

明 細 書

発明の名称：

基板処理方法、半導体装置の製造方法、基板処理装置、およびプログラム
技術分野

[0001] 本開示は、基板処理方法、半導体装置の製造方法、基板処理装置、およびプログラムに関する。

背景技術

[0002] 半導体装置の製造工程の一工程として、基板上に多結晶膜を形成する処理が行われることがある（例えば、特許文献1～7参照）。

先行技術文献

特許文献

- [0003] 特許文献1：特開2020-43262号公報
特許文献2：特開2016-1760号公報
特許文献3：特開2009-81457号公報
特許文献4：特開2013-197307号公報
特許文献5：特開2009-147388号公報
特許文献6：特開2018-160516号公報
特許文献7：国際公開第2022/064578号パンフレット

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 基板上に多結晶膜を形成させる際に、膜の残留応力が大きくなってしまい、基板上に形成される膜の膜質が劣化することがある。

[0005] 本開示は、基板上に形成する膜の膜質を改善させることが可能な技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0006] 本開示の一態様によれば、

(a) 基板を原料ガスに暴露することにより初期の膜を堆積させる工程と、

(b) 前記基板を結晶成長阻害ガス又は前記初期の膜とは膜質の異なる膜を形成する所定のガスに暴露する工程と、

を含むサイクルを所定回数行うことにより、前記基板上に所定厚さの多層膜を形成する工程と、を備え、

前記所定回数は、前記多層膜をアニールした後に前記多層膜の残留応力の絶対値又は勾配が許容可能な値よりも小さくなるように設定される技術が提供される。

発明の効果

[0007] 本開示によれば、基板上に形成する膜の膜質を改善させることが可能となる。

図面の簡単な説明

[0008] [図1]図1は、本開示の一態様で好適に用いられる基板処理装置の縦型処理炉の概略構成図であり、処理炉202部分を縦断面図で示す図である。

[図2]図2は、本開示の一態様で好適に用いられる基板処理装置のコントローラ121の概略構成図であり、コントローラ121の制御系をブロック図で示す図である。

[図3]図3は、本開示の一態様の基板処理工程におけるフローチャートを示す図である。

[図4]図4(A)は、比較例の基板処理工程により形成されるサンプル1及び2の基板断面を示す図であり、図4(B)は、本実施例の基板処理工程により形成されるサンプル3及び4の基板断面を示す図である。

[図5]図5は、本開示の一態様の成膜工程における処理シーケンスを示す図である。

[図6]図6は、本開示の一態様の基板処理工程後の基板の膜中の酸素のSIMS分析結果を示す図である。

[図7]図7は、本開示の一態様の基板処理工程においてアニール工程無しの場

合とアニール工程有りの場合の基板上に形成された膜の残留応力の測定結果を示した図である。

[図8]図8（A）は、比較例の基板処理工程により形成されるサンプル1及び2の基板断面を示す図であり、図8（B）は、本実施例の基板処理工程により形成されるサンプル3及び4の基板断面を示す図である。

[図9]図9（A）は、実験3のサンプル1の断面TEM像を示す図である。図9（B）は、実験3のサンプル3の断面TEM像を示す図である。

[図10]図10（A）は、実験3のサンプル2の断面TEM像を示す図である。図10（B）は、実験3のサンプル4の断面TEM像を示す図である。

[図11]図11（A）は、実験3のサンプル2の基板上の膜のXRD分析結果を示す図である。図11（B）は、実験3のサンプル4の基板上の膜のXRD分析結果を示す図である。

[図12]図12（A）は、実験4のサンプル2の断面SEM像を示す図である。図12（B）は、実験4のサンプル4の断面SEM像を示す図である。

[図13]図13（A）は、実験4のサンプル2に対する断面EBSD分析の範囲を、断面TEM像において示す図である。図13（B）は、実験4のサンプル4に対する断面EBSD分析の範囲を、断面TEM像において示す図である。

[図14]図14は、実験4のサンプル2及び4の断面EBSD分析により得られた逆極点図方位マップである。

[図15]図15は、実験4のサンプル2及び4の逆極点図マップである。

[図16]図16（A）は、実験4のサンプル2で作製したカンチレバーのSEM像である。図16（B）は、実験4のサンプル4で作製したカンチレバーのSEM像である。

[図17]図17は、実験4のサンプル2及び4のカンチレバーの表面の変位量のプロファイルを示す図である。

発明を実施するための形態

[0009] <本開示の一態様>

以下、本開示の一態様について、主に、図1～図5を参照しつつ説明する。なお、以下の説明において用いられる図面は、いずれも模式的なものであり、図面に示される、各要素の寸法の関係、各要素の比率等は、現実のものとは必ずしも一致していない。また、複数の図面の相互間においても、各要素の寸法の関係、各要素の比率等は必ずしも一致していない。

[0010] (1) 基板処理装置の構成

図1に示すように、処理炉202は温度調整器(加熱部)としてのヒータ207を有する。ヒータ207は円筒形状であり、保持板に支持されることにより垂直に据え付けられている。ヒータ207は、ガスを熱で活性化(励起)させる活性化機構(励起部)としても機能する。

[0011] ヒータ207の内側には、ヒータ207と同心円状に反応管203が配設されている。反応管203は、例えば石英(SiO_2)または炭化シリコン(SiC)等の耐熱性材料により構成され、上端が閉塞し下端が開口した円筒形状に形成されている。反応管203の下方には、マニホールド209が配設されている。マニホールド209は、例えばステンレス鋼(SUS)等の金属材料により構成され、上端および下端が開口した円筒形状に形成されている。マニホールド209の上端部は、反応管203の下端部に係合しており、反応管203を支持するように構成されている。マニホールド209と反応管203との間には、シール部材としてのOリング220aが設けられている。反応管203はヒータ207と同様に垂直に据え付けられている。主に、反応管203とマニホールド209とにより処理容器(反応容器)が構成される。処理容器の中空部には処理室201が形成される。処理室201は、基板としてのウエハ200を収容可能に構成されている。この処理室201内でウエハ200に対する処理が行われる。

[0012] 処理室201内には、第1～第3供給部としてのノズル249a～249cが、マニホールド209の側壁を貫通するようにそれぞれ設けられている。ノズル249a～249cを、それぞれ第1～第3ノズルとも称する。ノズル249a～249cは、例えば石英等の耐熱性材料により構成されてい

る。ノズル 2 4 9 a ~ 2 4 9 c には、ガス供給管 2 3 2 a ~ 2 3 2 c がそれぞれ接続されている。ノズル 2 4 9 a ~ 2 4 9 c はそれぞれ長さの異なるノズルである。

[0013] ノズル 2 4 9 a は、処理室 2 0 1 内をウエハ配列方向に沿って、最下端のウエハ 2 0 0 から最上端のウエハ 2 0 0 までのウエハ配列領域の上寄りの位置まで伸びるように設けられている。ノズル 2 4 9 c は、ウエハ配列方向に沿ってウエハ配列領域の下寄りの位置まで伸びるように設けられている。ノズル 2 4 9 b は、ウエハ配列領域の中央付近の位置まで伸びるように設けられている。ノズル 2 4 9 a, 2 4 9 c のそれぞれは、ノズル 2 4 9 b に隣接して設けられている。ノズル 2 4 9 a ~ 2 4 9 c の先端には、ガスを供給するガス供給孔 2 5 0 a ~ 2 5 0 c がそれぞれ設けられている。

[0014] ガス供給管 2 3 2 a ~ 2 3 2 c には、ガス流の上流側から順に、流量制御器（流量制御部）であるマスフローコントローラ（MFC）2 4 1 a ~ 2 4 1 c および開閉弁であるバルブ 2 4 3 a ~ 2 4 3 c がそれぞれ設けられている。ガス供給管 2 3 2 a のバルブ 2 4 3 a よりも下流側には、ガス供給管 2 3 2 d, 2 3 2 e がそれぞれ接続されている。ガス供給管 2 3 2 b のバルブ 2 4 3 b よりも下流側には、ガス供給管 2 3 2 f, 2 3 2 h がそれぞれ接続されている。ガス供給管 2 3 2 c のバルブ 2 4 3 c よりも下流側には、ガス供給管 2 3 2 g が接続されている。ガス供給管 2 3 2 d ~ 2 3 2 h には、ガス流の上流側から順に、MFC 2 4 1 d ~ 2 4 1 h およびバルブ 2 4 3 d ~ 2 4 3 h がそれぞれ設けられている。ガス供給管 2 3 2 a ~ 2 3 2 h は、例えば、SUS等の金属材料により構成されている。

[0015] ガス供給管 2 3 2 a ~ 2 3 2 c からは、原料ガスが、それぞれMFC 2 4 1 a ~ 2 4 1 c、バルブ 2 4 3 a ~ 2 4 3 c、ノズル 2 4 9 a ~ 2 4 9 c を介して処理室 2 0 1 内へ供給される。原料ガスは、原料としての第 1 元素を含有する第 1 元素含有ガスと称することもできる。

[0016] ガス供給管 2 3 2 d からは、クリーニングガスが、MFC 2 4 1 d、バルブ 2 4 3 d、ノズル 2 4 9 a を介して処理室 2 0 1 内へ供給される。

- [0017] ガス供給管232e～232gからは、不活性ガスが、それぞれMFC241e～241g、バルブ243e～243g、ガス供給管232a～232c、ノズル249a～249cを介して処理室201内へ供給される。
- [0018] ガス供給管232hからは、原料ガスの結晶成長に影響する結晶成長阻害ガスが、MFC241h、バルブ243h、ガス供給管232b、ノズル249bを介して処理室201内へ供給される。
- [0019] 主に、ガス供給管232a～232c、MFC241a～241c、バルブ243a～243cにより、原料ガス供給系（成膜ガス供給系ともいう）が構成される。主に、ガス供給管232d、MFC241d、バルブ243dにより、クリーニングガス供給系が構成される。主に、ガス供給管232e～232g、MFC241e～241g、バルブ243e～243gにより、不活性ガス供給系が構成される。主に、ガス供給管232h、MFC241h、バルブ243hにより、結晶成長阻害ガス供給系が構成される。
- [0020] ここで、原料ガスは、成膜ガス、第1元素含有ガスとして作用することから、原料ガス供給系を、成膜ガス供給系、第1元素含有ガス供給系と称することもできる。
- [0021] 上述の各種供給系のうち、いずれか、或いは、全ての供給系は、バルブ243a～243hやMFC241a～241h等が集積されてなる集積型供給システム248として構成されていてもよい。集積型供給システム248は、ガス供給管232a～232hのそれぞれに対して接続され、ガス供給管232a～232h内への各種ガスの供給動作、すなわち、バルブ243a～243hの開閉動作やMFC241a～241hによる流量調整動作等が、後述するコントローラ121によって制御されるように構成されている。集積型供給システム248は、一体型、或いは、分割型の集積ユニットとして構成されており、ガス供給管232a～232h等に対して集積ユニット単位で着脱を行うことができ、集積型供給システム248のメンテナンス、交換、増設等を、集積ユニット単位で行うことが可能なように構成されている。

[0022] 反応管203の側壁下方には、処理室201内の雰囲気気を排気する排気口231aが設けられている。排気口231aは、ウエハ200を挟んでノズル249a～249c（ガス供給孔250a～250c）と対向（対面）する位置に設けられうる。排気口231aは、マニホールド209の側壁に設けられても良く、反応管203の側壁の下部より上部に沿って、すなわち、ウエハ配列領域に沿って設けられていてもよい。排気口231aには排気管231が接続されている。排気管231には、処理室201内の圧力を検出する圧力検出器（圧力検出部）としての圧力センサ245および圧力調整器（圧力調整部）としてのAPC（Auto Pressure Controller）バルブ244を介して、排気装置としての真空ポンプ246が接続されている。APCバルブ244は、真空ポンプ246を作動させた状態で弁を開閉することで、処理室201内の真空排気および真空排気停止を行うことができ、更に、真空ポンプ246を作動させた状態で、圧力センサ245により検出された圧力情報に基づいて弁開度を調節することで、処理室201内の圧力を調整することができるよう構成されている。主に、排気管231、APCバルブ244、圧力センサ245により、排気系が構成される。真空ポンプ246を排気系に含めて考えてもよい。

[0023] マニホールド209の下方には、マニホールド209の下端開口を気密に閉塞可能な炉口蓋体としてのシールキャップ219が設けられている。シールキャップ219は、例えばSUS等の金属材料により構成され、円盤状に形成されている。シールキャップ219の上面には、マニホールド209の下端と当接するシール部材としてのＯリング220bが設けられている。シールキャップ219の下方には、後述するボート217を回転させる回転機構267が設置されている。回転機構267の回転軸255は、シールキャップ219を貫通してボート217に接続されている。回転機構267は、ボート217を回転させることでウエハ200を回転させるように構成されている。シールキャップ219は、反応管203の外部に設置された昇降機構としてのボートエレベータ115によって垂直方向に昇降されるように構

成されている。ポートエレベータ 115 は、シールキャップ 219 を昇降させることで、ウエハ 200 を処理室 201 内外に搬入および搬出（搬送）する搬送装置（搬送機構）として構成されている。

[0024] マニホールド 209 の下方には、シールキャップ 219 を降下させポート 217 を処理室 201 内から搬出した状態で、マニホールド 209 の下端開口を閉塞可能な炉口蓋体としてのシャッタ 219 s が設けられている。シャッタ 219 s は、例えば SUS 等の金属材料により円盤状に形成されている。シャッタ 219 s の上面には、マニホールド 209 の下端と当接するシール部材としてのリング 220 c が設けられうる。シャッタ 219 s の開閉動作（昇降動作や回転動作等）は、シャッタ開閉機構 115 s により制御される。

[0025] 基板支持具としてのポート 217 は、複数枚、例えば 25 ～ 200 枚のウエハ 200 を、水平姿勢で、かつ、互いに中心を揃えた状態で垂直方向に整列させて多段に支持するように、すなわち、間隔を空けて配列させるように構成されている。ポート 217 は、例えば石英や SiC 等の耐熱性材料により構成される。ポート 217 の下部には、断熱板 218 が多段に支持されている。

[0026] 反応管 203 内には、温度検出器としての温度センサ 263 が設置されている。温度センサ 263 により検出された温度情報に基づきヒータ 207 への通電具合を調整することで、処理室 201 内の温度が所望の温度分布となる。温度センサ 263 は、反応管 203 の内壁に沿って設けられている。

[0027] 図 2 に示すように、制御部（制御手段）であるコントローラ 121 は、CPU (Central Processing Unit) 121 a、RAM (Random Access Memory) 121 b、記憶装置 121 c、I/Oポート 121 d を備えたコンピュータとして構成されている。RAM 121 b、記憶装置 121 c、I/Oポート 121 d は、内部バス 121 e を介して、CPU 121 a とデータ交換可能なように構成されている。コントローラ 121 には、例えばタッチパネル等として構成された入出力

装置 1 2 2 が接続されている。

- [0028] 記憶装置 1 2 1 c は、例えば、フラッシュメモリ、HDD (Hard Disk Drive)、SSD (Solid State Drive) 等で構成されている。記憶装置 1 2 1 c 内には、基板処理装置の動作を制御する制御プログラムや、後述する基板処理の手順や条件等が記載されたプロセスレシピ等が、読み出し可能に格納されている。プロセスレシピは、後述する基板処理における各手順をコントローラ 1 2 1 に実行させ、所定の結果を得ることができるように組み合わせられたものであり、プログラムとして機能する。以下、プロセスレシピや制御プログラム等を総称して、単に、プログラムともいう。また、プロセスレシピを、単に、レシピともいう。本明細書においてプログラムという言葉を用いた場合は、レシピ単体のみを含む場合、制御プログラム単体のみを含む場合、または、それらの両方を含む場合がある。RAM 1 2 1 b は、CPU 1 2 1 a によって読み出されたプログラムやデータ等が一時的に保持されるメモリ領域（ワークエリア）として構成されている。
- [0029] I/Oポート 1 2 1 d は、上述のMFC 2 4 1 a～2 4 1 h、バルブ 2 4 3 a～2 4 3 h、圧力センサ 2 4 5、APCバルブ 2 4 4、真空ポンプ 2 4 6、温度センサ 2 6 3、ヒータ 2 0 7、回転機構 2 6 7、ボートエレベータ 1 1 5、シャッタ開閉機構 1 1 5 s 等に接続されている。
- [0030] CPU 1 2 1 a は、記憶装置 1 2 1 c から制御プログラムを読み出して実行すると共に、入出力装置 1 2 2 からの操作コマンドの入力等に応じて記憶装置 1 2 1 c からレシピを読み出すことが可能なように構成されている。CPU 1 2 1 a は、読み出したレシピの内容に沿うように、MFC 2 4 1 a～2 4 1 h による各種ガスの流量調整動作、バルブ 2 4 3 a～2 4 3 h の開閉動作、APCバルブ 2 4 4 の開閉動作および圧力センサ 2 4 5 に基づく APCバルブ 2 4 4 による圧力調整動作、真空ポンプ 2 4 6 の起動および停止、温度センサ 2 6 3 に基づくヒータ 2 0 7 の温度調整動作、回転機構 2 6 7 によるボート 2 1 7 の回転および回転速度調節動作、ボートエレベータ 1 1 5

によるポート 2 1 7 の昇降動作、シャッタ開閉機構 1 1 5 s によるシャッタ 2 1 9 s の開閉動作等を制御することが可能なように構成されている。

- [0031] コントローラ 1 2 1 は、外部記憶装置 1 2 3 に格納された上述のプログラムを、コンピュータにインストールすることにより構成することができる。外部記憶装置 1 2 3 は、例えば、HDD等の磁気ディスク、CD等の光ディスク、MO等の光磁気ディスク、USBメモリ、SSD等の半導体メモリ等を含む。記憶装置 1 2 1 c や外部記憶装置 1 2 3 は、コンピュータ読み取り可能な記録媒体として構成されている。以下、これらを総称して、単に、記録媒体ともいう。なお、コンピュータへのプログラムの提供は、外部記憶装置 1 2 3 を用いず、インターネットや専用回線等の通信手段を用いて行ってもよい。

[0032] (2) 基板処理工程

上述の基板処理装置を用い、半導体装置（デバイス）の製造工程の一工程として、ウエハ 2 0 0 の表面上に、膜を形成する処理シーケンス例について、主に、図 3、図 4（B）及び図 5 を用いて説明する。ここで、ウエハ 2 0 0 の表面上には予め犠牲層 3 0 0 が形成されている。以下の説明において、基板処理装置を構成する各部の動作はコントローラ 1 2 1 により制御される。

- [0033] 本明細書において「ウエハ」という言葉を用いた場合は、ウエハそのものを意味する場合や、ウエハとその表面に形成された所定の層や膜との積層体を意味する場合がある。本明細書において「ウエハの表面」という言葉を用いた場合は、ウエハそのものの表面を意味する場合や、ウエハ上に形成された所定の層等の表面を意味する場合がある。本明細書において「ウエハ上に所定の層を形成する」と記載した場合は、ウエハそのものの表面上に所定の層を直接形成することを意味する場合や、ウエハ上に形成されている層等の上に所定の層を形成することを意味する場合がある。本明細書において「基板」という言葉を用いた場合も、「ウエハ」という言葉を用いた場合と同義である。

[0034] [成膜工程 S 1 1 0]

まず、成膜工程 S 1 1 0 について図 4 (B) 及び図 5 を用いて説明する。

ここでは、原料ガスと結晶成長阻害ガスを用いて、それらを交互に供給することによってウエハ 2 0 0 の犠牲層 3 0 0 の表面上に多層膜を形成する。

[0035] すなわち、成膜工程では、

ウエハ 2 0 0 を原料ガスに暴露することにより初期の膜 (p r i m i t i v e f i l m) としての多結晶膜を堆積させるステップ A と、

ウエハ 2 0 0 を結晶成長阻害ガスに暴露するステップ B と、

を含むサイクルを所定回数 (n 回、n は 1 以上の整数) 行うことにより、ウエハ 2 0 0 上に所定厚さの多層膜を形成するステップ C と、を備え、

所定回数は、多層膜をアニールした後に多層膜の残留応力の絶対値又は勾配が許容可能な値よりも小さくなるように設定される。

[0036] なお、上述の成膜工程では、ステップ B にて、その後のステップ A において堆積される多結晶膜が新たな結晶粒を形成する条件で行われる。

[0037] 本明細書では、上述の処理シーケンスを、便宜上、以下のように示すこともある。以下の他の態様、変形例等の説明においても、同様の表記を用いる。

[0038] (原料ガス→結晶成長阻害ガス) × n

[0039] (ウエハチャージおよびボートロード)

複数枚のウエハ 2 0 0 がボート 2 1 7 に装填 (ウエハチャージ) されると、シャッタ開閉機構 1 1 5 s によりシャッタ 2 1 9 s が移動させられて、マニホールド 2 0 9 の下端開口が開放される (シャッタオープン)。その後、図 1 に示すように、複数枚のウエハ 2 0 0 を支持したボート 2 1 7 は、ボートエレベータ 1 1 5 によって持ち上げられて処理室 2 0 1 内へ搬入 (ボートロード) され、最終的にシールキャップ 2 1 9 によって処理室 2 0 1 は気密に閉塞される。このとき、処理室 2 0 1 内には、不活性ガスが供給されると共に、処理室 2 0 1 内の温度は所望の温度に維持されている。

[0040] (真空排気および温度調整)

その後、処理室201内、すなわち、ウエハ200が存在する空間が所望の圧力（真空度）となるように、真空ポンプ246によって真空排気（減圧排気）される。この際、処理室201内の圧力は圧力センサ245で測定され、この測定された圧力情報に基づきAPCバルブ244がフィードバック制御される。また、処理室201内のウエハ200が所望の処理温度となるように、ヒータ207によって加熱される。この際、処理室201内が所望の温度分布となるように、温度センサ263が検出した温度情報に基づきヒータ207への通電具合がフィードバック制御される。また、回転機構267によるウエハ200の回転を開始する。処理室201内の排気、ウエハ200の加熱および回転は、いずれも、少なくともウエハ200に対する処理が終了するまでの間は継続して行われる。

[0041] その後、ステップA、ステップBをこの順に実行する。以下、これらの各ステップについて説明する。

[0042] [ステップA]

ステップAでは、処理室201内のウエハ200に対して、原料ガスを供給し、ウエハ200を原料ガスに暴露することにより、ウエハ200の表面上に、多結晶膜を堆積（成膜）させた後、原料ガスの供給を停止して、処理室201内に残留する原料ガスを排気（パージ）する。

[0043] 具体的には、バルブ243a～243cを開き、ガス供給管232a～232c内へ原料ガスを供給する。原料ガスは、MFC241a～241cにより流量調整され、ノズル249a～249cを介して処理室201内へ供給され、排気口231aより排気される。このとき、ウエハ200に対して原料ガスが供給されて暴露される。このとき、APCバルブ244によって処理室201内の圧力は所定の処理圧力に保たれる。

[0044] 後述する処理条件下でウエハ200に対して原料ガスを供給（暴露ともいう）することにより、熱CVD法によって、ウエハ200の表面上に、初期の膜を堆積させて多結晶膜400を形成する。多結晶膜400は例えば第14族元素を含む膜である。本実施形態では、ホットウォール型のバッチ処理

室が用いられるので、表面反応が主体のコールドウォール型の処理室とは対照的に、気相反応を伴うCVDとなることが多い。それぞれの型の処理室によって得られる膜の膜質は異なり得る。例えば、コールドウォール型の枚葉装置で製造されるEpi-poly Si膜に比べ、ホットウォール型の減圧CVD装置で製造されるpoly-Si膜は、より大きな圧縮応力或いは応力勾配を有する傾向がある。気相反応から供給される反応中間体は、低温で高品質な膜を形成するのに役立つが、後述する余剰原子を生み、残留応力の増大を引き起こしている可能性がある。

[0045] 原料ガスとしては、ウエハ200上に多結晶膜400を堆積させるガスであって、例えば、第14族元素を含むガスであって、例えばシリコン(Si)を含有するSi含有ガスを用いることができる。Si含有ガスとして、例えばモノシラン(SiH₄)含有ガスを用いることができる。原料ガスとして、SiH₄ガスを用いる場合、本ステップにおいてSiH₄ガスが熱分解して、ウエハ200の表面上に多結晶膜であるポリシリコン膜が形成される。原料ガスは、Si含有ガスの他に水素(H₂)ガスや窒素(N₂)ガス、ヘリウム(He)ガス、アルゴン(Ar)ガス等の還元ガスやキャリアガス、希釈ガスを含んでも良い。

[0046] ステップAにおいて原料ガスを供給する際の処理条件としては、
処理温度：400～1090℃、好ましくは500～750℃
処理圧力：1～100000Pa、好ましくは10～1000Pa
原料ガス供給流量：10～5000sccm、好ましくは100～1500sccm
成膜速度：0.1～30nm/min、好ましくは1～20nm/min
不活性ガス供給流量（ガス供給管毎）：0～3000sccm
が例示される。

[0047] ステップAの最後に、バルブ243a～243cを閉じて原料ガスの供給を停止し、処理室201内を真空排気し、処理室201内に残留する原料ガス等を処理室201内から排除する。このとき、ノズル249a～249c

を介して処理室201内へ不活性ガスを供給する。ノズル249a～249cより供給される不活性ガスは、パージガスとして作用し、これにより、処理室201内がパージされる（パージ）。

[0048] 不活性ガスとしては、例えば、 N_2 ガスを用いることができ、その他、Arガス、Heガス、ネオン（Ne）ガス、キセノン（Xe）ガス等の希ガスを用いることができる。この点は、後述する各ステップにおいても同様である。

[0049] ステップAにおいてパージを行う際の処理条件としては、
処理温度：400～1090℃、好ましくは原料ガスを供給するときと同じ温度
処理圧力：1～5000Pa、好ましくは5～1000Pa
不活性ガス供給流量（ガス供給管毎）：0.1～5000sccm
不活性ガス供給時間：1～3000秒
が例示される。

[0050] なお、本明細書における「1000～100000Pa」のような数値範囲の表記は、下限値および上限値がその範囲に含まれることを意味する。よって、例えば、「1000～100000Pa」とは「1000Pa以上100000Pa以下」を意味する。他の数値範囲についても同様である。なお、本明細書における処理温度とはウエハ200の温度または処理室201内の温度のことを意味し、処理圧力とは処理室201内の圧力のことを意味する。また、処理時間とは、その処理を継続する時間を意味する。これらは、以下の説明においても同様である。

[0051] [ステップB]

ステップAが終了した後、ステップBを行う。ステップBでは、処理室201内のウエハ200に対して、結晶成長阻害ガスと不活性ガスを供給する。すなわち、表面に多結晶膜400が形成された後のウエハ200を結晶成長阻害ガスに暴露する。これにより、多結晶膜が形成されたウエハ200の表面上に結晶成長阻害層（結晶成長阻害膜ともいう）500を形成する。そ

の後、結晶成長阻害ガスと不活性ガスの供給を停止して、処理室201内に残留するガスを排気する。

[0052] 具体的には、バルブ243hを開き、ガス供給管232b内へ結晶成長阻害ガスを供給する。結晶成長阻害ガスは、MFC241hにより流量調整され、ノズル249bを介して処理室201内へ供給され、排気口231aより排気される。このとき、表面に多結晶膜が形成されたウエハ200に対して結晶成長阻害ガスが供給されて暴露される。このとき、バルブ243e～243gは開いた状態で、ノズル249a～249cのそれぞれを介して処理室201内へ不活性ガスを供給する。

[0053] 後述する処理条件下でウエハ200に対して結晶成長阻害ガスを供給して、ウエハ200を結晶成長阻害ガスに暴露することにより、直前のステップAにおいて形成された多結晶膜の表面に、例えば多結晶膜を構成する元素以外の元素を含む層である結晶成長阻害層500を形成する。結晶成長阻害層500は、多結晶膜を構成する微結晶（結晶粒）の連続的な結晶成長を停止させる。

[0054] ステップBは、後述するその後のステップAにおいて堆積される多結晶膜が新たな結晶粒を形成する条件で行われる。すなわち、表面に多結晶膜が形成されたウエハ200を結晶成長阻害ガスに暴露することにより、その後のステップAにおいて堆積される多結晶膜が新たな結晶粒を形成することが可能となる。言い換えれば、ステップBを契機として、ウエハ200の表面に形成された多結晶膜の結晶粒界を終端させ、その後のステップAにおいて堆積される多結晶膜に所定の密度で結晶核を与えて、下地の結晶とは連続性の無い結晶を成長させる。結晶成長阻害層500は、ステップBの間に形成されるとは限らず、その後のステップAの初期段階に形成されるアモルファスやその他の結晶性の低い層を含みうる。

[0055] ステップBにおいて形成される膜又は層の厚さは、直前のステップAにおいて形成される多結晶膜の厚さよりも薄く、例えば、直前のステップAにおいて形成される多結晶膜の厚さの1/10以下である。或いは、ステップB

は、直前のステップAにおいて形成された膜の一部を変質或いは除去したり、表面状態を変更（再構成）したりするものであってもよい。

[0056] 次に、バルブ243h、バルブ243e～243gを閉じて、結晶成長阻害ガスと不活性ガスの供給を停止する。そして、処理室201内を真空排気して、処理室201内に残留するガス等を処理室201内から排除する。

[0057] ステップBにおいて結晶成長阻害ガスを供給する際の処理条件としては、
処理圧力：1～10000Pa、好ましくは1～1000Pa
結晶成長阻害ガス供給流量：0.1～5000sccm、好ましくは10～500sccm

結晶成長阻害ガス供給時間：0.1秒～30分、好ましくは1秒～3分
不活性ガス供給流量（ガス供給管毎）：0～3000sccm
が例示される。

[0058] ステップBにおいて排気を行う際の処理条件としては、
処理圧力：0.1～5000Pa、好ましくは10～1000Pa
が例示される。

[0059] なお、ステップBでは、ステップAにおける処理温度と、同じ処理温度で行われるように、ヒータ207の出力を調整する。

[0060] 結晶成長阻害ガスとしては、例えば、酸素（O）含有ガスや窒素（N）含有ガスを用いることができる。O含有ガスとしては、例えば酸素（O₂）ガスを用いることができる。結晶成長阻害ガスとして、O含有ガスを用いることで、ステップAでウエハ200の表面上に形成された多結晶膜の少なくとも一部を酸化させて、多結晶膜の表面に、多結晶膜とは膜質の異なる膜であって、多結晶膜を構成する元素以外の元素であるOを含む層を形成し、連続的な結晶成長を阻害することができる。すなわち、酸化層を、多結晶膜の結晶成長を阻害する結晶成長阻害層500として用いることができる。

[0061] なお、ステップBでは、結晶成長阻害ガスとして、O含有ガスを用いる場合、後述するアニール後における多結晶膜上に形成される膜の酸素（O）濃度が 1×10^{23} [atoms/cm³]未満となる処理条件で行われる。好ま

しくは、アニール工程前における多層膜中のO濃度のピーク値は、 1×10^{20} から 1×10^{22} [atoms/cm³] の間となるような条件で行われる。或いは、ステップBに起因して形成される結晶核が、所望の密度、例えばその上に形成される多結晶膜の結晶粒径を、ステップBを行わない場合の結晶粒径の1/5以上にするような密度となる条件で行われる。これは、ステップBにおけるO含有ガス供給時の、酸素分圧、処理温度、処理時間等を制御することにより、達成されうる。これにより、多層膜中のO濃度は化学量論的組成に比べてごく僅かとなり、また結晶サイズの低下が抑えられ、多層膜中の特性に与える影響は限定的である。

[0062] [ステップC]

上述したステップA、Bを非同時に行うサイクルを所定回数（n回、nは1以上の整数）行うことにより、ウエハ200の犠牲層300の表面上に、所定厚さであって、例えば1 μm以上の厚さの多層膜を形成する。上述のサイクルは、複数回繰り返すことが好ましい。具体的には、多結晶膜400を例えば250 nm形成する毎に、結晶成長阻害層500を形成することにより、ウエハ200の犠牲層300の表面上に、所定厚さであって、例えば1 μm以上の厚さの多層膜を形成する。なおステップA、Bは同時に行われても良い。

[0063] そして、ステップCの後に、上述したステップAを行って、結晶成長阻害層500の上に、多結晶膜400を形成する。すなわち、結晶成長阻害層500の上に、多結晶膜400が新たな結晶粒を形成して堆積される。言い換えれば、結晶成長阻害層を挟んで上側と下側の多結晶膜400は、結晶の連続性が無いもしくは制限されている。

[0064] このようにして、図4（B）に示すような、ウエハ200上の多結晶膜400の結晶粒を結晶成長阻害層500で分断して複数層の多結晶膜400である多層膜を形成する。このように形成された多層膜の構造を、以後ILIS (inhibition layer inserted structure) と呼び、このような構造を形成する成膜工程をILISプロセス

と呼ぶ。これに対して、図4（A）に示すようなI L I Sを用いない従来の単一膜構造を比較例と呼ぶ。所定の膜厚の多層膜を得る上で、上述した所定回数（ステップBを行う回数、結晶成長阻害層の数ともいう）は、多層膜全体の中の後述するアモルファス状或いは余剰S i 原子の密度を変化させる。そのため所定回数を制御することにより、多層膜全体の残留応力を制御することが可能となる。

[0065] 上述した所定回数は、後述するアニール工程後の多層膜中の残留応力の絶対値が、許容可能な値の範囲内となるように設定される。膜中の残留応力が許容可能な値は、アプリケーション毎に異なるが例えば $-150 \sim 150$ MPaである。ここで応力は引張を正、圧縮を負としている。すなわち、ステップBを挿入する回数を制御することにより、アニール工程後の多層膜中の残留応力を制御することができる。ここで、残留応力とは、外力が無い状態で物体内に存在する応力のことをいい、本開示においては、多層膜とその下地であるウエハ200との間に作用する力と、犠牲層が除去され前述の残留応力の一部が開放された後も多層膜中に残留する応力の、両方の意味を含む。なお、残留応力は、膜ストレスと称することもできる。

[0066] ここで、成膜工程におけるステップBを行う回数は、アニール後の膜中の残留応力が大きいほど多く、膜中の残留応力が小さい（すなわち圧縮側に大きい）ほど少なくするように設定される。言い換えれば、ステップBを行う回数を制御することにより、多層膜中の残留応力を制御することができ、多層膜全体の残留応力を緩和することが可能となる。

[0067] また、成膜工程において、ステップBを行う回数を制御することにより、多層膜中の残留応力を制御することができるので、回数を固定した場合に比べストレス制御範囲が広く、後述するアニール工程における温度が低い（熱履歴が少ない）場合であっても残留応力をゼロに近い値にすることが可能となる。

[0068] （アフターパージおよび大気圧復帰）

次に、ノズル249a～249cのそれぞれから不活性ガスを処理室20

1 内へ供給し、排気口 2 3 1 a より排気する。ノズル 2 4 9 a ~ 2 4 9 c より供給される不活性ガスは、パージガスとして作用し、これにより、処理室 2 0 1 内がパージされ、処理室 2 0 1 内に残留するガスや反応副生成物等が処理室 2 0 1 内から除去される（アフターパージ）。その後、処理室 2 0 1 内の雰囲気の不活性ガスに置換され（不活性ガス置換）、処理室 2 0 1 内の圧力が常圧に復帰される（大気圧復帰）。

[0069] （ボートアンロードおよびウエハディスチャージ）

その後、ボートエレベータ 1 1 5 によりシールキャップ 2 1 9 が下降され、マニホールド 2 0 9 の下端が開口される。そして、処理済のウエハ 2 0 0 が、ボート 2 1 7 に支持された状態でマニホールド 2 0 9 の下端から反応管 2 0 3 の外部に搬出（ボートアンロード）される。ボートアンロードの後には、シャッター 2 1 9 s が移動させられ、マニホールド 2 0 9 の下端開口がリング 2 2 0 c を介してシャッター 2 1 9 s によりシールされる（シャッタークローズ）。処理済のウエハ 2 0 0 は、反応管 2 0 3 の外部に搬出された後、ボート 2 1 7 より取り出される（ウエハディスチャージ）。

[0070] その後、別の処理炉（処理室）において、ボートロード、処理室内の圧力調整および温度調整が行われ、次のアニール工程 S 1 2 0 を行う。すなわち、成膜工程 S 1 1 0 が終了した後、アニール工程を、成膜工程の処理炉とは別の処理炉において（e x - s i t u にて）行う。

[0071] [アニール工程 S 1 2 0]

次に、アニール工程 S 1 2 0 について説明する。

ここでは、ウエハ 2 0 0 の表面上に多層膜が形成された後のウエハ 2 0 0 に対して、ノンプラズマの N₂ 雰囲気下で、アニール処理を行う。アニール処理は初期の膜である多結晶膜のそれぞれを、膜質の異なる膜に転換する。具体的にはアニール処理は、多結晶膜に対し粒界移動や粒界すべりを引き起こすので、しばしば結晶粒径が拡大する。また結晶粒界付近やある種の結晶成長阻害層に存在するアモルファス状の S i は、固相エピタキシャル成長の要領で、隣接する結晶粒と一体化する場合がある。複数の実験を通じて後述す

るように、ステップBを行う回数が多いほど多層膜全体における余剰S iの比率が高くなると考えられ、アニール処理によるシュリンク率が大きくなる。また、結晶成長阻害層500を形成しない場合と比較して、残留応力はゼロ方向へシフトする。

[0072] なお、ステップS120では、ウエハ200の温度を、成膜工程S110におけるウエハ200の温度以上であって1200℃以下、より好ましくは900℃以上1100℃以下の温度となるように、ヒータの出力を調整する。ステップS120の温度は、ウエハ200の製造時（つまり成膜工程S110よりも前）のアニール等における最高暴露温度（典型的には1100～1200℃）よりも低くすることで、ゲッタリングサイトや不純物の濃度分布等のウエハ200の特性を変化させてしまうことを抑制でき、1000℃以下にすることで特性の好ましくない変化を十分に抑制できる。

[0073] ステップS120では、上述した成膜工程S110におけるステップCの所定回数（ステップBを行う回数）が多くなるほど、残留応力が、負の値の圧縮から正の値の引張へシフトする。所定回数が0のときのアニール後の残留応力が負の値であるとする、残留応力が正に反転するまでは、所定回数が0から多くなるほど、多層膜中の残留応力の絶対値が小さくなる。言い換えると、アニール工程S120は、多層膜が形成されたウエハ200の温度を、上述した成膜工程S110におけるステップBの回数と、アニール後の多層膜の残留応力との間に正の相関を有するような性質となるように多層膜の性質が変更されるような温度で為される。最高温度だけでなく、昇温レートや降温レートもアニール後の残留応力に影響しうる。多層膜の膜厚が例えば10μmを超えて厚くなると、RTA（Rapid Thermal Anneal）のような手法は深さ方向に均一にアニールすることが難しくなりえる。

[0074] すなわち、アニール工程S120では、ステップBの回数が適切に選ばれてなされた成膜工程S110において形成された多層膜の残留応力の絶対値をアニール前より小さくするとともに、応力勾配を小さくして、膜質を向上

させることも可能となる。このようにして、アニール工程S 1 2 0では、アニール工程前の多層膜よりも膜質が改善されてなる膜、すなわち、膜質が向上した膜へ変化させることが可能となる。なおこの文脈において、膜質とは膜の結晶学的、化学的、機械的、光学的、電気的およびデバイスの作成に求められるその他のあらゆる性質の一部または全部を含み得る。

[0075] [パターンニング工程S 1 3 0]

次に、パターンニング工程S 1 3 0について説明する。

ここでは、成膜工程S 1 1 0、アニール工程S 1 2 0時とは別の処理炉において、ステップS 1 3 0を行う。ステップS 1 3 0では、アニール処理された後のウエハ2 0 0に対して、パターンニングを行う。

[0076] パターンニング工程として、レジスト塗布、露光、異方性エッチング、レジスト除去等が含まれる。

[0077] [犠牲層除去工程S 1 4 0]

次に、犠牲層を除去する犠牲層除去工程S 1 4 0について説明する。

ここでは、成膜工程S 1 1 0、アニール工程S 1 2 0、パターンニング工程S 1 3 0時とは別の設備を用いて、パターンニングが行われた後のウエハ2 0 0に対して、犠牲層を除去する工程について説明する。

[0078] 犠牲層としては、例えば、シリコン酸化 (SiO_2) 層、 SiO_2 層中にリン (P) を含んだPSG層、ボロンリンガラス (BPSG: Boron phosphorus silicate glass) 層、Si層等を用いることができる。 SiO_2 層は、テトラエトキシシラン (TEOS) を原料とするCVD法やウエハ2 0 0の熱酸化等によって得られうる。犠牲層としては、これらのうち1以上を用いることができる。

[0079] 本ステップでは、ウエハ2 0 0上の多層膜の下地として形成された犠牲層と、エッチングガスとの化学反応により、犠牲層が除去される。エッチングガスとしては、例えば、ハロゲン含有ガスを用いることができる。ハロゲン含有ガスとしてフッ素 (F) 含有ガスを用いることができる。エッチングガスとして、例えばハロゲン含有ガスを用いることで、ウエハ2 0 0上に形成

された犠牲層の除去を行うことが可能となる。ハロゲン含有ガスの一例であるF含有ガスとして、例えば、フッ化水素(HF)ガス、三フッ化塩素(ClF₃)ガス、フッ化塩素(ClF)ガス、三フッ化窒素(NF₃)ガス、フッ素(F₂)ガス等を用いることができる。F含有ガスとしては、これらのうち1以上を用いることができる。なお犠牲層は、硝酸、酢酸等が添加されたフッ酸(HF)溶液を用いたウェット処理によっても除去することができる。この場合、溶媒として水の外、ハイドロフルオロエーテル等の非水系溶媒が用いられうる。

[0080] ここで、犠牲層を除去してカンチレバー等の構造を形成する際に、犠牲層の上に形成されているポリシリコン膜等の多結晶膜には膜に垂直な方向に反りが発生してしまう場合があった。本開示によれば、多結晶膜の応力の深さ方向における応力勾配を所定の範囲内に維持したまま、膜中の残留応力の絶対値を小さくした状態で、多結晶膜をカンチレバーに加工することができるので、膜の反りを抑制することが可能となる。

[0081] なお本ステップは、ウェットエッチングに限らず、ドライエッチングによって行うこともできる。

[0082] (3) 本態様による効果

本態様によれば、以下に示す1つまたは複数の効果が得られる。

[0083] (a) ウエハ200上の多結晶膜に対して、結晶成長阻害ガスに暴露させる回数を制御することにより、多層膜中の残留応力を制御することが可能となる。また、膜質を改善させることが可能となる。

[0084] (b) ウエハ200上の多結晶膜に対して、結晶成長阻害ガスに暴露させることにより、多結晶膜の結晶粒径(グレインサイズ)を制御することが可能となる。具体的には、多層膜の膜厚の増加に関わらず、結晶粒径の均一性を向上させることができる。また、表面粗さの小さい膜を得ることができる。

[0085] (c) また、その後のアニール工程において、多層膜中の残留応力を所望の範囲内に制御することが可能となる。具体的には、アニール後の多層膜中の残留応力の絶対値或いは応力勾配を小さくすることができる。

[0086] (d) また、その後のアニール工程において、多層膜中の応力勾配を所望の範囲内に制御することが可能となり、アニール工程前と比較して膜質を改善させることが可能となる。具体的には、アニール後の多層膜中の応力勾配を許容可能な値よりも小さくすることができる。

[0087] (e) また、成膜工程中にアニールを介在させず、成膜工程の間、処理温度を変更しないので、処理時間を短くすることができ、スループットを向上させることができる。

[0088] (f) また、ウエハ200上の多層膜の下地として形成された犠牲層を除去した場合であっても、多層膜中の残留応力の絶対値又は勾配を小さくすることができるので、多層膜の反りを抑制することができる。このためMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 等のデバイスの製造に好適に利用することができる。

[0089] (g) また、堆積により形成した膜を用いて、MEMS慣性センサのような構造を作製することができる。多層膜の下には、犠牲層を介して電極層等の任意の膜を挿入可能であり、silicon-on-insulator (SOI) ウエハやcavity SOIウエハを用いたSOIプロセスに比べ、デバイスの設計自由度を高くすることができる。

[0090] (h) また、LPCVD法によって、残留応力の絶対値又は勾配の小さい、20～30 μm の厚さの膜を形成することができ、量産性に優れる。

[0091] (4) 変形例

本態様におけるステップBは、以下に示す変形例のように変更することができる。特に説明がない限り、各変形例の各ステップにおける処理手順、処理条件は、上述の基板処理シーケンスの各ステップにおける処理手順、処理条件と同様とすることができる。

[0092] 本変形例では、上述したステップBにおいて、結晶成長阻害ガスの代わりに、ステップAにおける多結晶膜とは膜質の異なる膜又は表面を形成する所定のガスを用いる。すなわち、上述した基板処理装置において、処理室201内のウエハ200に対して多結晶膜とは膜質の異なる膜を形成する所定の

ガスを暴露する所定のガス供給系を備え、以下に示す処理シーケンスを行う。

[0093] (原料ガス→所定のガス) × n

[0094] 所定のガスは、例えば第14族元素を含むガスである。つまり、ステップAによる多結晶膜の構成元素と、ステップBによる多結晶膜とは膜質の異なる膜の構成元素とは、実質的に同じでもよい。例えば、ステップBによって形成される膜は、ステップAにおいて形成される初期の膜と結晶性が異なるだけで、組成が実質的に同じ膜でもよい。

[0095] 具体的には、例えばステップBにおいて、上述したSiH₄ガス以外のシリコン原料ガスであって、例えばジシラン(Si₂H₆)ガスやクロロシランガスを供給して、ステップAにおいてウエハ200上に形成された多結晶膜の表面に、多結晶膜とは膜質の異なる膜であるアモルファスSi膜を形成してもよい。ステップAの原料ガスと異なる原料ガスを用いることで、温度を変えずに結晶性を異ならせることができる。

[0096] 本変形例においても上述の態様と同様な効果が得られる。また、本変形例においては、さらにステップBにおいて、ステップAにおける原料ガスに含まれる元素と同じ元素を含むガスを用いるため、多層膜中に原料ガスに含まれる元素と異なる元素を含めないようにすることが可能となる。

[0097] 或いは、ステップAとステップBのように工程を区別せずに、それらを並行して行ってもよい。このとき、堆積の進行中において、結晶粒の大きさ(基板に平行な面における断面積)が変化せず、及び／又は、配向性が同等となるように、すなわち結晶性が一定となるように、原料ガスと共に、原料ガスとは異なる所定のガスを供給する。このとき、原料ガスの分圧若しくは原料ガスと共に暴露する所定のガスの分圧或いはウエハ200の温度を変更する。このようにした場合であっても、多結晶膜の残留応力の勾配を所定の範囲内に維持することが可能であり、多結晶膜の応力勾配を所定の範囲内に維持したまま、多結晶膜をカンチレバーに加工することができる。ここで原料ガスと共に暴露する所定のガスとして、例えばN₂ガスやArガス等の不活性

ガスや H_2 ガス等を用いることができる。

[0098] <本開示の他の態様>

以上、本開示の態様を具体的に説明した。しかしながら、本開示は上述の態様に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能である。

[0099] 例えば、上述した基板処理工程では、ステップS110～ステップS140を、それぞれ別の処理炉（処理室）にて行う（つまり*ex-situ*処理）構成について説明したが、これに限定されるものではなく、全ステップ又は一部のステップを同一処理炉（処理室）にて連続して行う（つまり*in-situ*処理）ようにしてもよい。本態様においても、上述の態様と同様の効果が得られる。

[0100] また、例えばステップAにて用いる原料ガスとして、Si含有ガスにホスフィン（ PH_3 ）を添加（ドーピング）して、多結晶膜としてドーブSi膜を形成してもよい。これにより、ノズル毎にドーパントガスの流量を調整し、不純物濃度の面間均一性を改善することが可能となる。また、ドーブSi膜と、Si含有ガスに PH_3 を添加しないノンドーブSi膜と、を形成する毎に、結晶成長阻害層を形成して多層膜を形成してもよい。本態様においても、上述の態様と同様の効果が得られる。

[0101] また、例えばステップBにて用いる結晶成長阻害ガスとして、窒素（N）含有ガス（窒化ガスともいう）を用いても良い。N含有ガスとして、例えば一酸化窒素（NO）ガスやアンモニア（ NH_3 ）ガス、Nラジカル等を用いることができる。またN含有ガスは、プラズマ等によって活性化されても良い。これによって、ステップAでウエハ200の表面上に形成された多結晶膜の少なくとも一部を窒化させて、多結晶膜の表面に、多結晶膜を構成する元素以外の元素であるNを含む層を形成し、多結晶膜の結晶粒を終端させることができる。すなわち、窒化層を、多結晶膜の結晶成長阻害層として用いることもできる。本態様においても、上述の態様と同様の効果が得られる。

[0102] また、例えばステップAで形成される初期の膜は多結晶膜に限らず、アモ

ルファス膜や単結晶膜であってもよい。またステップBで形成される膜は、ステップAと結晶性が異なる多結晶膜、アモルファス膜等から任意に選ぶことができる。初期の膜がアモルファス膜の場合、積層膜は600℃以上のアニールで容易に多結晶化し、その際ステップBの処理は核形成、粒界形成、粒径制御に寄与しうる。またステップBで形成される膜は、少なくとも表面の1原子層において、ステップAの最中における表面状態とは異なるものであれば十分であり、更には連続的な膜である必要もない。即ち、ステップBは、ステップAで堆積された初期の膜の上に新たな膜を堆積させるものに限らず、初期の膜の表面を再構成したり、表面のごく一部に（疎らに）特定の分子を吸着させたり、化学的な反応で改質させたり、原子結合を切断したり、励起したりするものであっても良い。本態様においても、上述の態様と同様の効果が得られる。

[0103] また、上述した基板処理工程では、犠牲層が形成されたウエハ200上に多層膜を形成する場合を例にして説明したが、本開示はこれに限定されるものではなく、犠牲層がウエハ200上に直接接していない場合や、多層膜が犠牲層に直接接していない場合にも、好適に適用できる。犠牲層はシリコン酸化膜に限らず、窒化膜ウエハでもよく、非晶質、結晶質のいずれの膜でも良い。SiO₂膜は通常非晶質であるが、基板の結晶方位に対応する配向性を有する微結晶を含んでも良く、その場合その上に形成される多層膜も基板の結晶方位に対応する配向性を有する可能性がある。

[0104] また、上述した基板処理工程では、多結晶膜をSiのみからなる1元系半導体で構成する場合を例にして説明したが、本開示はこれに限定されるものではなく、SiGe等の混晶や、化合物半導体にも、適用されうる。または、アニール処理は多層膜全体を所定温度に昇温するものに限らず、RTA等の手法により表面側をより高温にし大きくシュリンクさせ、カンチレバーが上向きに反るような応力勾配を形成することもできる。また多結晶膜の形成には、熱CVDに限らず、プラズマCVD、光CVD、反応性CVDや、多結晶膜を形成しうるその他のあらゆる成膜方法が利用できる。

- [0105] また、各処理に用いられるレシピは、処理内容に応じて個別に用意し、電気通信回線や外部記憶装置 1 2 3 を介して記憶装置 1 2 1 c 内に格納しておくことが好ましい。そして、各処理を開始する際、CPU 1 2 1 a が、記憶装置 1 2 1 c 内に格納された複数のレシピの中から、処理内容に応じて適正なレシピを適宜選択することが好ましい。これにより、1 台の基板処理装置で様々な膜種、組成比、膜質、膜厚の膜を、再現性よく形成することができるようになる。また、オペレータの負担を低減でき、操作ミス回避しつつ、各処理を迅速に開始できるようになる。
- [0106] また、上述のレシピは、新たに作成する場合に限らず、例えば、基板処理装置に既にインストールされていた既存のレシピを変更することで用意してもよい。レシピを変更する場合は、変更後のレシピを、電気通信回線や当該レシピを記録した記録媒体を介して、基板処理装置にインストールしてもよい。また、既存の基板処理装置が備える入出力装置 1 2 2 を操作し、基板処理装置に既にインストールされていた既存のレシピを直接変更してもよい。
- [0107] また、上述の態様では、一度に複数枚の基板を処理するバッチ式の基板処理装置を用いて膜を形成する例について説明した。本開示は上述の態様に限定されず、例えば、一度に 1 枚または数枚の基板を処理する枚葉式の基板処理装置を用いて膜を形成する場合にも、好適に適用できる。また、上述の態様では、ホットウォール型の処理炉を有する基板処理装置を用いて膜を形成する例について説明した。本開示は上述の態様に限定されず、コールドウォール型の処理炉を有する基板処理装置を用いて膜を形成する場合にも、好適に適用できる。
- [0108] これらの基板処理装置を用いる場合においても、上述の態様と同様な処理手順、処理条件にて各処理を行うことができ、上述の態様と同様の効果が得られる。
- [0109] なお、上述の各種態様や変形例は、適宜組み合わせて用いることができる。このときの処理手順、処理条件は、例えば、上述の態様や変形例の処理手順、処理条件と同様とすることができる。

[0110] (5) 以下、複数の実験結果について説明する。

[0111] (実験1)

上述した基板処理装置を用いて、上述した成膜工程 (ILIS プロセス) とアニール工程を行って、ウエハの犠牲層上に多層膜を形成した評価サンプルを作製した。図6は、評価サンプルの膜中のO濃度を、二次イオン質量分析法 (SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry) により分析した結果を示した図である。評価サンプルを作製する際の各ステップにおける処理条件は、上述の態様の各ステップにおける処理条件範囲内の所定の処理条件とした。図6の横軸は膜の深さ、右縦軸はSiの二次イオン強度、左縦軸はO濃度を示している。また、上述したステップBでは、結晶成長阻害ガスとしてのO₂ガス供給時における多層膜中の、アニール後におけるO濃度が、 $1 \times 10^{23} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$ 未満となる処理条件で行った。

[0112] 酸素 (O) は、膜中の組成においてSiの次に多い元素である。アニール後における多層膜中のO濃度のピーク値 (最大値) は、 1×10^{20} から $1 \times 10^{22} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$ の間であることが確認された。また、O₂ガス供給時における多層膜中のO濃度は、犠牲層であるSiO₂層の界面におけるO濃度と比較して傾きが緩やかであることが確認された。これは、多層膜の表面ラフネス (最大高さ粗さ) が50~100nm程度であることと、成膜中にOが拡散したためであると考えられる。また、アニール後における多結晶膜中の典型的なO濃度は $1 \times 10^{17} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$ 未満であることが確認された。これは現在のチョクラルスキー法による一般的なSiウエハにおける典型的な残留酸素濃度である $1 \times 10^{18} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$ よりも小さく、Oの固溶限よりも小さい。なおアニール工程を行わないサンプルについても測定したところ、O濃度のプロファイルに大きな違いは無かった。

[0113] よって、本基板処理工程により形成された多層膜中におけるO濃度は、ごく僅かであり、MEMS用の多層膜に求められる膜質を満たす上で障害にならないことが確認された。なおO濃度は、 $1 \times 10^{23} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$

以上であると、結晶粒径の低下や抵抗率の低下をもたらしアニール後に要求される膜質を満たせない恐れがあるが、 $1 \times 10^{22} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$ 以下であれば膜質への影響は限定的である。またO濃度は、 $1 \times 10^{20} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$ 未満であると、結晶成長阻害効果が不十分で新たな結晶粒を形成できず、応力制御が困難になりうるが、 $1 \times 10^{20} [\text{atoms}/\text{cm}^3]$ 以上であれば応力制御するのに十分な結晶成長阻害効果が得られる。

[0114] (実験2)

図7は、上述した基板処理装置を用いて、上述したILISプロセスを行って、ウエハ上に $1 \mu\text{m}$ の膜厚の多層膜を形成した場合の、結晶成長阻害ガスの供給回数と、膜中の残留応力との関係を、その後にアニール工程を行わなかった場合と、その後にアニール工程を行った場合とで比較して示した図である。図7の横軸は膜厚 $1 \mu\text{m}$ 当たりの結晶成長阻害ガスの供給回数、縦軸は多層膜中の残留応力を示している。残留応力の符号で、マイナスは圧縮応力を示し、プラスは引張応力であることを示している。多層膜の内部応力は、基板の両面に成膜処理をした後、片面の多層膜を剥離して基板の反りを計測する基板曲率法によって評価した。なお1回、3回および9回の供給回数はそれぞれ、多層膜の表面からの深さが 500 nm 、 250 nm 及び 100 nm 増すごとに結晶成長阻害層が存在することを意味する。

[0115] アニール工程無しの場合には、多層膜中の残留応力は総じて負（圧縮応力）である。さらに結晶成長阻害ガスの供給回数が多いほど、さらに圧縮応力が強くなることが確認された。

[0116] これに対して、アニール工程有りの場合には、全ての供給回数において、アニール工程無しの場合よりも多層膜中の残留応力は引張側に変化し、また絶対値が小さくなった。さらに結晶成長阻害ガスの供給回数が多いほど、残留応力（圧縮応力）が引張方向に大きく移動し、残留応力が0に近づくことが確認された。すなわち、結晶成長阻害ガスの供給回数に応じて、ウエハ上の多層膜中の残留応力の絶対値を小さくすることが可能となることが確認された。すなわち、アニール工程無しと有りとは、残留応力の阻害層数への

依存性が逆転する。このメカニズムは以下のように考えられる。初めに、アニール処理で残留ストレスが緩和する要因として、膜のシュリンクが考えられる。具体的には粒界に存在する余剰S i 原子が結晶中へ取り込まれるようなモデルである。余剰S i は、結晶と結晶の間に存在するアモルファス状のS i であって、結晶化していないため密度が小さい。アニール処理を行うとアモルファス状だった部分が結晶化して体積が減少し、残留応力は圧縮側から引張側に変化する。アズデポの膜に大きな圧縮応力が残留している場合、アニールにより残留応力の絶対値はアニール前に比べて小さくなる。

[0117] 次に、アニール処理前後の阻害層数依存の傾向が異なる要因は、粒界の多さの違いが考えられる。ここで、多結晶膜400は、堆積が進行するほど結晶粒の大きさが大きくなると仮定する。すると、阻害層数を増やすことで、多結晶膜1層当たりの厚さが小さくなり、平均的な結晶粒サイズが小さくなる。これは粒界の面積の増大、及び余剰原子の割合の増大をもたらし、アズデポの膜の残留応力は圧縮側に大きくなる。一方、アニール処理をすると、阻害層数が多いほどシュリンク率が高くなり、残留応力が大きく緩和し引張側へ変化する。このモデルは、後述の実験3～4によって更に裏付けられた。

[0118] すなわち、アニール処理を実施することにより、アニール処理を実施しない場合と比較して、残留応力が緩和され、さらに結晶成長阻害ガスの供給回数を多くするほど、膜中の残留応力が圧縮応力から引張方向へシフトして、残留応力をゼロに近づけることが可能となることが確認された。すなわち、アニール処理後には、結晶成長阻害ガスの供給回数が増えるほど、膜中の残留応力が大きくなる、或いは残留応力の絶対値が小さくなるような性質となるように多層膜の性質が変更されることが確認された。このように、結晶成長阻害層によって一旦圧縮応力の大きな、つまり好ましくない膜質の多層膜を形成し、アニールによって圧縮応力の原因を取り除くことによって、結晶成長阻害層を有しない膜よりも膜質の優れた膜を得ることができるのである。

[0119] なお、620℃で成膜処理を行い、900℃で1時間アニール処理をした別の実験では、アニール後に実質ゼロ或いは僅かに正の残留応力が確認された。従って、成膜処理の温度と、アニール処理の温度及び時間を更に最適化することによって、残留応力を更に0に近づけたり、引張応力を残留せたりすることもできると考えられる。また図7は、アニールを行わない（即ちアニール温度を成膜温度に限りなく近づける）オプションを含めることによって、残留応力の制御範囲を約2倍に拡張できることを示唆している。例えば、目標の応力が所定応力未満の場合、アニールを行わずに犠牲層の数を増やすほど応力が減少する態様でストレス制御し、目標の応力が所定応力を超える場合、アニールを行い犠牲層の数を増やすほど応力が増大する態様でストレス制御することが可能である。これにより、カンチレバーに所定の反りを与えたい場合に、反りの制御範囲を拡張することができる。

[0120] （実験3）

実験3では、両面に犠牲層として厚さ100μmの下地SiO₂を形成した200mmのSiウエハの両面に、上述した基板処理装置を用いて、2種類の条件で、1μmの多層膜を形成し、断面TEM（Transmission Electron Microscopy）観察及びXRD（X-Ray Diffraction）により評価した。ここで2種類の条件の1つ目の条件によりサンプル1とサンプル2は作製された。すなわち、図8（A）に示すように、比較例の成膜工程として、犠牲層300上に、PH₃が添加（ドーピング）されたSi含有ガスを用いて25nmの厚さのドーピングSi膜600aを形成する工程と、PH₃を添加しないで225nmの厚さのノンドーピングSi膜600bを形成する工程と、を4回行って多結晶膜600を形成した。サンプル3とサンプル4は、2つ目の条件により製作された。すなわち、図8（B）に示すように、犠牲層300上に、PH₃が添加されたSi含有ガスを用いて25nmの厚さのドーピングSi膜600aを形成する工程と、PH₃を添加しないで225nmの厚さのノンドーピングSi膜600bを形成する工程と、を行う毎にO₂ガスを供給して結晶成長阻害層（O₂パージ層ともいう

）500を形成する、ILISプロセスにより多結晶膜600を形成した。
2つの条件とも、多結晶膜の成膜温度は620℃、リンドープSi膜600
a中のリン濃度は $1 \times 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ であり、サンプル2と4に対してはN₂
ガス雰囲気下において1100℃で5分間アニール処理を行った。

[0121] 図9（A）は、サンプル1の断面TEM像を示し、図9（B）は、サンプ
ル3の断面TEM像を示す。サンプル1は、深さ方向に様態が変わり、下地
酸化膜の付近では、不規則な結晶が存在し、その後の膜厚増加と共に柱状に
成長した結晶が確認された。これに対して、サンプル3は、結晶成長阻害層
によって結晶成長が阻害され、膜厚方向の結晶性が均一化していることが確
認できた。

[0122] 図10（A）は、サンプル2の断面TEM像を示し、図10（B）は、サ
ンプル4の断面TEM像を示す図である。サンプル2は、アニール処理によ
って結晶粒径が大きく成長する一方、サンプル4では、アニール処理しても
阻害層によって結晶成長が抑制されていることが確認できた。どちらもアニ
ール処理によって単結晶化することはなかった。結晶粒界の減少により余剰
Si原子が結晶中に取り込まれると、余剰Si原子に起因する圧縮応力も減
少することが期待でき、この場合アニール処理の温度が高いほど、圧縮応力
の減少は大きい。

[0123] 図11（A）は、サンプル2のXRDスペクトルを示し、図11（B）は
、サンプル4のXRDスペクトルを示す図である。両者は共にin-plane
法により測定された。サンプル2は、粉末からのスペクトルに比べ、（
111）の強度が強く、明らかな結晶配向が確認された。一方評価サンプル
4は、配向性は有するものの、（111）の割合がサンプル1と比較して小
さい。これは、膜厚増加と共に成長する（111）の結晶の成長が阻害され
ているためだと考えられる。

[0124] （実験4）

実験4では、両面に犠牲層として厚さ2μmの下地SiO₂を形成した20
0mmのSiウエハの両面に、上述した基板処理装置を用いて、上述した2

種類の条件で、 $25\text{ }\mu\text{m}$ の多層膜を形成した。サンプル1とサンプル2は、1つ目の条件により作製された。すなわち図8（A）に示すように、比較例の成膜工程として、犠牲層300上に、 PH_3 が添加（ドーピング）されたSi含有ガスを用いて25nmの厚さのドーピングSi膜600aを形成する工程と、 PH_3 を添加しないで225nmの厚さのノンドーピングSi膜600bを形成する工程と、を100回行って多結晶膜600を形成した。サンプル3とサンプル4は、2つ目の条件により作製された。すなわち、図8（B）に示すように、犠牲層300上に、 PH_3 が添加されたSi含有ガスを用いて25nmの厚さのドーピングSi膜600aを形成する工程と、 PH_3 を添加しないで225nmの厚さのノンドーピングSi膜600bを形成する工程と、を行う毎に O_2 ガスを供給して結晶成長阻害層500を形成する、ILISプロセスにより多結晶膜600を形成した。

[0125] そして、サンプル1及びサンプル3に対して、 N_2 ガス雰囲気下において900℃で60分のアニール処理を行った。また、サンプル2及びサンプル4に対して、 N_2 ガス雰囲気下において1100℃で5分のアニール処理を行った。そして、サンプル1～4に対して、それぞれリソグラフィ、deep reactive ion etching、犠牲層除去の工程を行って、幅 $18\text{ }\mu\text{m}$ 、長さ100～700 μm の各種のカンチレバーを形成して、評価した。

[0126] 図12（A）は、サンプル2の断面SEM像、図12（B）はサンプル4の断面SEM像である。この断面において深さ依存の結晶性を確認するために、下地 SiO_2 界面側の5 μm をEBSD分析した。図13（A）、図13（B）にそれぞれ示されるように、EBSD分析の観察視野は、界面から5 μm を、上、中央、下の3つに分割した領域に設定された。

[0127] 図14は、サンプル2とサンプル4の逆極点図方位マップである。この逆極点図は、視野内の各位置における結晶の方位を、サンプルの断面に垂直な関係にある結晶面の面指数に対応する濃淡で表したものである。このマップから計算された各視野における結晶粒径を表1に示す。なお、粒径は面積比

による加重平均粒径（ μm ）として算出され、この計算において双晶の境界は粒界としていない。

[0128] [表1]

視野	サンプル2	サンプル4
上	0.46	0.16
中央	0.38	0.17
下	0.32	0.17

[0129] 表1から、サンプル2は、膜成長と共に結晶粒径が大きくなるが、サンプル4は、結晶粒径が深さ方向に依存しないことがわかる。また、サンプル2は、深さ方向に異なる結晶形状であることがわかり、サンプル4は結晶成長が抑制され深さ方向に均一化されていることがわかる。

[0130] 図15は、サンプル2とサンプル4の逆極点図マップである。このマップは、各視野内における結晶面の割合を、ステレオ投影図のUnit Triangleに濃淡で表している。図15からもサンプル2は、深さ方向に結晶方位の分布が不均一だが、サンプル4は深さ方向に結晶方位の分布が均一である。これらの結果より、ILISプロセスで製作されたサンプル4は、比較例のサンプル2よりも深さ方向に結晶粒径、結晶形状、結晶方位が均一であることが分かる。このため余剰Siの密度も均一となり、応力勾配も小さいことが期待される。

[0131] 図16（A）は、サンプル2で作製したカンチレバーのSEM像を示す図である。図16（B）は、サンプル4で作製したカンチレバーのSEM像を示す図である。なおカンチレバーは、700 μm の長さで500 μm の長さの2種類の単純な片持ち梁が評価の対象とされ、図16（A）及び図16（B）はそれぞれ700 μm のものである。

[0132] 図17は、カンチレバーの表面の変位量のプロファイルを示す図である。に示すように、変位量は白色干渉計を用いて、ウェハ200に垂直方向の変位が測定された。図16(A)に示すサンプル2の700 μm のカンチレバーは、Si基板へタッチするほど大きく反り、500 μm のカンチレバーから圧力勾配を計算した。一方、図16(B)に示すサンプル4の700 μm のカンチレバーは、500 μm のカンチレバーとほぼ一致するプロファイルを示し、カンチレバー先端が下方方向に0.8 μm しか変位せず、算出した圧力勾配は-0.65MPa/ μm と非常に小さいことを確認した。これによりILISは、圧力勾配の緩和に作用していることがわかった。なお、応力勾配Xは、以下の式から算出される。

[数1]

$$X = \frac{2uE}{L^2(1-\nu)}$$

[0133] 上記において、uはカンチレバーの縦方向の変化量、Lはカンチレバーの長さ、Eはヤング率、 ν はポリシリコンのポアソン比（公知の値である0.22）であり、ヤング率にはサンプルの多結晶膜をナノインデントで測定して得た値を用いた。

[0134] 表2に、サンプル2、サンプル4及び公知のEpi-poly Si膜の各指標を示す。残留応力は、カンチレバーの先端の長手方向の変位（つまりカンチレバーの伸縮）をrotating beam structureを利用して計測し、ヤング率を乗じて算出した。表面粗さはatomic force microscopy (AFM)で算術平均粗さとして測定した。抵抗率は、spreading resistance profiling (SRP)で測定した。

[0135]

[表2]

	サンプル4	サンプル2	Epi-poly Si
応力勾配 (MPa/ μ m)	-0.65	-2.61	1.41
残留応力(MPa)	-6.5	-40.9	-57.2
表面粗さRa(nm)	18	61	202
ヤング率(GPa)	156.4	157.5	—
抵抗率(Ω ・cm)	0.128	0.027	0.003

[0136] サンプル4の応力勾配Xの絶対値は、サンプル2の応力勾配Xの絶対値と比較して小さい値となった。また、サンプル4の残留応力の絶対値は、サンプル2の残留応力の絶対値と比較して小さい値となった。また、サンプル4の表面粗さ（表面ラフネスともいう）は、サンプル2の表面粗さと比較して小さくなった。すなわち、結晶成長阻害層により結晶成長を阻害し、深さ方向に均一な結晶性を形成することで、残留応力の絶対値と応力勾配を小さくすることが可能となり、表面粗さも小さくなった。以上により、結晶成長阻害層を形成することにより、カンチレバー構造のポリシリコン膜の反りを、低減可能であり、ポリシリコン膜をMEMSに適用できることが確認された。なお、サンプル2とサンプル4の両方の抵抗率は、公知のEpi-poly Si膜よりも劣っており、サンプル4の方が悪化が大きい。この原因としては、結晶粒径の拡大の他、プロセス条件の最適化不足が考えられる。本例のILISは良く知られたLPCVDポリSiをベースにした技術なので、抵抗率は容易に調整できる。

符号の説明

[0137] 121 コントローラ（制御部）
 200 ウエハ（基板）

請求の範囲

- [請求項1] (a) 基板を原料ガスに暴露することにより初期の膜を堆積させる工程と、
- (b) 前記基板を結晶成長阻害ガス又は前記初期の膜とは膜質の異なる膜を形成する所定のガスに暴露する工程と、
- を含むサイクルを所定回数行うことにより、前記基板上に所定厚さの多層膜を形成する工程と、を備え、
- 前記所定回数は、前記多層膜をアニールした後に前記多層膜の残留応力の絶対値又は勾配が許容可能な値よりも小さくなるように設定される
- 基板処理方法。
- [請求項2] (a) は、前記初期の膜として多結晶膜を堆積し、
- (b) は、その後の(a)において堆積される多結晶膜が新たな結晶粒を形成する条件で行われる請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項3] 前記初期の膜は第14族元素を含む請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項4] (b) では、前記基板を前記結晶成長阻害ガスに暴露することにより、その後の(a)において堆積される初期の膜に所定の密度で結晶核を与える請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項5] 前記結晶成長阻害ガスは、酸素含有ガスである請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項6] 前記所定のガスは第14族元素を含み、前記初期の膜の構成元素と、前記初期の膜とは膜質の異なる膜の構成元素とは実質的に同じである請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項7] (a) と (b) は同じ温度で行われる請求項1記載の基板処理方法。
- 。
- [請求項8] (b) では、直前の(a)において形成された前記初期の膜の表面に、前記初期の膜を構成する元素以外の元素を含む層を形成する請求項1記載の基板処理方法。

- [請求項9] (b) は、アニール後における前記初期の膜とは膜質の異なる膜の膜中酸素濃度が 1×10^{23} [atoms/cm³] 未満となる処理条件で行われる請求項5記載の基板処理方法。
- [請求項10] 前記初期の膜は多結晶膜であり、前記初期の膜とは膜質の異なる膜は、アモルファス膜である請求項6記載の基板処理方法。
- [請求項11] (b) において形成される膜又は層の厚さは、直前の(a)において形成される前記初期の膜の厚さよりも薄い請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項12] (b) において形成される膜又は層の厚さは、直前の(a)において形成される前記初期の厚さの $1/10$ 以下である請求項11記載の基板処理方法。
- [請求項13] 前記所定回数は、アニール後の残留応力が大きいほど多く、残留応力が小さいほど少なくように設定される請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項14] (c) 前記多層膜を 1200°C 以下の温度でアニールする工程をさらに備え、
(c) では、前記所定回数が0から多くなるほどアニール後の残留応力の絶対値が小さくなるような性質となるように前記多層膜を変更する請求項1記載の基板処理方法。
- [請求項15] 前記結晶成長阻害ガスは、酸素含有ガスであって、
(c) 後における前記多層膜の膜中酸素濃度の最大値が 1×10^{20} から 1×10^{22} [atoms/cm³] の間であり、
(c) 後における前記初期の膜の膜中酸素濃度が 1×10^{18} [atoms/cm³] 未満である請求項14記載の基板処理方法。
- [請求項16] 最初の(a)が行われる前の基板は、その表面に犠牲層を有し、
(d) (c) の後に、前記犠牲層を除去する工程を有する請求項14記載の基板処理方法。
- [請求項17] (a) 処理室内で、表面に酸化膜が形成された単結晶基板を、第1

元素含有ガスに暴露し、表面に、少なくとも一部の結晶粒が前記単結晶基板にエピタキシャルな態様で前記第1元素含有の多結晶膜を堆積させる工程と、

(b) 前記多結晶膜の応力勾配を所定の範囲内に維持したまま、前記多結晶膜をカンチレバーに加工する工程と、を有し、

(a) では、堆積の進行中に結晶性が一定となるように、第1元素含有ガスの分圧若しくは第1元素含有ガスと共に暴露する前記第1元素含有ガスとは異なるガスの分圧或いは前記単結晶基板の温度を変更する工程を有する

基板処理方法。

[請求項18]

(a) 基板を原料ガスに暴露することにより初期の膜を堆積させる工程と、

(b) 前記基板を結晶成長阻害ガス又は前記初期の膜とは膜質の異なる膜を形成する所定のガスに暴露する工程と、

を含むサイクルを所定回数行うことにより、前記基板上に所定厚さの多層膜を形成する工程と、を備え、

前記所定回数は、前記多層膜をアニールした後に前記多層膜の残留応力の絶対値又は勾配が許容可能な値よりも小さくなるように設定される

半導体装置の製造方法。

[請求項19]

基板が処理される処理室と、

前記処理室内の基板に対して原料ガスを暴露する原料ガス供給系と、

前記処理室内の基板に対して結晶成長阻害ガスを暴露する結晶成長阻害ガス供給系又は前記原料ガスに暴露することにより堆積される初期の膜とは膜質の異なる膜を形成する所定のガスを暴露する前記所定のガス供給系と、

前記処理室内において、

(a) 前記基板を前記原料ガスに暴露することにより初期の膜を堆積させる処理と、

(b) 前記基板を前記結晶成長阻害ガス又は前記所定のガスに暴露する処理と、

を含むサイクルを所定回数行うことにより、前記基板上に所定厚さの多層膜を形成する処理と、を行わせ、

前記所定回数は、前記多層膜をアニールした後に前記多層膜の残留応力の絶対値又は勾配が許容可能な値よりも小さくなるように設定されるように、前記原料ガス供給系、前記結晶成長阻害ガス供給系及び前記所定のガス供給系のいずれかを制御することが可能なよう構成される制御部と、

を有する基板処理装置。

[請求項20]

基板処理装置の処理室内において、

(a) 基板を原料ガスに暴露することにより初期の膜を堆積させる手順と、

(b) 前記基板を結晶成長阻害ガス又は前記初期の膜とは膜質の異なる膜を形成する所定のガスに暴露する手順と、

を含むサイクルを所定回数行うことにより、前記基板上に所定厚さの多層膜を形成する手順と、をコンピュータによって前記基板処理装置に実行させるプログラムであって、

前記所定回数は、前記多層膜をアニールした後に前記多層膜の残留応力の絶対値又は勾配が許容可能な値よりも小さくなるように設定されるプログラム。