

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5576617号

(P5576617)

(45) 発行日 平成26年8月20日 (2014. 8. 20)

(24) 登録日 平成26年7月11日 (2014. 7. 11)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 27/12 (2006. 01)	HO 1 L 27/12 B
HO 1 L 21/02 (2006. 01)	HO 1 L 21/20
HO 1 L 21/20 (2006. 01)	HO 1 L 29/78 6 2 7 G
HO 1 L 29/786 (2006. 01)	HO 1 L 29/78 6 1 8 G
HO 1 L 21/336 (2006. 01)	HO 1 L 27/12 T
請求項の数 2 (全 28 頁) 最終頁に続く	

(21) 出願番号	特願2009-62728 (P2009-62728)	(73) 特許権者	000153878
(22) 出願日	平成21年3月16日 (2009. 3. 16)		株式会社半導体エネルギー研究所
(65) 公開番号	特開2009-260298 (P2009-260298A)		神奈川県厚木市長谷 3 9 8 番地
(43) 公開日	平成21年11月5日 (2009. 11. 5)	(72) 発明者	下村 明久
審査請求日	平成24年2月24日 (2012. 2. 24)		神奈川県厚木市長谷 3 9 8 番地 株式会社
(31) 優先権主張番号	特願2008-67295 (P2008-67295)		半導体エネルギー研究所内
(32) 優先日	平成20年3月17日 (2008. 3. 17)	(72) 発明者	古山 将樹
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		神奈川県厚木市長谷 3 9 8 番地 株式会社
			半導体エネルギー研究所内
		(72) 発明者	中島 基
			神奈川県厚木市長谷 3 9 8 番地 株式会社
			半導体エネルギー研究所内
		審査官	綿引 隆
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 単結晶半導体層の結晶性評価方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

単結晶半導体基板の表面から所定の深さの領域に形成された脆化層から分離され、絶縁層を介してベース基板上に固定された後、レーザ光が照射されて再単結晶化した単結晶半導体層に対し、

前記単結晶半導体層の深さ方向の炭素濃度分布を測定し、

前記炭素濃度分布が極大を有するときは、前記単結晶半導体層の結晶性が優れると判定することを特徴とする単結晶半導体層の結晶性評価方法。

【請求項 2】

単結晶半導体基板の表面から所定の深さの領域に形成された脆化層から分離され、絶縁層を介してベース基板上に固定された後、レーザ光が照射されて再単結晶化した単結晶半導体層に対し、

前記単結晶半導体層の深さ方向の炭素濃度分布及び水素濃度分布を測定し、

前記炭素濃度分布が極大を有し、且つ前記水素濃度分布がショルダーピークを有さないときは、前記単結晶半導体層の結晶性が優れると判定することを特徴とする単結晶半導体層の結晶性評価方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、単結晶半導体膜の結晶性評価方法及びこれを用いた半導体基板の作製方法に関

10

20

する。

【背景技術】

【0002】

近年、バルク状のシリコンウエハに代わり、絶縁表面に薄い単結晶半導体膜が存在するSOI (Silicon on Insulator) 基板を使った集積回路が開発されている。絶縁膜上に形成された薄い単結晶シリコン層の特長を活かすことで、集積回路中のトランジスタ同士を完全に分離して形成することができ、またトランジスタを完全空乏型とすることができるため、高集積、高速駆動、低消費電圧など付加価値の高い半導体集積回路が実現できる。

【0003】

SOI 基板を製造する方法の1つに、水素イオン注入と剥離を組み合わせた、水素イオン注入剥離法が知られている。水素イオン注入剥離法によるSOI 基板の作製方法の概要を以下に説明する。まず、剥離用基板となるシリコンウエハにイオン注入法を用いて水素イオンを注入することにより表面から所定の深さにイオン注入層を形成する。次に、酸化シリコン膜を介して、水素イオンを注入したシリコンウエハを別のシリコンウエハに接合（ボンディング）させる。その後、熱処理を行うことにより、イオン注入層を劈開面として水素イオンを注入した剥離用のシリコンウエハが薄膜状に剥離し、被剥離用のシリコンウエハ上に単結晶シリコン膜を形成することができる。また、水素イオン注入剥離法はスマートカット（登録商標）法と呼ぶこともある。

【0004】

また、このような水素イオン注入剥離法を用いて単結晶シリコン膜をガラスからなるベース基板上に形成する方法が提案されている（例えば、特許文献1及び2参照）。特許文献1では、イオン注入によって形成された欠陥層や、剥離面の数nm～数十nmの段差を除去するために、剥離面を機械研磨している。また、特許文献2では、剥離工程後、レーザー光を照射して、半導体薄膜層の結晶品質を改善するとともに、半導体薄膜層と透明な絶縁基板を強固に結合させている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開平11-097379号公報

【特許文献2】特開2005-252244号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

水素イオン注入剥離法を用いて単結晶半導体膜を形成する場合、イオンの注入により、単結晶半導体膜の欠陥が増大する。単結晶半導体膜に欠陥が多数存在する場合には、例えば、ゲート絶縁膜との界面に欠陥の準位が形成されやすくなるため、これを用いて作製した半導体素子の特性は良好なものではない。

【0007】

従来、シリコンウエハに貼り付けられた半導体膜の結晶欠陥は、高温（例えば800℃以上）の温度で加熱することで除去されてきた。しかしながら、ベース基板としてガラス基板を用いると、大面積で安価なSOI 基板を作製することが可能になるものの、歪み点が700℃以下と耐熱性が低いため、単結晶半導体膜の結晶欠陥の除去には、このような高温プロセスは用いることができない。

【0008】

特許文献2には、剥離後の単結晶半導体膜にレーザーを照射して、単結晶半導体膜の結晶性を改善する方法が提案されている。しかしながら、レーザー光の照射強度が小さすぎる場合には、欠陥の回復が十分でなく、また、レーザー光の照射強度が大きすぎる場合には、単結晶半導体膜が微結晶化し、結晶性が低下してしまうという問題が生じる。このため、単結晶半導体膜に照射するレーザー光の照射強度を最適化する必要があるが、最適なレーザー光の

10

20

30

40

50

照射強度は、単結晶半導体膜の膜厚や、照射雰囲気等によって変化するため、最適なレーザ光の照射強度を一律に決定することは容易ではない。

【0009】

上述した問題に鑑み、本発明の一態様は、最適なレーザ光の照射条件を設定するために必要な、単結晶半導体膜の結晶性の評価方法を提供することを課題の一とする。

【0010】

また、本発明の一態様は、レーザ光の照射条件を最適化することで、高性能な半導体素子を形成することを可能とする半導体基板及びその作製方法を提供することを課題の1つとする。

【課題を解決するための手段】

10

【0011】

本発明の結晶性評価方法の一は、単結晶半導体基板の表面から所定の深さの領域に形成された脆化層から分離され、絶縁層を介してベース基板上に固定された後、レーザ光が照射されて再単結晶化した単結晶半導体層に対し、単結晶半導体層の深さ方向の炭素濃度分布を測定し、炭素濃度が極大を有するときは、単結晶半導体層の結晶性が優れると判定することを特徴とする。

【0012】

また、本発明の結晶性評価方法の一は、単結晶半導体基板の表面から所定の深さの領域に形成された脆化層から分離され、絶縁層を介してベース基板上に固定された後、レーザ光が照射されて再単結晶化した単結晶半導体層に対し、単結晶半導体層の深さ方向の炭素濃度及び水素濃度分布を測定し、炭素濃度が極大を有し、且つ水素濃度が炭素濃度の極大に対応するショルダーピークを有さないときは、単結晶半導体層の結晶性が優れると判定することを特徴とする。

20

【0013】

なお、本発明の一態様において、接合層は単結晶半導体基板の表面だけでなく、ベース基板の表面にも形成することができる。また、接合層は、ベース基板の表面のみに形成してもよい。

【0014】

また、本明細書においてショルダーピークとは、単結晶半導体層の深さ方向の濃度分布（プロファイル）において、絶縁層との界面付近で見られるショルダーを指す。

30

【発明の効果】

【0015】

本発明の一態様を用いることにより、簡便な方法で単結晶半導体膜の結晶性を評価することができる。また、この評価方法を用いることにより、レーザ光の照射条件の最適化が容易となり、結晶性の良好な単結晶半導体層を効率よく作製することができる。

【0016】

したがって、本発明の一態様に係る半導体基板を用いて高性能な半導体素子を効率よく形成することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

40

【図1】レーザ光の照射工程の一例について示す図。

【図2】単結晶半導体層の深さ方向の元素濃度分布を示す図。

【図3】溶融状態または結晶状態における水素原子及び炭素原子の拡散係数を示す図。

【図4】半導体基板の作製工程を示す図。

【図5】半導体装置の作製工程を示す図。

【図6】半導体装置の作製工程を示す図。

【図7】半導体装置の平面図及び断面図。

【図8】半導体装置を用いた電子機器を示す図。

【図9】半導体装置を用いた電子機器を示す図。

【図10】再結晶化後の単結晶半導体層表面をEBS P法にて測定した図。

50

【図 1 1】再結晶化後の単結晶半導体層のライフタイム評価測定結果を示すグラフ。

【図 1 2】単結晶半導体層を用いて作製した T F T の S 値を測定した確率統計分布図。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、本発明の実施の態様について図面を用いて詳細に説明する。但し、本発明は以下の説明に限定されず、本発明の趣旨及びその範囲から逸脱することなくその形態及び詳細を様々に変更し得ることが可能である。従って、本発明は以下に示す実施の形態の記載内容に限定して解釈されるものではない。なお、以下に説明する本発明の構成において、同じものを指す符号は異なる図面間で共通して用いる場合がある。

【0019】

(実施の形態 1)

本実施の形態では、本発明の結晶性評価方法について図 1 乃至図 3 を参照して説明する。

【0020】

図 1 は、モニタ基板に設けられた単結晶半導体層 1 1 2 の複数の領域にレーザ光 1 1 3 を照射する工程を示している。図 1 において、絶縁層 1 1 1 を介してベース基板 1 1 0 上に、単結晶半導体基板から分離された単結晶半導体層 1 1 2 が設けられている。図 1 では、単結晶半導体層 1 1 2 の領域 A 乃至領域 C の 3 領域に対して、互いに異なるエネルギー密度条件にてレーザ光 1 1 3 を照射するものとする。なお、上述したように、単結晶半導体基板から分離された後の単結晶半導体層 1 1 2 は、平坦性及び結晶性が損なわれており、結晶欠陥が増大している。なお、単結晶半導体基板としては、例えば、単結晶のシリコン基板やゲルマニウム基板、ガリウムヒ素やインジウムリン等の化合物半導体基板を用いることができる。本実施の形態では、単結晶半導体基板として、シリコンウエハを用いるものとする。

【0021】

レーザ光 1 1 3 を照射すると、単結晶半導体層 1 1 2 がレーザ光 1 1 3 を吸収し、レーザ光 1 1 3 が照射された部分が温度上昇する。この部分の温度が単結晶半導体層 1 1 2 の融点以上の温度になると、単結晶半導体層 1 1 2 が熔融して欠陥を修復することができる。レーザ光 1 1 3 が照射されなくなると、単結晶半導体層 1 1 2 の熔融部分の温度は下がり、やがて、熔融部分は凝固し、再結晶化（再単結晶化）する。これによって、単結晶半導体層の結晶性を回復させることができる。また、同時に、単結晶半導体層表面の平坦性を回復させることができる。なお、単結晶半導体層 1 1 2 を熔融させるためのレーザ光は、単結晶半導体層 1 1 2 の上方から照射される。

【0022】

ベース基板 1 1 0 としては、例えばガラス基板を用いることができる。本実施の形態においては、厚さ 0.7 mm のガラス基板を用いるものとする。また、絶縁層 1 1 1 は、例えば、酸化シリコン膜、酸化窒化シリコン膜、窒化シリコン膜、窒化酸化シリコン膜等の単層、又はこれらを積層させた膜を用いることができる。これらの膜は、熱酸化法、CVD 法又はスパッタリング法を用いて形成することができる。また、CVD 法を用いて絶縁層 1 1 1 を形成する場合には、絶縁層 1 1 1 として、テトラエトキシシラン（略称；TEOS：化学式 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ）等の有機シランを用いて化学気相成長法により作製される酸化シリコン膜を用いることができる。また、他にもシリコンカーバイド（SiC）膜等の Si を主成分とする絶縁膜を用いてもよい。なお、絶縁層 1 1 1 は、ベース基板 1 1 0 側からナトリウムが拡散することを防止できるバリア層を含むことが好ましい。バリア層として窒化酸化シリコン膜、窒化シリコン膜を用いることができる。本実施の形態において絶縁層 1 1 1 は、ベース基板 1 1 0 側から順に、酸化シリコン膜、窒化酸化シリコン膜、酸化窒化シリコン膜がそれぞれ 50 nm 積層された構成とする。

【0023】

なお、酸化窒化シリコン膜とは、その組成として、窒素よりも酸素の含有量が多いものであって、ラザフォード後方散乱法（RBS：Rutherford Backscatt

10

20

30

40

50

ering Spectrometry) 及び水素前方散乱法 (HFS: Hydrogen Forward Scattering) を用いて測定した場合に、濃度範囲として酸素が 50～70 原子%、窒素が 0.5～15 原子%、Si が 25～35 原子%、水素が 0.1～10 原子% の範囲に含まれるものをいう。また、窒化酸化シリコン膜とは、その組成として、酸素よりも窒素の含有量が多いものであって、RBS 及び HFS を用いて測定した場合に、濃度範囲として酸素が 5～30 原子%、窒素が 20～50 原子%、Si が 25～35 原子%、水素が 15～30 原子% の範囲に含まれるものをいう。但し、酸化窒化シリコンまたは窒化酸化シリコンを構成する原子の合計を 100 原子% としたとき、窒素、酸素、Si 及び水素の含有比率が上記の範囲内に含まれるものとする。

【0024】

レーザ光 113 を発振するレーザ発振器は、連続発振レーザ、疑似連続発振レーザ及びパルス発振レーザのいずれでもよいが、パルス発振レーザを用いることが好ましい。これは瞬間的に高エネルギーのパルスレーザ光を発振することができ、熔融状態を作り出すことが容易となるためである。発振周波数は、1 Hz 以上 10 MHz 以下程度とすることが好ましい。

【0025】

また、レーザ発振器としては、例えば、KrF レーザなどのエキシマレーザ、Ar レーザ、Kr レーザ等の気体レーザがある。その他、固体レーザとして、YAG レーザ、YVO₄ レーザ、YLF レーザ、YAlO₃ レーザ、GdVO₄ レーザ、KGW レーザ、KYW レーザ、アレキサンドライトレーザ、Ti:サファイアレーザ、Y₂O₃ レーザ等がある。なお、エキシマレーザはパルス発振レーザであるが、YAG レーザなどの固体レーザには、連続発振レーザにも、疑似連続発振レーザにも、パルス発振レーザにもなるものがある。

【0026】

本実施の形態では、レーザ発振器として XeCl エキシマレーザを用い、レーザ光 113 の波長は、308 nm とした。また、単結晶半導体層 112 の領域 A 乃至領域 C に対して、それぞれ異なるエネルギー密度にてレーザ光 113 を照射する。具体的には、領域 A に対しては条件 A のエネルギー密度で、領域 B に対しては条件 B のエネルギー密度で、領域 C に対しては条件 C のエネルギー密度でレーザ光 113 を照射する。条件 A 乃至条件 C は、以下の通りである。

条件 A. 568 mJ/cm²

条件 B. 584 mJ/cm²

条件 C. 600 mJ/cm²

【0027】

照射されるレーザ光 113 のエネルギー密度に応じて、レーザ光を照射後のそれぞれの領域の単結晶半導体層 112 の元素濃度の分布が特徴的なものになる。図 2 に、上記条件 A 乃至条件 C の照射条件にてレーザ光 113 を照射した単結晶半導体層 112 のそれぞれの領域の深さ方向の濃度分布の一例を示す。図 2 (A) において、横軸は単結晶半導体層 112 の表面からの深さ (nm) を示し、縦軸は炭素濃度 (任意単位) を示す。また、図 2 (B) において、横軸は単結晶半導体層 112 の表面からの深さ (nm) を示し、縦軸は水素濃度 (任意単位) を示す。また、図 2 (A) 及び (B) において、点線で示したグラフは、レーザ光 113 を照射する前の、炭素濃度または水素濃度の分布を示す。なお、元素の深さ方向の濃度分布の分析方法としては、2 次イオン質量分析法 (SIMS; Secondary Ion Mass Spectrometry) を好ましく用いることができる。

【0028】

図 2 (A) より、レーザ光を照射した単結晶半導体層は、照射時に大気中の炭素が膜中に取り込まれる等によって、未照射の単結晶半導体層と比較して炭素濃度が増加する。また、条件 A 及び条件 B にてレーザ光を照射した場合には、単結晶半導体層 112 中の炭素濃度の分布において極大を有する。すなわち、条件 A 及び B にて照射した単結晶半導体層に

10

20

30

40

50

は、膜中で濃度変化が見られ、表面側の炭素濃度は絶縁層との界面側の炭素濃度よりも増加している。また、当該極大は、条件Aでは絶縁層との界面から20nm付近の領域に存在し、条件Bでは絶縁層との界面から10nm付近の領域に存在している。つまり、条件Aと比較してエネルギー密度の大きい条件Bの方が、より絶縁層111との界面に近い領域において極大が出現している。一方、条件Cにてレーザ光を照射した場合には、単結晶半導体層112中の炭素濃度の分布において極大は見られない。

【0029】

また、図2(B)より、レーザ光を照射した単結晶半導体層112は、照射時に単結晶半導体層中に含まれる水素が大気中または絶縁層へと放出される為に、未照射の場合と比較して単結晶半導体層112表面側の水素濃度が低減する。また、条件Aにてレーザ光を照射した場合には、単結晶半導体層112における水素濃度はショルダーピークを有している。すなわち、条件Aにて照射した単結晶半導体層には、膜中で水素濃度の緩やかな濃度変化が見られる。また、当該ショルダーピークは、炭素濃度の極大の位置と概ね対応した位置に見られている。一方、条件B及びCにてレーザ光を照射した場合には、ショルダーピークは確認できない。

【0030】

以上をまとめると、次のようになる。

条件Aにてレーザ光を照射した単結晶半導体層の領域Aでは、単結晶半導体層の元素の濃度分布において、炭素濃度が極大を有している。また、当該炭素濃度の極大と対応する水素濃度のショルダーピークを有している。

条件Bにてレーザ光を照射した単結晶半導体層の領域Bでは、単結晶半導体層の元素の濃度分布において、炭素濃度が極大を有している。また、当該炭素濃度の極大と対応する水素濃度のショルダーピークは有さない。

条件Cにてレーザ光を照射した単結晶半導体層の領域Cでは、単結晶半導体層の元素の濃度分布において、炭素濃度の極大及び水素濃度のショルダーピーク共に確認できない。

【0031】

本発明者らは、レーザ光のエネルギー密度の違いで生じる再結晶化後の単結晶半導体層中の炭素原子及び水素原子の濃度差が、レーザ光照射時の単結晶半導体層の熔融状態に依存すると考察した。つまり、レーザ光を照射した際の単結晶半導体層が熔融状態であるか、または結晶状態であるかによって、単結晶半導体層（本実施の形態においてはシリコン層）中の水素原子または炭素原子の挙動が変化するために、固液界面付近において濃度差が生じる。

【0032】

図3に、古典分子動力学法を用いて計算した結晶状態及び熔融状態における、シリコン中の炭素原子及び水素原子の拡散係数を示す。図3において、横軸は温度(°C)を示し、縦軸は炭素原子又は水素原子の拡散係数(cm^2/s)を示している。また、黒塗り丸印が水素原子の拡散係数を示し、白塗りの丸印が炭素原子の拡散係数を示す。シリコンの融点は1410°Cであるため、図3において1410°C未満の領域では、結晶状態での原子の拡散係数を表し、1410°C以上の領域では、熔融状態での原子の拡散係数を表している。

【0033】

図3より、結晶シリコン中の炭素原子の拡散係数は、 $1 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ 以下と著しく小さく、炭素原子は結晶シリコン中で殆ど拡散しない。一方で、シリコンが熔融した状態における炭素原子の拡散係数は、結晶シリコン中と比較して 10^4 倍以上上昇している。レーザ光を照射した単結晶半導体層が、表面から下地の絶縁層との界面まで熔融され、液体状態となっている（以下、完全熔融状態）場合には、単結晶半導体層の膜厚方向全体で概略一様の拡散係数を有するため、炭素濃度も均一となる。一方、レーザ光を照射した単結晶半導体層のうち、上層が熔融して液相となり、下層は溶けずに固相の単結晶半導体のまま（以下、部分熔融状態）の場合、上層と下層では 10^4 倍以上の拡散係数の相違を有しており、この拡散係数の違いによって固液界面近傍の領域で炭素濃度の濃度差が現れ

る。

【0034】

また、図3より、結晶シリコン中の水素原子の拡散係数は、最大で $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であるから、結晶シリコン中の水素原子は表面近傍の原子の一部が大気中に放出されるのみで、膜全体の水素原子の濃度変化は小さいといえる。一方、シリコンが溶融した状態における水素原子の拡散係数は、結晶状態と比較して10倍以上であり、大気中への放出が起こりやすい。レーザー光を照射した単結晶半導体層が完全溶融状態の場合、表面付近の水素原子は大気中に放出されやすくなり、下地の絶縁層付近の水素原子は直接大気中に放出はされないが、表面付近と絶縁層付近の層の勾配を小さくし、均一化する様に移動する。そのため、単結晶半導体層全体の水素原子濃度は、レーザー光を照射する前よりも大きく減少する。一方、レーザー光を照射した単結晶半導体膜が部分溶融状態の場合、表面付近の水素原子は拡散係数が大きいため、大気中に放出され濃度が減少するが、固相部分の水素原子は拡散係数が小さいため、液相と比較して濃度変化は小さい。そのため、単結晶半導体層全体の水素原子濃度が均一化せず、濃度差が現れる。

10

【0035】

したがって、再結晶化後の単結晶半導体層の水素原子及び炭素原子の濃度分布より、レーザー光を照射した際の単結晶半導体層の溶融状態を判定することができる。図2に示したSIMS測定結果では、条件Aと条件Bでは炭素濃度の濃度差（極大）を有し、条件Cでは極大を有さないため、条件A及びBが部分溶融状態、条件Cが完全溶融状態であることがわかる。また、炭素原子は結晶状態では殆ど拡散しないため、炭素濃度の濃度差が現れる領域付近、すなわち、極大付近が固液界面と近似できる。

20

【0036】

また、水素原子は炭素原子よりも拡散係数が大きく、部分溶融状態では、水素原子は溶融された領域と、当該領域からの熱伝導により水素ガスが放出する温度以上に加熱された領域と、で濃度が減少する。従って、炭素原子と比較して濃度の変化は緩やかなショルダーピークとなり、また、その位置は固液界面よりも下方（絶縁層との界面方向）にずれる。なお、条件Bのように固液界面が絶縁膜との界面に近づく、と、単結晶半導体層の全体で水素ガスが放出する温度以上に加熱されて、単結晶半導体層全体で水素原子が概略均一に拡散する為、濃度差が現れなくなる。単結晶半導体層の濃度分布において炭素濃度が極大を有し、当該炭素濃度の極大と対応する水素濃度のショルダーピークは有さない場合、レーザー光を照射した際の単結晶半導体層は、下部絶縁層との界面近傍まで溶融した部分溶融状態であるといえることができる。

30

【0037】

以下、本明細書においては、再結晶化後の単結晶半導体層が、炭素濃度の極大と対応する水素濃度のショルダーピークを有する部分溶融状態を、狭義の部分溶融状態とし、再結晶化後の単結晶半導体層が、炭素濃度の極大を有し、且つ当該極大と対応する水素濃度のショルダーピークを有さない部分溶融状態を準完全溶融状態として表記するものとする。準完全溶融状態の単結晶半導体層は、下部絶縁層との界面近傍まで溶融している。例えば、本実施の形態においては、条件Aにてレーザー光を照射した場合の単結晶半導体層の溶融状態が狭義の部分溶融状態であり、条件Bにてレーザー光を照射した場合の単結晶半導体層の溶融状態が準完全溶融状態である。

40

【0038】

レーザー光の照射により単結晶半導体層の欠陥を低減させる場合には、狭義の部分溶融状態、又は、準完全溶融状態とすることが好ましい。完全溶融状態とした場合には、液相となった後の無秩序な核発生により、単結晶半導体層の一部の領域が微結晶化し、結晶性が低下するためである。

【0039】

一方で、狭義の部分溶融状態とした場合には、溶融されていない固体の領域から結晶成長が進行するため、結晶性を保ったまま欠陥を低減することができる。また、準完全溶融状態とした場合には、下部絶縁層との界面付近において、溶融していない固体が、わずかに

50

残存しており、これを種結晶として結晶成長が進行する。このため、下部絶縁層との界面付近からの固化により、結晶性を低下させることなく欠陥を低減することができる。単結晶半導体層を準完全熔融状態とすることで、結晶欠陥が単結晶半導体層と下部絶縁層との界面付近まで存在する場合であっても、当該欠陥を修復し、単結晶半導体層の結晶性を回復させることが可能になる。

【0040】

上述の半導体基板における単結晶半導体層の欠陥を低減させ、結晶性を向上させるという目的においては、レーザ光を照射した単結晶半導体層が部分熔融状態のとき、単結晶半導体層の結晶性が良好であり、準完全熔融状態のときに特に良好である。すなわち、レーザ光を照射した後の単結晶半導体層の深さ方向の濃度の分布において、炭素濃度が極大を有するときは、単結晶半導体層の結晶性が優れており、炭素濃度が極大を有し、且つ、水素濃度が当該極大に対応するショルダーピークを有さないときは、単結晶半導体層の結晶性が特に優れているといえることができる。また、炭素濃度の極大の位置は、部分熔融状態における固液界面と近似することができるため、極大が下部絶縁層との界面から20nm以内好ましくは10nm以内の領域に存在する場合、単結晶半導体層の結晶性は良好であるといえることができる。

10

【0041】

以上示したように、再結晶化後の単結晶半導体層の深さ方向の元素の濃度分布を測定し、単結晶半導体層の熔融状態を判定することで、極めて簡便な方法で再結晶化後の単結晶半導体層の結晶性を評価することができる。

20

【0042】

また、本発明に係る評価方法を用いることで、レーザ光の照射条件の最適化が容易となるため、結晶性の良好な単結晶半導体層を効率よく作製することができる。

【0043】

例えば、 n ($n \geq 2$) 層の単結晶半導体層をレーザ処理して n ($n \geq 2$) 枚の半導体基板を作製する場合、 n 枚のうち1枚をモニタ基板として、単結晶半導体層の複数の領域に互いに異なるエネルギー密度条件にてレーザ光を照射した後、本実施の形態で示した結晶性評価方法を用いて再結晶化後の単結晶半導体層の結晶性を評価する。そして、その評価方法を用いて検出した最適なレーザ光の照射条件を用いて $(n-1)$ 枚にレーザ光を照射する。これによって、結晶性の良好な単結晶半導体層を有する $(n-1)$ 枚の半導体基板を効率よく作製することが可能となる。

30

【0044】

また、最適なレーザ光の照射強度を選択することで、半導体基板の作製工程において単結晶半導体層が微結晶化した不良基板の発生を抑制することが可能となる。よって、良好な単結晶半導体層を有する半導体基板を低いコストで作製することができる。

【0045】

なお、本実施の形態は他の実施の形態と自由に組み合わせることができる。

【0046】

(実施の形態2)

本実施の形態では、実施の形態1の評価方法を用いた半導体基板の作製方法について、図4を参照して説明する。

40

【0047】

はじめに、 n ($n \geq 2$) 枚のベース基板110を用意する(図4(A)参照)。ベース基板110には、液晶表示装置などに使用されている透光性を有するガラス基板を好ましく用いることができる。ガラス基板としては、歪み点が580℃以上680℃以下(好ましくは、600℃以上680℃以下)であるものを用いると良い。また、ガラス基板は無アルカリガラス基板であることが好ましい。無アルカリガラス基板には、例えば、アルミノシリケートガラス、アルミノホウケイ酸ガラス、バリウムホウケイ酸ガラスなどのガラス材料が用いられている。

【0048】

50

なお、ベース基板110としては、ガラス基板の他、セラミック基板、石英基板、サファイア基板などの絶縁体でなる基板、珪素などの半導体でなる基板、金属やステンレスなどの導電体でなる基板などを用いることもできる。

【0049】

本実施の形態においては示さないが、ベース基板110の表面に絶縁層を形成しても良い。該絶縁層を設けることにより、ベース基板110に不純物（アルカリ金属やアルカリ土類金属など）が含まれている場合には、当該不純物が半導体層へ拡散することを防止できる。絶縁層は単層構造でも良いし積層構造でも良い。絶縁層を構成する材料としては、酸化珪素、窒化珪素、酸化窒化珪素、窒化酸化珪素などを挙げることができる。

【0050】

次に、 n ($n \geq 2$) 枚の単結晶半導体基板100を用意する。単結晶半導体基板100としては、例えば、シリコン、ゲルマニウム、シリコンゲルマニウム、炭化シリコンなどの第4属元素でなる単結晶半導体基板を用いることができる。もちろん、ガリウムヒ素、インジウムリンなどの化合物半導体でなる基板を用いてもよい。本実施の形態においては、単結晶半導体基板100として、単結晶シリコン基板を用いることとする。単結晶半導体基板100の形状やサイズに制限は無いが、例えば、8インチ(200mm)、12インチ(300mm)、18インチ(450mm)といった円形の半導体基板を、矩形に加工して用いることができる。なお、本明細書において、単結晶とは、結晶構造が一定の規則性を持って形成されており、どの部分においても結晶軸が同じ方向を向いているものをいう。つまり、欠陥の多少については問わないものとする。

【0051】

単結晶半導体基板100を洗浄した後、単結晶半導体基板100表面に絶縁層を形成する。絶縁層を設けない構成とすることもできるが、後のイオン打ち込みの際の単結晶半導体基板100の汚染及び表面の損傷を防ぐためには、絶縁層を設けることが好ましい。

【0052】

次に、上記絶縁層を介して、電界で加速されたイオンでなるイオンビームを単結晶半導体基板100に照射し、単結晶半導体基板100の表面から所定の深さの領域に、脆化層102を形成する。脆化層102が形成される領域の深さは、イオンビームの加速エネルギーとイオンビームの入射角によって制御することができる。ここで、脆化層102は、イオンの平均侵入深さと同程度の深さの領域に形成されることになる。

【0053】

上述の脆化層102が形成される深さにより、単結晶半導体基板100から分離される半導体層の厚さが決定される。脆化層102が形成される深さは、単結晶半導体基板100の表面から50nm以上500nm以下であり、好ましくは50nm以上200nm以下である。

【0054】

イオンを単結晶半導体基板100に打ち込む際には、イオン注入装置又はイオンドーピング装置を用いることができる。イオン注入装置では、ソースガスを励起してイオン種を生成し、生成されたイオン種を質量分離して、所定の質量を有するイオン種を被処理物に注入する。イオンドーピング装置は、プロセスガスを励起してイオン種を生成し、生成されたイオン種を質量分離せずに被処理物に打ち込む。なお、質量分離装置を備えているイオンドーピング装置では、イオン注入装置と同様に、質量分離を伴うイオンの注入を行うこともできる。本明細書において、イオン注入装置又はイオンドーピング装置のいずれか一方を特に用いる必要がある場合にのみそれを明記し、特に明記しないときは、いずれの装置を用いてイオンの打ち込みを行っても良いこととする。

【0055】

イオンドーピング装置を用いる場合のイオンの打ち込み工程は、例えば、以下の条件で行うことができる。

- ・加速電圧 10kV以上100kV以下（好ましくは30kV以上80kV以下）
- ・ドーズ量 1×10^{16} ions/cm² 以上 4×10^{16} ions/cm² 以下

10

20

30

40

50

・ビーム電流密度 $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上（好ましくは $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上、より好ましくは $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上）

【0056】

イオンドーピング装置を用いる場合、イオンの打ち込み工程のソースガスには水素を含むガスを用いることができる。該ガスを用いることによりイオン種として H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ を生成することができる。該ガスをソースガスとして用いる場合には、 H_3^+ を多く打ち込むことが好ましい。具体的には、イオンビームに、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ の総量に対して H_3^+ イオンが70%以上含まれるようにすることが好ましい。また、 H_3^+ イオンの割合を80%以上とすることがより好ましい。このように H_3^+ の割合を高めておくことで、脆化層102に $1 \times 10^{20} \text{ atoms}/\text{cm}^3$ 以上の濃度で水素を含ませることが可能である。これにより、脆化層102からの剥離が容易になる。また、 H_3^+ イオンを多く打ち込むことで、 H^+ 、 H_2^+ を打ち込むよりもイオンの打ち込み効率が向上する。つまり、打ち込みにかかる時間を短縮することができる。

10

【0057】

イオン注入装置を用いる場合には、質量分離により、 H_3^+ イオンが注入されるようにすることが好ましい。もちろん、 H_2^+ を注入してもよい。ただし、イオン注入装置を用いる場合には、イオン種を選択して注入するため、イオンドーピング装置を用いる場合と比較して、イオン打ち込みの効率が低下する場合がある。

【0058】

上記の脆化層102を形成した後、絶縁層を除去し、新たに絶縁層111を形成する（図4（B）参照）。ここで、絶縁層を除去するのは、上記のイオン打ち込みの際に、絶縁層が損傷している可能性が高いためである。なお、絶縁層の損傷が問題とならない場合には絶縁層を除去する必要はない。

20

【0059】

絶縁層111は、貼り合わせにおけるボンディング（接合）を形成する層であるから、その表面は、高い平坦性を有していることが好ましい。このような絶縁層111としては、例えば、有機シランガスを用いて化学気相成長法により形成される酸化珪素膜を用いることができる。なお、本実施の形態においては絶縁層111を単層構造としたが、2層以上の積層構造としても良い。

【0060】

また、絶縁層111は、単結晶半導体基板100を、酸化性雰囲気下において熱処理することにより形成してもよい。熱酸化処理は、酸化性雰囲気中にハロゲンを添加した酸化を行うことが好ましい。ハロゲンを添加して熱酸化を行うことにより形成された絶縁層中にはハロゲンが含まれており、ハロゲンは $1 \times 10^{16} \text{ atoms}/\text{cm}^3$ 以上 $2 \times 10^{21} \text{ atoms}/\text{cm}^3$ 以下の濃度で含まれることにより金属等の不純物を捕獲して単結晶半導体基板100の汚染を防止する保護膜としての機能を発現させることができる。

30

【0061】

その後、上記のn枚のベース基板110とn枚の単結晶半導体基板100とをそれぞれ貼り合わせる（図4（C）参照）。具体的には、ベース基板110及び絶縁層111の表面を超音波洗浄などの方法で洗浄した後、ベース基板110の表面と絶縁層111の表面とが接触するように配置し、ベース基板110の表面と絶縁層111の表面とでボンディング（接合）が形成されるように加圧処理を施す。ボンディングの形成には、ファン・デル・ワールス力や水素結合が関与しているものと考えられている。なお、1枚のベース基板上に、2枚以上の単結晶半導体基板を貼り合わせても構わない。

40

【0062】

ボンディングを形成する前に、ベース基板110又は絶縁層111の表面を酸素プラズマ処理又はオゾン処理して、その表面を親水性にしても良い。この処理によって、ベース基板110又は絶縁層111の表面に水酸基が付加されるため、水素結合を効率よく形成することができる。

【0063】

50

次に、貼り合わせられたベース基板110及び単結晶半導体基板100に対して加熱処理を施して、貼り合わせを強固なものとする。この際の加熱温度は、脆化層102における分離が進行しない温度とする必要がある。例えば、400℃未満、好ましくは300℃以下とすることができる。加熱処理時間については特に限定されず、処理速度と貼り合わせ強度との関係から最適な条件を適宜設定すればよい。本実施の形態においては、200℃、2時間の加熱処理を施すこととする。ここで、貼り合わせに係る領域のみにマイクロ波を照射して、局所的に加熱することも可能である。なお、貼り合わせ強度に問題がない場合は、上記加熱処理を省略しても良い。

【0064】

次に、単結晶半導体基板100を、脆化層102にて、単結晶半導体層112と単結晶半導体基板118とに分離する（図4（D）参照）。単結晶半導体基板100の分離は、加熱処理により行う。該加熱処理の温度は、ベース基板110の耐熱温度を目安にすることができる。例えば、ベース基板110としてガラス基板を用いる場合には、加熱温度は400℃以上650℃以下とすることが好ましい。ただし、短時間であれば、400℃以上700℃以下の加熱処理を行っても良い。なお、本実施の形態においては、600℃、2時間の加熱処理を施すこととする。

【0065】

上述のような加熱処理を行うことにより、脆化層102に形成された微小な空孔の体積変化が生じ、脆化層102に亀裂が生ずる。その結果、脆化層102に沿って単結晶半導体基板100が劈開する。絶縁層111はベース基板110と貼り合わせられているので、ベース基板110上には単結晶半導体基板100から分離された単結晶半導体層112が固定される。また、この加熱処理で、ベース基板110と絶縁層111の貼り合わせに係る界面が加熱されるため、貼り合わせに係る界面に共有結合が形成され、ベース基板110と絶縁層111の結合力が一層向上する。

【0066】

その後、単結晶半導体層112の欠陥の低減などを目的として、単結晶半導体層112にレーザ光113を照射する（図4（E）参照）。ここで、実施の形態1で示した結晶性評価方法を用いることで、レーザ光113の照射条件を簡便に最適化することができる。すなわち、第1の単結晶半導体層が設けられた第1のベース基板をモニタ基板として用い、このモニタ基板に対して複数のエネルギー密度条件でレーザ光を照射し、レーザ光を照射後の単結晶半導体層の炭素濃度及び水素濃度深さ方向の濃度分布を測定する。次いで、モニタ基板を用いて検出した最適のエネルギー密度で、(n-1)層の単結晶半導体層にレーザ光を照射する。

【0067】

上記レーザ光113の照射には、パルス発振レーザを用いることが好ましい。これは、瞬間的に高エネルギーのパルスレーザ光を発振することができ、部分熔融状態を作り出すことが容易となるためである。発振周波数は、1Hz以上10MHz以下程度とすることが好ましい。より好ましくは、10Hz以上1MHz以下である。上述のパルス発振レーザとしては、Arレーザ、Krレーザ、エキシマ（ArF、KrF、XeCl）レーザ、CO₂レーザ、YAGレーザ、YVO₄レーザ、YLFレーザ、YAlO₃レーザ、GdVO₄レーザ、Y₂O₃レーザ、ルビーレーザ、アレキサンドライトレーザ、Ti：サファイアレーザ、銅蒸気レーザ、金蒸気レーザ等を用いることができる。なお、上記レーザ光113の照射にはパルス発振レーザを用いることが好ましいが、これに限定して解釈されるものではない。すなわち、連続発振レーザの使用を除外するものではない。なお、連続発振レーザとしては、Arレーザ、Krレーザ、CO₂レーザ、YAGレーザ、YVO₄レーザ、YLFレーザ、YAlO₃レーザ、GdVO₄レーザ、Y₂O₃レーザ、ルビーレーザ、アレキサンドライトレーザ、Ti：サファイアレーザ、ヘリウムカドミウムレーザ等がある。

【0068】

レーザ光113の波長は、単結晶半導体層112に吸収される波長とする必要がある。そ

10

20

30

40

50

の波長は、レーザ光の侵入長などを考慮して決定すればよい。例えば、単結晶半導体層 112 が単結晶シリコン層である場合には、200 nm 以上 700 nm 以下の範囲とすることができる。また、レーザ光 113 のエネルギー密度は、レーザ光 113 の波長、単結晶半導体層 112 の材料、単結晶半導体層 112 の膜厚などを考慮して決定することができる。レーザ光 113 のエネルギー密度は、例えば、 300 mJ/cm^2 以上 800 mJ/cm^2 以下の範囲とすることができる。これらの条件についても、実施の形態 1 の評価方法を用いて最適化することができる。

【0069】

レーザ光 113 の照射は、大気雰囲気のような酸素を含む雰囲気、または窒素雰囲気のような不活性雰囲気で行うことができる。不活性雰囲気中でレーザ光 113 を照射するには、気密性のあるチャンバー内でレーザ光 113 を照射し、このチャンバー内の雰囲気を制御すればよい。チャンバーを用いない場合は、レーザ光 113 の被照射面に窒素ガスなどの不活性ガスを吹き付けることで、窒素雰囲気を形成することもできる。その他、レーザ光 113 の照射は真空中で行っても良い。

【0070】

上述のようにレーザ光 113 を照射した後は、単結晶半導体層 112 の膜厚を小さくする薄膜化工程を行っても良い。単結晶半導体層 112 の薄膜化には、ドライエッチングまたはウェットエッチングの一方、または双方を組み合わせたエッチング処理（エッチバック処理）を適用すればよい。例えば、単結晶半導体層 112 がシリコン材料からなる層である場合、 SF_6 と O_2 をプロセスガスに用いたドライエッチング処理で、単結晶半導体層 112 を薄くすることができる。

【0071】

なお、本実施の形態においては、レーザ光の照射により平坦化等した後でエッチング処理を行う例を挙げたが、本発明はこれに限定して解釈されるものではない。例えば、レーザ光の照射前にエッチング処理を行ってもよい。この場合には、エッチング処理により半導体層表面の凹凸や欠陥をある程度低減することができる。また、レーザ光の照射前及び照射後の両方に上記処理を適用しても良い。また、レーザ光の照射と上記処理を交互に繰り返しても良い。このように、レーザ光の照射とエッチング処理を組み合わせることで、半導体層表面の凹凸、欠陥等を著しく低減することができる。もちろん、上述のエッチング処理や加熱処理などを常に用いる必要はない。

【0072】

以上により、表面の平坦性が向上し、欠陥が低減された単結晶半導体層 120（単結晶シリコン半導体層）を有する半導体基板を作製することができる（図 4（F）参照）。

【0073】

本実施の形態は、他の実施の形態と適宜組み合わせて用いることができる。

【0074】

（実施の形態 3）

本実施の形態では、図 5 乃至 7 を参照して、上述の半導体基板を用いた半導体装置の作製方法について説明する。ここでは、半導体装置の一例として複数のトランジスタからなる半導体装置の作製方法について説明することとする。なお、以下において示すトランジスタを組み合わせることで、様々な半導体装置を形成することができる。

【0075】

図 5（A）は、実施の形態 2 により作製した半導体基板の断面図である。ただし、本実施の形態においては、実施の形態 2 における絶縁層 111 を 2 層構造とした場合について示すこととする。

【0076】

単結晶半導体層 120 には、TFT のしきい値電圧を制御するために、硼素、アルミニウム、ガリウムなどの p 型不純物、若しくはリン、砒素などの n 型不純物を添加しても良い。不純物を添加する領域、および添加する不純物の種類は、適宜変更することができる。例えば、n チャネル型 TFT の形成領域には p 型不純物を添加し、p チャネル型 TFT の

10

20

30

40

50

形成領域にn型不純物を添加することができる。上述の不純物を添加する際には、ドーザ量が $1 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ 以上 $1 \times 10^{17} \text{ ions/cm}^2$ 以下程度となるように行えばよい。その後、単結晶半導体層120を島状に分離して、半導体層702、及び半導体層704を形成する（図5（B）参照）。

【0077】

次に、半導体層702と半導体層704を覆うように、ゲート絶縁層706を形成する（図5（C）参照）。ここでは、プラズマCVD法を用いて、酸化珪素膜を単層で形成することとする。その他にも、酸化窒化珪素、窒化酸化珪素、窒化珪素、酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、酸化タンタル等を含む膜を、単層構造又は積層構造で形成することによりゲート絶縁層706としても良い。

10

【0078】

プラズマCVD法以外の作製方法としては、スパッタリング法や、高密度プラズマ処理による酸化または窒化による方法が挙げられる。高密度プラズマ処理は、例えば、ヘリウム、アルゴン、クリプトン、キセノンなどの希ガスと、酸素、酸化窒素、アンモニア、窒素、水素などガスの混合ガスを用いて行う。この場合、プラズマの励起をマイクロ波の導入により行うことで、低電子温度で高密度のプラズマを生成することができる。このような高密度のプラズマで生成された酸素ラジカル（OHラジカルを含む場合もある）や窒素ラジカル（NHラジカルを含む場合もある）によって、半導体層の表面を酸化または窒化することにより、1nm以上20nm以下、望ましくは2nm以上10nm以下の絶縁層を半導体層に接するように形成する。

20

【0079】

上述した高密度プラズマ処理による半導体層の酸化または窒化は固相反応であるため、ゲート絶縁層706と半導体層702及び半導体層704との界面準位密度をきわめて低くすることができる。また、高密度プラズマ処理により半導体層を直接酸化または窒化することで、形成される絶縁層の厚さのばらつきを抑えることができる。また、半導体層が結晶性を有するため、高密度プラズマ処理を用いて半導体層の表面を固相反応で酸化させる場合であっても、結晶粒界における不均一な酸化を抑え、均一性が良く、界面準位密度の低いゲート絶縁層を形成することができる。このように、高密度プラズマ処理により形成された絶縁層をトランジスタのゲート絶縁層の一部または全部に用いることで、特性のばらつきを抑制することができる。

30

【0080】

プラズマ処理による絶縁層の作製方法のより具体的な一例について説明する。亜酸化窒素（ N_2O ）を、アルゴン（Ar）を用いて1倍以上3倍以下（流量比）に希釈し、10Pa以上30Pa以下の圧力で3kW以上5kW以下のマイクロ波（2.45GHz）電力を印加して、半導体層702と半導体層704の表面を酸化または窒化させる。この処理により1nm以上10nm以下（好ましくは2nm以上6nm以下）のゲート絶縁層706の下層を形成する。さらに、亜酸化窒素（ N_2O ）とシラン（ SiH_4 ）を導入し、10Pa以上30Pa以下の圧力で3kW以上5kW以下のマイクロ波（2.45GHz）電力を印加して気相成長法により酸化窒化シリコン膜を形成し、ゲート絶縁層706の上層とする。このように、固相反応と気相成長法を組み合わせることでゲート絶縁層706を形成することにより界面準位密度が低く絶縁耐圧の優れたゲート絶縁層706を形成することができる。なお、この場合においてゲート絶縁層706は2層構造となる。

40

【0081】

或いは、半導体層702と半導体層704を熱酸化させることで、ゲート絶縁層706を形成するようにしても良い。このような熱酸化を用いる場合には、耐熱性の比較的高いベース基板を用いることが好ましい。

【0082】

なお、水素を含むゲート絶縁層706を形成し、その後、350℃以上450℃以下の温度による加熱処理を行うことで、ゲート絶縁層706中に含まれる水素を半導体層702及び半導体層704中に拡散させるようにしても良い。この場合、ゲート絶縁層706と

50

して、プラズマCVD法を用いた窒化シリコン又は窒化酸化シリコンを用いることができる。なお、プロセス温度は350℃以下とすると良い。このように、半導体層702及び半導体層704に水素を供給することで、半導体層702中、半導体層704中、ゲート絶縁層706と半導体層702の界面、及びゲート絶縁層706と半導体層704の界面における欠陥を効果的に低減することができる。

【0083】

次に、ゲート絶縁層706上に導電層を形成した後、該導電層を所定の形状に加工（パターンニング）することで、半導体層702と半導体層704の上方に電極708を形成する（図5（D）参照）。導電層の形成にはCVD法、スパッタリング法等を用いることができる。導電層は、タンタル（Ta）、タングステン（W）、チタン（Ti）、モリブデン（Mo）、アルミニウム（Al）、銅（Cu）、クロム（Cr）、ニオブ（Nb）等の材料を用いて形成することができる。また、上記金属を主成分とする合金材料を用いても良いし、上記金属を含む化合物を用いても良い。または、半導体に導電性を付与する不純物元素をドーピングした多結晶珪素など、半導体材料を用いて形成しても良い。

10

【0084】

本実施の形態では電極708を単層の導電層で形成しているが、本発明の半導体装置は該構成に限定されない。電極708は積層された複数の導電層で形成されていても良い。2層構造とする場合には、例えば、モリブデン膜、チタン膜、窒化チタン膜等を下層に用い、上層にはアルミニウム膜などを用いればよい。3層構造の場合には、モリブデン膜とアルミニウム膜とモリブデン膜の積層構造や、チタン膜とアルミニウム膜とチタン膜の積層構造などを採用するとよい。

20

【0085】

なお、電極708を形成する際に用いるマスクは、酸化珪素や窒化酸化珪素等の材料を用いて形成してもよい。この場合、酸化珪素膜や窒化酸化珪素膜等をパターンニングしてマスクを形成する工程が加わるが、レジスト材料と比較して、エッチング時におけるマスクの膜減りが少ないため、より正確な形状の電極708を形成することができる。また、マスクを用いずに、液滴吐出法を用いて選択的に電極708を形成しても良い。ここで、液滴吐出法とは、所定の組成物を含む液滴を吐出または噴出することで所定のパターンを形成する方法を意味し、インクジェット法などがその範疇に含まれる。

【0086】

また、ICP（Inductively Coupled Plasma：誘導結合型プラズマ）エッチング法を用い、エッチング条件（コイル型の電極層に印加される電力量、基板側の電極層に印加される電力量、基板側の電極温度等）を適宜調節し、所望のテーパー形状を有するように導電層をエッチングすることで、電極708を形成することもできる。また、テーパー形状は、マスクの形状によって制御することもできる。なお、エッチング用ガスとしては、塩素、塩化硼素、塩化珪素もしくは四塩化炭素などの塩素系ガス、四弗化炭素、弗化硫黄もしくは弗化窒素などのフッ素系ガス又は酸素などを適宜用いることができる。

30

【0087】

次に、電極708をマスクとして、一導電性を付与する不純物元素を半導体層702、半導体層704に添加する（図6（A）参照）。本実施の形態では、半導体層702にn型を付与する不純物元素（例えばリンまたはヒ素）を、半導体層704にp型を付与する不純物元素（例えばボロン）を添加する。なお、n型を付与する不純物元素を半導体層702に添加する際には、p型の不純物が添加される半導体層704はマスク等で覆い、n型を付与する不純物元素の添加が選択的に行われるようにする。また、p型を付与する不純物元素を半導体層704に添加する際には、n型の不純物が添加される半導体層702はマスク等で覆い、p型を付与する不純物元素の添加が選択的に行われるようにする。又は、半導体層702及び半導体層704に、p型を付与する不純物元素又はn型を付与する不純物元素の一方を添加した後、一方の半導体層のみに、より高い濃度でp型を付与する不純物元素又はn型を付与する不純物元素の他方を添加するようにしても良い。上記不純

40

50

物の添加により、半導体層 702 に不純物領域 710、半導体層 704 に不純物領域 712 が形成される。

【0088】

次に、電極 708 の側面にサイドウォール 714 を形成する（図 6（B）参照）。サイドウォール 714 は、例えば、ゲート絶縁層 706 及び電極 708 を覆うように新たに絶縁層を形成し、垂直方向を主体とした異方性エッチングにより、該絶縁層を部分的にエッチングすることで形成することができる。なお、上記の異方性エッチングにより、ゲート絶縁層 706 を部分的にエッチングしても良い。サイドウォール 714 を形成するための絶縁層としては、プラズマ CVD 法やスパッタリング法等により、珪素、酸化珪素、窒化珪素、酸化窒化珪素、窒化酸化珪素、有機材料などを含む膜を、単層構造又は積層構造で形成すれば良い。本実施の形態では、膜厚 100 nm の酸化珪素膜をプラズマ CVD 法によって形成する。また、エッチングガスとしては、 CHF_3 とヘリウムの混合ガスを用いることができる。なお、サイドウォール 714 を形成する工程は、これらに限定されるものではない。

10

【0089】

次に、ゲート絶縁層 706、電極 708 及びサイドウォール 714 をマスクとして、半導体層 702、半導体層 704 に一導電型を付与する不純物元素を添加する（図 6（C）参照）。なお、半導体層 702、半導体層 704 には、それぞれ先の工程で添加した不純物元素と同じ導電型の不純物元素をより高い濃度で添加する。なお、n 型を付与する不純物元素を半導体層 702 に添加する際には、p 型の不純物が添加される半導体層 704 はマスク等で覆い、n 型を付与する不純物元素の添加が選択的に行われるようにする。また、p 型を付与する不純物元素を半導体層 704 に添加する際には、n 型の不純物が添加される半導体層 702 はマスク等で覆い、p 型を付与する不純物元素の添加が選択的に行われるようにする。

20

【0090】

上記不純物元素の添加により、半導体層 702 に、一対の高濃度不純物領域 716 と、一対の低濃度不純物領域 718 と、チャンネル形成領域 720 とが形成される。また、上記不純物元素の添加により、半導体層 704 に、一対の高濃度不純物領域 722 と、一対の低濃度不純物領域 724 と、チャンネル形成領域 726 とが形成される。高濃度不純物領域 716、高濃度不純物領域 722 はソース又はドレインとして機能し、低濃度不純物領域 718、低濃度不純物領域 724 は LDD (Lightly Doped Drain) 領域として機能する。

30

【0091】

なお、半導体層 702 上に形成されたサイドウォール 714 と、半導体層 704 上に形成されたサイドウォール 714 は、キャリアが移動する方向（いわゆるチャンネル長に平行な方向）の長さが同じになるように形成しても良いが、異なるように形成しても良い。p チャンネル型トランジスタとなる半導体層 704 上のサイドウォール 714 の長さは、n チャンネル型トランジスタとなる半導体層 702 上のサイドウォール 714 の長さよりも大きくすると良い。なぜならば、p チャンネル型トランジスタにおいてソース及びドレインを形成するために注入されるボロンは拡散しやすく、短チャンネル効果を誘起しやすいためである。p チャンネル型トランジスタにおいて、サイドウォール 714 の長さをより大きくすることで、ソース及びドレインに高濃度のボロンを添加することが可能となり、ソース及びドレインを低抵抗化することができる。

40

【0092】

ソース及びドレインをさらに低抵抗化するために、半導体層 702 及び半導体層 704 の一部をシリサイド化したシリサイド層を形成しても良い。シリサイド化は、半導体層に金属を接触させ、加熱処理（例えば、GRTA 法、LRTA 法等）により、半導体層中の珪素と金属とを反応させて行う。シリサイド層としては、コバルトシリサイド又はニッケルシリサイドを用いれば良い。半導体層 702 や半導体層 704 が薄い場合には、半導体層 702、半導体層 704 の底部までシリサイド反応を進めても良い。シリサイド化に用い

50

ることができる金属材料としては、チタン (Ti)、ニッケル (Ni)、タングステン (W)、モリブデン (Mo)、コバルト (Co)、ジルコニウム (Zr)、Hf (ハフニウム)、タンタル (Ta)、バナジウム (V)、ネオジム (Nb)、クロム (Cr)、白金 (Pt)、パラジウム (Pd) 等が挙げられる。また、レーザ光の照射などによってもシリサイド層を形成することができる。

【0093】

上述の工程により、nチャネル型トランジスタ728及びpチャネル型トランジスタ730が形成される。なお、図6 (C) に示す段階では、ソース電極又はドレイン電極として機能する導電層は形成されていないが、これらのソース電極又はドレイン電極として機能する導電層を含めてトランジスタと呼ぶこともある。

10

【0094】

次に、nチャネル型トランジスタ728、pチャネル型トランジスタ730を覆うように絶縁層732を形成する (図6 (D) 参照)。絶縁層732は必ずしも設ける必要はないが、絶縁層732を形成することで、アルカリ金属やアルカリ土類金属などの不純物がnチャネル型トランジスタ728、pチャネル型トランジスタ730に侵入することを防止できる。具体的には、絶縁層732を、酸化珪素、窒化珪素、酸化窒化珪素、窒化酸化珪素、窒化アルミニウム、酸化アルミニウムなどの材料を用いて形成するのが望ましい。本実施の形態では、膜厚600nm程度の窒化酸化珪素膜を、絶縁層732として用いる。この場合、上述の水素化の工程は、該窒化酸化珪素膜形成後に行っても良い。なお、本実施の形態においては、絶縁層732を単層構造としているが、積層構造としても良いこと

20

【0095】

次に、nチャネル型トランジスタ728、pチャネル型トランジスタ730を覆うように、絶縁層732上に絶縁層734を形成する。絶縁層734は、ポリイミド、アクリル、ポリイミド、ベンゾシクロブテン、ポリアミド、エポキシ等の、耐熱性を有する有機材料を用いて形成するとよい。また、上記有機材料の他に、低誘電率材料 (low-k材料)、シロキサン系樹脂、酸化珪素、窒化珪素、酸化窒化珪素、窒化酸化珪素、PSG (リンガラス)、BPSG (リンボロンガラス)、アルミナ等を用いることもできる。ここで、シロキサン系樹脂とは、シロキサン系材料を出発材料として形成されたSi-O-Si結合を含む樹脂に相当する。シロキサン系樹脂は、置換基に水素の他、フッ素、アルキル基、芳香族炭化水素から選ばれる一を有していても良い。なお、これらの材料で形成される絶縁層を複数積層させることで、絶縁層734を形成しても良い。

30

【0096】

絶縁層734の形成には、その材料に応じて、CVD法、スパッタ法、SOG法、スピンコート、ディップ、スプレー塗布、液滴吐出法 (インクジェット法、スクリーン印刷、オフセット印刷等)、ドクターナイフ、ロールコーター、カーテンコーター、ナイフコーター等を用いることができる。

【0097】

次に、半導体層702と半導体層704の一部が露出するように絶縁層732及び絶縁層734にコンタクトホールを形成する。そして、該コンタクトホールを介して半導体層702と半導体層704に接する導電層736、導電層738を形成する (図7 (A) 参照)。導電層736及び導電層738は、トランジスタのソース電極又はドレイン電極として機能する。なお、本実施の形態においては、コンタクトホール開口時のエッチングに用いるガスとしてCHF₃とHeの混合ガスを用いたが、これに限定されるものではない。

40

【0098】

導電層736、導電層738は、CVD法やスパッタリング法等により形成することができる。具体的には、導電層736、導電層738として、アルミニウム (Al)、タングステン (W)、チタン (Ti)、タンタル (Ta)、モリブデン (Mo)、ニッケル (Ni)、白金 (Pt)、銅 (Cu)、金 (Au)、銀 (Ag)、マンガン (Mn)、ネオジ

50

ム（Nd）、炭素（C）、珪素（Si）等を用いることができる。また、上記材料を主成分とする合金を用いても良いし、上記材料を含む化合物を用いても良い。また、導電層736、導電層738は、単層構造としても良いし、積層構造としても良い。

【0099】

アルミニウムを主成分とする合金の例としては、アルミニウムを主成分として、ニッケルを含むものを挙げることができる。また、アルミニウムを主成分とし、ニッケルと、炭素または珪素の一方または両方を含むものを挙げることができる。アルミニウムやアルミニウムシリコン（Al-Si）は抵抗値が低く、安価であるため、導電層736、導電層738を形成する材料として適している。特に、アルミニウムシリコンは、パターンニングの際のレジストバークによるヒロックの発生を抑制することができるため好ましい。また、珪素の代わりに、アルミニウムに0.5%程度のCuを混入させた材料を用いても良い。

10

【0100】

導電層736、導電層738を積層構造とする場合には、例えば、バリア膜とアルミニウムシリコン膜とバリア膜の積層構造、バリア膜とアルミニウムシリコン膜と窒化チタン膜とバリア膜の積層構造などを採用するとよい。なお、バリア膜とは、チタン、チタンの窒化物、モリブデンまたはモリブデンの窒化物などを用いて形成された膜である。バリア膜の間にアルミニウムシリコン膜を挟むように導電層を形成すると、アルミニウムやアルミニウムシリコンのヒロックの発生をより一層防止することができる。また、還元性の高い元素であるチタンを用いてバリア膜を形成すると、半導体層702と半導体層704上に薄い酸化膜が形成されていたとしても、バリア膜に含まれるチタンが該酸化膜を還元し、導電層736と半導体層702、及び導電層738と半導体層704のコンタクトを良好なものとすることができる。また、バリア膜を複数積層するようにして用いても良い。その場合、例えば、導電層736、導電層738を、下層からチタン、窒化チタン、アルミニウムシリコン、チタン、窒化チタンのように、5層構造又はそれ以上の積層構造とすることもできる。

20

【0101】

また、導電層736、導電層738として、WF₆ガスとSiH₄ガスから化学気相成長法で形成したタングステンシリサイドを用いても良い。また、WF₆を水素還元して形成したタングステンを、導電層736、導電層738として用いても良い。

【0102】

なお、導電層736はnチャネル型トランジスタ728の高濃度不純物領域716に接続されている。導電層738はpチャネル型トランジスタ730の高濃度不純物領域722に接続されている。

30

【0103】

図7（B）に、図7（A）に示したnチャネル型トランジスタ728及びpチャネル型トランジスタ730の平面図を示す。ここで、図7（B）のA-Bにおける断面が図7（A）に対応している。ただし、図7（B）においては、簡単のため、導電層736、導電層738、絶縁層732、絶縁層734等を省略している。

【0104】

なお、本実施の形態においては、nチャネル型トランジスタ728とpチャネル型トランジスタ730が、それぞれゲート電極として機能する電極708を1つずつ有する場合を例示しているが、本実施の形態は該構成に限定されない。本実施の形態で作製されるトランジスタは、ゲート電極として機能する電極を複数有し、なおかつ該複数の電極が電氣的に接続されているマルチゲート構造を有していても良い。

40

【0105】

本実施の形態では、機械的な研磨処理などを行う代わりに、レーザ光を照射して、単結晶半導体層の欠陥や表面凹凸を低減している。さらに、実施の形態1の評価方法を用いることにより、極めて簡便な方法によりレーザ光照射条件の最適化を実現している。これにより、欠陥が十分に低減された平坦性の高い半導体基板を提供することができ、且つ、その提供にかかるコストを抑えることができる。また、該半導体基板を用いることにより、高

50

速動作が可能で、サブスレッショルド値が低く、電界効果移動度が高く、低電圧で駆動可能なトランジスタを低いコストで作製することができる。

【0106】

本実施の形態は、他の実施の形態と適宜組み合わせて用いることができる。

【0107】

(実施の形態4)

上記実施の形態で示した半導体基板を用いてトランジスタ等の半導体装置を作製し、この半導体装置を用いてさまざまな電子機器を完成することができる。実施の形態2で示した半導体基板に設けられた単結晶半導体層は結晶欠陥が低減されているため、ゲート絶縁層との界面において、局在準位密度を低減させることが可能となる。この単結晶半導体層を活性層として用いることで、リーク電流が低減し、電気的特性が向上した半導体素子を作製することができる。すなわち、実施の形態2で示した半導体基板を用いることで、電流駆動能力が高く、かつ信頼性の高い半導体素子を作製することが可能になり、結果として、最終製品としての電子機器をスループット良く、良好な品質で作製することが可能になる。本実施の形態では、図面を用いて具体的な電子機器への適用例を説明する。

10

【0108】

半導体装置（特に表示装置）を用いて作製される電子機器としては、ビデオカメラ、デジタルカメラ、ゴーグル型ディスプレイ（ヘッドマウントディスプレイ）、ナビゲーションシステム、音響再生装置（カーオーディオコンポ等）、コンピュータ、ゲーム機器、携帯情報端末（モバイルコンピュータ、携帯電話、携帯型ゲーム機または電子書籍等）、記録媒体を備えた画像再生装置（具体的にはDigital Versatile Disc（DVD）等の記録媒体を再生し、その画像を表示しうるディスプレイを備えた装置）などが挙げられる。

20

【0109】

図8（A）はテレビ受像器又はパーソナルコンピュータのモニタである。筐体1001、支持台1002、表示部1003、スピーカー部1004、ビデオ入力端子1005等を含む。表示部1003には、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能なテレビ受像器又はパーソナルコンピュータのモニタを低価格で提供することができる。

【0110】

図8（B）はデジタルカメラである。本体1011の正面部分には受像部1013が設けられており、本体1011の上面部分にはシャッターボタン1016が設けられている。また、本体1011の背面部分には、表示部1012、操作キー1014、及び外部接続ポート1015が設けられている。表示部1012には、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能なデジタルカメラを低価格で提供することができる。

30

【0111】

図8（C）はノート型パーソナルコンピュータである。本体1021には、キーボード1024、外部接続ポート1025、ポインティングデバイス1026が設けられている。また、本体1021には、表示部1023を有する筐体1022が取り付けられている。表示部1023には、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能なノート型パーソナルコンピュータを低価格で提供することができる。

40

【0112】

図8（D）はモバイルコンピュータであり、本体1031、表示部1032、スイッチ1033、操作キー1034、赤外線ポート1035等を含む。表示部1032にはアクティブマトリクス表示装置が設けられている。表示部1032には、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能なモバイルコンピュータを低価格で提供することができる。

【0113】

図8（E）は画像再生装置である。本体1041には、表示部B1044、記録媒体読み

50

込み部1045及び操作キー1046が設けられている。また、本体1041には、スピーカー部1047及び表示部A1043それぞれを有する筐体1042が取り付けられている。表示部A1043及び表示部B1044それぞれには、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能な画像再生装置を低価格で提供することができる。

【0114】

図8(F)は電子書籍である。本体1051には操作キー1053が設けられている。また、本体1051には複数の表示部1052が取り付けられている。表示部1052には、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能な電子書籍を低価格で提供することができる。

10

【0115】

図8(G)はビデオカメラであり、本体1061には外部接続ポート1064、リモコン受信部1065、受像部1066、バッテリー1067、音声入力部1068、操作キー1069が設けられている、また、本体1061には、表示部1062を有する筐体1063が取り付けられている。表示部1062には、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能なビデオカメラを低価格で提供することができる。

【0116】

図8(H)は携帯電話であり、本体1071、筐体1072、表示部1073、音声入力部1074、音声出力部1075、操作キー1076、外部接続ポート1077、アンテナ1078等を含む。表示部1073には、上記実施の形態で示した半導体装置が用いられており、信頼性が高く高性能な携帯電話を低価格で提供することができる。

20

【0117】

図9は、電話としての機能と、情報端末としての機能を併せ持った携帯電子機器1100の構成の一例である。ここで、図9(A)は正面図、図9(B)は背面図、図9(C)は展開図である。携帯電子機器1100は、電話と情報端末の双方の機能を備えており、音声通話以外にも様々なデータ処理が可能な、いわゆるスマートフォンと呼ばれる電子機器である。

【0118】

携帯電子機器1100は、筐体1101及び筐体1102で構成されている。筐体1101は、表示部1111、スピーカー1112、マイクロフォン1113、操作キー1114、ポインティングデバイス1115、カメラ用レンズ1116、外部接続端子1117等を備え、筐体1102は、キーボード1121、外部メモリスロット1122、カメラ用レンズ1123、ライト1124、イヤフォン端子1125等を備えている。また、アンテナは筐体1101内部に内蔵されている。上記構成に加えて、非接触ICチップ、小型記録装置等を内蔵していてもよい。

30

【0119】

表示部1111には、上記実施の形態で示した半導体装置が組み込まれている。なお、表示部1111に表示される映像(及びその表示方向)は、携帯電子機器1100の使用形態に応じて様々に変化する。また、表示部1111と同一面にカメラ用レンズ1116を備えているため、映像を伴う音声通話(いわゆるテレビ電話)が可能である。なお、スピーカー1112及びマイクロフォン1113は音声通話に限らず、録音、再生等に用いることが可能である。カメラ用レンズ1123(及び、ライト1124)を用いて静止画及び動画の撮影を行う場合には、表示部1111はファインダーとして用いられることになる。操作キー1114は、電話の発信・着信、電子メール等の簡単な情報入力、画面のスクロール、カーソル移動等に用いられる。

40

【0120】

重なり合った筐体1101と筐体1102(図9(A))は、スライドし、図9(C)のように展開し、情報端末として使用できる。この場合には、キーボード1121、ポインティングデバイス1115を用いた円滑な操作が可能である。外部接続端子1117はACアダプタやUSBケーブル等の各種ケーブルと接続可能であり、充電やコンピュータ等

50

とのデータ通信を可能にしている。また、外部メモリスロット1122に記録媒体を挿入し、より大容量のデータの保存及び移動に対応できる。上記機能に加えて、赤外線などの電磁波を用いた無線通信機能や、テレビ受信機能等を有していても良い。上記実施の形態で示した半導体装置を搭載することで、信頼性が高く高性能な携帯電子機器を低価格で提供することができる。

【0121】

以上の様に、本実施の形態の適用範囲は極めて広く、あらゆる分野の電子機器に用いることが可能である。なお、本実施の形態は、他の実施の形態と適宜組み合わせる用いることができる。

【実施例1】

【0122】

本実施例では、図2で示した濃度分布を有する、条件A乃至Cにてレーザ光を照射した単結晶半導体層の結晶性について、EBSP (Electron Back Scatter diffraction Pattern) 法を用いて評価した結果を示す。

【0123】

本実施例において単結晶半導体層は、実施の形態1で図1を用いて説明した単結晶半導体層112と同様に、厚さ0.7mmの無アルカリガラス基板（商品名 AN100）上に、酸化シリコン膜、窒化酸化シリコン膜、酸化窒化シリコン膜がそれぞれ50nm積層された絶縁膜を介して設けられた構成である。また、単結晶半導体層の膜厚は100nmとする。

【0124】

単結晶半導体層を作製するための単結晶半導体基板としては単結晶シリコンウエハが用いられている。単結晶シリコンウエハは、5インチ角の四角い基板である。その導電型はP型で、抵抗率が $10\Omega\cdot\text{cm}$ 程度である。また、結晶方位は、主表面が(100)であり、側面が $\langle 110 \rangle$ である。

【0125】

また、酸化窒化シリコン膜、窒化酸化シリコン膜及び酸化シリコン膜は、PECVD法を用いて形成した。酸化窒化シリコン膜のプロセスガスは、 SiH_4 、および N_2O であり、流量比は、 $\text{SiH}_4\backslash\text{N}_2\text{O}=4\backslash 800$ である。成膜工程の基板温度は 400°C である。窒化酸化シリコン膜のプロセスガスは、 SiH_4 、 NH_3 、 N_2O 、および H_2 であり、流量比は、 $\text{SiH}_4\backslash\text{NH}_3\backslash\text{N}_2\text{O}\backslash\text{H}_2=10\backslash 100\backslash 20\backslash 400$ ある。成膜工程の温度は 350°C である。酸化シリコン膜の成膜用プロセスガスには、 TEOS 、および O_2 を用い、その流量比は、 $\text{TEOS}\backslash\text{O}_2=15\backslash 750$ である。また、成膜工程の温度は 300°C である。

【0126】

単結晶シリコンウエハに脆化層を形成するために、イオンドーピング装置を用い、水素イオンを単結晶シリコンウエハに添加している。ソースガスには100%水素ガスを用い、水素ガスを励起して生成されたプラズマ中のイオンを質量分離せずに、電界で加速して単結晶シリコンウエハ基板に照射して、脆化層を形成した。イオンドーピング装置において、水素ガスを励起することで、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ という3種類のイオン種が生成され、この全てのイオン種を加速し、単結晶シリコンウエハに照射する。水素ガスから発生された水素イオン種のうち、80%程度が H_3^+ である。

【0127】

本実施例において、水素イオンドーピングの条件は、電源出力100W、加速電圧40kV、ドーズ量 $2.2\times 10^{16}\text{ions}/\text{cm}^2$ とした。

【0128】

ガラス基板と、絶縁層が形成された単結晶シリコンウエハと、を純水中で超音波洗浄し、その後、オゾンを含む純水で洗浄した。次いで、ガラス基板表面と単結晶シリコンウエハ表面に形成された酸化シリコン膜を密着させて、接合させた。次に、脆化層で劈開を生じさせるため、加熱炉において、 200°C 、2時間の加熱処理を行い、ガラス基板と酸化シ

10

20

30

40

50

リコン膜の結合強度を向上させ、引き続き、加熱炉において、600℃、4時間の加熱を行うことで、単結晶シリコンウエハを劈開させ、単結晶シリコン層を単結晶シリコンウエハから分離している。

【0129】

次に、1/100に希釈されたフッ酸水溶液で単結晶シリコン層を処理して、表面に形成された自然酸化膜を除去した。次に、単結晶シリコン層にレーザ光を照射し、熔融させ、再結晶化させた。レーザ発振器には、波長308nmのビームを発振するXeClエキシマレーザを用いた。レーザビームのパルス幅25nsであり、繰り返し周波数30Hzである。上述したように、単結晶半導体層112の3領域に対し、レーザ光のエネルギー密度が互いに異なる3つの条件（条件A乃至C）にてレーザ光照射処理を行った。条件A乃至Cは以下の通りである。

条件A．568mJ/cm²

条件B．584mJ/cm²

条件C．600mJ/cm²

【0130】

図10にレーザ光113を照射した後の単結晶半導体層112の結晶性をEBSP法にて測定した結果を示す。本測定において、測定範囲は40μm×40μmとする。図10（A）は、条件Aにてレーザ光113を照射した領域の単結晶半導体層112の結晶方位の分布を示すものであり、図10（B）は条件Bにて、また、図10（C）は条件Cにてレーザ光113を照射した領域の単結晶半導体層112の結晶方位の分布を示すものである。図10（A）乃至（C）は、単結晶半導体層112に対して垂直な方向の分布を示している。また、図10（D）は、図10（A）乃至（C）における面方位を示す。

【0131】

図10より、条件A及び条件Bにてレーザ光113を照射した領域の単結晶半導体層112の結晶方位はほぼ一方に揃い単結晶であると見なされる。前述したように、条件A及び条件Bは、再結晶化後の単結晶半導体層の深さ方向の元素の濃度分布において、炭素濃度が極大を有する条件、すなわち単結晶半導体層が部分熔融状態となる条件である。一方、条件Cにてレーザ光113を照射した領域の単結晶半導体層112は、結晶欠陥が非常に多く、一部に微結晶化している領域が存在していることがわかる。これは、条件Cにて照射した場合、単結晶半導体層が完全熔融して液相となった後、無秩序な核発生が起こったためと判断できる。

【0132】

図2に示した元素の濃度分布、及び図10より、再結晶化後の単結晶半導体層の深さ方向の元素の濃度分布において、炭素濃度が極大を有するとき、単結晶半導体層の結晶性が良好であることが示された。

【実施例2】

【0133】

本実施例では、レーザ光のエネルギー密度が異なる4つの条件（条件A'、A、B及びC'）にてレーザ光照射処理を行った単結晶半導体層の結晶性についてライフタイム測定を用いて評価した結果、及び当該単結晶半導体層を用いて作製したTFETの特性を示す。

【0134】

本実施例において、レーザ光の照射条件は以下の通りである。

条件A'．547mJ/cm²

条件A．568mJ/cm²

条件B．584mJ/cm²

条件C'．608mJ/cm²

【0135】

なお、本実施例において、レーザ光の照射条件以外の単結晶半導体層の構造及び作製方法は、上記実施例1にて説明したものと同様であるため説明は省略する。また、本実施例において、条件A及びBについての再結晶化後の単結晶半導体層の深さ方向の濃度分布は、

図2で示した結果と同様である。条件A'及びC'についての濃度分布は図示しないが、図2に示した結果から、条件A'は、条件Aよりも固液界面が表面側に位置する狭義の部分熔融状態であると推測することができる。また、条件C'は、図2の条件Cと近似することができ、完全熔融状態であると推測することができる。

【0136】

図11は、レーザ光を照射後の単結晶半導体層のライフタイム評価結果のグラフである。本実施例では、測定装置に、コベルコ科研(株)社製のマイクロ波光導電減衰(Microwave Photo Conductive Decay)法を用いたライフタイム評価装置を使用した。

【0137】

マイクロ波光導電減衰法(以下、 μ -PCD法という)とは、半導体の表面にレーザ光を照射して、半導体中にキャリアを発生させ、かつレーザ光が照射されている位置にマイクロ波を照射し、半導体で反射されたマイクロ波の強度の減衰状態を検出することで、ライフタイムを評価する方法である。 μ -PCD法では、半導体中にキャリアが生成されると半導体の抵抗値が下がるため、キャリアが発生した領域でのマイクロ波の反射率が高くなることを利用しており、反射マイクロ波の強度を検出することで、ライフタイムを評価している。

【0138】

単結晶シリコンに光を照射すると価電子帯で発生した電子と伝導帯に発生した正孔は、再結合し、消滅する。単結晶シリコン層に汚染や欠陥が多数あると、電荷トラップ中心の密度が高くなるため、単結晶シリコンでのキャリアの再結合の確率が増加するので、ライフタイムは短くなる。このため、ライフタイムは単結晶シリコンなど半導体の結晶構造が完全であるか否かを評価するパラメータとして利用されている。

【0139】

図11のグラフの縦軸は、反射マイクロ波の検出信号のピーク値であり、ピーク値が大きいほどライフタイムが長いことを表している。レーザ照射時に単結晶半導体層が完全熔融状態となる条件C'では、部分熔融状態となる条件A'、条件A及び条件Bと比較してライフタイムが格段に短いことがわかる。また、条件A'、条件A及び条件Bを比較すると、レーザ光照射時に単結晶半導体層が部分熔融であって、且つその固液界面が下部絶縁層に近づくほど、ライフタイムが長くなることが分かる。

【0140】

また、図12(A)、図12(B)は、条件A'、A、B及びC'のレーザ光を照射して再結晶化させた単結晶半導体層を用いて作製したnチャネル型TFETのS値の確率統計分布図(図12(A))、およびpチャネル型TFETのS値の確率統計分布図(図12(B))である。なお、本実施例のnチャネル型TFET又はpチャネル型TFETのチャネル長(L)とチャネル幅(W)との比は、 $L/W=10/8\mu\text{m}$ である。

【0141】

確率統計分布図の横軸はS値(V/d e c.)、縦軸は累積度数を示す。また、確率統計分布図では、TFET間でのS値のばらつきが小さいほど、グラフの傾きが大きくなる。

【0142】

図12(A)及び(B)において、×印は条件A'にて照射した場合の測定結果、黒塗りの三角印は条件Aにて照射した場合の測定結果、白塗りの丸印は条件Bにて照射した場合の測定結果、白塗りの四角印は条件C'にて照射した場合の測定結果をそれぞれ示す。図12(A)に示したnチャネル型TFET、及び図12(B)に示したpチャネル型TFET共に、条件A'、条件A及び条件B単結晶半導体層の方が、完全熔融状態となると推測される条件C'のグラフと比較して、ばらつきが小さく、またS値の特性も良好であることがわかる。

【0143】

また、レーザ光を照射した際に単結晶半導体層が部分熔融状態となる条件A'、条件A及び条件Bでは、レーザ光のエネルギー密度が増加する程、言い換えると、再結晶化後の単

10

20

30

40

50

結晶半導体層の深さ方向の濃度分布において、炭素濃度の極大の位置が数絶縁層との界面に近づく程S値が小さくなり、T F Tの特性が向上している。これは部分熔融状態において固液界面が下部絶縁層との界面に近づくほど、膜厚方向全体で欠陥を修復し、単結晶半導体層の結晶性を回復させることができるためと判断できる。

【0144】

図2に示した元素の濃度分布、及び図11、図12より、再結晶化後の単結晶半導体層の深さ方向の元素の濃度分布において、炭素濃度が極大を有するとき、単結晶半導体層の結晶性及び当該単結晶半導体層を用いて作製したT F Tの特性が良好であることが示された。また、当該極大の位置が下部絶縁層との界面に近づく程、単結晶半導体層の結晶性及び当該単結晶半導体層を用いて作製したT F Tの特性が良好となることが示された。

10

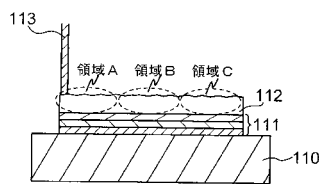
【符号の説明】

【0145】

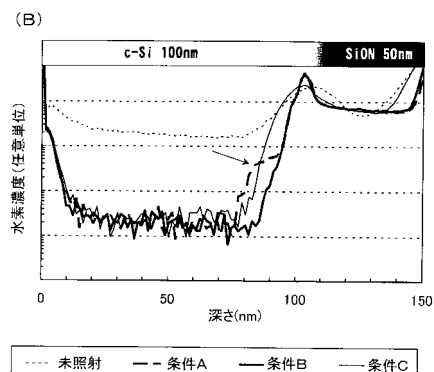
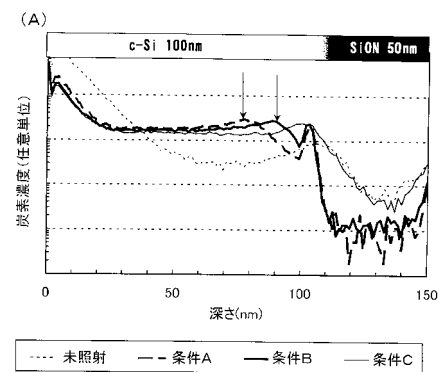
- 100 単結晶半導体基板
- 102 脆化層
- 110 ベース基板
- 111 絶縁層
- 112 単結晶半導体層
- 113 レーザ光
- 118 単結晶半導体基板
- 120 単結晶半導体層

20

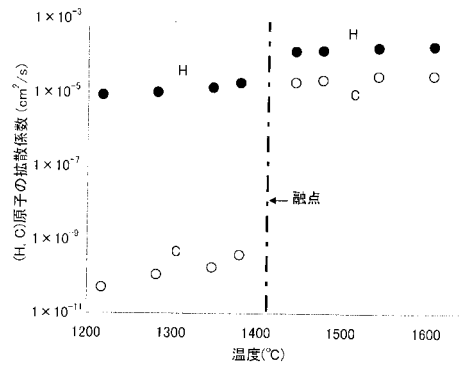
【図1】



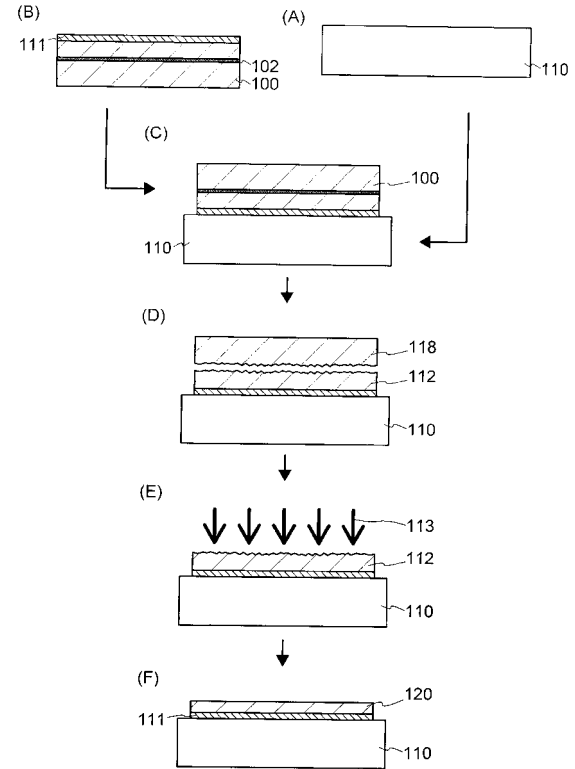
【図2】



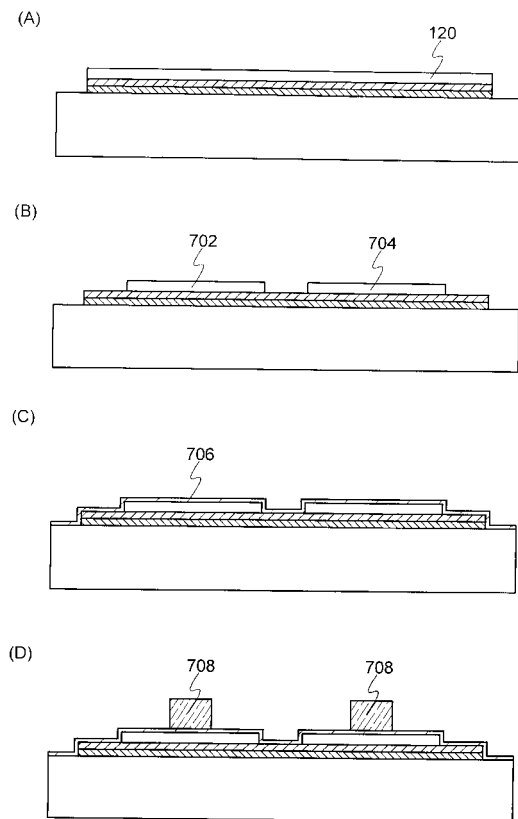
【図 3】



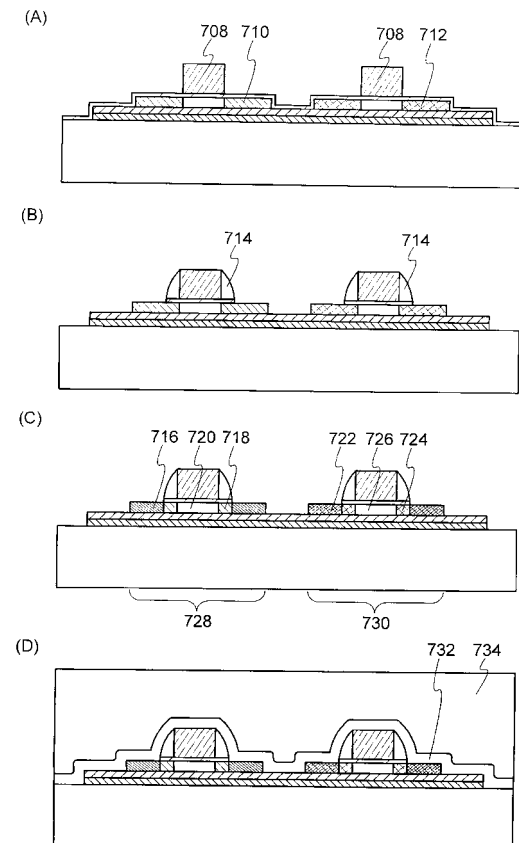
【図 4】



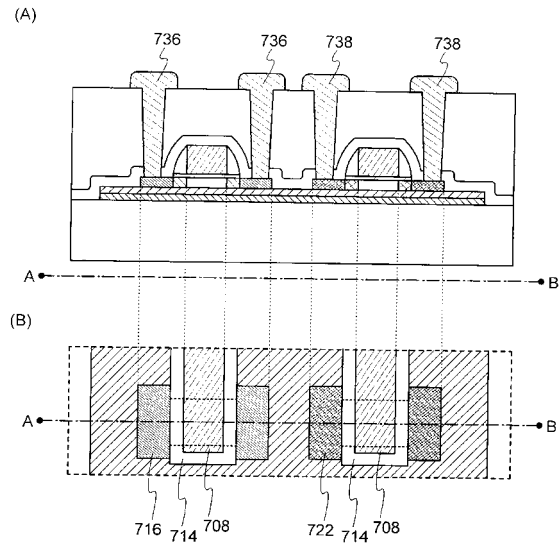
【図 5】



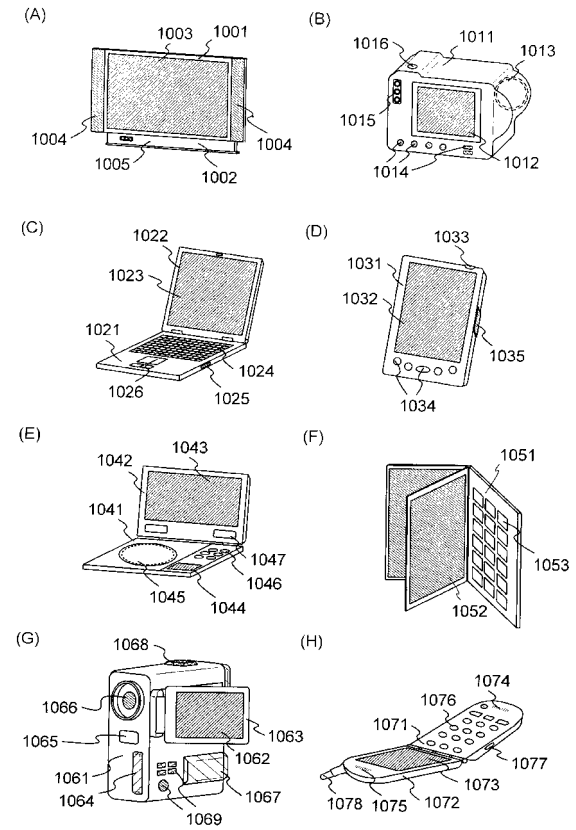
【図 6】



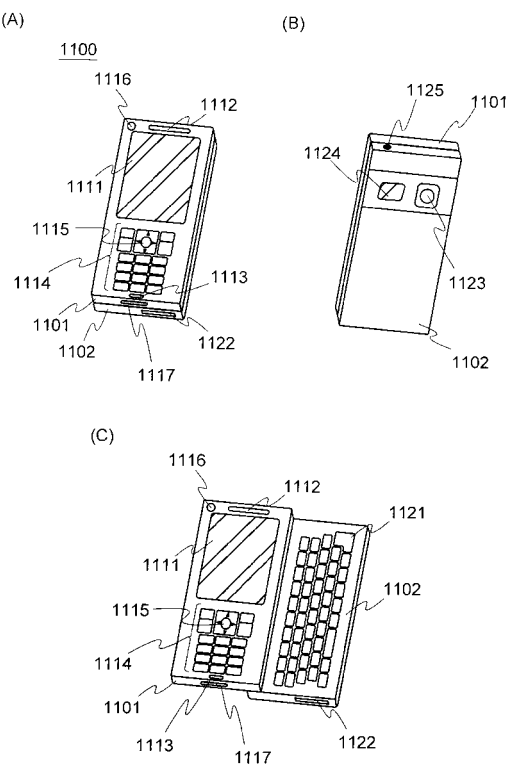
【図 7】



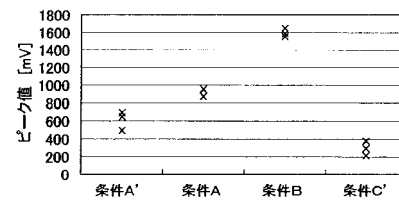
【図 8】



【図 9】

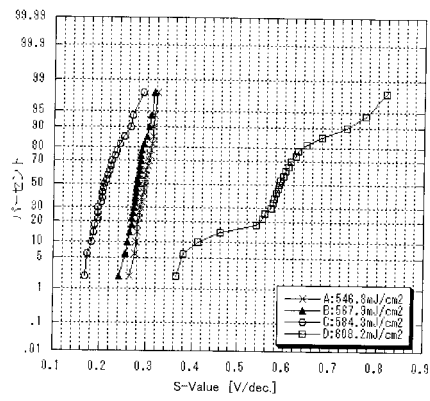


【図 11】

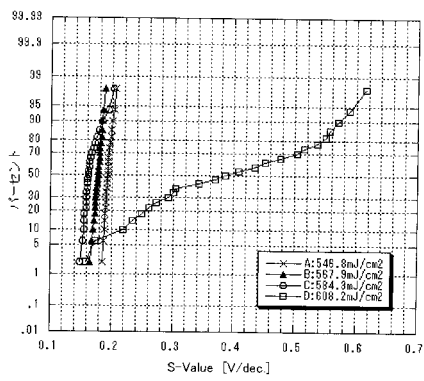


【図 12】

(A)



(B)



【図 10】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 L 29/78 6 2 4
H 0 1 L 29/78 6 2 7 D

(56)参考文献 特開 2 0 0 5 - 2 0 3 5 9 6 (J P, A)
特開 2 0 0 5 - 2 7 7 3 7 1 (J P, A)
特開平 1 0 - 0 5 5 9 5 9 (J P, A)
特開昭 6 1 - 2 4 4 0 1 9 (J P, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H 0 1 L 2 1 / 0 2
H 0 1 L 2 1 / 2 0
H 0 1 L 2 1 / 2 6 5
H 0 1 L 2 1 / 2 6 8
H 0 1 L 2 1 / 3 3 6
H 0 1 L 2 1 / 6 6
H 0 1 L 2 7 / 1 2
H 0 1 L 2 9 / 7 8 6