

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-193770

(P2017-193770A)

(43) 公開日 平成29年10月26日(2017.10.26)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
C23C 14/34 (2006.01)	C23C 14/34 R	2G084
H01L 21/3205 (2006.01)	H01L 21/88 R	4K029
H01L 21/768 (2006.01)	H01L 21/285 S	4M104
H01L 23/532 (2006.01)	C23C 14/22 F	5F033
H01L 21/285 (2006.01)	C23C 14/14 D	

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 13 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2016-86074 (P2016-86074)
 (22) 出願日 平成28年4月22日 (2016.4.22)

(71) 出願人 504203572
 国立大学法人茨城大学
 茨城県水戸市文京二丁目1番1号
 (74) 代理人 100097113
 弁理士 堀 城之
 (74) 代理人 100162363
 弁理士 前島 幸彦
 (74) 代理人 100194146
 弁理士 長谷川 明
 (74) 代理人 100194283
 弁理士 村上 大勇
 (74) 代理人 100141324
 弁理士 小河 卓

最終頁に続く

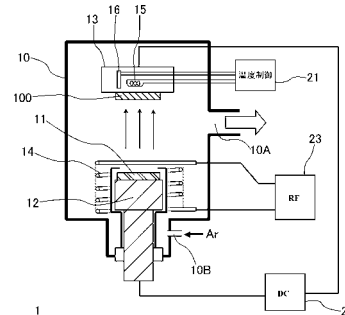
(54) 【発明の名称】 Ru成膜方法、Ru成膜装置、金属成膜装置、Ruバリアメタル層、配線構造

(57) 【要約】

【課題】緻密な構造のRu層（金属層）を低温で成膜する。

【解決手段】基板ホルダ13とカソード電極12間には、チャンバ10外に設けられた直流電源22を介して、カソード電極12が負側となるような直流(DC)電圧が印加される。ここでは、スパッタリングターゲット11、カソード電極12をその鉛直方向に沿った中心軸の周りで巻回するヘリカルコイル14が設けられている。ヘリカルコイル14には、チャンバ10外に設けられた高周波電源23によって高周波電力が印加される。ヘリカルコイル14を用いることによって、基板100の温度が400 以下の場合でも、良好な膜質のRuバリアメタル層を得ることができる。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

ルテニウム (Ru) を主成分とする Ru 層をスパッタリング法によって基板上に成膜する Ru 成膜方法であって、

圧力が $5 \times 10^{-4} \text{ Torr} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ の範囲とされたアルゴン (Ar) 雰囲気下において、前記基板と、Ru を主成分とするスパッタリングターゲットとを上下方向において対向させて配置し、

前記スパッタリングターゲット側と前記基板側の間において、前記基板側を負として直流電力を印加すると共に、

前記スパッタリングターゲットに隣接して設けられ、前記スパッタリングターゲット側と前記基板側の間に前記直流電力が印加されない場合においても前記 Ar をプラズマ化可能なプラズマ補助手段に対して電力を供給し、

前記基板の温度を 400 以下として前記 Ru 層を成膜することを特徴とする Ru 成膜方法。

【請求項 2】

前記スパッタリングターゲットの面積で規格化した前記直流電力を $5.9 \text{ W/cm}^2 \sim 11.9 \text{ W/cm}^2$ の範囲とすることを特徴とする請求項 1 に記載の Ru 成膜方法。

【請求項 3】

前記プラズマ補助手段は、上下方向の周りで前記スパッタリングターゲットを囲み高周波電力が供給されるコイルであることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の Ru 成膜方法。

【請求項 4】

前記高周波電力を 30 W ~ 60 W の範囲とすることを特徴とする請求項 3 に記載の Ru 成膜方法。

【請求項 5】

ルテニウム (Ru) を主成分とする Ru 層をスパッタリング法によって基板上に成膜する Ru 成膜装置であって、

圧力が制御されたアルゴン (Ar) の雰囲気下において、前記基板と、Ru を主成分とするスパッタリングターゲットとを上下方向において対向させて内部に保持するチャンバと、

前記チャンバ内において前記基板の温度を制御しつつ前記基板を保持する基板ホルダと、

前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットを保持するカソード電極と、

前記カソード電極を負側として前記基板ホルダと前記カソード電極との間に直流電力を供給する直流電源と、

前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットに隣接して設けられ、前記基板ホルダと前記カソード電極との間に前記直流電力が印加されない場合においても前記 Ar をプラズマ化可能なプラズマ補助手段と、

を具備することを特徴とする Ru 成膜装置。

【請求項 6】

前記プラズマ補助手段は、上下方向の周りで前記スパッタリングターゲットを囲み、高周波電力が供給されるコイルであることを特徴とする請求項 5 に記載の Ru 成膜装置。

【請求項 7】

前記基板の温度は 400 以下、前記圧力は $5 \times 10^{-4} \text{ Torr} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ の範囲であることを特徴とする請求項 5 又は 6 に記載の Ru 成膜装置。

【請求項 8】

40 nm 以下のデザインルールで製造された半導体装置が形成された半導体ウェハ上に形成され、(002) 配向度が 85% 以上である柱状構造を具備するルテニウム (Ru) で構成されたことを特徴とする Ru パリアメタル層。

【請求項 9】

前記 Ru パリアメタル層は、前記半導体装置の表面に形成され、前記 Ru パリアメタル層の厚さが 10 nm 以上であることを特徴とする Ru パリアメタル層。

請求項 8 に記載の Ru バリアメタル層と、前記 Ru バリアメタル層の上に形成され (1 1) 配向度が 8 0 % 以上である銅 (Cu) 層とを具備することを特徴とする配線構造。

【請求項 1 0】

金属層をスパッタリング法によって基板上に成膜する金属成膜装置であって、
圧力が制御されたスパッタリングガス雰囲気下において、前記基板と、前記金属層を構成する金属を主成分とするスパッタリングターゲットとを上下方向において対向させて内部に保持するチャンバと、

前記チャンバ内において前記基板の温度を制御しつつ前記基板を保持する基板ホルダと、

前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットを保持するカソード電極と、
前記カソード電極を負側として前記基板ホルダと前記カソード電極との間に直流電力を供給する直流電源と、

前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットに隣接して設けられ、前記基板ホルダと前記カソード電極との間に前記直流電力が印加されない場合においても前記スパッタリングガスをプラズマ化可能なプラズマ補助手段と、

を具備することを特徴とする金属成膜装置。

【請求項 1 1】

前記プラズマ補助手段は、上下方向の周りで前記スパッタリングターゲットを囲み、高周波電力が供給されるコイルであることを特徴とする請求項 1 0 に記載の金属成膜装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、ルテニウム (Ru) の成膜方法、成膜装置、及び金属の成膜装置に関する。また、半導体ウェハにおいて用いられる Ru バリアメタル層、及びこれが用いられる配線構造に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

近年、LSI (半導体集積回路) における配線の構造としては、複数の配線層が層間絶縁層を介して多数積層された多層配線構造が広く用いられている。ここで、高速化、微細化が進んだ LSI においては、特に配線の低抵抗化が要求されるため、各配線層を構成する材料として、電気抵抗率の低い銅が用いられている。このため、こうした配線層は主に銅で構成されるが、銅は層間絶縁層に拡散しやすく LSI の動作や信頼性に対して悪影響を及ぼすおそれがある、配線層が直接接する下地金属層や層間絶縁層と銅との間の密着性が低い、等の問題がある。このため、実際には、銅を用いた配線構造においては、厚い銅層が薄い金属層 (バリアメタル層) の上に形成される。バリアメタル層は、銅の拡散を防止する (バリアする) 役割と、銅層と他の層 (下地金属層や層間絶縁層) との間に介在することによって銅層と他の層との間の密着性を高める役割を果たす。

【0 0 0 3】

この役割を果たすことのできるバリアメタル層の材料としては、Ta、Ti、Ta₂N、TiN 等が知られている。ここで、配線構造が低抵抗であることが要求されるために、こうしたバリアメタル層も低抵抗であることが好ましいが、実際にはこうしたバリアメタル層の材料の電気抵抗率はいずれも銅よりも大幅に高く、バリアメタル層を低抵抗とすることは困難であった。

【0 0 0 4】

上記の材料に代わりうるバリアメタル層の材料として、ルテニウム (Ru) がある。例えば、バルク状態における Ta、Ti の比抵抗が $15 \times 10^{-6} \text{ } \cdot \text{ cm}$ 、 $80 \times 10^{-6} \text{ } \cdot \text{ cm}$ 程度であるのに対して、バルク状態における Ru の比抵抗は $9 \times 10^{-6} \text{ } \cdot \text{ cm}$ 程度であるため、Ru を用いることによって、バリアメタル層を低抵抗化できることが期待される。

【0 0 0 5】

10

20

30

40

50

バリアメタル層としてRuを用いるためには、その成膜方法として、量産性や段差被覆性に優れたものが用いられる。こうした成膜方法としては、例えば特許文献1に記載されたような、DCスパッタリング法がある。特許文献1に記載の技術においては、成膜時に、Ruバリアメタル層を形成すべき基板の温度を500以上に加熱することによって、クレパスの面積比が小さいためにバリア性が高く、銅層の高い密着性を得ることができる比抵抗の小さなRuバリアメタル層を形成することができた。

【0006】

また、成膜直後においてRuバリアメタル層がこうした良好な特性を具備しなくとも、その後熱処理を行うことによって、ポイドやクレパスを少なくすることができ、Ruバリアメタル層をより緻密な構造に、その比抵抗をより小さくすることができる。この際、ポイドやクレパスを少なくすることによって、Ruバリアメタル層と銅層や層間絶縁層(SiO₂等)との間の密着性(耐剥離性)も高めることができる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2012-174765号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

こうした銅配線は、実際には、LSIの構成要素、すなわち、これよりも下層となる配線層やトランジスタ(MOSTランジスタ)等が予め形成された半導体ウェハ上に形成される。この際、この配線層やトランジスタの材料や構造(例えば拡散層や層間絶縁層等)の耐熱性は、LSIの高速化あるいはデザインルールの微細化に伴って、低下している。このため、上記のバリアメタル層のような金属層をこうした半導体ウェハ上に形成するためには、その成膜温度や成膜後の熱処理の温度を低下することが必要であり、例えばこれらの温度を、特許文献1に記載されたような500よりも低くすることが望まれた。

20

【0009】

すなわち、緻密な構造のRu層(金属層)を低温で成膜することが望まれた。

【0010】

本発明は、かかる問題点を鑑みてなされたものであり、上記問題点を解決する発明を提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明は、上記課題を解決すべく、以下に掲げる構成とした。

本発明のルテニウム(Ru)成膜方法は、ルテニウム(Ru)を主成分とするRu層をスパッタリング法によって基板上に成膜するRu成膜方法であって、圧力が 5×10^{-4} Torr ~ 2×10^{-3} Torrの範囲とされたアルゴン(Ar)雰囲気下において、前記基板と、Ruを主成分とするスパッタリングターゲットとを上下方向において対向させて配置し、前記スパッタリングターゲット側と前記基板側の間において、前記基板側を負として直流電力を印加すると共に、前記スパッタリングターゲットに隣接して設けられ、前記スパッタリングターゲット側と前記基板側の間前記直流電力が印加されない場合においても前記Arをプラズマ化可能なプラズマ補助手段に対して電力を供給し、前記基板の温度を400以下として前記Ru層を成膜することを特徴とする。

40

本発明のRu成膜方法は、前記スパッタリングターゲットの面積で規格化した前記直流電力を $5.9 \text{ W/cm}^2 \sim 11.9 \text{ W/cm}^2$ の範囲とすることを特徴とする。

本発明のRu成膜方法において、前記プラズマ補助手段は、上下方向の周りで前記スパッタリングターゲットを囲み高周波電力が供給されるコイルであることを特徴とする。

本発明のRu成膜方法は、前記高周波電力を30W ~ 60Wの範囲とすることを特徴とする。

本発明のRu成膜装置は、Ruを主成分とするRu層をスパッタリング法によって基板

50

上に成膜するRu成膜装置であって、圧力が制御されたArの雰囲気下において、前記基板と、Ruを主成分とするスパッタリングターゲットとを上下方向において対向させて内部に保持するチャンバと、前記チャンバ内において前記基板の温度を制御しつつ前記基板を保持する基板ホルダと、前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットを保持するカソード電極と、前記カソード電極を負側として前記基板ホルダと前記カソード電極との間に直流電力を供給する直流電源と、前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットに隣接して設けられ、前記基板ホルダと前記カソード電極との間に前記直流電力が印加されない場合においても前記Arをプラズマ化可能なプラズマ補助手段と、を具備することを特徴とする。

本発明のRu成膜装置において、前記プラズマ補助手段は、上下方向の周りで前記スパッタリングターゲットを囲み、高周波電力が供給されるコイルであることを特徴とする。

本発明のRu成膜装置において、前記基板の温度は400以下、前記圧力は 5×10^{-4} Torr ~ 2×10^{-3} Torrの範囲であることを特徴とする。

本発明のRuバリアメタル層は、40nm以下のデザインルールで製造された半導体装置が形成された半導体ウェハ上に形成され、(002)配向度が85%以上である柱状構造を具備するルテニウム(Ru)で構成されたことを特徴とする。

本発明の配線構造は、前記Ruバリアメタル層と、前記Ruバリアメタル層の上に形成され(111)配向度が80%以上である銅(Cu)層とを具備することを特徴とする。

本発明の金属成膜装置は、金属層をスパッタリング法によって基板上に成膜する金属成膜装置であって、圧力が制御されたスパッタリングガス雰囲気下において、前記基板と、前記金属層を構成する金属を主成分とするスパッタリングターゲットとを上下方向において対向させて内部に保持するチャンバと、前記チャンバ内において前記基板の温度を制御しつつ前記基板を保持する基板ホルダと、前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットを保持するカソード電極と、前記カソード電極を負側として前記基板ホルダと前記カソード電極との間に直流電力を供給する直流電源と、前記チャンバ内において前記スパッタリングターゲットに隣接して設けられ、前記基板ホルダと前記カソード電極との間に前記直流電力が印加されない場合においても前記スパッタリングガスをプラズマ化可能なプラズマ補助手段と、を具備することを特徴とする。

本発明の金属成膜装置において、前記プラズマ補助手段は、上下方向の周りで前記スパッタリングターゲットを囲み、高周波電力が供給されるコイルであることを特徴とする。

【発明の効果】

【0012】

本発明は以上のように構成されているので、緻密な構造のRu層(金属層)を低温で成膜することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本発明の実施の形態に係るRu成膜装置の構成を示す図である。

【図2】Arをスパッタリングガスとしたスパッタリング法によって成膜された金属層の膜質の、Arガス圧と成膜温度(基板温度Ts)依存性を模式的に示す図である

【図3】Zone Iで成膜したRu層(a)、Zone T(Ts = 700)で成膜したRu層(b)の表面の電子顕微鏡写真である。

【図4】本発明の実施の形態に係る成膜方法によって得られたRu層(a)、従来の成膜方法によって得られたRu層(b)の表面の電子顕微鏡写真である。

【図5】本発明の実施の形態に係る成膜方法によって得られたRu層(a)、従来の成膜方法によって得られたRu層(b)のX線回折特性である。

【図6】本発明のRuバリアメタル層を用いた銅配線の第1の構造の製造工程を示す工程断面図である。

【図7】本発明のRuバリアメタル層を用いた銅配線の第2の構造の製造工程を示す工程断面図である。

【図8】本発明のRuバリアメタル層の電気抵抗率の膜厚依存性を測定した結果である。

10

20

30

40

50

【図9】LSIにおいて、配線の断面積に占めるバリアメタル層の断面積の比率の配線幅依存性を計算した一例である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

まず、本発明の実施の形態に係るRuバリアメタル層の成膜装置、成膜方法について説明する。図1は、この成膜装置（Ru成膜装置：金属成膜装置）1の構成を模式的に示す構成図である。この成膜装置1は、スパッタリング法によって基板100上にRuバリアメタル層（金属層）を形成する。

【0015】

この成膜装置1においては、減圧されたスパッタリングガス雰囲気とされたチャンバ10中において、基板100が上側に、スパッタリングターゲット（Ruターゲット）11が下側となるように、基板100とスパッタリングターゲット11とが対向して設けられる。チャンバ10は、排気ポート10Aを介して真空ポンプ（図示せず）によって真空排気され、かつ、その下側におけるガス導入口10Bからスパッタリングガスが導入される構成とされる。この際、チャンバ10内の圧力は真空ゲージ（図示せず）でモニターすることができ、チャンバ10内はコンダクタンス調整が可能なバルブ（図示せず）を介して真空排気されるため、スパッタリングガスの流量とバルブの開度を調整することによって、チャンバ10内の圧力を所望の範囲とすることができる。ここで、ガス導入口10Bから導入されるスパッタリングガスとしては、純アルゴン（Ar）が用いられる。

【0016】

スパッタリングターゲット11は高純度のRuで構成され、カソード電極12に固定され、かつ電氣的に接続される。一方、基板100は、金属製の基板ホルダ13に固定され、基板ホルダ13内には、基板ホルダ13を加熱する電熱式のヒーター15、基板ホルダ13の温度を計測する熱電対16が内蔵されているため、これらが接続されチャンバ10外に設けられた温度制御用電源21を用いて、ヒーター15に流れる電流を制御して、基板ホルダ13の温度を室温よりも高い範囲で制御することができる。基板ホルダ13に保持される基板100の温度は基板ホルダ13の温度とほぼ等しい。

【0017】

ここで、基板ホルダ13とカソード電極12間には、チャンバ10外に設けられた直流電源22を介して、カソード電極12が負側となるような直流（DC）電圧が印加される。このため、スパッタリングガス（Ar）雰囲気下におけるチャンバ10内の圧力を適度な範囲に保つことによって、基板ホルダ13（基板100）とカソード電極12（スパッタリングターゲット11）間でDC放電を発生させることができ、この際に発生したArの正イオンによって負電位側のスパッタリングターゲット11表面を照射し、この際にスパッタリングターゲット11から脱離したRu原子、イオンを基板100上に堆積させることによって、基板100上へのRu成膜を行うことができる。なお、カソード電極12には、スパッタリング効率を高めるために、隣接した磁石間で極性が互いに逆向きとなるように複数の磁石（図示せず）が配置されており、この構成はDCマグネトロンスパッタリング型となっている。また、基板100とスパッタリングターゲット11間の間隔は273.5mmとされた。

【0018】

上記の構成は、通常知られるDCスパッタリング装置と同様である。ただし、図1に示されるように、ここでは、スパッタリングターゲット11、カソード電極12をその鉛直方向に沿った中心軸の周りで巻回するヘリカルコイル（コイル：プラズマ補助手段）14が設けられている。ヘリカルコイル14には、チャンバ10外に設けられた高周波電源23によって13.56MHzの高周波電力が印加される。ヘリカルコイル14を用いることによって、基板100の温度が400以下の場合でも、良好な膜質のRuバリアメタル層を得ることができる。この点について、以下に説明する。

【0019】

スパッタリングによって成膜されるRuバリアメタル層（金属膜）の膜質は、スパッタ

10

20

30

40

50

リング時における Ar 圧と成膜温度（成膜時の基板 100 の温度）の影響を大きく受ける。図 2 は、Ar をスパッタリングガスとしたスパッタリング法によって成膜された金属膜の膜質の、Ar ガス圧と成膜温度（基板温度 T_s ）依存性を模式的に示す図である（「Influence of Apparatus Geometry and Deposition Conditions on the Structure and Topography of Thick Sputtered Coatings」、John A. Thomson、Journal of Vacuum Science and Technology A、Vol. 11、p666（1974 年））。ここで、基板温度 T_s は、単位を K として、金属膜の融点 T_m （Ru の融点 ~ 2300 ）で規格化されている。この結果に示されるように、得られる金属膜の構造は、ポイドで囲まれた粗い結晶粒からなる構造（Zone I）、密度の高い繊維構造をもつ結晶粒からなる構造（Zone T）、柱状結晶粒からなる構造（Zone II）、再結晶化した粗い結晶粒からなる構造（Zone III）の 4 種類に大別される。

10

20

30

40

50

【0020】

図 3 (a) は、Zone I (T_s : 室温) で成膜した Ru 層表面の電子顕微鏡写真である。図 3 (b) は、Zone T ($T_s = 700$) で成膜した Ru 層表面の電子顕微鏡写真であり、これは、特許文献 1 に記載された Ru 層に対応する。図 3 に示されるように、Zone I の Ru 層 (図 3 (a)) においては、粗い柱状結晶の間に多くのポイドが形成され、この Ru 層は低抵抗のバリアメタル層としては適さないことが明らかである。一方、Zone T の Ru 層 (図 3 (b)) においては、少なくともこうした多くのポイドは見られず、この Ru 層はバリアメタル層として適している。このため、緻密な構造をもった Zone T の Ru 層がバリアメタル層として好ましい。

【0021】

しかしながら、図 3 (b) の Ru 層が得られる T_s (700) は、成膜温度の低温化という観点では好ましくない。これに対して、図 2 の特性において、Zone T は Ar 圧の低い側、 T_s / T_m の小さな側に向かって湾曲しているため、 T_s が小さな場合には Ar 圧を低くすることが必要であり、Ar 圧が高い場合には T_s を大きくすることが必要となる。

【0022】

一方で、基板ホルダ 13 とカソード電極 12 との間で DC 放電を発生させスパッタリングを起こすためには、Ar 圧には適正な範囲が存在する。この Ar 圧は、例えば特許文献 1 に記載されるように、 1×10^{-2} Torr $\sim 1 \times 10^{-1}$ Torr の範囲であり、これによって DC スパッタリングを起こし、基板 100 上に Ru を堆積させることができる。この場合において図 2 における Zone T となる Ru バリアメタル層を基板 100 上で得るために必要な T_s は 500 \sim 800 の範囲となるため、特許文献 1 においては T_s は 500 以上とされている。

【0023】

図 1 の成膜装置 1 においては、基板ホルダ 13 とカソード電極 12 との間で DC 放電を発生させる際に、補助的にヘリカルコイル 14 を用いることによって、より低い Ar 圧でスパッタリングを発生させることができる。すなわち、ヘリカルコイル 14 に高周波電力を投入して、より低圧の Ar を ICP (Inductively Coupled Plasma) 化することができ、その上で基板ホルダ 13 に直流電力を投入することにより、より低圧で DC スパッタリングを行うことができる。通常の DC スパッタリングにおいては Ar のプラズマ化は、基板ホルダ 13 とカソード電極 12 の間に印加された直流電力による放電によって行われるが。これに対して、ここでは、この直流電力が印加されない場合でも、ヘリカルコイル 14 に高周波電力を印加することによって、スパッタリングターゲット 11 周辺の Ar を低い圧力でプラズマ (ICP) 化することができる。このため、具体的には、ヘリカルコイル 14 を用いない場合には Ar 圧が 1×10^{-2} Torr $\sim 1 \times 10^{-1}$ Torr の範囲で DC スパッタリングが行われたのに対し、ヘリカルコイル 14 に高周波電力を投入して Ar を ICP 化した上で DC スパッタリングを行えば、Ar

圧が $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ Torr の範囲で成膜を行うことができる。この際、基板ホルダ 13 とカソード電極 12 との間の直流電力は、スパッタリングターゲット 11 の面積で規格化された値として、 $5.9 \sim 11.9$ W/cm² の範囲として、基板 100 に Ru の成膜を行うことができる。また、この直流電力が印加されない場合でも、ヘリカルコイル 14 に $30 \sim 60$ W の範囲の高周波電力を供給することによって、上記の圧力範囲の Ar をプラズマ化することができる。

【0024】

また、図 1 の構成において、チャンバ 10 には、Ar ガスが導入されるガス導入口 10 B がスパッタリングターゲット 11 よりも下側に設けられ、排気ポート 10 A がスパッタリングターゲット 11 よりも基板 100 に近い側で、ガス導入口 10 B から離れて設けられている。このため、実際にはスパッタリングターゲット 11 近傍の圧力 (Ar 圧) と基板 100 近傍の圧力 (Ar 圧) とは等しくなく、前者が後者よりも高くなっている。こうした構成によって、基板 100 側の圧力をより低くしてスパッタリングを行うことが容易となる。すなわち、図 2 の特性において、より圧力の低い側でスパッタリングを行うことができる。

10

【0025】

また、クレパスやボイドが少なく均一で一様な Ru 層を得るためには、基板 100 の表面に Ru 原子が吸着し、かつ基板 100 上でこの Ru 原子が表面に沿って拡散 (移動) しやすいことが必要であり、この点において、Ts を高くすることは有効である。これに対して、上記の構成においては、ヘリカルコイル 14 を用いることにより、基板 100 の表面に到達する Ru 原子 (イオン) のエネルギーを高めることによって、Ts を 400 以下としながらこの拡散の度合いを高めることができる。これによって、Ru 層のボイドやクレパスを低減することができる。

20

【0026】

次に、上記の成膜方法で成膜された Ru 層の特性について説明する。まず、図 4 に、上記の成膜方法で形成された Ru 層 (a)、ヘリカルコイル 14 を用いない従来の DC スパッタリング法による Ru 層 (b)、の表面の電子顕微鏡写真を示す。ここで、図 4 (a) の Ru 層の成膜においては、Ar 圧を 1×10^{-3} Torr、Ts = 400 とした。図 4 (b) の Ru 層の成膜においては、ヘリカルコイル 14 を用いず、Ar 圧を 4×10^{-2} Torr、Ts = 500 とした、特許文献 1 に記載の成膜方法を用いた。また、図 4 (b) の Ru 層においては、成膜後にボイドを低減化するために、水素雰囲気での熱処理 (400) を行っている。この結果より、図 4 (a) においても、図 4 (b) と同等に良質な Ru 層が得られているが、図 4 (a) において、よりボイドの少ないものが、熱処理なし、かつより低い Ts で得られている。

30

【0027】

また、図 5 (a) は、上記の成膜方法で形成された Ru 層 (a)、ヘリカルコイル 14 を用いない従来のスパッタリング法によって形成した Ru 層 (b)、の X 線回折結果である。ここで、基板 100 としては、Si 単結晶ウェハを用いたため、Si に対応した回折ピークも現れている。図 5 (a) の試料の成膜条件は図 4 (a) と同様であり、図 5 (b) の試料の成膜条件は、Ts = 400、Ar 圧は 5×10^{-3} Torr とした。また、図 5 (b) における下段は図 1 の構成におけるヘリカルコイル 14 を用いない通常の DC スパッタリングによる Ru 層の結果であり、図 5 (b) における上段は、この DC スパッタリングにおいて直流電力の代わりに高周波電力をカソード電極に入力した、通常知られる RF スパッタリングによる Ru 層の結果である。

40

【0028】

図 5 (a) より明らかなように、ここで形成された Ru 層においては、(002) 配向性が顕著であり、この Ru 層は主に (002) 配向した柱状結晶で構成されることが明らかである。この場合の (002) 配向度は 85% 以上となっている。ここで、(002) 配向度は、図 5 に示された X 線回折パターンでの Ru の全ての回折ピークの積分強度に対する (002) に対応した全ての回折ピークの積分強度の比として定義される。これに対

50

して、図5(b)下段のRu層においては、(101)配向が比較的強いものの、その配向度は低い。図5(b)上段のRu層においては、配向性は特に低くなっている。

【0029】

このRu層がバリアメタル層(Ruバリアメタル層)として用いられる場合には、その上に銅(Cu)層が形成された銅配線の一部として用いられる。ここで、例えば「Substrate Temperature Dependence of Electrical and Structural Properties of Ru Films」、Takatoshi Nagano、Kazuya Inokuchi、Kunihiro Tamahashi、Nobuhiro Ishikawa、Yasushi Sasajima、and Jin Onuki、Thin Solid Film s Vol. 520(1)、p374(2011年)に記載されるように、Ruの(0001)面(002)面と等価)とCu(111)面との格子ミスマッチは小さく、かつ、これらの間の吸着エネルギーは大きい。このため、(002)配向性の高いRuバリアメタル層上には、(111)配向性の高い銅(Cu)層が高い密着性で形成される。この場合のCu層の(111)配向度(上記のRuにおける(002)配向度と同様に算出)は80%以上となる。

10

【0030】

実際に、上記のRuバリアメタル層を用いた2種類の銅配線構造を製造した。その第1の構造における製造工程を図6に示す。ここでは、図6(a)に示されるように、単純な平面構造のSi基板51(10mm×10mm)上に一様に薄いSiO₂層52が形成された構造が下地として用いられた。図6(b)に示されるように、この上に上記のRuバリアメタル層53を成膜し、その後、電気めっきによってCu層54をRuバリアメタル層53上に形成した。電気めっきにおいては、図6(b)の構造を陰極とし、純度99.9999%の銅を陽極として、硫酸-硫酸銅溶液(めっき浴)中で、電流密度を5mA/cm²として通電することによって、厚さ300nmのCu層54を形成した。ここで、一般的には、Ruバリアメタル層53の上に厚さが数nm程度の薄い銅層をシード層としてスパッタリング法等によって成膜した後に、電気めっきを行う場合が多いのに対し、ここでは、こうしたシード層は用いられていない。

20

【0031】

また、第2の構造における製造工程を図7に示す。ここでは、図7(a)に示されるように、Si基板51上にバリア層となるSiN層55が薄く形成され、その上にSiO₂層52が形成されるが、このSiO₂層52には開口が形成されている。その後、図7(b)に示されるように、この開口の内部を含めた全面に前記のRuバリアメタル層53を成膜した後に、図7(c)に示されるように、前記と同様にCu層54を形成した。この構造は、特にダマシン法による銅配線を製造する場合に対応する。

30

【0032】

図6(c)、図7(c)どちらの場合においても、X線回折結果より、Cu層54の配向性は(111)が主となっていた((111)配向度が80%以上である)ことが確認できた。このため、上記のRuバリアメタル層53を用いて銅配線を形成できることが確認された。

40

【0033】

次に、図6(b)の形態の試料において、成膜時間を変えることによって、異なる膜厚のRuバリアメタル層53を形成した。その後、このRuバリアメタル層53の電気抵抗率を4端子法によって測定した。これによって測定された電気抵抗率と膜厚の関係を図8に示す。この場合の成膜は、Ar圧が 1×10^{-3} Torr、Ts = 400とした。この結果より、特に膜厚を20nm以上とすることによって、電気抵抗率が 20×10^{-6} ・cm程度に低いRuバリアメタル層53が得られた。この電気抵抗率は、バルク状態のRuと比べると高いものの、同様に薄膜状態として用いられる他のバリアメタル層と比べて低い。

【0034】

50

このため、上記の Ru バリアメタル層 53 を用いて銅配線を半導体ウェハ上に形成することができる。ここで、LSI における配線幅が小さくなる（デザインルールが微細化する）場合に、配線幅を小さくしても、バリアメタル層としての効果を奏するためには、バリアメタル層の厚さは、ある一定以上が必要である。図 9 は、配線の断面積に占めるバリアメタル層の断面積の比率の配線幅依存性を計算した一例である。ここでは、配線のアスペクト比（配線深さ / 配線幅）を 3、バリアメタル層の厚さを 3 nm としている。このように、デザインルールが微細化した場合には、配線構造の断面におけるバリアメタル層の占める比率が大きくなる。この場合、配線の低抵抗化のためには、バリアメタル層の低抵抗化が必須である。前記の通り、Ta、Ti、Ta_N、Ti_N 等と比べて Ru は比抵抗が低いために、図 9 においてバリアメタル層の占める断面積比の増大が顕著になる 40 nm 以下の配線幅においては、Ru をバリアメタル層として用いることが特に好ましい。更に、例えばデザインルールが 40 nm 以下の LSI を構成するトランジスタや配線構造（配線層、層間絶縁層等）が形成された半導体ウェハにおいては、こうしたトランジスタや配線構造の耐熱性は低いために、Ru バリアメタル層を 500 °C 以下で成膜し、かつこの温度以上の温度での熱処理を必要としないで、良好な膜質の Ru バリアメタル層が得られることが望まれる。上記の Ru バリアメタル層は、特にこうした場合に好ましく用いられる。

【0035】

なお、上記においては、スパッタリングターゲット 11 が高純度の Ru で構成され、これによって Ru 層（Ru バリアメタル層）が基板 100 上に形成された。しかしながら、バリアメタル層を、Ru が含まれる合金としてもよい。この場合においても、主成分が Ru である（例えば Ru の原子組成が 90 % 以上である限りにおいて、図 2 の特性が同様に現れるため、上記の構成は有効である。

【0036】

また、上記においては、図 1 の成膜装置 1 を用いて Ru 層が形成されるものとしたが、Ru 層以外でも、DC スパッタリングによって成膜が可能な材料（例えば任意の金属材料）に対しても、低温での成膜が要求される場合には、この構成が有効であることは明らかである。すなわち、基板 100 に形成すべき金属層に応じて、スパッタリングターゲット 11 の材料は適宜設定することができる。これに応じて、スパッタリングの条件（スパッタリングガス圧力）、直流電力、高周波電力等は設定される。

【0037】

また、上記においては、プラズマ補助手段としてヘリカルコイル 14 が用いられたが、基板 100 とスパッタリングターゲット 11 との間で DC 放電を発生させる場合よりも低圧でスパッタリングガスをプラズマ化できる限りにおいて、ヘリカルコイル以外のプラズマ生成手段を、プラズマ補助手段として用いることができる。

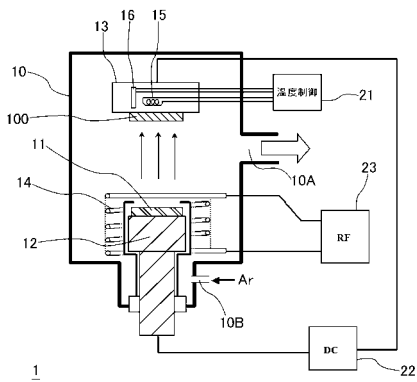
【符号の説明】

【0038】

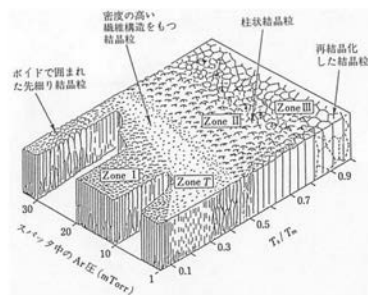
- 1 成膜装置（Ru 成膜装置：金属成膜装置）
- 10 チャンバ
- 10A 排気ポート
- 10B ガス導入口
- 11 スパッタリングターゲット
- 12 カソード電極
- 13 基板ホルダ
- 14 ヘリカルコイル（コイル：プラズマ補助手段）
- 15 ヒーター
- 16 熱電対
- 21 温度制御用電源
- 22 直流電源
- 23 高周波電源

- 5 1 Si 基板
- 5 2 SiO₂ 層
- 5 3 Ru バリアメタル層
- 5 4 Cu 層
- 5 5 SiN 層
- 1 0 0 基板

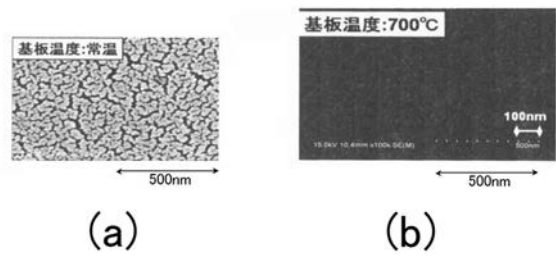
【 図 1 】



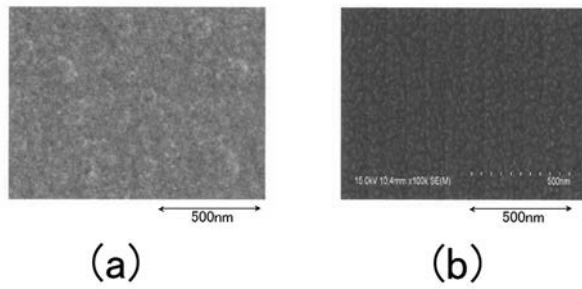
【 図 2 】



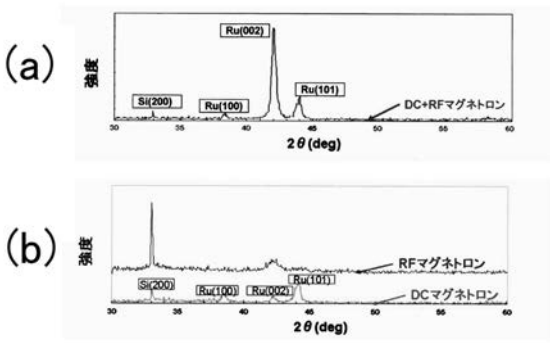
【 図 3 】



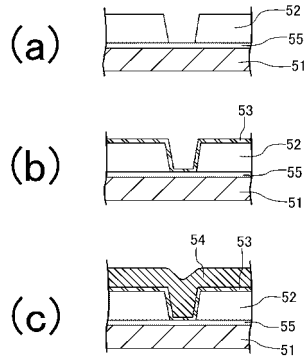
【 図 4 】



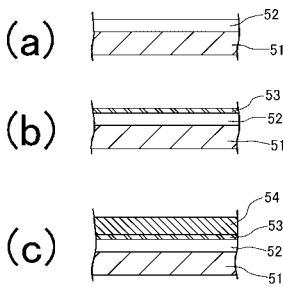
【 図 5 】



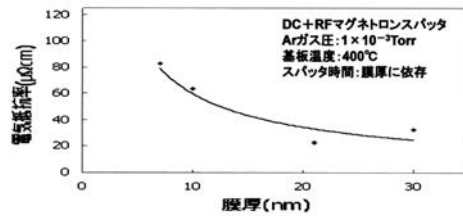
【 図 7 】



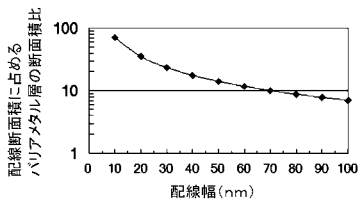
【 図 6 】



【 図 8 】



【 図 9 】



フロントページの続き

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード(参考)
C 2 3 C 14/22 (2006.01)			C 2 3 C	14/38		
C 2 3 C 14/14 (2006.01)			H 0 5 H	1/46	A	
C 2 3 C 14/38 (2006.01)						
H 0 5 H 1/46 (2006.01)						

(72)発明者 永野 隆敏

茨城県日立市中成沢町四丁目12番1号 国立大学法人茨城大学 工学部内

(72)発明者 大貫 仁

茨城県日立市中成沢町四丁目12番1号 国立大学法人茨城大学 工学部内

(72)発明者 篠嶋 妥

茨城県日立市中成沢町四丁目12番1号 国立大学法人茨城大学 工学部内

(72)発明者 玉橋 邦裕

茨城県日立市中成沢町四丁目12番1号 国立大学法人茨城大学 工学部内

(72)発明者 小沼 重春

茨城県日立市中成沢町四丁目12番1号 国立大学法人茨城大学 工学部内

Fターム(参考) 2G084 AA04 BB11 BB21 CC02 CC13 CC17 CC33 DD01 DD03 DD05
DD13 DD14 DD66 FF13 FF20 FF26 FF31 FF40 HH09 HH35
HH45
4K029 AA06 AA24 BA02 BB02 BB08 BC03 BD02 CA05 DC03 DC27
DC34 EA03 EA08 EA09
4M104 AA01 BB04 DD38 DD39 DD40 DD41 DD52 FF17 HH05 HH09
5F033 HH07 HH11 MM01 MM12 MM13 PP17 PP23 PP27 QQ07 RR04
RR06 WW03 WW05 WW08 XX10 XX14 XX28