明　細　書

発明の名称 ： レーザアニール装置およびレーザアニール方法

技術分野

[0001] この発明は、半導体膜にパルスレーザ光を照射してレーザアニールを行うレーザアニール装置およびレーザアニール方法に関するものである。

背景技術

[0002] 近年、液晶ディスプレイは高解像度や、駆動フレームレートの高速化、３Ｄ化などをキーワードに、それを実現するために必要な性能の薄膜トランジスタが求められるようになっている。薄膜トランジスタの性能向上のために、レーザアニールによってシリコン半導体膜を結晶化する必要がある。

従来、レーザアニール装置は、アモルファスシリコン（ａ－Ｓｉ）を結晶化する装置であり、エキシマレーザを用いたアニール技術が用いられている。エキシマレーザはビームが低品質であるため、ビームを微小に絞ることが出来ない。そのため、光学系を組んでＸＹ方向でトップフラット型のビームに整形して用いている。一般的に用いられるエキシマレーザはＸｅＣｌ（波長３０８ｎｍ）であるため、ａ－Ｓｉへの吸収が高く、アモルファスシリコンへの浸透深さは約７ｎｍと非常に浅く、膜厚方向で温度勾配が生じる。エキシマレーザを用いたアニール技術はこの温度勾配を利用して、アモルファスシリコン膜全体を完全に溶融させないレーザ出力で膜底部に結晶成長の核を残して溶融させ、この核を基点に結晶成長を起こさせる。図８に該結晶化の模式図を示す。

すなわち、ガラス基板３０上に形成されたアモルファスシリコン膜３１に対し、パルスレーザ光４０を照射し、溶融シリコン膜３２を生成する。該溶融シリコン膜３２が再結晶化して凝固する過程で結晶化して結晶シリコン膜３３が形成される。

[0003] 他にも吸収層を用いたレーザアニール方法（特許文献１）、ＹＡＧ２倍波（波長５３２ｎｍ）を用いたレーザアニール装置（特許文献２）や連続発振

レーザを用いた装置（特許文献３）も提案されている。

さらには、ムラなく均一に結晶化をするために複雑な工程を用いてレーザアニールを行う方法もあり、例えば、特許文献４では加熱ステージを用いる方法が提案されている。その他に、レーザを二回に分けて照射する方法（特許文献５、６）が提案されている。また他波長のレーザを用いて上記問題点を解決しようとした例もあり、例えば、Ｍｏ膜吸収層とレーザダイオードを用いた例（非特許文献１）が報告されている。他にはＧａＮ系青色半導体レーザを用いた方法（特許文献７）が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開昭６２－１３２３３１１号公報

特許文献2：特開２００５－２９４４９３号公報

特許文献3：特開２０１０－１１８４０９号公報

特許文献4：特開２００８－１４７４８７号公報

特許文献5：特開２０１０－１０３４８５号公報

特許文献6：特開２００１－３３８８７３号公報

特許文献7：特開２００９－１１１２０６号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：E.P.Donovan,Calorimetric studies of crystallization and relaxation of amorphous Si and Ge prepared by ion implantation.J.Appl.Phys.,Vol.57,pp.1795-1804,1985.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 従来のＸｅＣｌエキシマレーザアニール装置は以上のような方法を用いるため、結晶性は良いものの瞬間的に融点まで加熱するのでアブレーションを防ぐ目的の脱水素工程やレーザ出力、フォーカスの厳密な制御が必要となる。また一度溶融させるためにビームの長軸繋ぎ合わせ部が特性劣化の問題が

あり、現状ではビームサイズの制約上基板サイズＧ４（７３０ｍｍ×９２０ｍｍ）までしか対応できないため大面積処理が困難であるという問題点がある。レーザアニールにおいて、レーザ出力の大小により結晶の状態が変化するので、上記の問題を鑑みて、特許文献１ではレーザ出力を変化させる方法も開示されているが、長軸繋ぎ合わせの問題を解決することはできていない。

[0007] 連続発振レーザを用いた特許文献３に開示される装置では、複数のレーザ光を収束化する光学系を必要とするため、レーザ発振器のそれぞれがもつエネルギーの強度にばらつきや干渉が生じ、高精度に均一化を図ることが困難になる。

また、特許文献４のように加熱ステージを用いる方法は加熱冷却に伴うタクトタイムの損失が大きく実用上適さない。また、レーザを二回に分けて照射する特許文献５、６に開示されている方法は、スループットが悪化するという問題がある。また他波長のレーザを用いて上記問題点を解決する非特許文献１に開示されるものでは、吸収層の剥離などといった工程が増えるため実用上適さない。

また、ＧａＮ系青色半導体レーザを用いた特許文献７の方法は、本質的に溶融プロセスと変わらない上、このプロセスはＧａＮ系青色半導体レーザに限られるため出力が極めて低く産業上適さない。

[0008] この発明は上記のような従来のものの課題を解決するためになされたものであり、半導体膜に吸収されるレーザ光を用いて本願で示す有効パワー密度をある範囲にすることにより、複雑な工程を要することなく、大面積の半導体膜をムラなく均一に結晶化できるレーザアニール装置およびレーザアニール方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0009] すなわち、本発明のレーザアニール装置のうち、第１の本発明は、パルスレーザ光を出力するパルスレーザ発振装置と、該パルスレーザ発振装置から出力された前記パルスレーザ光を伝送して半導体膜に照射する光伝送手段と

を備え、前記パルスレーザ光は、半導体膜照射面において、下記式で算出される有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記半導体膜に照射されるものであることを特徴とする。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^{3}））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^{2}）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$）　…（式）

[0010] 第２の本発明のレーザアニール装置は、連続レーザ光を出力する連続レーザ発振装置と、該連続レーザ発振装置から出力された連続レーザ光および該連続レーザ光から切り出されたパルスレーザ光を伝送して該パルスレーザ光を半導体膜に照射する光伝送手段と、前記連続レーザ光を前記伝送中に切り出して擬似的にパルス状にしてパルスレーザ光を生成するパルスレーザ光生成手段とを備え、

前記パルスレーザ光は、半導体膜照射面において、下記式で算出される有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記半導体膜に照射されるものであることを特徴とする。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^{3}））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^{2}）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$）　…（式）

[0011] 第３の本発明のレーザアニール装置は、前記第１または第２の本発明において、前記パルスレーザ光のエネルギー密度を調整するエネルギー調整手段を有し、該エネルギー調整手段は、前記式で算出される前記有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるようにエネルギー密度が設定されていることを特徴とする。

[0012] 第４の本発明のレーザアニール装置は、前記第３の本発明において、前記エネルギー調整手段として、パルスレーザ光を所定の減衰率で減衰させて透過させるアテニュエータおよび前記レーザ発振装置の出力を調整する出力調整手段とを備え、該アテニュエータおよび前記出力調整手段は、前記式で算出される前記有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記減衰率および前記出力が設定されていることを特徴とする。

[0013] 第５の本発明のレーザアニール装置は、前記第１～第４の本発明のいずれ

かにおいて、前記パルスレーザ光のパルス幅を調整するパルス幅調整手段を備え、該パルス幅調整手段は、前記式で算出される前記有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記パルスレーザ光のパルス幅を調整するものであることを特徴とする。

[0014] 第６の本発明のレーザアニール装置は、前記第１～第５の本発明のいずれかにおいて、前記半導体膜がシリコン半導体膜であり、前記エネルギー密度が１００～５００ｍＪ／ｃｍ^{2}、前記パルス幅が５０～５００ｎ秒であることを特徴とする。

[0015] 第７の本発明のレーザアニール方法は、パルスレーザ光を半導体膜に照射して該半導体膜のレーザアニールを行うレーザアニール方法において、前記パルスレーザ光のパルスエネルギー密度およびパルス幅を、照射面において下記式で算出される有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように設定をし、該設定がなされた前記パルスレーザ光を前記半導体膜に照射することを特徴とする。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^{3}））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^{2}）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$） …（式）

[0016] 本発明によれば、パルスレーザ光を適度なエネルギー密度とパルス幅と吸収係数との関係を有して半導体膜に照射して急速に加熱することで、半導体膜に、完全に溶融しない程度の熱を与えて、従来の完全溶融・再結晶化法と異なる手法で粒径のバラツキの小さな均一な結晶を得ることできる。従来方式の溶融結晶化法や加熱炉によるＳＰＣ（固相成長法）では結晶粒のばらつきは大きくなる。

次に、本発明で規定する条件について以下に説明する。

[0017] 有効パワー密度：３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内

下記式で算出される有効パワー密度を適切な範囲に設定することで、半導体膜をアニールしてバラツキの小さな均一な結晶半導体膜とすることができる。有効パワー密度が下限未満であると、半導体膜を十分に加熱することができず、結晶化が不均一になりやすい。また、有効パワー密度が上限を超え

ると、半導体膜の溶融が生じて不均一な結晶になる。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^{3}））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^{2}）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$）　…（式）

なお、上記有効パワー密度は、本発明において定義するものであり、一般的な物理的性質を示すものではない。

[0018] パルスレーザ光波長域

本発明においては、半導体膜に照射するパルスレーザ光の波長域が特定のものに限定されるものではない。ただし、半導体膜、特にアモルファスシリコン膜に対し、吸収のよい波長域であるパルスレーザ光によって設定してパルスレーザ光の照射を行うと、半導体膜を直接加熱させることで、効果的に加熱を行うことができ、半導体膜の上層に間接的にレーザ吸収層を設ける必要がない。また、半導体膜、特にアモルファスシリコン膜に対し吸収はあるが、透過するような波長であると、半導体膜に対する光の吸収率が、下層からの多重反射によりシリコン下層の厚みによる偏差（ばらつき）が大きく依存してしまう。これらの点で紫外域の３０８～３５８ｎｍの波長域が望ましい。

[0019] エネルギー密度

半導体膜に適度なエネルギー密度のパルスレーザ光を照射することにより、半導体膜は完全には溶融しない状態で変化し、微結晶が作製できる。エネルギー密度が低いと有効パワー密度が小さくなって結晶化が十分になされなかったり、結晶化が困難になる。一方、エネルギー密度が高いと、有効パワー密度が大きくなりすぎて溶融結晶が生じたり、アブレーションが生じてしまう。本発明としては、有効パワー密度が適正な範囲内に有ればエネルギー密度は特に限定されるものではないが、１００～５００ｍＪ／ｃｍ^{2}の範囲を望ましいものとして示すことができる。

[0020] パルス幅

パルス幅は、有効パワー密度を適切にして半導体膜を適度に加熱するために重要な要素の１つであり、パルス幅が小さすぎると有効パワー密度が増大

し、半導体膜が完全に溶融する温度にまで加熱され、均一な結晶化が困難になる。また、パルス幅が大きすぎると有効パワー密度が減少し、結晶化させる温度まで加熱できない場合がある。本発明としては、有効パワー密度が適正な範囲内に有ればパルス幅は特に限定されるものではないが、５０～５００ｎ秒の範囲を望ましいものとして示すことができる。

[0021] パルスレーザ光の照射面形状は特に限定されるものではなく、例えばスポット状、ライン状にして半導体膜に照射することができる。

ライン状にする場合、前記パルスレーザ光の短軸幅は０．５ｍｍ以下とするのが望ましい。短軸幅方向にパルスレーザ光を相対的に走査することで、半導体膜を部分的に照射・加熱しつつ大領域の結晶化処理が可能になる。但し、短軸幅が大きすぎると効率よく結晶化するために走査速度を大きくしなければならず、装置コストが増大してしまう。

[0022] 前記パルスレーザ光を非晶質膜に対し相対的に走査することで、前記半導体膜を面方向に沿って結晶化させることが可能になる。該走査は、パルスレーザ側を移動させてもよく、非晶質膜側を移動させてもよく、両方を移動させるようにしてもよい。

[0023] なお、本発明は、パルスレーザ光を出力する固体レーザ光源を使用して所望の波長域のパルスレーザ光を出力でき、メンテナンス性の良好なレーザ光源によって均一結晶の作製を行うことができる。なお、パルスレーザ光は、連続レーザ光を切り出して擬似的にパルス状としたものであってもよい。切り出しは、機械的に高速回転などするシャッターや光変調器などを用いて行うことができる。

[0024] パルスレーザ光は、適正な前記有効パワー密度によって均一な微細結晶を得るためにエネルギー調整手段によってエネルギー密度が適切に調整されて半導体膜に照射されるようにすることができる。エネルギー調整手段は、レーザ発振装置の出力を調整して所定のエネルギー密度が得られるようにしてもよく、レーザ発振装置から出力されたレーザ光の減衰率をアテニュエータで調整するなどしてエネルギー密度を調整するようにしてもよい。パルスレ

ーザ光のエネルギー密度調整は、擬似的なパルスレーザ光を使用する場合、パルス状に切り出す前に前記エネルギー調整がなされるものであってもよい。

[0025] また、パルスレーザ光は、適正な前記有効パワー密度によって均一な微細結晶を得るためにパルス幅調整手段によってパルス幅が適切に調整されて半導体膜に照射されるようにすることができる。

パルス幅調整手段としては、パルスレーザ光を複数のビームに分割するビーム分割手段と、分割された各ビームを遅延させる遅延手段と、分割された各ビームを合成するビーム合成手段とを備えるものによって構成することができる。遅延手段における遅延量の設定によってパルス波形を適宜の形にすることができる。遅延手段は、光路長の調整によって遅延量を変更することができる。

例えば、上記ビーム分割手段で分割されたレーザを、夫々光路長の異なる光学系に導く。分割して遅延させたビームを再び単一の光路上に導くことにより、パルス時間幅を伸長させ、パルス波形を調整できる。特に分割時の強度比の調整と、分割後の夫々の光路長の設定によりパルス時間波形を適宜変更することができる。

[0026] パルス幅調整としては、複数のレーザ光源から出力されたパルスレーザ光を重ね合わせることで行うこともできる。複数のパルスレーザ光を半導体膜に照射することで、結果的に所望のパルス波形が得られる。複数のパルスレーザ光を重ね合わせる際に、パルス出力の位相を調整したり、遅延手段を介在させたりすることで所望のパルス幅に調整することができ、これら構成によってパルス幅調整手段が構成される。

[0027] パルスレーザ光は、走査装置によって半導体膜に対し相対的に走査することで、半導体膜の大領域で微細で均一な結晶を得ることができる。該走査によって半導体膜に対する同一領域へのショット数が所定数、例えば１～１０となるようにパルスの周波数、パルスレーザ光の短軸幅、走査速度が設定される。

走査装置は、パルスレーザ光が導かれる光学系を移動させてパルスレーザ光を移動させるものでもよく、また、半導体膜が配置される基台を移動させるものであってもよい。

発明の効果

[0028] 以上説明したように、本発明によれば、下記式で示される有効パワー密度を３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内にして半導体膜にパルスレーザ光を照射するので、半導体膜を異常粒成長させることなく結晶化させることができ、バラツキの小さな均一な結晶を得ることができる。

図面の簡単な説明

[0029] [図1]本発明に係るレーザアニール装置の一実施形態を示す概略図である。

[図2]同じく、パルス幅調整手段の一例を示す概略図である。

[図3]他の実施形態におけるレーザアニール装置を示す概略図である。

[図4]本発明の実施例におけるレーザアニール後の結晶を示すＳＥＭ写真である。

[図5]同じく、実施例におけるレーザアニール後の結晶を示すＳＥＭ写真である。

[図6]同じく、実施例におけるレーザアニール後の結晶を示すＳＥＭ写真である。

[図7]同じく、実施例における有効パワー密度を示す図である。

[図8]従来のレーザアニールにおける結晶形成状態を示す説明図である。

発明を実施するための形態

[0030] 以下に、本発明の一実施形態を説明する。

図１は、本発明のレーザアニール装置１の概略を示す図である。

レーザアニール装置１は、処理室２を備えており、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、その上部に基台４を備えている。基台４上には、ステージとして基板配置台５が設けられている。アニール処理時には、該基板配置台５上に半導体膜として非晶質のシリコン膜１００などが設置される。シリコン膜１００は、図示しない基板上に５０ｎｍ厚で形成さ

れている。該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、アニール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い。結晶質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レーザアニール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光を導入する導入窓６が設けられている。

[0031] 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、駆動電圧を供給するレーザ電源９が接続されており、該レーザ電源９は、制御部８に制御可能に接続されている。制御部８の指令によってレーザ電源９は必要な駆動電圧をパルスレーザ発振装置１０に供給し、該パルスレーザ発振装置１０では、所定の出力でパルスレーザ光が出力される。

[0032] 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光１５は、必要に応じてアテニュエータ１１で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。すなわち、上記レーザ電源９、制御部８およびアテニュエータ１１は、本発明のエネルギー調整手段を構成する。該エネルギー調整手段によって、好適にはシリコン膜１００の照射面において、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。

アテニュエータ１１を透過したパルスレーザ光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伝送手段１２でビーム整形や偏向がなされ、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。照射の際の照射面形状は特に限定されないが、前記光伝送手段１２によって、例えばスポット状、円形状、角形状、長尺状などに整形される。

[0033] また、光伝送手段１２には、パルス幅調整手段１３を有するものであってもよい。該パルス幅調整手段１３の概略を図２に基づいて説明する。

パルス幅調整手段１３には、光路上に、ハーフミラーからなるビームスプリッタ１３０が配置されており、一部のビーム１５ａは９０度反射され、残部のビーム１５ｂは透過するように分割される。すなわち、ビームスプリッタ１３０は、本発明のビーム分割手段に相当する。また、ビームスプリッタ１３０の反射方向には入射角が４５度になるように全反射ミラー１３１が配置され、該全反射ミラー１３１の反射方向に入射角が４５度になるように全反射ミラー１３２が配置され、全反射ミラー１３２の反射方向に入射角が４５度になるように全反射ミラー１３３が配置され、全反射ミラー１３３の反射方向に入射角が４５度になるように全反射ミラー１３４が配置されている。

全反射ミラー１３４の反射方向には、前記ビームスプリッタ１３０の裏面側が位置しており、入射角４５度でビームが照射される。

[0034] ビームスプリッタ１３０で９０度反射されたビーム１５ａは、全反射ミラー１３１、１３２、１３３、１３４で順次９０度ずつ反射されることで遅延したビーム１５ｃとなってビームスプリッタ１３０の裏面側に至り、一部が９０度反射されてビーム１５ｂに遅延した形で重ね合わされ、残りのビームはビームスプリッタ１３０を透過して前記全反射、ビームスプリッタ１３０での分割が繰り返される。ビーム１５ｂ側で重ね合わされたビームは、遅延したビームが重ね合わされることでパルス波形の整形がなされ、パルス幅の調整がなされ、パルスレーザ光１５０として光路上を進行する。

なお、各全反射ミラーの位置を変えて光路長を調整することでビームの遅延量を変えることができ、これによって重ね合わされたパルスレーザ光のパルス幅を任意に変更することができる。また、分割されたパルスレーザ光の

強度を個別に調整するようにしてもよい。

パルス幅調整手段によって、好適にはパルス幅を５０～５００ｎｓの範囲に設定することができる。なお、本発明としてはパルス幅調整手段を有さず、出力されたパルスレーザ光のパルス幅でシリコン膜１００に照射されるものであってもよい。

[0035] パルスレーザ光１５０は、導入窓６を通して処理室２内に導入され、基板配置台５上のシリコン膜１００に照射される。この際に基板配置台５は、走査装置３によって基台４とともに移動され、パルスレーザ光１５０がシリコン膜１００上で相対的に走査されつつ照射されることになる。

この際のパルスレーザ光１５０は、結晶化に適した有効パワー密度が得られるように、パルスレーザ発振装置１０の出力、アテニュエータ１１の減衰率、パルス幅、パルスレーザ光の照射断面積が設定されており、前記式で算出される有効パワー密度が３×１０^{12}から$１．５\times１０^{12}$の範囲内になるように設定されている。このパルスレーザ光１５０の照射によってシリコン膜１００が均一に結晶化する。なお、シリコン膜１００におけるレーザ光吸収率は、パルスレーザ光の波長によって定まるものであり、既知の情報を用いることができる。

該パルスレーザ光１５０が照射されて結晶化されたシリコン膜１００は、結晶粒径が揃った結晶性に優れたものとなる。

[0036] なお、上記では、パルス幅の調整をパルスレーザ光の分割と遅延によって行うパルス幅調整手段１３で行っているが、複数のパルスレーザ発振装置で出力されたパルスレーザ光を同期をずらしてシリコン膜１００に照射することでパルス幅を調整することができる。

図３は、当該装置構成を示す図であり、以下に説明する。なお、前記実施形態と同様の構成については同一の符号を付して説明する。

レーザアニール装置は、図３に示すように、処理室２を備えており、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、その上部に基台４を備えている。基台４上には、基板配置台５が設けられている。アニール処理

時には、該基板配置台５上に処理対象であるシリコン膜１００が設置される。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、制御部８で制御される。

処理室２外部には、パルスレーザ発振装置１０が設置されている。パルスレーザ発振装置１０でパルス発振されて出力されるパルスレーザ光１５は、必要に応じて減衰器１１でエネルギー密度が調整され、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伝送手段１２でビーム整形や偏向がなされ、処理室２内のシリコン膜１００に照射される。

[0037] また、処理室２外部には、同じくパルスレーザ光２５を発生するパルスレーザ発振装置２０が設置されている。パルスレーザ発振装置２０でパルス発振されて出力されるパルスレーザ光２５は、必要に応じて減衰器２１でエネルギー密度が調整され、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伝送手段２２でビーム整形や偏向がなされ、処理室２内のシリコン膜１００に照射される。

上記装置では、制御部８で装置全体が制御されており、前記パルスレーザ発振装置１０を駆動するレーザ電源９、前記パルスレーザ発振装置２０を駆動するレーザ電源１９にそれぞれ制御可能に接続され、それぞれのパルスレーザ発振装置１０、２０の出力を設定する。また、制御部８は、アテニュエータ１１、アテニュエータ２１に制御可能に接続され、それぞれの減衰率を設定する。したがって、レーザ電源９、１９、アテニュエータ１１、２１および制御部８は、本発明のエネルギー調整手段を構成する。

[0038] 上記レーザアニール装置では、図３に示すように、パルスレーザ光１５とパルスレーザ光２５とが出力され、シリコン膜１００上で複合照射される。この際のパルスレーザ光の同期をずらすことで、結果的にはシリコン膜１００に照射されるパルスレーザ光のパルス幅を調整することができる。

パルス幅が調整されたパルスレーザ光において、上記有効パワー密度が３×10^{12}から１．５×10^{12}の範囲内になるように設定されてシリコン膜１００に照射される。

[0039] また、上記各実施形態では、パルスレーザ発振装置から出力されたパルスレーザ光を用いるものとして説明をしたが、レーザ光連続発振装置から出力された連続レーザ光を切り出して、擬似的にパルス状としたレーザ光を用いることも可能である。

実施例 1

[0040] 次に本発明の実施例と比較例とを比較しつつ説明する。

上記実施形態のレーザアニール装置（図１）を用いて、ガラス製の基板の表面に常法によって形成されたアモルファスシリコン薄膜５０ｎｍにパルスレーザ光を照射する実験を行なった。

該実験では、パルスレーザ光は、光伝送手段によって加工面で長方形となるように整形し、照射面においてエネルギー密度が８～４００ｍＪ／ｃｍ^2、パルス幅が２０～６００ｎｓの範囲にあるように設定して基板上のアモルファスシリコンに照射した。なお、アモルファスシリコン膜の吸収係数は、吸収係数＝４πｋ／波長と定義する。

（ｋ：減衰係数　非特許文献：D. E. Aspnes and J. B. Theeten, J. Electrochem. Soc. 127, 1359 (1980)参照）

[0041] 上記パルスレーザ光の照射によってアモルファスシリコンは加熱され、結晶シリコンへと変化した。この照射を行なった薄膜を顕微鏡とＳＥＭ写真により評価した。ＳＥＭ写真（図面代用写真）は図４～図６に示した。

なお、以下で説明する有効パワー密度は、いずれも下記式で算出した。また、算出結果を図７に示した。該図には、参考データとして従来のレーザアニールにおける有効パワー密度を記載した。図中○印は以下の実施例に相当し、×印は、以下の比較例に相当する。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^3））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^2）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$）　…（式）

[0042]（実施例１）

レーザ発振装置にＸｅＣｌエキシマレーザを用いて、有効パワー密度を２．０×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１に示すよう

に、均一でムラのない結晶ができた。

（実施例２）

レーザ発振装置にＸｅＣｌエキシマレーザを用いて、有効パワー密度を２．７×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真２に示すように、均一でムラのない結晶ができた。

（実施例３）

レーザ発振装置にＹＡＧ３倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を１．８×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真３に示すように、均一でムラのない結晶ができた。

（実施例４）

レーザ発振装置にＹＡＧ３倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を２．５×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真４に示すように、均一でムラのない結晶ができた。

（実施例５）

レーザ発振装置にＹＡＧ２倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を１．６×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真５に示すように、均一でムラのない結晶ができた。

（実施例６）

レーザ発振装置にＹＡＧ２倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を２．４×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真６に示すように、均一でムラのない結晶ができた。

[0043] （比較例１）

レーザ発振装置にＸｅＣｌエキシマレーザを用いて、有効パワー密度を２．０×１０^{13}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真７に示すように、長軸重ねあわせ部で結晶状態の異なるムラのある結晶ができた。ＸＲＤ（Ｘ線回折）で表面解析をしたところほぼ全領域で溶融をしていた。

（比較例２）

レーザ発振装置にＸｅＣｌエキシマレーザを用いて、有効パワー密度を３

．５×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真８に示すように、長軸重ねあわせ部で結晶状態の異なるムラのある結晶ができた。ＸＲＤで表面解析をしたところ表層３ｎｍほど溶融をしていた。

（比較例３）

レーザ発振装置にＹＡＧ３倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を３．１×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真９に示すように、長軸重ねあわせ部で結晶状態の異なるムラのある結晶ができた。ＸＲＤで表面解析をしたところ表層８ｎｍほど溶融をしていた。

（比較例４）

レーザ発振装置にＹＡＧ３倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を３．５×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１０に示すように、長軸重ねあわせ部で結晶状態の異なるムラのある結晶ができた。ＸＲＤで表面解析をしたところ表層９ｎｍほど溶融をしていた。

（比較例５）

レーザ発振装置にＹＡＧ２倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を３．２×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１１に示すように、長軸短軸重ねあわせ部で結晶状態の異なるムラのある結晶ができた。

（比較例６）

レーザ発振装置にＸｅＣｌエキシマレーザを用いて、有効パワー密度を１．４×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１２に示すように、全体的にムラのある結晶となった。

（比較例７）

レーザ発振装置にＸｅＣｌエキシマレーザを用いて、有効パワー密度を１．３×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１３に示すように、全体的にムラのある結晶となった。

（比較例８）

レーザ発振装置にＹＡＧ３倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を１．４×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１４に示すよ

うに、全体的にムラのある結晶となった。

（比較例９）

レーザ発振装置にＹＡＧ３倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を０．９×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１５に示すように、全体的にムラのある結晶となった。

（比較例１０）

レーザ発振装置にＹＡＧ２倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を０．６×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１６に示すように、全体的にムラのある結晶となった。

（比較例１１）

レーザ発振装置にＹＡＧ２倍波固体レーザを用いて、有効パワー密度を１．４×１０^{12}に設定してパルスレーザ光の照射を行うと、写真１７に示すように、全体的にムラのある結晶となった。

[0044] 以上、上記実施形態および実施例に基づいて本発明の説明を行ったが、本発明は上記説明の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

[0045]

１ レーザアニール装置

２ 処理室

３ 走査装置

５ 基板配置台

８ 制御部

９ レーザ電源

１０ パルスレーザ発振装置

１１ アテニュエータ

１２ 光伝送手段

１３ パルス幅調整手段

１５ パルスレーザ光

１９　レーザ電源

２０　パルスレーザ発振装置

２１　アテニュエータ

２２　光伝送手段

２５　パルスレーザ光

１００　シリコン膜

１５０　パルスレーザ光

請求の範囲

[請求項1] パルスレーザ光を出力するパルスレーザ発振装置と、該パルスレーザ発振装置から出力された前記パルスレーザ光を伝送して半導体膜に照射する光伝送手段とを備え、

前記パルスレーザ光は、半導体膜照射面において、下記式で算出される有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記半導体膜に照射されるものであることを特徴とするレーザアニール装置。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^{3}））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^{2}）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$） …（式）

[請求項2] 連続レーザ光を出力する連続レーザ発振装置と、該連続レーザ発振装置から出力された連続レーザ光および該連続レーザ光から切り出されたパルスレーザ光を伝送して該パルスレーザ光を半導体膜に照射する光伝送手段と、前記連続レーザ光を前記伝送中に切り出して擬似的にパルス状にしてパルスレーザ光を生成するパルスレーザ光生成手段とを備え、

前記パルスレーザ光は、半導体膜照射面において、下記式で算出される有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記半導体膜に照射されるものであることを特徴とするレーザアニール装置。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^{3}））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^{2}）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$） …（式）

[請求項3] 前記パルスレーザ光のエネルギー密度を調整するエネルギー調整手段を有し、該エネルギー調整手段は、前記式で算出される前記有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記エネルギー密度が設定されていることを特徴とする請求項１または

２に記載のレーザアニール装置。

[請求項4] 前記エネルギー調整手段として、パルスレーザ光を所定の減衰率で減衰させて透過させるアテニュエータおよび前記レーザ発振装置の出力を調整する出力調整手段とを備え、該アテニュエータおよび前記出力調整手段は、前記式で算出される前記有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記減衰率および前記出力が設定されていることを特徴とする請求項３に記載のレーザアニール装置。

[請求項5] 前記パルスレーザ光のパルス幅を調整するパルス幅調整手段を備え、該パルス幅調整手段は、前記式で算出される前記有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように前記パルスレーザ光のパルス幅を調整するものであることを特徴とする請求項１～４のいずれかに記載のレーザアニール装置。

[請求項6] 前記半導体膜がシリコン半導体膜であり、前記エネルギー密度が１００～５００ｍＪ／ｃｍ^{2}、前記パルス幅が５０～５００ｎ秒であることを特徴とする請求項１～５のいずれかに記載のレーザアニール装置。

[請求項7] パルスレーザ光を半導体膜に照射して該半導体膜のレーザアニールを行うレーザアニール方法において、

前記パルスレーザ光のパルスエネルギー密度およびパルス幅を、照射面において下記式で算出される有効パワー密度が３×１０^{12}から１．５×１０^{12}の範囲内になるように設定をし、該設定がなされた前記パルスレーザ光を前記半導体膜に照射することを特徴とするレーザアニール方法。

有効パワー密度（Ｊ／（秒・ｃｍ^{3}））＝パルスエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^{2}）／パルス幅（秒）×半導体膜の吸収係数（ｃｍ$^{-1}$） …（式）