

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4824888号
(P4824888)

(45) 発行日 平成23年11月30日(2011.11.30)

(24) 登録日 平成23年9月16日(2011.9.16)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 N 23/20 (2006.01) GO 1 N 23/20

請求項の数 31 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2001-513799 (P2001-513799)	(73) 特許権者	500022362
(86) (22) 出願日	平成12年8月2日(2000.8.2)		サーマ-ウェイブ・インク
(65) 公表番号	特表2003-529047 (P2003-529047A)		アメリカ合衆国、カリフォルニア州 94
(43) 公表日	平成15年9月30日(2003.9.30)		539、フレモント、リライアンス・ウェ
(86) 国際出願番号	PCT/US2000/020988		イ 1250
(87) 国際公開番号	W02001/009566	(74) 代理人	100071010
(87) 国際公開日	平成13年2月8日(2001.2.8)		弁理士 山崎 行造
審査請求日	平成19年7月25日(2007.7.25)	(74) 代理人	100114742
(31) 優先権主張番号	60/146,832		弁理士 林 秀男
(32) 優先日	平成11年8月2日(1999.8.2)	(74) 代理人	100119253
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 金山 賢教
(31) 優先権主張番号	60/162,679	(74) 代理人	100121762
(32) 優先日	平成11年11月1日(1999.11.1)		弁理士 杉山 直人
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 パターン化されたウエハ上のX線反射率測定

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

パターン半導体ウエハの薄膜層の特性を評価する方法であって、
X線のプローブビームを生成するステップと、
前記プローブビームのスポットサイズが前記パターン半導体ウエハの表面上のパターンの形状の大きさに比べて大きくなるように、前記パターン半導体ウエハの表面上に前記プローブビームを導くステップと、
反射データを生成するために、前記パターン半導体ウエハから反射される種々のX線の強度を測定するステップと、
前記薄膜層の特性を決定するために、前記反射データを解析するステップと、
を有することを特徴とする方法。

10

【請求項 2】

前記特性は、薄膜層厚を含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】

前記測定するステップは、電荷結合素子を用いることを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 4】

前記測定するステップは、自己走査ダイオードアレイを用いることを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 5】

20

前記測定するステップは、複線比例計数管を用いることを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 6】

前記測定するステップは、複数陽極マイクロチャンネル検出器を用いることを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 7】

前記導くステップは、曲線モノクロメータを用いて前記 X 線を集束し、反射することを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 8】

前記反射データを解析するステップは、フーリエ変換を適用することを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

10

【請求項 9】

前記反射データを解析するステップは、前記反射データに変換関数を適用することを含み、更に、前記変換関数は、半導体ウエハのパターン化されない領域上でなされる測定に対応する X 線反射データと前記反射データの比較に基づいて選択されることを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 10】

前記反射データは、入射角の関数として反射 X 線強度を測定するデータを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 11】

20

パターン半導体ウエハの薄膜層の特性を評価する方法であって、
X 線のプローブビームを生成するステップと、
集束されたプローブビーム内の種々の X 線が前記パターン半導体ウエハ表面に関する入射角の範囲を作り、前記プローブビームのスポットサイズが前記パターン半導体ウエハの前記表面上のパターンの形状の大きさに比べて大きくなるように、前記パターン半導体ウエハの表面上に前記プローブビームを集束するステップと、
前記表面に関して特定の入射角に対応する反射されたプローブビーム内の X 線の位置で反射されるプローブビーム内の位置の関数として、種々の X 線の強度を測定するステップと、

前記薄膜層の特性を決定するために、前記反射データを解析するステップと、
を有することを特徴とする方法。

30

【請求項 12】

前記特性は、薄膜層厚を含むことを特徴とする請求項 11 記載の方法。

【請求項 13】

前記測定するステップは、電荷結合素子を用いることを含むことを特徴とする請求項 1 記載の方法。

【請求項 14】

前記測定するステップは、自己走査ダイオードアレイを用いることを含むことを特徴とする請求項 11 記載の方法。

【請求項 15】

40

前記測定するステップは、複線比例計数管を用いることを含むことを特徴とする請求項 11 記載の方法。

【請求項 16】

前記測定するステップは、複数陽極マイクロチャンネル検出器を用いることを含むことを特徴とする請求項 11 記載の方法。

【請求項 17】

前記集束するステップは、曲線モノクロメータを用いることを含むことを特徴とする請求項 11 記載の方法。

【請求項 18】

前記反射データを解析するステップは、フーリエ変換を適用することを含むことを特徴

50

とする請求項 1 1 記載の方法。

【請求項 1 9】

前記反射データを解析するステップは、前記反射データに変換関数を適用することを含み、更に、前記変換関数は、半導体ウエハのパターン化されない領域上でなされる測定に対応する X 線反射データと前記反射データの比較に基づいて選択されることを特徴とする請求項 1 1 記載の方法。

【請求項 2 0】

パターン半導体ウエハの薄膜層の特性を評価する方法であって、
エネルギーの広域スペクトルを有する X 線のプローブビームを生成するステップと、
前記プローブビームのスポットサイズが前記パターン半導体ウエハの表面上のパターンの形状の大きさに比べて大きくなるように、前記パターン半導体ウエハの表面上に前記プローブビームを導くステップと、

10

X 線エネルギーの関数として反射 X 線強度を測定する反射データを生成するために、前記パターン半導体ウエハから反射される種々の X 線の強度を測定するステップと、

前記薄膜層の特性を決定するために、前記反射データを解析するステップと、を有することを特徴とする方法。

【請求項 2 1】

前記特性は、薄膜層厚を含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

【請求項 2 2】

前記測定するステップは、電荷結合素子を用いることを含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

20

【請求項 2 3】

前記測定するステップは、自己走査ダイオードアレイを用いることを含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

【請求項 2 4】

前記測定するステップは、複線比例計数管を用いることを含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

【請求項 2 5】

前記測定するステップは、複数陽極マイクロチャンネル検出器を用いることを含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

30

【請求項 2 6】

前記生成するステップは、制動放射輻射を放射する X 線源を用いることを含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

【請求項 2 7】

前記反射データを解析するステップは、フーリエ変換を適用することを含むことを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

【請求項 2 8】

前記反射データを解析するステップは、前記反射データに変換関数を適用することを含み、更に、前記変換関数は、半導体ウエハのパターン化されない領域上でなされる測定に対応する X 線反射データと前記反射データの比較に基づいて選択されることを特徴とする請求項 2 0 記載の方法。

40

【請求項 2 9】

パターン半導体ウエハの薄膜層の特性を評価する装置であって、
X 線のプローブビームを生成する線源と、
前記プローブビームのスポットサイズが前記パターン半導体ウエハの前記表面上のパターンの形状の大きさに比べて大きくなるように、前記パターン半導体ウエハの表面上に前記プローブビームを導く手段と、

反射データを生成するために、前記パターン半導体ウエハから反射される種々の X 線の強度を測定する検出器と、

前記薄膜層の特性を決定するために、前記反射データを解析するプロセッサ手段と、

50

を備えることを特徴とする装置。

【請求項 30】

前記プロセッサ手段は、フーリエ変換を適用することによって前記反射データを解析する手段を含むことを特徴とする請求項 29 記載の装置。

【請求項 31】

前記検出器は、入射角の関数として反射 X 線強度を測定するのに効果的であることを特徴とする請求項 29 記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

優先権

この出願は、米国仮特許出願第 60 / 162, 679 号及び第 60 / 146, 832 号の利益を要求する。これらの仮特許出願は、それぞれ 1999 年 11 月 1 日及び 1999 年 8 月 2 日に提出され、いずれも参照によってここに組み込まれる。

【0002】

発明の背景技術

半導体産業は、ウエハ上に形成された薄膜を測定することに継続的に関心を有する。多くの計測学装置は、これらの計測のために開発された。これらの装置の多くは、可視及び/又は紫外線領域の波長を有する放射ビームでサンプルを精査することを頼りにする。これらの装置は、これらの波長で少なくとも部分的に透過する多くの異なるタイプの膜で非常によく機能する。あいにく、(銅のような)不透明な金属膜は紫外線あるいは可視放射線を透過しないので、これらの装置は、不透明な金属膜を調査するのに有効ではない。

【0003】

近年、X 線療法で波長を用いるいくつかの技術が開発されている。これらの X 線反射率技術 (XRR) は、可視光を用いる技術よりもいくつかの利点を有する。そのような利点の一つは、XRR が厚さ 30 オングストローム以下のオーダの超薄膜の膜厚を測定することができることである。可視光は、その波長のために干渉縞を用いてそのような超薄膜の調査には相応しくない。しかしながら、XRR システムは、むしろ、およそ 1.5 オングストロームの波長で放射を用い得る。その放射は、そのような超薄膜を調べるときでさえ、適当な干渉縞を作り出す。加えて、XRR は、膜が金属や金属化合物のような光に不透明な材料から構成されるところで適当に用いられ得る。XRR 方法のもう一つの可能な応用は、放射ビームのグレイジング角のみがプロセスチャンバ内のサンプルをモニタするために用いられ得る原位置モニタとしてである。最終的に、XRR は、あるポリマ、フッ化炭素化合物、及びエーロゲルのような、低い誘電率と相応して低い屈折率を有する材料からなる膜の密度と厚さを測定するために相応に用いられ得る。

【0004】

好ましい XRR 技術は、参照によりここに組み込まれる、1997 年 4 月 8 日に発行された米国特許第 5,619,548 号に記述される。図 1 は、この好ましい技術を示す。(同じく、1997 年 11 月 21 日に発行された日本特許第 2,720,131 号参照)

【0005】

図 1 において、好ましい X 線散乱システムは、35a、35b、及び 35c として示される複数の X 線を備える X 線束 33 を作り出す X 線源 31 を含む。X 線反射器 37 は、X 線束 33 の行路に配置される。その反射器 37 は、ステージ 45 によって固定位置に保持され、基板 43 上に位置される薄膜層 41 を典型的に含むテストサンプル 39 に X 線束 33 を注ぐ。結果的に、複数の反射 X 線 57A、57B、及び 57C (束 55 を形成する) は、異なる入射角でテストサンプル 39 の薄膜層 41 に同時に照射する。X 線反射器 37 は、好ましくは、モノクロメータである。単結晶モノクロメータ中の X 線の入射束 33 の回折は、ブラッグ条件がその狭い帯域で満足するように、入射波長スペクトルの狭い帯域のみがサンプル 39 に到達することを可能にする。結果として、テストサンプル 39 に向けられる複数の X 線 57A、57B、及び 57C も同じく単色である。検出器 47 は、テストサンプル 39 から反射された X 線を感知するとともに、感知 X 線の輝度及び入射角に対

10

20

30

40

50

応する信号を作るために配置される。プロセッサ60は、厚さ、密度及び表面粗さを含む薄膜層の構造の種々の特性を決定するために、検出器に接続され、検出器によって作られる信号を受信する。

【0006】

基本システムでは、X線放射のプローブビームは、それが少なくとも部分的に反射されるように選択された角度でサンプルに衝突するように向けられる。サンプルは、典型的に、1以上の薄い金属層によって被覆された基板からなってもよい。臨界角 (θ_c) (サンプルの表面と入射光線との間で計測されるように)以下の非常に浅い角度で、すべてのX線放射が反射されるであろう。入射ビームの入射角がサンプル表面に関して増加するにつれて、放射の入射量は、上部金属層を通して伝搬され、反射光の量は減少するであろう。金属層を通して伝搬されるある放射は、金属膜及び基板の間の界面に達し、基板に反射されるであろう。

10

【0007】

金属膜層と基板の間の界面で反射される放射は、干渉効果を示す反射曲線を生み出して、干渉するであろう。図2は、2つのそのような角度反射スペクトルを示す。上部スペクトル曲線 S_2 は、基板上にタンタル層のものであり、底部スペクトル曲線 S_1 は、基板上に銅のものである。この変動は、測定信号 S_1 及び S_2 における干渉縞18の出現を起こす。反射率がそんなに小さい(典型的に、1より遙かに小さい)ので、多重反射は、X線反射信号において比較的検出できない効果を有する。両曲線では、 θ を増やすことで反射率は急激に減少する。

20

【0008】

実際には、X線の入射角は、X線源を移動し、あるいはサンプルを傾けることによって変化され得る。上述の先行技術では、多数のX線入射角は、線源放射を集束することによって作り出され得る。それは、異なる入射角でサンプルに衝突するために、ビーム内の光線を曲げるように機能する。

【0009】

線源とサンプルの間の角度を積極的に変更することを要求する従来のX線反射器あるいはXRR提案で用いられ得るけれども、主発明の概念は、同時に多数の入射角実施例、すなわち、高速X線反射計あるいは「RXRR」提案で最も好ましく用いられる。

【0010】

また、主発明は、X線エネルギーの広域スペクトルが固定角度で適用されるエネルギー分散方式技術に適用され得る。そのような広域スペクトルX線放射は、回転陽極の制動放射放射によって適当に生成され得る。X線反射は、各エネルギーで計測される。そのようなエネルギー分散方式X線技術は、Chason他のPhys. Rev. Lett. 72, 3040(1994年)及びChason他のAppl. Phys. Lett. 60, 2353(1992年)に記述される。これらはそれぞれ全部参照にここに組み込まれる。

30

【0011】

金属層の測定は、半導体パターンウエハ上では非常に困難である。XRR又はRXRRの典型的な測定スポットサイズは1mm以上である。パターンウエハの形状が1ミクロンオーダーであり、パターンウエハ上のテストサイトでさえ100ミクロンより一般的に小さい寸法を有するので、パターンウエハ上の単一又は二層金属厚の正確な決定は、非常に困難であると信じられていた。

40

【0012】

ここに記述される提案は、パターンウエハ上の形状より大きい1mmスポットサイズをさらに用いて、パターンウエハ上の1、2又はそれ以上の層(不透明なあるいは誘電性の金属)厚を測定する可能性を提供する。

【0013】

発明の概要

主発明の教示は、XRR及びRXRRシステムの新しい応用を導く。特に、そのようなシステムが形状が測定スポットよりも小さいパターンウエハ上の種々の薄膜(誘電性で、

50

不透明な金属膜の両方)の厚さを測定するために用いられ得る。概して、本発明の一面は、XRR及びR×RRシステムがテストウエハ上のみならず、同様にパターンウエハ上においても用いられ得るという認識である。ここで特定の技術は、この基本概念を単純化し、拡張するのを助けるように意図される。しかしながら、この開示の前に、誰も小さい形状を持つパターンウエハにおいてそのようなシステムを用いようと試みたことを我々が知らないことを理解されたい。

【0014】

図5は、シリコン基板22、誘電体層24及び金属層26から成るパターンウエハ20を示す。図に示すように、金属層26の厚さは一定であるが、その下の酸化層24は、X線ビーム30からスポットの径全体にわたって厚さが劇的に変化する。実際に量を定めることを困難にさせるこのような変化にかかわらず、金属層26の厚さがXRR又はR×RR技術を用いてさらに正確に決定され得ることが、見出された。

10

【0015】

数学的解析は、X線反射信号は、主として、金属層の上部表面と、金属層と酸化層の境界との間の干渉による効果から来るので、このような結果が達成され得ることを示していた。非常に小さい信号となるのは、上述のように、酸化層の厚さが際立って変化することによるものである。酸化層からの信号があまりに小さいという理由の一部は、そのような比較的厚い層のために、どの縞もそれが見られないほど互いに近いことであろう。加えて、上述のように、反射率があまりに小さいので、多重反射は、X線反射信号において相対的に検出できない程度の影響を及ぼす。上記を考慮すると、層の厚さの決定ができるようにしたまま、パターンウエハからの信号の数学的モデリングを、単純化することができる。

20

【0016】

好ましい実施の形態の詳細な記述

薄膜の所定のサンプルのために、X線反射は、X線波長()、入射角、並びに、層を作る材料の厚さ及び光学的特性の関数であるフレネルの式モデリングを用いて決定され得る。典型的に、全反射が起こる臨界角は、非常に小さい(およそ $0.1 \sim 0.5^\circ$)。入射角が臨界角以上に増加されるにつれて、反射率が非常に急速に落ちるので、小さい角X線反射は、実験的に重要である。小さい角近似(\sin)の下で、層 $n-1$ と層 n の間の界面におけるX線反射の再帰方程式は、以下のように与えられる：

30

【式1】

$$R_{n-1,n} = a_{n-1}^4 \left(\frac{R_{n,n+1} + F_{n-1,n}}{R_{n,n+1} F_{n-1,n} + 1} \right),$$

ここで、 $F_{n-1,n} = (f_{n-1} - f_n) / (f_{n-1} + f_n)$ であり、 $a_n = \exp(-i \sqrt{f_n} d_n)$ である。

40

【0017】

ここで、 d_n は、層 n の厚さであり、 $\theta_c(n)$ は、層 n の材料上に入射される波長のX線のために全反射が起こる入射角である。

【0018】

f_n は、 $f_n = A_n - i B_n$ によって与えられ、ここで、

【式2】

$$A_n = (1/\sqrt{2})\{[\psi^2 - \psi_c^2(n)]^2 + 4\beta_n^2\}^{1/2} \\ + [\psi^2 - \psi_c^2(n)]^{1/2} \\ B_n = (1/\sqrt{2})\{[\psi^2 - \psi_c^2(n)]^2 + 4\beta_n^2\}^{1/2} \\ - [\psi^2 - \psi_c^2(n)]^{1/2},$$

であり、 $\theta_n = \mu_n / 4$ 、 θ は X 線の入射角であり、 μ_n は、層 n の線吸収係数である。

10

【 0 0 1 9 】

これらの再帰方程式は、薄膜スタックの底から始めて、基板に対応する層 $n = N$ で R_N , R_{N+1} を 0 に設定し、結果として生じる再帰方程式を実行することによって解く。真空に対応する層 $n = 1$ で、その複素共役を持つ R_1, R_2 の積 $|R_1, R_2|^2$ は、入射 X 線強度に対する反射 X 線強度の比で与えられる。

【 0 0 2 0 】

界面の深さからの複雑化及び微視的表面粗さと同様に、伝統的なフルネルの式に基づく X 線反射の理論モデリングは、次の参考文献、すなわち、L. G. Parratt の Phys. Rev. 95, 359 (1954 年)、C. A. Lucas 他 の J. Appl. Phys. 63, 1936 (1988 年)、及び M. Toney と S. Brennan の J. Appl. Phys. 66, 1861 (1989 年) においてより詳細に記述される。これらはそれぞれ全部参照によりここに組み込まれる。

20

【 0 0 2 1 】

XRR を用いてパターン半導体ウエハの膜厚を測定する一提案は、測定された X 線反射曲線がパターンの構造よりもむしろ層の厚さに主として帰され得るという認識に頼る。XRR 測定に用いられる X 線の波長は、数オングストロームのオーダーである。10,000 オングストロームのオーダーであるパターンウエハの形状に比較して、その波長は非常に小さい。それゆえ、パターン自体の構造からの干渉効果は重要ではない。

【 0 0 2 2 】

例えば、一つは、図 5 に示されるような垂直断面を有する一タイプの線形パターンのラインに垂直な入射平面を持つ X 線を考慮してもよい。干渉効果が比較的重要なでないので、X 線反射曲線の形状は、同じ層を有するパターン化されていない半導体ウエハのそれと比較して、パターンによって相対的に変化していない。最も顕著な効果は、凹部の側面及び底に入射する光の一部が反射信号にあまり貢献しないので、反射 X 線強度が一般に減少され得るということである。凹部の深さが測定される層の厚さに比べて大きいとき、全体の強度の減少以上に X 線反射曲線における小さい変化のみが見られる。

30

【 0 0 2 3 】

ここで用いられるように、「パターンウエハ」又は「パターン半導体ウエハ」は、X 線プローブビームのスポットサイズよりも小さいサイズの人為的パターンをウエハの表面に有する半導体ウエハを意味する。上述のように、典型的に、プローブビームの測定スポットサイズは、1 mm 以上であるが、パターンの形状は、大きさが 1 ミクロンのオーダーであり、パターンウエハ上のテストサイトでさえ、100 ミクロンより典型的に小さい直径を有する。従って、X 線プローブビームスポットサイズとパターンウエハ上のテストサイトのサイズとを区分するものとして、通常は少なくとも一桁分のオーダーのサイズの違いがある。

40

【 0 0 2 4 】

パターンウエハの X 線反射曲線の解析は、類似した層を有するパターン化されない（パターンのない）ウエハ上でなされる測定との比較を通して、大いに単純化され得る。パターンのない比較ウエハは、単に、パターンウエハ上のパターンのない領域であってもよく、このパターンのない領域はパターンウエハと同様の積層がなされている。図 3 は、タンタルの境界層の上部に銅の最外殻層を有するパターンのないウエハでなされる測定からの

50

X線反射データのグラフを示す。そのグラフは、対数目盛で入射角の関数として反射率を示し、実際には、米国特許第5,691,548号に記述されるタイプのXRR装置を用いてなされた5つの測定実行から5つの重ね合わされた曲線を示す。

【0025】

図6は、銅及びタンタルの最外殻層を同じく有するパターンウエハ（実際には、図3を作るために測定した同じウエハ上のパターン領域）でなされた測定からのX線反射データのグラフを示す。そのグラフは、対数目盛で入射角の関数として反射率を示し、さらに、5つの測定実行から5つの重ね合わされた曲線を示す。

【0026】

図3及び図6の形状の類似性は顕著である。本発明によれば、パターンウエハの解析は、データの比較的単純な変換を通してパターンのないウエハを解析する問題に帰することができる。そのようなデータの変換を適用する結果は、以下の図表に要約される。

【0027】

パターン化されないウエハにおける5つの測定
及びパターンウエハにおける5つの測定
(PVD銅シード/タンタルバリアを持つ姉妹ウエハ)

【表1】

	パターンウエハ		非パターンウエハ	
	銅シード	タンタルバリア	銅シード	タンタルバリア
平均	829.4 Å	233.2 Å	826.0 Å	232.8 Å
範囲	2 Å	1 Å	3 Å	1 Å
1シグマ(標準偏差)	0.80 Å	0.40 Å	1.10 Å	0.40 Å
1シグマ(%)	0.10%	0.17%	0.13%	0.17%

【0028】

フルネルの式モデリングは、パターン化されないウエハの層厚を見出すために反射率データに適用された。そして、その結果は、上記表の右部分で報告される。必要なパラメータは、周知のMarquardt-Levenbergアルゴリズムのような反復非線形最小二乗最適化技術を通して見出される。この目的のための最適な反復最適化技術は、Fanton他の「ビームプロフィール反射計を用いる薄膜のマルチパラメータ測定」、応用物理学会誌第73巻第11号7035頁(1993年)及びLeng他の「分光測光法及びビームプロフィール反射計を用いる絶縁膜スタックにおけるシリコン6層の同時測定」、応用物理学会誌第81巻第8号3570頁(1997年)に記述される。これら2つの論文は、全部参照によってここに組み込まれる。

【0029】

パターンウエハデータの場合、パターンウエハ反射曲線 $RP(\theta)$ とパターン化されないウエハ反射曲線 $RU(\theta)$ の近い類似度に基づいて、単純な変換が適用される。(ここで、 θ は入射角であるが、波動ベクトル移動のような他の従属変数も用いられ得る。)変換関数 $T(\theta)$ は、 $RP(\theta) \times T(\theta)$ が $RU(\theta)$ に密接に近づくように選択される。 $RP(\theta)$ と $RU(\theta)$ の類似は、 $T(\theta)$ が適切に単純な線形関数にであり得るようである。しかしながら、例えば、 $T(\theta)$ が適切に二次方程式又は三次関数、あるいは角スペクトルの異なる部分の関数のような「スプラインギング」であり得るようにより複雑な関数も選択され得る。

【0030】

単純な線形変換関数 $T(\theta)$ を用いて、パターンウエハのデータは変換された。その点で、パターン化されないウエハに適用された同じフルネルの式モデリングは、パターンウエハの層厚を見出すために、変換された反射率データに適用された。その結果は、上記表の左部分で報告される。必要なパラメータは、再び、周知のMarquardt-Levenbergアルゴリ

10

20

30

40

50

ズムのような反復非線形最小二乗最適化技術を通して見出され得る。

【0031】

層厚が決定されると、R - 曲線を解析することができ、密度と表面及び界面粗度の値を得ることができる。

【0032】

パターン化されないウエハの層厚を見出すもう一つの提案は、フーリエ変換解析を用いることである。フーリエ変換解析は、Seeck他のAppl. Phys. Lett. 76, 2713 (2000年)においてポリマー系の層厚を見出すために適用された。それは全部参照によってここに組み込まれる。指数フーリエ変換は、入射角よりもむしろ従属変数として波動ベクトル移動 q_z を用いて適用される。ここで、 q_z は、反射光線波動ベクトルと入射光線波動ベクトルの間の差として定義される。特に、変換関数 $F(d)$ が用いられる。ここで、 d は層厚を表し、 $F(d)$ は以下のように与えられる：

【式3】

$$F(d, q_z, low) = \left| \int_{q_z, low}^{q_z, up} q_z^4 I(q_z) \exp(iq_z d) dq_z \right|^2$$

【0033】

そのようなフーリエ変換解析が適用されるとき、変換関数曲線のピークは、サンプルの電子密度が急速に変化する領域に対応する。換言すれば、変換関数のピークは、層界面間の距離を示す。フーリエ変換アプローチは、非常に有力であり、同様の積層を持つパターンのないウエハからのデータを参照することなく、パターンウエハからのデータに適用され得る。フーリエ変換技術は、O. Glatter及びO. Kratkyの「小さい角X線散乱」アカデミックプレス社(1982年)の126~136頁において幾分詳細に記述される。これらの頁は、全部参照によってここに組み込まれる。

【0034】

もう一つの提案では、異なる縞形態がデータ中に認識できるとき、パターンウエハ上の金属膜の層厚は、次のような修正ブラッグの式との照合によって決定され得る：

$$\sin^2 \theta_i = \sin^2 \theta_c + (i + 1/2)^2 (\lambda / 2d)^2$$

ここで、「 θ_i 」は縞最大がある角度であり、 θ_c は臨界角であり、 i は値1, 2, 3, ...を持つ正の整数であり、 λ はX線は長であり、 d は層厚である。

【0035】

θ_i 及び θ_c が非常に小さい角度であり、修正ブラッグの式が $\theta_c = 0$ を含むすべての臨界角で有効でなければならぬので、この近似値では、隣接する界面縞間の角間隔は、所定の厚さ d で一定であり、以下によって与えられる：

$$\Delta \theta = \lambda / 2d$$

【0036】

この提案を用いて、厚さ $d(\Delta \theta) = \lambda / (2 \Delta \theta)$ は、曲線の各縞間隔に結び付けられ得る。入射角が増加するにつれて近似ブラッグ式がより確かになるので、漸近解析は、増加する $\Delta \theta$ の関数として $d(\Delta \theta)$ をプロットし、漸近線を推定することによって、真の厚さ d を見出すために適用され得る。

【0037】

所定の層(又は多層)からの干渉縞が認識できることを保証するために、多くの方法が用いられ得る。これらの方法は以下のものを含む。

【0038】

a. 所定の層(又は多層)の干渉縞を最大にするための適切なX線波長の使用。例えば、タングステン源からのX線は、銅及びタンタル薄膜層でうまく機能することが分かった。選択されるX線波長は、すべての界面からの反射が外部的に観察される信号において効果を有するように、試験中多層構造を通して完全に貫通する。しばしば、その放射がキー多層構成の吸収端の低エネルギー(高透過)の側であるように、X線管ターゲット要素が選

10

20

30

40

50

扱われる。好ましくは、多層構成及び選択されたX線波長は、種々の多層構成の反射スペクトルへの貢献の間の高レベルの対比があるようにである。

銅及びタングステンX線の両方が特にうまく銅及びタンタル薄膜を貫通し、半導体産業で用いられるタンタル上の銅（又は窒化タンタル）構造を計測するための候補波長を表す。これらについて、タングステン、すなわち、耐火金属は、X線管ターゲットとして用いられるとき一層信頼性が高く、長く続いて、適用のために選ばれた。

【0039】

b. 必要ならば、所定のフルの厚さ範囲を覆い、あるいは、1層以上からより容易に縞を識別するための1以上のX線波長の使用。

【0040】

c. 縞対比を最大にするようにパターン特性に関してすれすれのX線ビームの適切な方向でウエハを放射線処理する。例えば、線パターンの場合、ビームは、入射面が線パターンのラインに平行であるように、方向付けられ得る。

【0041】

d. 基礎を為す層からの競合縞信号を最小にするための適切なX線波長の使用。

【0042】

基本的な例では、タンタルの薄いバリア層の上部に銅からなる層スタックを想定する。我々が適切なX線波長を注意深く選ぶならば、銅の単層(S1)及びタンタルの単層(S2)のためのR-曲線(図2に示される)を得るかもしれない。タンタルが銅より密であるので、その曲線S2の縞は、より高い値である。同じく、タンタル層が銅層より薄いので、タンタル曲線S2の干渉縞は、更に離れて離隔される。

【0043】

図3は、タンタル層が銅層の下に見出されるときを測定するR-曲線S3を表す。(図4はこの層構造を示す。)図3に見られるように、より低い領域では銅の縞だけあるが、より高い領域ではタンタル縞が銅縞よりかなり強いので、銅及びタンタルの両方の干渉縞が、個々に認識できる。

【0044】

上述のように、銅及びタンタル縞の両方間の間隔は、基礎を為す層あるいは粗度に強く依存しない。従って、銅及びタンタルの両層の厚さは、パターンウエハ上でさえ縞間隔から明白に決定され得る。この方法を用いて決定された層厚は、1mmの測定領域にわたっての平均厚さであろう。しかしながら、沈積層の厚さが典型的に1mmの寸法にわたってあまり変化しないので、この測定平均は妥当である。また、パターンウエハ上に存在するわずかなトポグラフィ(地形)が厚さ測定に顕著に影響を与えないことに気付かれない。

【0045】

正しいX線波長の選択は、2層の構成及び評価するのに必要な厚さ範囲に依存する。理想的には、一つの波長は、両層の要求される厚さ範囲における所定の2層からの干渉縞の明白な測定を可能にする。

【0046】

しかしながら、それは、上記基準を満たす一つの波長を見出すことができないということかもしれない。その場合、2つのX線波長は、スタックにおける一つの層上の良い縞データを提供する一つの波長と、スタックにおける他の層上の良い縞データを提供する他方で用いられ得る。両データセットを用いて、両層の厚さが決定され得る。実際には、縞間の間隔を解析するとき、測定縞分離と予測縞分離とを比較するために、従来の最小二乗法ルーチンを用い得る。

【0047】

2つのX線波長を作り出すために、2つのX線源を用いる必要があるかもしれない。これらの2つの線源は、タレット(例えば)上にその線源を据え付け、ウエハの同一領域について一連の測定のために同位置に各線源を導くことによって、連続的に用いられ得る。その代わりに、離れた90°の位置で2つの線源を据え付け、同一領域上に両放射ビーム焦点を同時に持つことができる。

10

20

30

40

50

【0048】

必要ならば、例えば、2以上の層を含む層スタック上の金属層を扱うとき、この概念は、2以上のX線源に拡張され得る。同様に、2以上の個々の線源の代わりに多線X線源を用いることもできる。多線X線源は、2以上の要素から成るX線ターゲットを用いることによって作られてもよい。また、シンクロトロン又は加速装置のような連続的なX線源を用いることもできる。

【0049】

上述の同一の概念は、誘電性で透過するあるいは部分的に吸収する薄膜に同等の有効性で適用され得る。そのような薄膜は、分光測定法、反射計及び偏向解析法のような従来の光学的方法で測定され得るけれども、XRR又はRXRRがより効果的であり得る場合もある。10
これらの場合は、光学的パラメータが知られず、あるいは正確に決定できないときでさえ、膜厚が計算される必要がある状況を含む。これは、部類分けされた光学的パラメータや空間的に変化するパラメータを持つ薄膜を持つ場合である。

【0050】

本発明の範囲は、次の特許請求の範囲に示されるもの及びその同等物であると意図され、上述のあらゆる特定の実施の形態に限定されない。

【図面の簡単な説明】

【図1】 好ましいX線反射計システムを示す。

【図2】 2つの異なるサンプル、すなわち、銅層を持つ一つとタンタル層を持つ一つからの反射データのための、サンプルへの入射角の関数であるサンプルX線反射の正規化グラフを示す。20

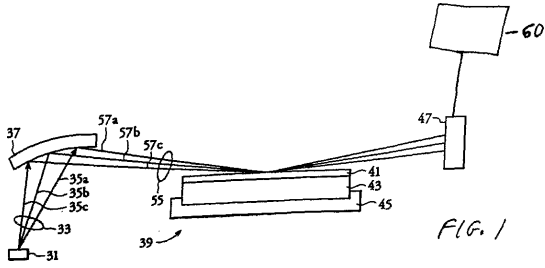
【図3】 銅とタンタルの両層を持つパターン化されないサンプルからの反射データのための、サンプルへの入射角の関数であるサンプルX線反射のグラフを示す。

【図4】 半導体基板上に銅層とタンタル層を持つサンプルの単純化された断面図及び三層の界面からのX線の反射を示す。

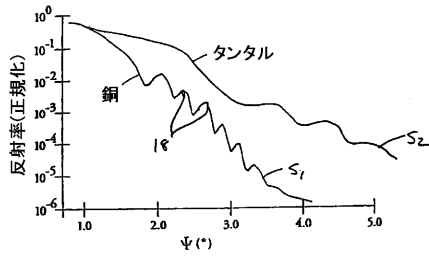
【図5】 パターンウエハサンプル上の境界の線パターンの断面図及びサンプルの表面へのX線の入射を示す。

【図6】 パターンウエハサンプルからの反射データのための、サンプルへの入射角の関数であるサンプルX線反射のグラフを示す。

【図1】

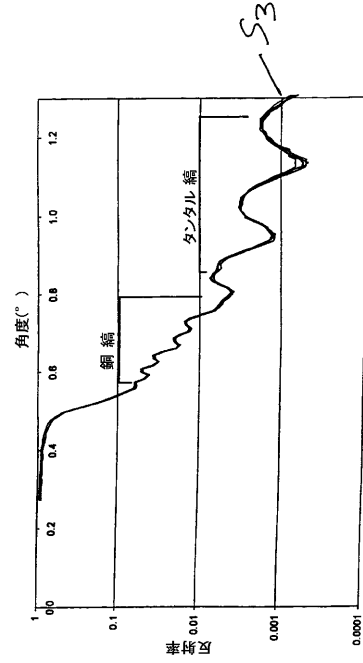


【図2】

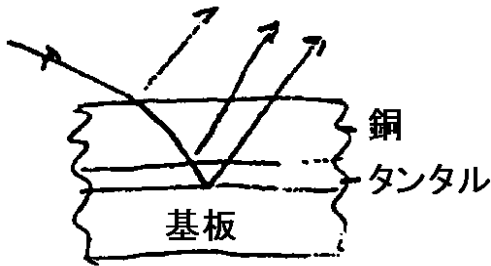


【図3】

ブラケットウエハ上の同一領域における5つの測定(銅シード/タンタルバリア)



【図4】



【図5】

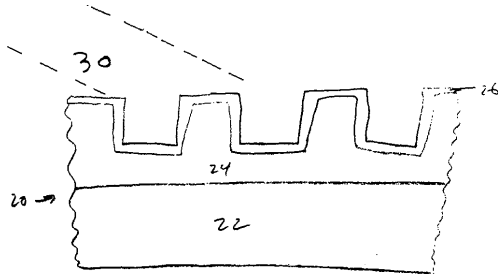
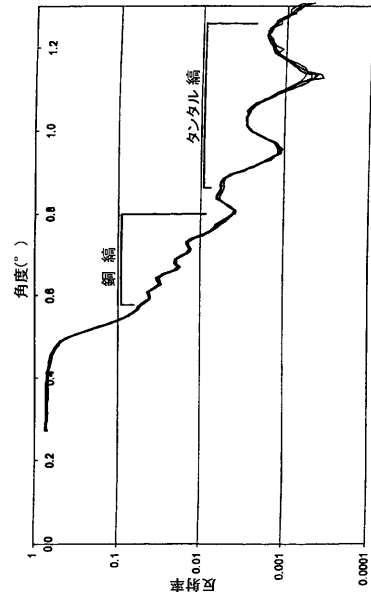


Fig 5

【図6】

パターン化されたウエハ上の同一領域における5つの測定(銅シード/タンタルバリア)



フロントページの続き

(31)優先権主張番号 09/629,407

(32)優先日 平成12年8月1日(2000.8.1)

(33)優先権主張国 米国(US)

(72)発明者 ローゼンクウエイグ、アラン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94506、ダンビル、ディア・ホロウ・ドライブ 3304

(72)発明者 オブサル、ジョン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94550、リバーモア、ノーウッド・ロード 2295

審査官 比嘉 翔一

(56)参考文献 特開平11-037957(JP,A)

特開平10-318737(JP,A)

特開平11-014561(JP,A)

国際公開第98/058245(WO,A1)

特開平06-221841(JP,A)

特開平09-210663(JP,A)

米国特許第05619548(US,A)

米国特許第04927485(US,A)

特開平06-094427(JP,A)

特開平09-283585(JP,A)

桜井健次,他1名,干渉効果を利用した斜入射X線法による薄膜の評価,日本化学会講演予稿集,1991年9月2日,Vol.62, No.2, P.773

宇佐見勝久,他1名,X線反射率法による多層膜の層構造解析,日本応用磁気学会誌,1994年2月1日,Vol.18, No.1, P.38-45

Kenji Sakurai,他1名,Fourier Analysis of Interference Structure in X-Ray Specular Reflection from Thin Films, Japanese Journal of Applied Physics.Part2.Letters, 1992年2月1日, Vol.31, No.2A, P.L113-L115

J.-M.Baribeau, Low angle x-ray reflection study of ultrathin Ge films on (100) Si, Applied Physics Letters, 1990年10月22日, Vol.57, No.17, P.1748-1750

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 23/00-23/27

G01B 15/00-15/08

H01L 21/66

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)