長が４００ｎｍ以下であることを特徴とする。

[0019] 第１０の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１～第９の本発明のいずれかにおいて、前記パルスレーザの半値幅が２００ｎｓ以下であることを特徴とする。

[0020] 第１１の本発明の結晶半導体膜の製造方法は、前記第１～第１０の本発明のいずれかにおいて、前記非単結晶半導体がシリコンであることを特徴とする。

[0021] 第１２の本発明の結晶半導体膜の製造装置は、パルスレーザを出力する１または２以上のレーザ光源と、

前記パルスレーザを整形して非単結晶半導体に導く光学系と、

前記パルスレーザの照射エネルギー密度を調整するエネルギー調整部と、

前記パルスレーザを前記非単結晶半導体に対し相対的に走査する走査装置と、

前記レーザ光源、前記エネルギー調整部および前記走査装置を制御する制御部と、を備え、

前記制御部は、前記エネルギー調整部を制御してパルスレーザの照射によって前記非単結晶半導体膜に微結晶化が生じる照射パルスエネルギー密度よりも低く、かつ複数回数Ｎ回の照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度Ｅ０と同じ照射パルスエネルギー密度Ｅ１に調整し、該照射パルスエネルギー密度Ｅ１で前記走査装置を制御して前記パルスレーザを走査しつつ前記非単結晶半導体に対しＮ１回（但しＮ１＜Ｎ）の複数回照射を順次行う第１ステップと、第１ステップで前記パルスレーザが照射された半導体に、前記エネルギー調整部を制御して前記照射パルスエネルギー密度Ｅ１よりも低く、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上の照射パルスエネルギーＥ２に調整し、該照射パルスエネルギー密度Ｅ２で前記走査装置を制御して前記パルスレーザを走査しつつ前記非単結晶半導体に対しＮ２回（但し、Ｎ２＜Ｎ、Ｎ１＋Ｎ２≧Ｎ）の複数回照射を順次行う第２ステップとを実行することを特徴とする。

[0022] 第１３の本発明の結晶半導体膜の製造装置は、パルスレーザを出力する１または２以上のレーザ光源と、

前記パルスレーザを整形して非単結晶半導体に導く光学系と、

前記パルスレーザの走査方向のビーム断面強度分布において、走査方向後端にかけた走査方向後方側の強度が走査方向前方側の強度よりも低く、かつ走査方向後方側の強度による照射パルスエネルギー密度が走査方向前方側の強度による照射パルスエネルギー密度の０．９５倍以上になるように前記強度分布を調整する強度調整部と、

前記パルスレーザの照射エネルギー密度を調整するエネルギー調整部と、

前記パルスレーザを前記非単結晶半導体に対し相対的に走査する走査装置と、

前記レーザ光源、前記エネルギー調整部および前記走査装置を制御する制御部と、を備え、

前記制御部は、前記エネルギー調整部を制御して、前記パルスレーザの走査方向前方側の照射において前記非単結晶半導体膜に微結晶化が生じる照射パルスエネルギー密度よりも低く、かつ複数回数Ｎ回の照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度Ｅ０と同じ照射パルスエネルギー密度Ｅ１になり、前記パルスレーザの走査方向後方側の照射において前記照射パルスエネルギー密度Ｅ１よりも低く、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上の照射パルスエネルギーＥ２になるように調整し、さらに前記走査装置を制御して前記パルスレーザを走査しつつ前記非単結晶半導体に対しＮ回以上の複数回照射を順次行う工程を実行することを特徴とする。

[0023] 第１４の本発明の結晶半導体膜の製造装置は、前記第１２または第１３の本発明において、前記制御部は、前記結晶化に適した照射パルスエネルギーが、複数回数Ｎ回の照射によって結晶粒径成長が飽和する照射パルスエネルギー密度Ｅとして、Ｅ×０．９８～Ｅ×１．０３の範囲内に設定されていることを特徴とする。

[0024] 本発明では、非単結晶半導体膜に対し、Ｎ回照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度でパルスレーザ照射する場合と同様に、第１ステップと第２ステップとで、微結晶が生じないように非単結晶半導体膜を良好に結晶化することができる。しかも、本発明では、パルスレーザのエッジ部による半導体膜上の盛り上がり部の高さを低くすることができる。なお、結晶化は、非単結晶の結晶半導体膜を単結晶にするものであってもよく、また、非晶質半導体膜を多結晶半導体膜にするものであってもよく、非晶質半導体膜を単結晶半導体膜にするものであってもよい。

[0025] 照射パルスエネルギー密度は、半導体膜上のパルスエネルギー密度であり、第１ステップでは、照射パルスエネルギー密度をＮ回照射による結晶化に適した照射エネルギー密度と同じにして照射を行うことができる。これにより第１ステップでは、微結晶化が回避される。なお、第１ステップにおける結晶化に適したエネルギー密度は、結晶化を意図する範囲で適宜選定することができる。例えば、複数回数Ｎ回の照射によって結晶粒径成長が飽和する

照射パルスエネルギー密度Ｅと同程度の照射パルスエネルギー密度とすることができる。具体的には、Ｅ×０．９８～Ｅ×１．０３の範囲が望ましい。ステップ１の照射パルスエネルギー密度がＥ×１．０３を超えると、結晶粒径の粗大化などによるバラツキが生じやすくなる。一方、Ｅ×０．９８未満になると、結晶粒成長が不十分になって結晶粒径のバラツキが生じやすくなる。

[0026] また、第２ステップでは照射パルスエネルギー密度Ｅ１以下にし、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上とすることで、第１ステップで生じたパルスレーザのエッジ部による半導体膜上の盛り上がり部の高さを低くするとともに、良好な結晶性を維持することができる。ここで、第２ステップの照射パルスエネルギー密度Ｅ２は、上記条件を満たすことが必要であるが、さらには、Ｅ１×０．９５以上であるのが望ましい。これにより第１ステップおよび第２ステップのパルスレーザ照射後の結晶粒径を均一で十分に結晶が成長したものにすることができる。第２ステップの照射パルスエネルギー密度を低くしすぎると、溶融エネルギー密度域に達しなければ盛り上がりの緩和はできず、また、溶融エネルギー密度域に達していても、盛り上がりの緩和作用は得られても十分な結晶成長が得られず、結晶粒径が小さくなってしまう。

また、照射パルスエネルギー密度Ｅ２は、Ｅ１×０．９８未満とするのが望ましい。照射パルスエネルギー密度Ｅ２が照射パルスエネルギー密度Ｅ１と同等であると、半導体膜上に同等の盛り上がりを再度形成してしまい、盛り上がりの緩和作用が得られない。

[0027] また、合計照射回数はＮ回以上とすることで、結晶粒径を十分に成長させることができる。なお、Ｎの数値については特に限定されるものではないが、出力バラツキによる膜質低下を防止するという点では、ある程度の回数が望ましく、例えば８回以上とすることができる。

さらに、合計照射回数はＮ×１．５以下とするのが望ましい。全照射回数を多くすると生産性の低下を招く。生産性の観点で最も望ましい合計照射回

数はＮ回であるが、結晶化の状態を勘案して選定することができる。

さらに、第１ステップの照射回数Ｎ１は、第２ステップの照射回数Ｎ２と同じか、多くするのが望ましい。これにより合計照射回数をできるだけ少なくすることができる。

[0028] また、本願発明では、パルスレーザの波長は特定のものに限定されないが、例えば４００ｎｍ以下のものを示すことができる。

さらに、本願発明におけるパルスレーザの半値幅は特定のものに限定されないが、例えば２００ｎｓ以下のものを示すことができる。

[0029] さらに、上記第１ステップ、第２ステップのパルスレーザの照射は、時を異にして非単結晶半導体膜に異なるパルスレーザが照射されるものが挙げられるが、１つのパルスレーザで第１ステップと第２ステップのパルスレーザ照射が行われるものであってもよい。パルスレーザは、二つ以上のパルスレーザが非単結晶半導体膜に同時期に照射されることで擬似的に合成されたものであってもよい。

すなわち、パルスレーザが、走査方向のビーム断面強度分布において、走査方向後端にかけた走査方向後方側が、走査方向前方側の強度よりも低い強度を有しており、前記走査方向前方側で前記強度に従って前記第１ステップの照射がなされ、前記走査方向後方側で前記強度に従って前記第２ステップの照射がなされることになる。

発明の効果

[0030] 以上説明したように、本発明によれば、第１ステップと第２ステップのパルスレーザ照射により、結晶を十分に成長させて照射ムラの少ない良質な結晶半導体膜を得ることができる効果がある。

図面の簡単な説明

[0031] [図1]本発明の一実施形態の結晶半導体膜の製造装置を示す図である。

[図2]同じく、走査方向でのビーム断面強度分布でビーム強度に段階を有するビーム断面強度分布を示す図である。

[図3]同じく、走査方向でのビーム断面強度分布でビーム強度に段階を有する

パルスレーザを整形する光学系を示す図である。

[図4]同じく、走査方向でのビーム断面強度分布でビーム強度に段階を有するパルスレーザの合成を説明する図である。

[図5]同じく、実施例における半導体膜表面の状態を示す図である。

[図6]同じく、実施例におけるムラ評価の結果を示す図である。

発明を実施するための形態

[0032] 以下に、本発明の一実施形態の結晶半導体膜の製造装置および製造方法を説明する。

結晶半導体膜製造装置１は、処理室２を備え、該処理室２内にＸ－Ｙ方向に移動可能な走査装置３を備え、該走査装置３にステージ５が設けられている。処理時には、該ステージ５上に非単結晶半導体膜として非晶質のシリコン膜１００などが設置され、所望により処理室２内の雰囲気を調整する。シリコン膜１００は、図示しない基板上に例えば４０～１００ｎｍの厚さで形成されている。なお、本発明としては、非単結晶半導体膜の厚さが特に限定されるものではない。非単結晶半導体膜の形成は常法により行うことができ、本発明としては半導体膜の形成方法が特に限定されるものではない。また、処理対象となる半導体膜としては非晶質のものが好適であるが、本発明としては非晶質のものに限定されるものではなく、非単結晶のものや結晶を一部に含むものであってもよく、これらにおいても結晶の改質として本装置を適用することができる。

なお、走査装置３は、図示しないモータなどによって駆動され、該モータは後述する制御部８によって動作が制御されて走査装置３の走査速度が設定される。また、処理室２には、外部からパルスレーザを導入する導入窓６が設けられている。

[0033] 処理室２の外部には、パルスレーザ発振装置１０が設置されている。該パルスレーザ発振装置１０は、エキシマレーザ発振装置で構成されている。該パルスレーザ発振装置１０には、制御部８に制御可能に接続されている。制御部８の指令によってパルスレーザ発振装置１０は所定の出力でパルスレー

ザが出力される。なお、本発明としては、発振装置の種別や発振媒質が限定されるものではなく、所望のパルスレーザを半導体膜に照射できるものであればよい。

[0034] 該パルスレーザ発振装置１０においてパルス発振されて出力されるパルスレーザ１５は例えば波長が４００ｎｍ以下で、パルス半値幅が２００ｎｓ以下のものとされる。ただし、本発明としてはこれらに限定されるものではない。

パルスレーザ１５は、アテニュエータ１１でパルスエネルギー密度が調整される。アテニュエータ１１は、前記制御部８に制御可能に接続されており、制御部８の指令によって所定の減衰率に設定される。制御部８では、半導体膜への照射面上で所定の照射パルスエネルギー密度が得られるように、減衰率が調整される。好適にはシリコン膜１００の照射面上において、エネルギー密度が１００～５００ｍＪ／ｃｍ^{2}となるように調整することができる。

[0035] アテニュエータ１１を透過したパルスレーザ１５は、レンズ、反射ミラー、ホモジナイザーなどによって構成される光学系１２でビーム整形され、処理室２に設けた導入窓６を通して処理室２内のシリコン膜１００に照射されるようにパルスレーザ１５を導く。図では、光学系１２の１つとして反射ミラー１２ａと集光レンズ１２ｂとが図示されている。本発明としては光学系に含まれる光学部材の種別や数が特に限定されるものではない。

照射の際の照射面形状は、断面角形状とされ、角形にはライン状のものが含まれる。

[0036] 次に、上記結晶半導体膜製造装置１を用いた結晶半導体膜の製造方法について説明する。

前記シリコン膜１００を対象にして、パルスレーザ１５の照射によって微結晶化が生じる照射パルスエネルギー密度よりも低く、かつ複数回数Ｎ回の照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度Ｅ０を決定する。結晶化に適した照射パルスエネルギー密度Ｅ０としては、Ｎ回の照射によって結晶粒径成長が飽和する照射パルスエネルギー密度Ｅと同等なものを選定でき

る。同等なものとしては、Ｅ×０．９８～Ｅ×１．０３を例示することができる。この実施形態では、回数Ｎ回のオーバーラップ照射によって照射パルスエネルギー密度Ｅ０でパルスレーザを照射した際と、同等の結晶化を得るものである。

上記照射パルスエネルギー密度Ｅ０を第１ステップの照射パルスエネルギー密度Ｅ１に決定する。また、第２ステップの照射パルスエネルギー密度Ｅ２として、照射パルスエネルギー密度Ｅ１よりも低く、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上となる照射パルスエネルギーＥ２を決定し、これらを制御部８に設定する。なお、照射パルスエネルギー密度Ｅ２はＥ１×０．９５以上とするのが望ましい。

上記したＥ０、Ｅ１、Ｅ２には経験的に数値を得たものを利用できる。

[0037] 次に、第１ステップにおけるオーバーラップにおける照射回数Ｎ１と、第２ステップにおけるオーバーラップにおける照射回数Ｎ２とを決定し、制御部８に設定する。Ｎ１とＮ２の和はＮ以上とする。なお、Ｎ１≧Ｎ２が望ましく、さらにＮ１＋Ｎ２≦１．５Ｎが望ましい。Ｎ１、Ｎ２の回数は経験的に定めることができる。

[0038] 上記設定に基づいて、第１ステップの条件で、走査装置３によりシリコン膜１００を一方向に移動させつつパルスレーザ発振装置１０からパルスレーザ１５を出力し、光学系１２、導入窓６を通して処理室２内のシリコン膜１００にパルスレーザ１５をオーバーラップ照射して処理をする。なお、オーバーラップ回数は、走査装置３の走査速度とパルスレーザの繰り返し周波数とパルスの短軸方向幅で決定される。このため、制御部８は、パルスレーザの繰り返し周波数を前提にして、Ｎ１回のオーバーラップがなされるように走査装置３の走査速度を決定する。走査速度は、例えば６～１６ｍｍ／秒の範囲で選定することができる。なお、本発明としてはこの走査速度が特定のものに限定されるものではなく、例えば１～１００ｍｍ／秒の範囲で選択することができる。また、アテニュエータ１１の減衰率は、制御部８によってシリコン膜１００上の照射パルスエネルギーＥ１が設定値になるように調整

される。該調整は、予め減衰率と照射パルスエネルギーとの関係を求めておき、この関係に従って行うことができる。また、図示しない測定装置でパルスレーザ１５のパルスエネルギー密度を測定して、該パルスエネルギー密度が所定値になるようにアテニュエータ１１の制御を行うことができる。

[0039] 次にシリコン膜１００の所定エリアの処理が完了すると、走査装置３を逆方向に移動するように動作させて第２ステップのオーバーラップ照射を行う。制御部８は、パルスレーザの繰り返し周波数を前提にして、Ｎ２回のオーバーラップがなされるように走査装置３の走査速度を決定する。走査速度は、例えば６～１６ｍｍ／秒の範囲で選定することができる。なお、本発明としてはこの走査速度が特定のものに限定されるものではなく、例えば１～１００ｍｍ／秒の範囲で選択することができる。また、アテニュエータ１１の減衰率は、制御部８によってシリコン膜１００の照射パルスエネルギーＥ２が設定値になるように調整される。該調整は、第１ステップと同様に行うことができる。また、第２ステップでパルス幅の異なるパルスレーザを用いることでオーバーラップによる回数を変えることもでき、走査速度などを複合して所望のオーバーラップ回数を得るようにしてもよい。

[0040] 第１ステップのパルスレーザ照射と第２ステップのパルスレーザ照射がされたシリコン膜１００の所定エリアは、照射パルスエネルギー密度Ｅ０でＮ回のオーバーラップ照射を行った場合と同程度に良好に結晶化される。さらに、本実施形態では、第１ステップの照射と第２ステップの照射とが行われることで、パルスレーザのエッジ部による半導体膜上の盛り上がり部の高さを低くして照射ムラをなくし、よって、より良質の半導体デバイスに提供することが可能になる。

[0041] なお、上記実施形態では、第１ステップのスキャン照射を所定のエリアで行った後、第２ステップのスキャン照射を上記エリアに行うものとして説明したが、二つのパルスレーザを用いて第１のステップでの照射を行った後、直ちに第２のステップの照射を行うようにしてもよい。この場合、二つのパルスレーザは、二つのパルスレーザ光源から出力されたものを用いることが

でき、また、１つのパルスレーザ光源から出力されたパルスレーザを分割して、エネルギー調整や遅延調整などを行って、二つのパルスレーザを得てもよい。

なお、パルスレーザは、複数のパルスレーザを合成してパルス幅を調整したものであってもよい。

[0042] なお、上記実施形態では、第１ステップで、１つのパルスレーザで所定のエリアのシリコン膜を処理した後に、第２ステップで他のパルスレーザで処理を行うものとして説明したが、１つのパルスで第１ステップと第２ステップとが同時期に行われるようにしてもよい。なお、１つのパルスとしては擬似的に１つといえるものも含まれる。

すなわち、パルスレーザが、短軸方向のビーム断面強度分布において、走査方向後端にかけた走査方向後方側が、走査方向前方側の強度よりも低い強度を有しており、前記走査方向前方側で前記強度に従って前記第１ステップの照射がなされ、前記走査方向後方側で前記強度に従って前記第２ステップの照射がなされる。

[0043] この形態に用いられるパルスレーザの走査方向のビーム断面強度分布を図２に示す。

ビーム断面は、走査方向前方側で、パルス照射エネルギーＥ１の高さを有し、走査方向後方側で後端にかけてパルス照射エネルギーＥ２の高さを有する段階的なビーム強度を有している。この形態では、パルス照射エネルギーＥ１の高さを有するパルス部分でシリコン膜１００の同一領域にＮ１回のパルスレーザ照射が行われ、パルス照射エネルギーＥ２の高さを有するパルス部分でシリコン膜１００の同一領域にＮ２回のパルスレーザ照射が行われる。Ｎ１、Ｎ２の回数は、パルス照射エネルギーＥ１の高さを有する走査方向の部分長さＬ１とパルス照射エネルギーＥ１の高さを有する走査方向の部分長さＬ２と、パルス毎のピッチによって定まる。例えば、Ｌ１＝Ｌ２（例えば２００μｍ）とすれば、Ｎ１とＮ２とは基本的には同一回数となる。

すなわち、長さＬ１を相対的に長くすることでＮ１の回数を多くすること

ができる。このためＬ１≧Ｌ２とするのが望ましい。したがって、Ｎ１、Ｎ２は、長さＬ１、Ｌ２の大きさに依存し、さらには上記実施形態と同様に、走査速度とパルスレーザの繰り返し周波数にも依存する。これらの設定によって、この形態におけるＮ１、Ｎ２が決定される。

[0044] 上記形状の走査方向のビーム断面強度分布を有するパルスレーザは種々の方法で有ることができる。

例えば、図３（ａ）に示すように光学系の光路上で光学部材の上流側または下流側でレーザビームの一部を遮蔽または透過を抑制する部材を配置することで、図３（ｂ）に示すように走査方向におけるビーム強度を部分的に低くし、ビーム強度が段階的になったビーム断面強度分布を有するパルスレーザが得られる。

また、図４（ａ）に示すように、二つのパルスを合成または擬似的に合成することで、図４（ｂ）に示すように、ビーム強度が段階的（走査方向幅Ｌ１、Ｌ２）になったビーム断面強度分布を有するパルスｃが得られる。例えば、ビーム強度が異なるパルスａとパルスｂとに時間差を設けて光学系で合成し、合成したパルスを非単結晶半導体膜上に照射することができる。また、ビーム強度が異なるパルスａとパルスｂとを同時に位置をずらして非単結晶半導体膜上に照射することで擬似的に１つとしたパルスとすることができる。

実施例 1

[0045] 次に、パルスレーザ光源（製品番号ＬＳＸ５４０Ｃ）を用いて、膜厚５０ｎｍのアモルファスシリコン膜に、波長３０８ｎｍ、パルス幅７０ｎｍ、繰り返し周波数３００Ｈｚ、ビーム断面において長軸長さ４６５ｍｍ×短軸長さ４００μｍのラインビーム状のエキシマパルスレーザを照射して、アニール処理を行った。

従来例として、オーバーラップ率９５％（オーバラップ照射２０回）で結晶化に適した照射エネルギー密度Ｅ０（ＯＥＤ（Optinum energy density）；この例では３７０ｍＪ／ｃｍ^2）を設定した。この際には、２０μｍピッチ

になるように走査速度およびパルスレーザの繰り返し周波数を設定した。エネルギー密度Ｅ０は、微結晶が生じず、前記オーバラップ照射で結晶粒径が飽和する照射エネルギー密度Ｅと同じにした。

また、発明例および参考例として、第１ステップでオーバーラップ率９０％（オーバラップ照射１０回）で照射エネルギー密度Ｅ０と同じ照射エネルギー密度Ｅ１（３７０ｍＪ／ｃｍ^2）を設定した。この際には、４０μｍピッチになるように走査速度を設定した。

[0046] さらに、発明例として、第２ステップでオーバーラップ率９０％（オーバラップ照射１０回）で照射エネルギー密度Ｅ１の－５％となる照射エネルギー密度Ｅ２（３５２ｍＪ／ｃｍ^2）を設定した。この際には、４０μｍピッチになるように走査速度を設定した。

さらに、参考例として、第２ステップでオーバーラップ率９０％（オーバラップ照射１０回）で照射エネルギー密度Ｅ１の－１０％、－１５％または－２０％となる照射エネルギー密度に設定した。この際にも、４０μｍピッチになるように走査速度およびパルスレーザの繰り返し周波数を設定した。

[0047] 上記条件で、アモルファスのシリコン膜にパルスレーザをオーバーラップ照射し、処理後の結晶シリコン膜の照射ムラおよび結晶性を評価した。また、従来例と発明例については、結晶シリコン膜の表面凹凸をＡＦＭ（Atomic Force Microscope：原子間力顕微鏡）によって観察した。

図５に、結晶シリコン膜の表面断面の概略図を示す。従来例では、図５（ｂ）に示すようにパルスレーザの最終照射によるエッジ部分に相応して比較的大きな盛り上がりが形成されている。一方、発明例では、図５（ａ）に示すように、上記に相当する盛り上がりが低くなだらかになっていることが認められ、第１ステップと第２ステップの照射により盛り上がりが緩和されていることが分かる。

[0048] 結晶シリコン膜の照射ムラ評価は以下の方法によって行った。

結晶シリコン膜に検査光をそれぞれの例で５地点に照射し、それぞれ反射光を受光してカラー画像を取得し、カラー画像の色成分を検出し、検出され

た色成分に基づいてカラー画像をモノクロ化した。次いで、モノクロ化された画像のデータをコンボリューションして画像濃淡を強調した画像データを取得し、画像濃淡を強調した画像データを射影変換し、射影変換がされた画像データに基づいて表面ムラを評価した。モノクロ化は、検出がされた色成分のうち、主となる色成分を用いて行うことができ、主となる色成分は、光分布が他の色成分よりも相対的に大きい色成分とすることができる。

モノクロ化した画像データは、レーザのビーム方向を行、レーザの走査方向を列とする行列データで示し、コンボリューションでは、所定係数の行列をモノクロ化された画像のデータの行列に掛け合わせることによって行った。

所定係数の行列は、ビーム方向を強調するものと、スキャン方向を強調するものとをそれぞれ用いてビーム方向の画像濃淡を強調した画像データとスキャン方向の画像濃淡を強調した画像データとをそれぞれ取得した。

具体的には、以下のコンボリューションを行った。なお、所定係数の行列が下記に限定されるものではない。

[0049] [数1]

$$\text{ｼｮｯﾄ方向＝濃淡強調} \begin{vmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \\ -2 & -2 & -2 \end{vmatrix} * \text{画像データ} \quad (1)$$

$$\text{ｽｷｬﾝ方向＝濃淡強調} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 & -2 \\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2 \\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2 \end{vmatrix} * \text{画像データ} \quad (2)$$

[0050] 画像の濃淡を強調した画像データに対しては、スキャン方向、ショット方向にまとまったスジが現われることを利用して、それぞれの方向の射影を求める。

具体的には下記に示す式によってショット方向、スキャン方向にそれぞれ射影変換する。

ショット方向＝（Max(Σf(x)/Nx) -Min(Σf(x)/Nx) ）/平均

スキャン方向＝（Max(Σf(y)/Ny) -Min(Σf(y)/Ny) ）/平均

ただし、ｘはショット方向の画像の位置、ｙはスキャン方向の画像の位置、ｆ（ｘ）はｘ位置における画像データ、ｆ（ｙ）はｙ位置における画像データ、Ｎｘはショット方向の画像の数、Ｎｙはスキャン方向の画像の数を示す。

[0051] 図６のムラスコアは、スキャン方向のムラを数値化して示したものである。数値が高いほどムラが大きいことを示している。

図６から分かるように、従来例では、ムラスコアは０．２～０．３となりムラが大きい。これは前述したようにパルスレーザのエッジによる表面盛り上がりが影響していると考えられる。

一方、発明例では、第１ステップ後では従来例と同様にムラが大きいものの、第２ステップ後にはムラスコアは０．０６～０．１３になりムラが緩和されている。なお、第２のステップでの照射を－１０％ＥＯ、－１５％ＥＯ、－２０％ＥＯの照射パルスエネルギーで行ったものは、従来例よりもムラは小さくなっているが、ムラの軽減という点で十分ではなかった。

[0052] 次に、従来例、発明例および参考例の結晶シリコン膜の結晶性をＳＥＭ（Scanning Electron Microscope）写真により観察した。

その結果、従来例、発明例ともに均一な結晶粒が同等に形成されていた。一方、－１５％ＥＯ、－２０％ＥＯとした参考例では、十分な結晶成長がなされておらず、結晶粒径が小さいものになった。－１０％ＥＯでは、－１５％ＥＯ、－２０％ＥＯ程ではないがやや結晶粒径が小さくなった。

[0053] 以上のように、本発明例によれば、良好な結晶粒成長が得られるとともにパルスレーザのエッジによる盛り上がりを小さくしてムラを軽減することができる。また、従来に比べて生産性を殆ど低下させることなく処理を行うことが可能になる。

[0054] 以上、本発明について前記各実施形態および実施例に基づいて説明を行ったが、本発明はこれらの説明内容に限定されるものではなく、本発明の範囲を逸脱しない限りは適宜の変更が可能である。

符号の説明

[0055]

1	結晶半導体膜製造装置
2	処理室
3	走査装置
5	ステージ
8	制御部
１０	パルスレーザ発振装置
１１	アテニュエータ

請求の範囲

[請求項1] 非単結晶半導体膜上に、パルスレーザを短軸方向に相対的に走査しつつオーバーラップ照射して結晶化を行う結晶半導体膜の製造方法において、

前記パルスレーザの照射によって前記非単結晶半導体膜に微結晶化が生じる照射パルスエネルギー密度よりも低く、かつ複数回数Ｎ回の照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度をＥ０として、

前記照射パルスエネルギー密度Ｅ０と同じ照射パルスエネルギー密度Ｅ１で前記パルスレーザが照射される第１ステップと、

前記照射パルスエネルギー密度Ｅ１よりも低く、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上となる照射パルスエネルギーＥ２で前記パルスレーザが照射される第２ステップとを有し、

同一照射面に対する前記第１ステップと前記第２ステップにおける合計照射回数がＮ回以上であることを特徴とする結晶半導体膜の製造方法。

[請求項2] 前記結晶化に適した照射パルスエネルギーが、複数回数Ｎ回の照射によって結晶粒径成長が飽和する照射パルスエネルギー密度Ｅとして、Ｅ×０．９８～Ｅ×１．０３の範囲内であることを特徴とする請求項１記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項3] 前記照射パルスエネルギー密度Ｅ２がＥ１×０．９５以上であることを特徴とする請求項１または２に記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項4] 前記合計照射回数がＮ×１．５以下であることを特徴とする請求項１～３のいずれかに記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項5] 前記第１のステップによって前記パルスレーザを走査しつつ同一照射面に対するＮ１回の複数回照射を順次行い、その後、前記所定面に対し、前記第２のステップによって前記パルスレーザを走査しつつ同一照射面に対するＮ２回の複数回照射を順次行い、前記Ｎ１＋Ｎ２を前記合計照射回数としてＮ回以上とすることを特徴とする請求項１～

４のいずれかに記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項6] 前記Ｎ１を前記Ｎ２以上の回数にすることを特徴とする請求項５記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項7] 前記パルスレーザが、走査方向のビーム断面強度分布において、走査方向後端にかけた走査方向後方側が、走査方向前方側の強度よりも低い強度を有しており、前記走査方向前方側で前記強度に従って前記第１ステップの照射がなされ、前記走査方向後方側で前記強度に従って前記第２ステップの照射がなされることを特徴とする請求項１～６のいずれか１項に記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項8] 前記走査方向前方側の走査方向幅が、前記走査方向後方側の走査方向幅以上であることを特徴とする請求項７記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項9] 前記パルスレーザの波長が４００ｎｍ以下であることを特徴とする請求項１～８のいずれかに記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項10] 前記パルスレーザの半値幅が２００ｎｓ以下であることを特徴とする請求項１～９のいずれかに記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項11] 前記非単結晶半導体がシリコンであることを特徴とする請求項１～１０のいずれかに記載の結晶半導体膜の製造方法。

[請求項12] パルスレーザを出力する１または２以上のレーザ光源と、

前記パルスレーザを整形して非単結晶半導体に導く光学系と、

前記パルスレーザの照射エネルギー密度を調整するエネルギー調整部と、

前記パルスレーザを前記非単結晶半導体に対し相対的に走査する走査装置と、

前記レーザ光源、前記エネルギー調整部および前記走査装置を制御する制御部と、を備え、

前記制御部は、前記エネルギー調整部を制御してパルスレーザの照射によって前記非単結晶半導体膜に微結晶化が生じる照射パルスエネ

ルギー密度よりも低く、かつ複数回数Ｎ回の照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度Ｅ０と同じ照射パルスエネルギー密度Ｅ１に調整し、該照射パルスエネルギー密度Ｅ１で前記走査装置を制御して前記パルスレーザを走査しつつ前記非単結晶半導体に対しＮ１回（但しＮ１＜Ｎ）の複数回照射を順次行う第１ステップと、第１ステップで前記パルスレーザが照射された半導体に、前記エネルギー調整部を制御して前記照射パルスエネルギー密度Ｅ１よりも低く、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上の照射パルスエネルギーＥ２に調整し、該照射パルスエネルギー密度Ｅ２で前記走査装置を制御して前記パルスレーザを走査しつつ前記非単結晶半導体に対しＮ２回（但し、Ｎ２＜Ｎ、Ｎ１＋Ｎ２≧Ｎ）の複数回照射を順次行う第２ステップとを実行することを特徴とする結晶半導体膜の製造装置。

［請求項13］ パルスレーザを出力する１または２以上のレーザ光源と、

前記パルスレーザを整形して非単結晶半導体に導く光学系と、

前記パルスレーザの走査方向のビーム断面強度分布において、走査方向後端にかけた走査方向後方側の強度が走査方向前方側の強度よりも低く、かつ走査方向後方側の強度による照射パルスエネルギー密度が走査方向前方側の強度による照射パルスエネルギー密度の０．９５倍以上になるように前記強度分布を調整する強度調整部と、

前記パルスレーザの照射エネルギー密度を調整するエネルギー調整部と、

前記パルスレーザを前記非単結晶半導体に対し相対的に走査する走査装置と、

前記レーザ光源、前記エネルギー調整部および前記走査装置を制御する制御部と、を備え、

前記制御部は、前記エネルギー調整部を制御して、前記パルスレーザの走査方向前方側の照射において前記非単結晶半導体膜に微結晶化

が生じる照射パルスエネルギー密度よりも低く、かつ複数回数Ｎ回の照射による結晶化に適した照射パルスエネルギー密度Ｅ０と同じ照射パルスエネルギー密度Ｅ１になり、前記パルスレーザの走査方向後方側の照射において前記照射パルスエネルギー密度Ｅ１よりも低く、かつ結晶が再溶融するため必要な照射エネルギー密度以上の照射パルスエネルギーＥ２になるように調整し、さらに前記走査装置を制御して前記パルスレーザを走査しつつ前記非単結晶半導体に対しＮ回以上の複数回照射を順次行う工程を実行することを特徴とする結晶半導体膜の製造装置。

［請求項14］ 前記制御部は、前記結晶化に適した照射パルスエネルギーが、複数回数Ｎ回の照射によって結晶粒径成長が飽和する照射パルスエネルギー密度Ｅとして、Ｅ×０．９８～Ｅ×１．０３の範囲内に設定されていることを特徴とする請求項１２または１３に記載の結晶半導体膜の製造装置。