

明 細 書

発明の名称：

窒化物半導体ウェーハの製造方法及び窒化物半導体ウェーハ

技術分野

[0001] 本発明は、窒化物半導体ウェーハの製造方法及び窒化物半導体ウェーハに関する。

背景技術

[0002] GaNやAlNをはじめとする窒化物半導体は、2次元電子ガスを用いた高電子移動度トランジスタ（HEMT）を作製することができるので、高周波用途の半導体デバイスとしての応用が期待されている。また、上記の窒化物半導体は、機械的特性に優れた圧電体でもあり、通信用高周波フィルターや、センサー、エネルギーハーベスターなどへの利用も期待されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：国際公開第2005/038899号

特許文献2：特開2012-79952号公報

特許文献3：特開2011-103380号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、これらの窒化物半導体のウェーハを作製することは難しい。産業応用上は、サファイアやSiC、シリコン基板上への気相成長による窒化物半導体薄膜が使用されている。特に、シリコン基板上への気相成長による窒化物半導体薄膜の作製は、サファイアやSiCに比べて大口径の基板が使用できるので生産性が高く、放熱性の点で有利であり有望と考えられている。特許文献1には高周波通信デバイスの支持基板として高抵抗シリコンウェーハを使用することが開示されている。

[0005] また、高周波デバイスでは、高周波特性を改善するため、デバイスやその

支持基板、周辺のパッケージの寄生容量を減少させる必要がある。寄生容量の低減のため、酸素濃度が低く、高抵抗なシリコン基板を支持基板やパッケージに利用すると、特性が改善されるとともに、コスト上もメリットがあると考えられる。

[0006] 一方、デバイス製造工程は、基板上へのエピタキシャル成長や熱処理、貼り合わせなどの工程を含むが、その過程で異種の材料間の格子定数差や熱膨張係数差で基板に応力が発生して、塑性変形する恐れがある。塑性変形が起るとウェーハが大きく歪み、形状が元に戻らないため、反り異常や接合不良が発生する恐れがある。

[0007] 特に、高抵抗率で低酸素濃度のシリコン基板は、含有ドーパント、酸素等の不純物が著しく少ないため、機械的強度が低い。そのため、窒化物半導体をエピタキシャル成長させた場合、格子定数差や熱膨張係数差による応力によって、反りの増大や塑性変形が起こりやすいので、成長条件や緩和層による応力低減が行われている。特許文献2には基板の反りを低減するため、シリコン単結晶基板上に複合層を複数積層した、周期堆積層を形成した窒化ガリウム系化合物半導体基板が開示されている。

[0008] また、特許文献3には、 $5000\Omega\cdot\text{cm}$ の高抵抗率シリコン基板を用いたGa₂N/Si基板について開示されているが、酸素濃度の減少とともに反り量が増大している。しかしながら、一般的なデバイス作製のプロセスで使用するには、反り量が $50\mu\text{m}$ 以下であることが望ましく、十分に対策されているとは言えない。

[0009] 本発明は、上記問題を解決するためになされたものであり、高周波デバイスの支持基板として有望である、高抵抗率で低酸素濃度、特に超低酸素濃度のシリコン単結晶基板であっても、塑性変形や反りが抑制された窒化物半導体ウェーハの製造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

[0010] 本発明は、上記目的を達成するためになされたものであり、シリコン単結晶基板の上に気相成長により窒化物半導体薄膜を成長させる窒化物半導体ウ

エーハの製造方法であって、前記シリコン単結晶基板として、抵抗率が $1000\Omega\cdot\text{cm}$ 以上であり、酸素濃度が $1\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\mu\text{m}$ 以上であるシリコン単結晶基板を用い、該シリコン単結晶基板の上に気相成長により窒化物半導体薄膜を成長させる窒化物半導体ウェーハの製造方法を提供する。

[0011] このような窒化物半導体ウェーハの製造方法によれば、機械的強度が低い、高抵抗率で $1\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ 未満といった超低酸素濃度のシリコン単結晶基板を用いた場合であっても、塑性変形や反りが抑制された窒化物半導体ウェーハを製造することができる。

[0012] このとき、前記窒化物半導体薄膜を気相成長により成長させた後に、前記シリコン単結晶基板の、前記窒化物半導体薄膜を成長させた面とは逆の面を研磨して前記シリコン単結晶基板を薄くすることができる。

[0013] このように気相成長後に背面のシリコン単結晶基板を研磨して薄くすることで、高温成長中の塑性変形を防ぎ、冷却後にデバイス製造に適した基板厚さに加工しても、反りの小さいウェーハを得ることができる。

[0014] このとき、シリコン単結晶基板の上に窒化物半導体薄膜を有する窒化物半導体ウェーハであって、前記シリコン単結晶基板は、抵抗率が $1000\Omega\cdot\text{cm}$ 以上であり、酸素濃度が $1\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\mu\text{m}$ 以上である、窒化物半導体ウェーハを提供する。

[0015] このような窒化物半導体ウェーハによれば、支持基板として、機械的強度が低い、高抵抗率で超低酸素濃度のシリコン単結晶基板を用いた場合であっても、塑性変形や反りが抑制されたものとなる。

発明の効果

[0016] 以上のように、本発明に係る窒化物半導体ウェーハとその製造方法によれば、高周波デバイスの支持基板として極めて有望である高抵抗率で超低酸素濃度のシリコン単結晶基板であっても、塑性変形や反りが抑制された窒化物半導体ウェーハを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]本発明に係る窒化物半導体ウェーハの一例を概念的に示す概略断面図である。

[図2]本発明に係る窒化物半導体ウェーハの応用例としてHEMT構造を形成した場合を示す概略断面図である。

[図3]気相成長中の窒化物半導体ウェーハの曲率の変化を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0018] 以下、本発明を詳細に説明するが、本発明はこれらに限定されるものではない。

[0019] 上述のように、高周波デバイスの支持基板として有望であるが機械的強度が低い、高抵抗率で低酸素濃度のシリコン単結晶基板を用いた場合であっても、塑性変形や反りが抑制された窒化物半導体ウェーハおよびその製造方法が求められていた。

低酸素の中でも $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 未満、更には $0.5 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 以下といった超低酸素濃度で、高抵抗率のシリコン単結晶は、特に寄生容量を確実に低減でき、高周波デバイスの高周波特性の向上を計ることができるので、今後のより高機能の高周波用途で要求される半導体デバイス用としての応用が大いに期待される。

ところが、超低酸素では特に酸素不純物量が低いために著しく機械的強度が低く、エピタキシャル成長において反りや塑性変形が極めて大きくなり易い。

[0020] 高周波デバイス用のシリコン単結晶基板としては、 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の高抵抗率のものが要求される。また、酸素濃度を $7 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 以下、特には $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 未満とすることでサーマルドナーによる抵抗率の影響を完全に抑制できるものとなる。しかし、このように高抵抗率、超低酸素濃度とした場合、通常の低抵抗率基板と比較して、有転位化した時のヤング率が低く、極めて塑性変形しやすくなる。そこで、本発明者らは、ウェーハの厚さが $1000 \mu\text{m}$ 以上のシリコン単結晶基板とすることで塑性変形を抑制することができることを見出した。

- [0021] すなわち、本発明者らは、上記課題について鋭意検討を重ねた結果、シリコン単結晶基板の上に気相成長により窒化物半導体薄膜を成長させる窒化物半導体ウェーハの製造方法であって、前記シリコン単結晶基板として、抵抗率が $1000\Omega\cdot\text{cm}$ 以上であり、酸素濃度が $1\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\mu\text{m}$ 以上であるシリコン単結晶基板を用い、該シリコン単結晶基板の上に気相成長により窒化物半導体薄膜を成長させる窒化物半導体ウェーハの製造方法により、高抵抗率で超低酸素濃度のシリコン単結晶基板を用いたとしても、塑性変形や反りが抑制された窒化物半導体ウェーハを製造することができることを見出し、本発明を完成した。
- [0022] また、本発明者らは、シリコン単結晶基板の上に窒化物半導体薄膜を有する窒化物半導体ウェーハであって、前記シリコン単結晶基板は、抵抗率が $1000\Omega\cdot\text{cm}$ 以上であり、酸素濃度が $1\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\mu\text{m}$ 以上である、窒化物半導体ウェーハにより、塑性変形や反りが抑制されたものとなることを見出した。
- [0023] 以下、図面を参照して説明する。
- [0024] 図1は、本発明に係る窒化物半導体ウェーハの一例を概念的に示す概略断面図である。図1に示した本発明に係る窒化物半導体ウェーハ10は、シリコン単結晶基板12上に窒化物半導体薄膜からなるデバイス層16を有する。シリコン単結晶基板12として、抵抗率が $1000\Omega\cdot\text{cm}$ 以上、酸素濃度が $1\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\mu\text{m}$ 以上であるシリコン単結晶基板を使用する。
- [0025] シリコン単結晶基板の抵抗率を $1000\Omega\cdot\text{cm}$ 以上とする理由は、高周波デバイス用の基板として要求されるレベルのものとするためである。シリコン単結晶基板の抵抗率は、高ければ高い程よいので、上限は特に限定されず、無限大であってよい。また、酸素濃度については、 $7\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ (JEIDA)を超えるとサーマルドナーによる抵抗率の影響が無視できなくなるため、 $7\times 10^{17}\text{atoms}/\text{cm}^3$ (JEIDA)を上限とする。また、更にサーマルドナーによる抵抗率の影響を完全になくし、寄生

容量を確実に低減し、高周波デバイスの高周波特性の向上を計り、今後のより高機能の高周波用途で要求される半導体デバイス用として適用可能とするために、低酸素の中でも $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 未満、更には $0.5 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 以下といった超低酸素濃度とすることで、酸素濃度の影響をほぼ完全に排除することができる。酸素濃度は低ければ低い方が好ましく、下限は特に限定されないが、FZ単結晶のように実質上0とすることができる。

一方、シリコン単結晶基板の厚さを $1000 \mu\text{m}$ 以上の厚さとすることで、窒化物半導体成長中の塑性変形を防止して、反りを小さくすることができる。なお、シリコン単結晶基板の厚さの上限は特に限定されないが、 $1500 \mu\text{m}$ 程度以下とすることが好ましい。厚さがこのような範囲であれば、コストの上昇を抑制できるとともに、窒化物半導体薄膜のエピタキシャル成長をより安定して行うことができ、また、後述するような後工程でシリコン単結晶基板を研磨等により薄くする場合にも、生産性の低下を抑制することができる。

[0026] また、図1に示すように、シリコン単結晶基板12とデバイス層16との間に窒化物半導体や金属などからなる中間層14を有してもよい。中間層14は、デバイス層16の結晶性改善や応力の制御のために挿入される緩衝層として作用するものであってよい。窒化物半導体成長時に適切な緩衝層を有することで、冷却後には熱膨張係数差と格子定数差による薄膜からの応力を制御することができる。このとき、中間層14を窒化物半導体で作製すれば、デバイス層16と同一の設備で作製できる点で望ましい。中間層14を窒化物半導体からなるものとした場合、組成はデバイス層16となる窒化物半導体薄膜の組成と異なってもよいし同一でもよい。また、この場合、中間層14及びデバイス層16が窒化物半導体薄膜を構成すると言える。なお、中間層14の組成は成長の途中で変化させたものとしてもよい。応力や結晶性を改善する必要が無い場合、緩衝層等として作用する中間層14は省略することもできる。また、中間層14は、高周波フィルターなどのデバイス

の構成上、空間を作るための犠牲層や電極として用いることができる金属で作製されてもよい。

[0027] また、シリコン単結晶基板 12 の表面（図 1 の中間層 14 との界面）には、キャリアの寿命を低下させるトラップリッチ層が形成されていてもよい。

[0028] シリコン単結晶基板 12 の上に（シリコン単結晶基板 12 の上に中間層 14 を形成した場合は中間層 14 の上に）、窒化物半導体の薄膜からなるデバイス層 16 を有する。デバイス層の窒化物半導体として、例えば GaN、AlN、InN、AlGaN、InGaN、AlInN などを用いることができる。

[0029] 本発明に係る窒化物半導体ウェーハの応用例として、図 2 に、高移動度トランジスタ（HEMT）構造を形成した場合を示した。図 2 に示したように、例えば、高移動度トランジスタ（HEMT）構造では、デバイス層 16 は窒化ガリウム（GaN）層 17 とその上に形成される AlGaN からなる電子供給層 18 で構成される。デバイス層 16 は、デバイス特性の向上のため、結晶欠陥が少なく、炭素や酸素などの不純物が少ない結晶が望ましい。

[0030] 窒化ガリウム（GaN）は、Si（111）単結晶と格子定数差が 17%、熱膨張係数差が 116% あり、高温での成長中に薄膜や基板に応力がかかる。また、成長中 1000℃ 以上に加熱されているため、ウェーハに応力がかかると脆性破壊せずに、延性を示すようになり、転位を発生させて塑性変形する。

[0031] そこで、本発明では、シリコン単結晶基板 12 として、厚さが 1000 μm 以上であるものを用いることによって、シリコン単結晶基板 12 の転位の進展を防止して、塑性変形を防ぐことができる。塑性変形を防ぐことによって、反り異常を低減して、窒化物半導体ウェーハ 10 の製造の歩留まりを向上させることができる。また、シリコン単結晶基板 12 が応力に耐えることができるので、気相成長によるデバイス層 16 となる窒化物半導体薄膜の膜厚が厚いものとしてでき、デバイスの設計の自由度が向上する。

[0032] 次に、本発明に係る窒化物半導体ウェーハの製造方法を説明する。図 1 を

参照して説明すると、本発明に係る窒化物半導体ウェーハの製造方法は、まず、シリコン単結晶基板 1 2 を準備し、その後、シリコン単結晶基板 1 2 の上に気相成長によりデバイス層 1 6 となる窒化物半導体薄膜を成長させる。本発明では、シリコン単結晶基板 1 2 として、抵抗率が $1000\ \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であり、酸素濃度が $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\ \mu\text{m}$ 以上であるシリコン単結晶基板を用いる。このように、シリコン単結晶基板を $1000\ \mu\text{m}$ 以上に厚くすることで、高温成長中の塑性変形を防ぐことができる。

[0033] このような厚さが $1000\ \mu\text{m}$ 以上であるシリコン単結晶基板の製造方法は特に限定されず、公知の方法で製造することができる。CZ 法又は FZ 法により形成したシリコンインゴットを切断、研磨、洗浄等することで、厚さが $1000\ \mu\text{m}$ 以上のシリコン単結晶基板を製造しても良いし、厚さが $1000\ \mu\text{m}$ 未満のシリコン単結晶基板上にシリコンエピタキシャル成長層を形成して厚さが $1000\ \mu\text{m}$ 以上であるシリコン単結晶基板としても良い。

[0034] デバイス層 1 6 となる窒化物半導体薄膜の成長の前に、シリコン単結晶基板 1 2 上に中間層 1 4 を形成し、中間層 1 4 の上に、デバイス層 1 6 となる窒化物半導体薄膜を成長させてもよい。

[0035] また、シリコン単結晶基板 1 2 の表面（図 1 の中間層 1 4 との界面）には、キャリアの寿命を低下させるトラップリッチ層を形成しても良い。トラップリッチ層の形成は、イオン注入や電子線、X 線、 γ 線などの電離放射線の照射によって形成することができるがこれらに限らない。

[0036] シリコン単結晶基板 1 2 の上に（シリコン単結晶基板 1 2 の上に中間層 1 4 を形成した場合は中間層 1 4 の上に）、MOVPE（有機金属化学気相エピタキシー）法やスパッタリング法などの気相成長で、窒化物半導体の薄膜からなるデバイス層 1 6 を作製する。窒化物半導体の薄膜は $1 \sim 10\ \mu\text{m}$ の厚さとすることができ、デバイスに合わせて設計することができる。

[0037] 図 2 に示した高移動度トランジスタ（HEMT）構造では、デバイス層 1 6 は、デバイス特性の向上のため、結晶欠陥が少なく、炭素や酸素などの不

純物が少ない結晶層が望ましく、例えばMOVPE法を用いて900℃～1350℃で作製することができる。

- [0038] 上述したように、シリコン単結晶基板を1000μm以上の厚いものとすることで、高温成長中の塑性変形を防ぐことができる。窒化物半導体薄膜を気相成長により成長させた後、冷却後に、シリコン単結晶基板の、窒化物半導体薄膜を成長させた面とは逆の面を研磨等により薄くして、デバイス製造に適した厚さの基板に加工しても、反りの小さいウェーハを得ることができる。この場合、シリコン単結晶基板を薄くしても、基板中に塑性変形は生じていないので、塑性変形のない薄型化されたシリコン単結晶基板上にデバイス層を有する窒化物半導体ウェーハとすることができる。

実施例

- [0039] 以下、実施例、参考例を挙げて本発明について具体的に説明するが、これは本発明を限定するものではない。

- [0040] (参考例1)

直径が150mm、軸方位が<111>、抵抗率が1000Ω・cm、酸素濃度が $5 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ のシリコン単結晶基板で、基板の厚さが1000μmのシリコン単結晶基板を準備した。MOVPE炉で、準備したシリコン単結晶基板の上に、成長温度1200℃で総膜厚2.8μmの窒化物半導体薄膜のエピタキシャル層を成長した。

- [0041] 図3に、エピタキシャル成長中の窒化物半導体ウェーハの曲率の変化を示す。参考例1では後述する参考例2に比べて曲率の変化はほとんど見られなかった。また、エピタキシャル成長中に塑性変形は起こらず、成長後の反りは11.3μmであった。ウェーハの反りは、中央での基準面からの隔たりを表している。符号は、下側に凸形状を正、上側に凸形状を負の反りと定義している。

- [0042] (参考例2)

シリコン単結晶基板の厚さを675μmとしたこと以外は、参考例1と同じ条件で窒化物半導体ウェーハを製造した。

- [0043] 参考例2ではエピタキシャル成長中に曲率が大きく変化した。また、エピタキシャル成長中に塑性変形が起こり、成長後の反りが $-233.2\mu\text{m}$ と大きく、不良となった。
- [0044] 参考例1, 2から、 $5 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ の酸素濃度のシリコン単結晶基板12の厚さが $1000\mu\text{m}$ 以上であれば、塑性変形が起きることを抑制し、反りを小さくすることができることがわかった。
- [0045] (参考例3)
- シリコン単結晶基板の厚さを $1200\mu\text{m}$ としたこと以外は、参考例1と同じ条件で窒化物半導体のエピタキシャル成長をしたが、同様に基板に塑性変形は生じなかった。
- [0046] (参考例4)
- シリコン単結晶基板の酸素濃度を $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ としたこと以外は、参考例1と同じ条件で窒化物半導体ウェーハを製造した。
- その結果、エピタキシャル成長中に塑性変形は起こらず、成長後の反りは $20.0\mu\text{m}$ であった。
- [0047] (実施例1)
- シリコン単結晶基板の酸素濃度を $0.8 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ としたこと以外は、参考例1と同じ条件で窒化物半導体ウェーハを製造した。
- その結果、エピタキシャル成長中に塑性変形は起こらず、成長後の反りは $32.0\mu\text{m}$ であった。
- [0048] (実施例2)
- シリコン単結晶基板の酸素濃度を $0.5 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ とし、厚さを $1200\mu\text{m}$ としたこと以外は、参考例1と同じ条件で窒化物半導体ウェーハを製造した。
- その結果、エピタキシャル成長中に塑性変形は起こらず、成長後の反りは $22.0\mu\text{m}$ であった。
- [0049] 以上のように、実施例ではシリコン単結晶基板の酸素濃度を $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 未満の超低酸素濃度としても、塑性変形は起こらず、成長後

の反りも参考例2より大幅に小さい $50\mu\text{m}$ 以下とすることができた。

したがって、本発明の窒化物半導体ウェーハは、今後のより高機能の高周波用途で要求される半導体デバイス用として適用可能なものである。

[0050] なお、本発明は、上記実施形態に限定されるものではない。上記実施形態は、例示であり、本発明の特許請求の範囲に記載された技術的思想と実質的に同一な構成を有し、同様な作用効果を奏するものは、いかなるものであっても本発明の技術的範囲に包含される。

請求の範囲

- [請求項1] シリコン単結晶基板の上に気相成長により窒化物半導体薄膜を成長させる窒化物半導体ウェーハの製造方法であって、
- 前記シリコン単結晶基板として、抵抗率が $1000\ \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であり、酸素濃度が $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\ \mu\text{m}$ 以上であるシリコン単結晶基板を用い、該シリコン単結晶基板の上に気相成長により窒化物半導体薄膜を成長させることを特徴とする窒化物半導体ウェーハの製造方法。
- [請求項2] 前記窒化物半導体薄膜を気相成長により成長させた後に、前記シリコン単結晶基板の、前記窒化物半導体薄膜を成長させた面とは逆の面を研磨して前記シリコン単結晶基板を薄くすることを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体ウェーハの製造方法。
- [請求項3] シリコン単結晶基板の上に窒化物半導体薄膜を有する窒化物半導体ウェーハであって、
- 前記シリコン単結晶基板は、抵抗率が $1000\ \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であり、酸素濃度が $1 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ 未満であり、厚さが $1000\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする窒化物半導体ウェーハ。