

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6739960号  
(P6739960)

(45) 発行日 令和2年8月12日 (2020.8.12)

(24) 登録日 令和2年7月28日 (2020.7.28)

(51) Int.Cl.

F I

G O 3 F 1/24 (2012.01)

G O 3 F 1/24

G O 3 F 1/26 (2012.01)

G O 3 F 1/26

G O 3 F 7/20 (2006.01)

G O 3 F 7/20 5 2 1

H O 1 L 21/3065 (2006.01)

G O 3 F 7/20 5 0 3

H O 1 L 21/302 1 0 5 A

請求項の数 12 (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願2016-64269 (P2016-64269)  
 (22) 出願日 平成28年3月28日 (2016.3.28)  
 (65) 公開番号 特開2017-181571 (P2017-181571A)  
 (43) 公開日 平成29年10月5日 (2017.10.5)  
 審査請求日 平成31年2月22日 (2019.2.22)

(73) 特許権者 000113263  
 H O Y A 株式会社  
 東京都新宿区西新宿六丁目10番1号  
 (74) 代理人 110001508  
 特許業務法人 津国  
 (72) 発明者 池邊 洋平  
 東京都新宿区中落合2丁目7番5号 H O  
 Y A 株式会社内

審査官 山口 敦司

(56) 参考文献 特開2010-080659 (JP, A  
 )

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 反射型マスクブランク、反射型マスク及び半導体装置の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板上に、多層反射膜と、EUV光の位相をシフトさせる位相シフト膜とがこの順に形成された反射型マスクブランクであって、

前記位相シフト膜は、最上層と、最上層以外の下層とを有し、

$n_2 < n_1 < 1$  . . . (1)、かつ

$/ 4 \times (2m + 1) - n_1 \cdot d_1 / 4 \times (2m + 1) +$  . . . (2)

の関係を満たし、

前記  $n_1 \cdot d_1$  は、3.912以下であることを特徴とする反射型マスクブランク。

(ただし、 $n_1$  は、前記最上層の露光波長 = 13.5 nmにおける屈折率、

$n_2$  は前記下層の露光波長 = 13.5 nmにおける屈折率、

$d_1$  は前記最上層の膜厚 (nm)、

mはゼロ以上の整数、及び

= 1.5 nm)

【請求項 2】

前記最上層の膜厚は、4 nm以下であることを特徴とする請求項1に記載の反射型マスクブランク。

【請求項 3】

前記 m は 2 以下であることを特徴とする請求項1又は2に記載の反射型マスクブランク

。

10

20

## 【請求項 4】

前記位相シフト膜の前記最上層はケイ素化合物を含む材料からなり、前記下層はタンタル化合物を含む材料からなることを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の反射型マスクブランク。

## 【請求項 5】

基板上に、多層反射膜と、EUV 光の位相をシフトさせる位相シフト膜とがこの順に形成された反射型マスクブランクであって、

前記位相シフト膜は、第 1 層 ~ 第 N 層 (N は 2 以上の整数) をこの順で含む単位薄膜を 2 層以上含む多層膜からなり、最も多層反射膜から遠い所に位置する単位薄膜の第 1 層が最上層であり、

10

## 【数 3】

$$\lambda / 4 \times (2m + 1) - \alpha \leq \sum_{i=1}^N (n_i \cdot d_i) \leq \lambda / 4 \times (2m + 1) + \alpha \quad \cdots (3)$$

の関係を満たすことを特徴とする反射型マスクブランク。

(ただし、i は 1 ~ N の整数、

$n_i$  は第 i 層の露光波長 = 13.5 nm における屈折率、

$d_i$  は前記第 i 層の膜厚 (nm)、及び  
= 1.5 nm)

## 【請求項 6】

20

$n_{i+1} < n_i$ 、かつ  $n_1 < 1$  であることを特徴とする請求項 5 に記載の反射型マスクブランク。

## 【請求項 7】

N = 2 であることを特徴とする請求項 5 又は 6 に記載の反射型マスクブランク。

## 【請求項 8】

前記第 1 層は、Ta 及び Cr から選択される少なくとも一種の金属材料を含むことを特徴とする請求項 5 ~ 7 の何れか一項に記載の反射型マスクブランク。

## 【請求項 9】

前記第 2 層は、Mo、Ru、Pt、Pd、Ag 及び Au から選択される少なくとも一種の金属材料を含むことを特徴とする請求項 5 ~ 8 の何れか一項に記載の反射型マスクブランク。

30

## 【請求項 10】

前記多層反射膜と前記位相シフト膜との間に保護膜を有することを特徴とする請求項 1 ~ 9 の何れか一項に記載の反射型マスクブランク。

## 【請求項 11】

請求項 1 ~ 10 の何れか一項に記載の反射型マスクブランクにおける前記位相シフト膜がパターンニングされた位相シフト膜パターンを有することを特徴とする反射型マスク。

## 【請求項 12】

請求項 11 に記載の反射型マスクを用いて半導体基板上にパターンを形成するパターン形成工程を含むことを特徴とする半導体装置の製造方法。

40

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、半導体装置の製造などに使用される露光用マスクを製造するための原版である反射型マスクブランク及び反射型マスク、並びに前記反射型マスクを用いる半導体装置の製造方法に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

半導体製造における露光装置の光源の種類は、波長 436 nm の g 線、同 365 nm の i 線、同 248 nm の KrF レーザ、及び同 193 nm の ArF レーザと、波長を徐々に

50

短くしながら進化してきている。より微細なパターン転写を実現するため、光源の波長として13.5nm近傍の極端紫外線(EUV: Extreme Ultra Violet)を用いたEUVリソグラフィが提案されている。EUVリソグラフィでは、EUV光に対する材料間の吸収率の差が小さいことなどから、反射型のマスクが用いられる。反射型マスクとしては、例えば、基板上に露光光を反射する多層反射膜が形成され、当該多層反射膜を保護するための保護膜の上に、露光光を吸収する位相シフト膜がパターン状に形成されたものが提案されている。露光機(パターン転写装置)に搭載された反射型マスクに入射した光は、位相シフト膜パターンのある部分では吸収され、位相シフト膜パターンのない部分では多層反射膜により反射されることにより、光像が反射光学系を通して半導体基板上に転写されるものである。位相シフト膜パターンに入射する露光光の一部が、多層反射膜により反射される光と約180度の位相差を有して反射され(位相シフト)、これによりコントラスト(解像度)を得ている。

10

#### 【0003】

このようなEUVリソグラフィ用の反射型マスク及びこれを作製するためのマスクブランクに関連する技術が特許文献1~3などによって開示されている。

#### 【0004】

特許文献1には、ハーフトーンマスクの原理をEUV露光に適用して転写解像性を向上させるために、薄膜(位相シフト膜)を2層膜とすることが記載されている。具体的な2層膜の材料としては、Mo層とTa層の組み合わせが記載されている。

#### 【0005】

特許文献2には、ハーフトーンマスクの原理をEUV露光に適用して転写解像性を向上させるために、単層膜からなるハーフトーン膜(位相シフト膜)の材料を、屈折率及び消衰係数を座標軸とする平面座標で示す図2において、四角枠で囲む領域から選択することが記載されている。具体的な単層膜の材料としては、TaMo(組成比1:1)が記載されている。

20

#### 【0006】

特許文献3には、ハーフトーン型EUVマスクにおいて、反射率の選択性の自由度及び洗浄耐性の高さをもち、射影効果(シャドーイング効果)を低減させるために、ハーフトーン膜の材料をTaとRuとの化合物とし、その組成範囲を規定することが記載されている。

30

#### 【0007】

ここで、シャドーイング効果とは、次のような現象である。例えば、反射型マスクを使用する露光装置において、入射光と反射光の光軸が重ならないように、光をマスクに対して垂直方向から少し傾けて入射させている。マスクの位相シフト膜パターンに厚みがあると、光の入射方向の傾斜に起因して、位相シフト膜パターンの厚みに基づく影が生じる。この影の分だけ転写パターンの寸法が変化してしまうことをシャドーイング効果という。

#### 【0008】

特許文献4には、基板上に形成された高反射部と、前記高反射部の上に形成されたパターンニングされた低反射部とを備え、低反射部がTa(タンタル)、Mo(モリブデン)及びSi(シリコン)を有するハーフトーン型EUVマスクが記載されている。

40

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0009】

【特許文献1】特開2004-207593号公報

【特許文献2】特開2006-228766号公報

【特許文献3】特許第5233321号

【特許文献4】特開2009-098611号公報

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0010】

50

反射型マスクの位相シフト膜は、位相シフト膜パターンに入射する露光光の一部の多層反射膜により反射される光と、位相シフト膜パターンのない部分での多層反射膜により反射される光とが、 $13.5\text{ nm}$ の波長の光に対して約 $180$ 度の位相差を持つように設計される。また、位相シフト膜の表面には、検査光の露光における反射率が低い材料を用いた反射防止層を設けられている。2層以上の膜からなる位相シフト膜の場合、位相シフト膜の最表面からの反射光と、位相シフト膜の下に存在する多層反射膜からの反射光との干渉によって、例えば図3に示すように、位相差の膜厚依存性に振動構造が生じる。この振動構造が大きいと、位相シフト膜の膜厚変化に対して位相差が大きく変化することになるため、位相シフト膜の膜厚変化に対して安定した位相差が得られなくなる。

【0011】

10

そこで、本発明は、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜を有する反射型マスクブランク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】

【0012】

本発明者らは、最上層及びその他の層からなる位相シフト膜において、位相シフト膜に反射抑制機能を持たせることにより、位相シフト膜の最上層からの反射光と、位相シフト膜を透過した光の多層反射膜からの反射光との干渉を弱めることによって、位相差の膜厚依存性に振動構造が生じることを抑制することができることを見出した。本発明者らは、位相差の膜厚依存性に振動構造が生じることを抑制することにより、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜を有する反射型マスクブランクを得ることを見出し、本発明に至った。

20

【0013】

具体的には、最上層及びその他の層からなる位相シフト膜において、露光波長  $\lambda = 13.5\text{ nm}$ の光の位相シフト膜内の光路長（屈折率  $n \times$  膜厚  $d$ ）が、 $\lambda/4$ の奇数倍を中心に、 $\pm (nm)$ の範囲にあるときに、位相シフト膜の反射抑制機能が有効に働き、位相差の膜厚依存性に振動構造が生じることを抑制することができることを見出した。本発明者らは、光学的なシミュレーションによって、 $\lambda = 13.5\text{ nm}$ とすることが適切であることを見出し、本発明に至った。

【0014】

上記課題を解決するため、本発明は下記の構成を有する。本発明は、下記の構成1～9の反射型マスクブランク、下記の構成10の反射型マスク、及び下記の構成11の半導体装置の製造方法である。

30

【0015】

（構成1）

本発明の構成1は、基板上に、多層反射膜と、EUV光の位相をシフトさせる位相シフト膜とがこの順に形成された反射型マスクブランクであって、

前記位相シフト膜は、最上層と、最上層以外の下層とを有し、

$n_2 < n_1 < 1 \dots (1)$ 、かつ

$\lambda/4 \times (2m+1) - n_1 \cdot d_1 \dots \lambda/4 \times (2m+1) + \dots (2)$

の関係を満たすことを特徴とする反射型マスクブランクである。ただし、上記式中、 $n_1$ は前記最上層の露光波長  $\lambda = 13.5\text{ nm}$ における屈折率、 $n_2$ は前記下層の露光波長  $\lambda = 13.5\text{ nm}$ における屈折率、 $d_1$ は前記最上層の膜厚（nm）、 $m$ はゼロ以上の整数、及び  $\lambda = 13.5\text{ nm}$ である。

40

【0016】

本発明の構成1によれば、位相シフト膜の表面での反射率を小さくすることができるので、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜を有する反射型マスクブランクを得ることができる。

【0017】

（構成2）

本発明の構成2は、前記 $m$ は2以下であることを特徴とする構成1の反射型マスクブラ

50

ンクである。

【 0 0 1 8 】

パターンの微細化に伴うアスペクト比（パターンの線幅に対するパターン膜厚の比）の増大によって、シャドーイング効果の問題が深刻化している。本発明の構成 2 によれば、 $m$  を 2 以下とすることにより、位相シフト膜を薄膜化することが可能となる。そのため得られる反射型マスクのシャドーイング効果を抑制することができる。

【 0 0 1 9 】

（構成 3）

本発明の構成 3 は、前記位相シフト膜の前記最上層はケイ素化合物を含む材料からなり、前記下層はタンタル化合物を含む材料からなることを特徴とする構成 1 又は 2 の反射型マスクブランクである。

10

【 0 0 2 0 】

本発明の構成 3 によれば、位相シフト膜が、所定の材料の最上層及び下層を含むことにより、所望の位相シフト量を得ることができる。

【 0 0 2 1 】

（構成 4）

本発明の構成 4 は、基板上に、多層反射膜と、EUV 光の位相をシフトさせる位相シフト膜とがこの順に形成された反射型マスクブランクであって、

前記位相シフト膜は、第 1 層～第  $N$  層（ $N$  は 2 以上の整数）をこの順で含む単位薄膜を 1 層、又は 2 層以上含む多層膜からなり、最も多層反射膜から遠い所に位置する単位薄膜の第 1 層が最上層であり、

20

【数 1】

$$\lambda / 4 \times (2m + 1) - \alpha \leq \sum_{i=1}^N (n_i \cdot d_i) \leq \lambda / 4 \times (2m + 1) + \alpha \quad \cdots (3)$$

の関係を満たすことを特徴とする反射型マスクブランクである。ただし、上記式中、 $i$  は 1 ～  $N$  の整数、 $n_i$  は第  $i$  層の露光波長  $\lambda = 13.5 \text{ nm}$  における屈折率、 $d_i$  は前記第  $i$  層の膜厚（ $\text{nm}$ ）、及び  $\alpha = 1.5 \text{ nm}$  である。

【 0 0 2 2 】

30

本発明の構成 4 によれば、位相シフト膜の表面での反射率を小さくすることができるので、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜を有する反射型マスクブランクを得ることができる。

【 0 0 2 3 】

（構成 5）

本発明の構成 5 は、 $n_{i+1} < n_i$ 、かつ  $n_1 < 1$  であることを特徴とする構成 4 の反射型マスクブランクである。

【 0 0 2 4 】

本発明の構成 5 によれば、露光波長  $\lambda = 13.5 \text{ nm}$  における屈折率に関し、第  $i + 1$  層の屈折率が、第  $i$  層の屈折率より小さく、かつ第 1 層の屈折率が 1 未満であることにより、位相シフト膜の表面での反射をより小さくすることができる。

40

【 0 0 2 5 】

（構成 6）

本発明の構成 6 は、 $N = 2$  であることを特徴とする構成 4 又は 5 の反射型マスクブランクである。

【 0 0 2 6 】

本発明の構成 6 によれば、 $N = 2$  であることにより、単位薄膜を 2 層とした多層膜とした位相シフト膜を得ることができ、エッチング容易性を損なわずに位相シフト膜に反射抑制機能を持たせることができる。

【 0 0 2 7 】

50

(構成 7)

本発明の構成 7 は、前記第 1 層は、T a 及び C r から選択される少なくとも一種の金属材料を含むことを特徴とする構成 4 ~ 6 の何れかの反射型マスクブランクである。

【0028】

本発明の構成 7 によれば、第 1 層が、T a 及び C r から選択される少なくとも一種の金属材料を含むことにより、位相シフト膜の第 1 層として適切な屈折率及び消衰係数を得ることができる。

【0029】

(構成 8)

本発明の構成 8 は、前記第 2 層は、M o、R u、P t、P d、A g 及び A u から選択される少なくとも一種の金属材料を含むことを特徴とする構成 4 ~ 7 の何れかの反射型マスクブランクである。

【0030】

本発明の構成 8 によれば、第 2 層が所定の金属材料を含むことにより、位相シフト膜の第 2 層として適切な屈折率及び消衰係数を得ることができる。

【0031】

(構成 9)

本発明の構成 9 は、前記多層反射膜と前記位相シフト膜との間に保護膜を有することを特徴とする構成 1 ~ 8 の何れかの反射型マスクブランクである。

【0032】

本発明の構成 9 によれば、多層反射膜上に保護膜が形成されていることにより、多層反射膜付き基板を用いて反射型マスクを製造する際の多層反射膜表面へのダメージを抑制することができる。したがって、反射型マスクの E U V 光に対する反射率特性が良好となる。

【0033】

(構成 10)

本発明の構成 10 は、構成 1 ~ 9 の何れかの反射型マスクブランクにおける前記位相シフト膜がパターンニングされた位相シフト膜パターンを有することを特徴とする反射型マスクである。

【0034】

本発明の構成 10 の反射型マスクの製造ためには、上述の反射型マスクブランクが用いられるので、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜パターンを有する反射型マスクを得ることができる。

【0035】

(構成 11)

本発明の構成 11 は、構成 10 の反射型マスクを用いて半導体基板上にパターンを形成するパターン形成工程を含むことを特徴とする半導体装置の製造方法である。

【0036】

本発明の構成 11 の半導体装置の製造方法によれば、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜パターンを有する反射型マスクを用いることができるので、微細でかつ高精度の転写パターンを有する半導体装置を製造することができる。

【発明の効果】

【0037】

本発明により、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜を有する反射型マスクブランクを提供することができる。

【0038】

また、本発明の反射型マスクブランクを用いることにより、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜パターンを有する反射型マスクを得ることができる。

【0039】

また、本発明の半導体装置の製造方法により、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト

10

20

30

40

50

膜パターンを有する反射型マスクを用いることができるので、微細でかつ高精度の転写パターンを有する半導体装置を製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【0040】

【図1】本発明の実施形態1のEUVリソグラフィ用反射型マスクブランクの概略構成を説明するための断面図である。

【図2】本発明の実施形態2のEUVリソグラフィ用反射型マスクブランクの概略構成を説明するための断面図である。

【図3】シミュレーションによって得られた、実施例1～4及び比較例1～2の位相シフト膜の厚さと、位相差との関係を示す図である。

10

【図4】図3に示される実施例1及び比較例1の拡大図であり、位相差変動が10度（175度～185度）となる膜厚範囲を示す図である。

【図5】EUV光（波長13.5nm）における、金属材料の消衰係数kと屈折率nの特性を示すグラフである。

【図6】シミュレーションによって得られた、実施例5～7の位相シフト膜の厚さと、位相差との関係を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0041】

以下、本発明の実施形態について、図面を参照しながら具体的に説明する。なお、以下の実施形態は、本発明を具体化する際の形態であって、本発明をその範囲内に限定するものではない。

20

【0042】

図1に、本発明の実施形態1である反射型マスクブランク10の断面模式図を示す。本実施形態の反射型マスクブランク10は、基板12の上に、多層反射膜13と、EUV光の位相をシフトさせる位相シフト膜15とがこの順に形成されている。本実施形態の反射型マスクブランク10の位相シフト膜15は、最上層16と、最上層16以外の下層17とを有する。本実施形態の反射型マスクブランク10の位相シフト膜15は、下記式（1）及び（2）の関係、

$$n_2 < n_1 < 1 \quad \cdots (1)、かつ$$

$$\lambda / 4 \times (2m + 1) - n_1 \cdot d_1 \leq \lambda / 4 \times (2m + 1) + \alpha \quad \cdots (2)$$

30

を満たすことを特徴とする。ただし、上記式（1）及び式（2）中、 $n_1$ は前記最上層16の露光波長 $\lambda = 13.5 \text{ nm}$ における屈折率、 $n_2$ は下層17の露光波長 $\lambda = 13.5 \text{ nm}$ における屈折率、 $d_1$ は最上層16の膜厚、 $m$ はゼロ以上の整数、及び $\alpha = 1.5$ である。図1に示す反射型マスクブランク10は、1層の下層17を有する。

【0043】

図2に、本発明の実施形態2である反射型マスクブランク10の断面模式図を示す。本実施形態の反射型マスクブランク10は、基板12上に、多層反射膜13と、EUV光の位相をシフトさせる位相シフト膜15とがこの順に形成されている。本実施形態の反射型マスクブランク10の位相シフト膜15は、第1層～第N層（Nは2以上の整数であり、図2の例ではN=2である。）をこの順で含む単位薄膜18を1層、又は2層以上含む。本明細書では、単位薄膜18の繰り返し数のことを「周期」という。本実施形態の反射型マスクブランク10では、位相シフト膜15の単位薄膜18のうち、最も多層反射膜13から遠い所に位置する単位薄膜18の第1層15aが最上層16である。単位薄膜18が複数周期ある場合には、それぞれの単位薄膜18の第1層15aが多層反射膜13からより遠い位置になるように、単位薄膜18が積層される。本実施形態の反射型マスクブランク10の位相シフト膜15は、下記式（3）の関係、

40

【数2】

$$\lambda / 4 \times (2m + 1) - \alpha \leq \sum_{i=1}^N (n_i \cdot d_i) \leq \lambda / 4 \times (2m + 1) + \alpha \quad \cdots (3)$$

50

を満たすことを特徴とする。ただし、上記式(3)中、 $i$ は1~ $N$ の整数、 $n_i$ は、第 $i$ 層( $i$ は1以上 $N$ 以下の任意の整数)の露光波長 $\lambda = 13.5\text{ nm}$ における屈折率、 $d_i$ は、前記第 $i$ 層の膜厚( $\text{nm}$ )、及び $\lambda = 13.5\text{ nm}$ である。

【0044】

図3に、位相シフト膜15の膜厚と、位相差との関係を示す。図3に示すように、位相シフト膜15の膜厚と、位相差とは、単調増加の関係ではない。これは、位相シフト膜15の最上層16からの反射光と、位相シフト膜15を透過した光の多層反射膜13からの反射光との干渉に起因して、位相差に振動的な変化(本明細書では、これを「振動構造」という。)が生じているためである。本発明の反射型マスクブランク10では、位相シフト膜15を構成する所定の膜が、上述の所定の屈折率及び膜厚の関係を満たすことにより、位相シフト膜15の最上層16に反射抑制機能を持たせることができる。位相シフト膜15の最上層16に反射抑制機能を有することにより、最上層16からの反射光と多層反射膜13からの反射光との干渉を弱めることができる。この結果、位相差の膜厚依存性に振動構造が生じることを抑制することができる。具体的には、図3に示すように、本発明の実施例と、比較例とを比較すると、本発明の実施例の振動構造の方が、比較例より小さいことが見て取れる。振動構造が小さいということは、位相差の膜厚依存性が小さいことを意味する。したがって、本発明の反射型マスクブランク10のように、位相シフト膜15を構成する所定の膜の屈折率及び膜厚が、上述の式(1)~(3)のような所定の関係を満たすことにより、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜15を有する反射型マスクブランク10を得ることができる。

【0045】

本発明の反射型マスクブランク10は、上記式(2)又は(3)の $m$ が2以下(すなわち、 $m = 0$ 又は $m = 1$ )であることが好ましい。 $m$ を2以下とすることにより、位相シフト膜15を薄膜化することが可能となる。そのため、得られる反射型マスクのシャドウイング効果を抑制することができる。

【0046】

本発明の実施形態2の反射型マスクブランク10は、 $n_{i+1} < n_i$ 、かつ $n_1 < 1$ であることが好ましい。位相シフト膜15の表面での反射をより小さくすることができるためである。

【0047】

本発明の実施形態2の反射型マスクブランク10は、 $N = 2$ であることが好ましい。 $N = 2$ であることにより、単位薄膜を2層とした多層膜とした位相シフト膜を得ることができ、エッチング容易性を損なわずに位相シフト膜に反射抑制機能を持たせることができる。

【0048】

<反射型マスクブランク10の構成及びその製造方法>

図1は、本発明の実施形態1のEUVリソグラフィ用反射型マスクブランク10の構成を説明するための断面模式図である。図2は、本発明の実施形態2のEUVリソグラフィ用反射型マスクブランク10の構成を説明するための断面模式図である。図1及び図2を用いて本発明の反射型マスクブランク10について説明する。

【0049】

図1及び図2に示すように、反射型マスクブランク10は、基板12の裏面側の主表面上に形成された静電チャック用の裏面導電膜11を有する基板12と、この基板12の主表面(裏面導電膜11が形成された側とは反対側の主表面)上に形成され、かつ、露光光であるEUV光を反射する多層反射膜13と、この多層反射膜13上に、多層反射膜13を保護するためのルテニウム(Ru)を主成分とした材料で形成された保護膜14と、この保護膜14上に形成され、かつ、EUV光を吸収するとともに一部のEUV光を反射し、その位相をシフトさせるための位相シフト膜15と、を備えている。

【0050】



本明細書において、例えば、「基板 1 2 の主表面上に形成された多層反射膜 1 3」との記載は、多層反射膜 1 3 が、基板 1 2 の表面に接して配置されることを意味する場合の他、基板 1 2 と、マスクブランク用多層膜 2 6 との間に他の膜を有することを意味する場合も含む。他の膜についても同様である。また、本明細書において、例えば「膜 A が膜 B の上に接して配置される」とは、膜 A と膜 B との間に他の膜を介さずに、膜 A と膜 B とが直接、接するように配置されていることを意味する。

【0051】

以下、基板 1 2 及び各層の構成を説明する。

【0052】

EUV 光による露光時の熱による吸収体膜パターンの歪みを防止するため、基板 1 2 としては、 $0 \pm 5 \text{ ppb} /$  の範囲内の低熱膨張係数を有するものが好ましく用いられる。この範囲の低熱膨張係数を有する素材としては、例えば、 $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$  系ガラス、又は多成分系ガラスセラミックス等を用いることができる。

【0053】

基板 1 2 の両主表面のうち、反射型マスクの転写パターンとなる位相シフト膜 1 5 が形成される側の主表面は、少なくともパターン転写精度、位置精度を得る観点から高平坦度となるように表面加工されている。EUV 露光の場合、基板 1 2 の転写パターンが形成される側の主表面の  $132 \text{ mm} \times 132 \text{ mm}$  の領域において、平坦度が  $0.1 \mu\text{m}$  以下であることが好ましく、更に好ましくは  $0.05 \mu\text{m}$  以下、特に好ましくは  $0.03 \mu\text{m}$  以下である。また、基板 1 2 の両主表面のうち、位相シフト膜 1 5 が形成される側と反対側の主表面は、露光装置にセットするとき静電チャックされるための裏面導電膜 1 1 が形成される表面である。裏面導電膜 1 1 が形成される表面の平坦度は、 $142 \text{ mm} \times 142 \text{ mm}$  の領域において、 $1 \mu\text{m}$  以下であることが好ましく、更に好ましくは  $0.5 \mu\text{m}$  以下、特に好ましくは  $0.3 \mu\text{m}$  以下である。

【0054】

なお、本明細書において、平坦度は、TIR (Total Indicated Reading) で示される表面の反り (変形量) を表す値である。この値は、基板 1 2 の表面を基準として最小二乗法で定められる平面を焦平面とし、この焦平面より上にある基板 1 2 の表面の最も高い位置と、焦平面より下にある基板 1 2 の表面の最も低い位置との高低差の絶対値である。

【0055】

また、EUV 露光の場合、基板 1 2 として要求される表面平滑度は、基板 1 2 の、転写パターンとなる位相シフト膜 1 5 が形成される側の主表面の表面粗さが、二乗平均平方根粗さ (RMS) で  $0.1 \text{ nm}$  以下であることが好ましい。なお、表面平滑度は、原子間力顕微鏡 (AFM) で測定することができる。

【0056】

更に、基板 1 2 は、その上に形成される膜 (多層反射膜 1 3 など) の膜応力による変形を防止するために、高い剛性を有しているものが好ましい。特に、基板 1 2 は、 $65 \text{ GPa}$  以上の高いヤング率を有しているものが好ましい。

【0057】

多層反射膜 1 3 は、EUV リソグラフィ用反射型マスクにおいて、EUV 光を反射する機能を有する。多層反射膜 1 3 は、屈折率の異なる元素が周期的に積層された多層膜である。

【0058】

一般的には、高屈折率材料である軽元素又はその化合物の薄膜 (高屈折率層) と、低屈折率材料である重元素又はその化合物の薄膜 (低屈折率層) とが交互に  $40 \sim 60$  周期程度積層された多層膜が、多層反射膜 1 3 として用いられる。多層膜は、基板 1 2 側から高屈折率層と低屈折率層をこの順に積層した高屈折率層 / 低屈折率層の積層構造を 1 周期として複数周期積層した構造を有することができる。また、多層膜は、基板 1 2 側から低屈折率層と高屈折率層をこの順に積層した低屈折率層 / 高屈折率層の積層構造を 1 周期とし

て複数周期積層した構造を有することができる。なお、多層反射膜 13 の最表面の層、すなわち多層反射膜 13 の基板 12 と反対側の表面層は、高屈折率層とすることが好ましい。上述の多層膜において、基板 12 から高屈折率層と低屈折率層をこの順に積層した高屈折率層 / 低屈折率層の積層構造を 1 周期として複数周期積層する場合は最上層が低屈折率層となる。そのため、最上層の低屈折率層上に更に高屈折率層を形成して多層反射膜 13 とすることが好ましい。

#### 【0059】

本発明の反射型マスクブランク 10 において、高屈折率層としては、Si を含む層を採用することができる。Si を含む材料としては、Si 単体の他に、Si に、B、C、N、及び / 又は O を含む Si 化合物でもよい。Si を含む層を高屈折率層として使用することによって、EUV 光の反射率に優れた EUV リソグラフィ用反射型マスクが得られる。また、本発明の反射型マスクブランク 10 において、基板 12 としてはガラス基板が好ましく用いられる。Si はガラス基板との密着性においても優れている。また、低屈折率層としては、Mo、Ru、Rh、及び Pt から選ばれる金属単体、並びにこれらの合金が用いられる。例えば波長 13 ~ 14 nm の EUV 光に対する多層反射膜 13 としては、好ましくは Mo 膜と Si 膜を交互に例えば 40 ~ 60 周期程度積層した Mo / Si 周期積層膜が用いられる。なお、多層反射膜 13 の最上層である高屈折率層をケイ素 (Si) で形成し、当該最上層 (Si) と保護膜 14 との間に、ケイ素と酸素とを含むケイ素酸化物層を形成するようにしてもよい。これにより、マスク洗浄耐性 (位相シフト膜パターンの膜剥がれ耐性) を向上させることができる。

#### 【0060】

このような多層反射膜 13 の単独での反射率は、例えば、65% 以上であり、上限は通常 73% であることが好ましい。なお、多層反射膜 13 の各構成層の膜厚及び周期の数は、露光波長によるブラッグの法則を満たすように、適宜選択される。多層反射膜 13 において高屈折率層及び低屈折率層はそれぞれ複数存在する。すべての高屈折率層は同じ膜厚でなくてもよい。また、すべての低屈折率層は同じ膜厚でなくてもよい。また、多層反射膜 13 の最表面の Si 層の膜厚は、反射率を低下させない範囲で調整することができる。最表面の Si (高屈折率層) の膜厚は、例えば、3 ~ 10 nm とすることができる。

#### 【0061】

多層反射膜 13 の形成方法は当該技術分野において公知である。例えばイオンビームスパッタリング法により、多層反射膜 13 の各層を成膜することで形成できる。上述した Mo / Si 周期多層膜の場合、例えばイオンビームスパッタリング法により、まず Si ターゲットを用いて膜厚 4 nm 程度の Si 膜を基板 12 上に成膜し、その後 Mo ターゲットを用いて膜厚 3 nm 程度の Mo 膜を成膜する。Si 膜及び Mo 膜の成膜を 1 周期として、全体で、40 ~ 60 周期積層して、多層反射膜 13 を形成する (最上層は Si 層とする)。

#### 【0062】

本発明の反射型マスクブランク 10 は、多層反射膜 13 と位相シフト膜 15 との間に保護膜 14 を有することが好ましい。

#### 【0063】

図 1 及び図 2 に示すように、保護膜 14 は、後述する EUV リソグラフィ用反射型マスクの製造工程におけるドライエッチング又は洗浄液から多層反射膜 13 を保護するために、多層反射膜 13 の上に形成される。保護膜 14 は、例えば、Ru (ルテニウム) を主成分として含む材料 (主成分: 50 原子% 以上) により構成される。Ru を主成分として含む材料は、Ru 金属単体、Ru に Nb、Zr、Y、B、Ti、La、Mo、Co、及び / 又は Re などの金属を含有した Ru 合金、又はそれらの材料に N (窒素) が含まれる材料であることができる。また、保護膜 14 を 3 層以上の積層構造とし、最下層と最上層を、上記 Ru を含有する物質からなる層とし、最下層と最上層との間に、Ru 以外の金属、若しくは合金を介在させたものであることができる。

#### 【0064】

保護膜 14 の膜厚は、保護膜 14 としての機能を果たすことができる限り特に制限され

10

20

30

40

50

ない。EUV光の反射率の観点から、保護膜14の膜厚は、好ましくは、 $1.5 \sim 8.0$  nm、より好ましくは、 $1.8 \sim 6.0$  nmである。

【0065】

保護膜14の形成方法としては、公知の成膜方法を特に制限なく採用することができる。保護膜14の形成方法の具体例としては、スパッタリング法及びイオンビームスパッタリング法が挙げられる。

【0066】

図1及び図2に示すように、本発明の実施形態1の反射型マスクブランク10は、多層反射膜13の上に位相シフト膜15を含む。位相シフト膜15は、多層反射膜13の上に接して形成することができる。また、保護膜14が形成されている場合には、保護膜14の上に接して形成することができる。

10

【0067】

図1に示すように、本発明の実施形態1である反射型マスクブランク10の位相シフト膜15は、第1層15a（最上層16）と、第2層15b（下層17）とを含む多層膜である。本発明の実施形態1において、第1層15a及び第2層15bの光波長  $\lambda = 13.5$  nmにおける屈折率及び膜厚は、上述の式(1)及び式(2)の関係を満たす。

【0068】

図2に示すように、本発明の実施形態2である反射型マスクブランク10の位相シフト膜15は、一つの第1層15aと、一つの第2層15bとを交互に複数、積層した構造を有することができる。この場合、一对の第1層15a及び第2層15bを「単位薄膜18」という。なお、単位薄膜18は、第1層15a～第N層（Nは2以上の整数）の多層膜であることができる。この場合、一組の第1層15a～第N層の多層膜が「単位薄膜18」である。本発明の実施形態2において、第1層15a～第N層の光波長  $\lambda = 13.5$  nmにおける屈折率及び膜厚は、上述の式(3)の関係を満たす。また、位相シフト膜15の表面での反射をより小さくするために、 $n_{i+1} < n_i$ 、かつ  $n_1 < 1$  の関係を満たすことが好ましい。ここで、 $n_i$  及び  $n_1$  は、第i層（iは1以上N以下の任意の整数）及び第1層の露光波長  $\lambda = 13.5$  nmにおける屈折率である。また、エッチング容易性と位相シフト膜の反射抑制機能を両立するために、単位薄膜18を構成する多層膜の層数であるNは、2であることが好ましい。

20

【0069】

本発明の反射型マスクブランク10は、位相シフト膜15の最上層16（第1層15a）はケイ素化合物を含む材料からなり、下層17（第2層15b）はタンタル化合物を含む材料からなることが好ましい。特に、図1に示す実施形態1の反射型マスクブランク10の場合には、これらの材料からなる最上層16及び下層17を用いることが好ましい。最上層16とは、位相シフト膜15を構成する層のうち、最も多層反射膜13から遠い所に位置する層のことをいう。位相シフト膜15が、ケイ素化合物を含む材料からなる最上層16及びタンタル化合物を含む材料からなる下層17を含むことにより、所望の位相シフト量を得ることができる。

30

【0070】

位相シフト膜15の最上層16に用いるケイ素化合物の薄膜として、 $\text{SiO}_2$ 膜を挙げることができる。 $\text{SiO}_2$ 膜の光波長  $\lambda = 13.5$  nmにおける屈折率は0.978なので、1に近い。そのため、位相シフト膜15の最上層16に $\text{SiO}_2$ 膜を用いることにより、位相シフト膜15の最上層16からの反射を低くすることができる。

40

【0071】

位相シフト膜15の最上層16に用いるタンタル化合物の薄膜として、 $\text{Ta}_2\text{N}$ 膜を挙げることができる。 $\text{Ta}_2\text{N}$ 膜の光波長  $\lambda = 13.5$  nmにおける屈折率は0.949程度なので、 $\text{SiO}_2$ 膜の屈折率に近い。そのため、最上層16の $\text{SiO}_2$ 膜と組み合わせて用いることにより、 $\text{SiO}_2$ 膜と $\text{Ta}_2\text{N}$ 膜との界面からの反射を低くすることができる。

【0072】

本発明の反射型マスクブランク10の第1層15aは、Ta及びCrから選択される少

50

なくとも一種の金属材料を含むことができる。特に、図 2 に示す実施形態 2 の反射型マスクブランク 10 の場合には、これらの材料からなる最上層 16 を用いることが好ましい。

【0073】

図 5 に金属材料の、波長 13.5 nm における屈折率  $n$  と、消衰係数  $k$  の関係を示す。第 1 層 15a を形成する材料としては、例えば、Ta (波長 13.5 nm における屈折率  $n$  = 約 0.943、消衰係数  $k$  = 約 0.041)、又は、Cr (当該屈折率  $n$  = 約 0.932、消衰係数  $k$  = 約 0.039) が挙げられる。

【0074】

例えば、Ta は EUV 光の消衰係数が小さく、またフッ素系ガス又は塩素系ガスで容易にドライエッチングすることが可能である。そのため、Ta は、加工性に優れた位相シフト膜 15 の材料である。更に Ta に B、Si 及び / 又は Ge 等を加えることにより、アモルファス状の材料を容易に得ることができ、位相シフト膜 15 の平滑性を向上させることができる。また、Ta に N 及び / 又は O を加えれば、位相シフト膜 15 の酸化に対する耐性が向上する。そのため、Ta に N 及び / 又は O を加えた材料を位相シフト膜 15 の最上層 16 に用いることにより、洗浄耐性に優れ、経時的な安定性を向上させることができるという効果が得られる。

【0075】

なお、第 1 層 15a を形成するための材料としては、一種の金属材料が選択されることが好ましいが、これに限定されるものではない。第 1 層 15a を形成するための材料としては、二種以上の金属材料を選択してもよい。

【0076】

本発明の反射型マスクブランク 10 は、第 2 層 15b は、Mo、Ru、Pt、Pd、Ag 及び Au から選択される少なくとも一種の金属材料を含むことが好ましい。特に、実施形態 2 の反射型マスクブランク 10 の場合には、これらの材料からなる下層 17 を用いることが好ましい。これらの材料からなる下層 17 は、Ta 及び Cr から選択される少なくとも一種の金属材料を含む第 1 層 15a との組み合わせで用いることがより好ましい。第 2 層 15b が所定の金属材料を含むことにより、位相シフト膜 15 の第 2 層 15b として適切な屈折率及び消衰係数を得ることができる。

【0077】

具体的には、第 2 層 15b を形成する金属材料としては、第 1 層 15a とは異なる金属材料であって、波長 13.5 nm における屈折率  $n$  が第 1 層 15a を形成する材料の屈折率  $n$  より小さい金属材料から選択することが好ましい。例えば、第 2 層 15b を形成するための金属材料としては、Mo (当該屈折率  $n$  = 約 0.921、消衰係数  $k$  = 約 0.006)、Ru (当該屈折率  $n$  = 約 0.888、消衰係数  $k$  = 約 0.017)、Pt (当該屈折率  $n$  = 約 0.891、消衰係数  $k$  = 約 0.060)、Pd (当該屈折率  $n$  = 約 0.876、消衰係数  $k$  = 約 0.046)、Ag (当該屈折率  $n$  = 約 0.890、消衰係数  $k$  = 約 0.079)、又は、Au (当該屈折率  $n$  = 約 0.899、消衰係数  $k$  = 約 0.052) が挙げられる。

【0078】

例えば、Mo は、単体では洗浄耐性が懸念されるが、上述の Ta 又は Cr を含む層と組み合わせで多層膜を構成することで、その洗浄耐性を向上させることができる。また、Mo は、EUV 光における屈折率  $n$  が 0.95 より小さいため、薄い膜厚で位相シフト効果を得ることが可能である。更に、消衰係数  $k$  が小さいため、EUV 光の反射率が高くなり、位相シフト効果によるコントラスト (解像度) を得やすい膜材料である。

【0079】

また、Ru は、単体では各種のエッチングガスに対してエッチングレートが低く、加工困難性が高いが、上述の Ta 又は Cr を含む層と組み合わせで多層膜を構成することで、位相シフト膜 15 全体の加工性を向上させることができる。また、EUV 光における屈折率  $n$  が 0.95 より小さいため、薄い膜厚で位相シフト効果を得ることが可能であり、消衰係数  $k$  が小さいため、EUV 光の反射率が高くなり、位相シフト効果によるコントラ

10

20

30

40

50

ト（解像度）を得やすい膜材料である。

【0080】

Pt及びPdは、エッチングレートが低く、加工困難性を有する膜材料であるが、EUV光における屈折率 $n$ が0.95より小さいため、薄い膜厚で位相シフト効果を得ることが可能である。

【0081】

なお、第2層15bを形成するための材料としては、一種の金属材料が選択されることが好ましいが、これに限定されるものではない。第2層15bを形成するための材料として、二種以上の金属材料を選択してもよい。

【0082】

第1層15a及び第2層15bを形成するための材料として使用可能な金属材料は、その金属単体であることが好ましい。しかしながら、位相シフト膜15の位相シフト効果等の特性に影響を与えないことを条件として、当該金属を含む材料を用いることができる。

【0083】

第1層15aを形成するための材料に使用されるTaを含む材料としては、例えば、Taを主成分としてBを含有するTaB合金、Taを主成分としてSiを含有するTaSi合金、Taを主成分としてその他遷移金属（例えば、Pt、Pd及びAg）を含有するTa合金、及びTa金属、並びにそれらの合金にN、O、H、Cなどを添加したTa系化合物などを用いることができる。Crを含む材料としては、Crを主成分としてSiを含有するCrSi合金、Crを主成分としてその他遷移金属（例えば、Pt、Pd、Ag）を含有するCr合金、及びCr金属、並びにそれらの合金にN、O、H、Cなどを添加したCr系化合物などを用いることができる。

【0084】

また、第2層15bを形成するためのMoを含む材料としては、Moを主成分としてNb、Zr、Y、B、Ti、La、Ru、Co及び/又はReなどの金属を含有したMo合金などを用いることができる。第2層15bを形成するためのRuを含む材料としては、Ruを主成分としてNb、Zr、Y、B、Ti、La、Mo、Co及び/又はReなどの金属を含有したRu合金などを用いることができる。また、Ruを含む材料としては、Ru合金又はRu金属、並びにそれらの合金にN、H及び/又はCなどを添加したRu系化合物を用いることができる。第2層15bを形成するためのPtを含む材料としては、Ptを主成分としてNb、Zr、Y、B、Ti、La、Mo、Co及び/又はReなどの金属を含有したPt合金などを用いることができる。第2層15bを形成するためのPdを含む材料としては、Pdを主成分としてNb、Zr、Y、B、Ti、La、Mo、Co及び/又はReなどの金属を含有したPd合金などを用いることができる。第2層15bを形成するためのAgを含む材料としては、Agを主成分としてNb、Zr、Y、B、Ti、La、Mo、Co及び/又はReなどの金属を含有したAg合金などを用いることができる。第2層15bを形成するためのAuを含む材料としては、Auを主成分としてNb、Zr、Y、B、Ti、La、Mo、Co及び/又はReなどの金属を含有したAu合金などを用いることができる。

【0085】

位相シフト膜15の最下層及びその上の層は、その下に形成された保護膜14を形成するための材料と重複しない他の金属材料を含む第2層15bとされる（Ru保護膜\Ru以外・・・）。例えば、位相シフト膜15の最下層を、Ruを含む第2層15bとし、保護膜14を、Ruを主成分として材料で形成した場合（Ru保護膜\Ru・・・）、両者は共通したRuで形成し重複するため、この組み合わせは回避されるべきである。この場合、位相シフト膜15の最下層を、例えば、保護膜14のRuに対してエッチング選択性の高いMoを含む第2層15bとすることにより（Ru保護膜\Mo・・・）、高精細なパターニングが可能となり、かつ、保護膜14にダメージを与えることを抑制できる。

【0086】

位相シフト膜15の最上層16は、エッチング選択性に応じて決められる金属材料を含む最上層16（第1層15a）とされる。例えば、Ta又はCrを含む第1層15aと、Moを含む第2層15bとが位相シフト膜15の単位薄膜である場合、最上層16を、Ta又はCrを含む第1層15aとすることにより、位相シフト膜15全体の、パターン形成前の洗浄耐性を向上させることができる。

【0087】

Ruを主成分とした保護膜14上に、Taを含む第1層15aと、Moを含む第2層15bとが位相シフト膜15の単位薄膜として形成される場合、位相シフト膜15の最下層を、Moを含む第2層15bとし、位相シフト膜15の最上層16を、Taを含む第1層15aとすることができる（Ru保護膜\Mo\Ta・・・Mo\Ta）。Moは、保護膜14のRuに対してエッチング選択性が高いため、高精細なパターンニングが可能となり、かつ、保護膜14にダメージを与えることを抑制でき、かつ、パターン形成の前後の洗浄耐性を向上させることができる。

10

【0088】

なお、位相シフト膜15の最下層を、Taを含む第1層15aとすることもできる（Ru保護膜14\Ta\Mo\Ta\Mo・・・\Ta）。この場合、単位薄膜18（第1層15aのTa及び第2層15bのMo）に加えて、保護膜14の上に更にTaを含む第1層15aを形成することになる。

【0089】

位相シフト膜15を構成する単位薄膜18は、2層以上の薄膜で形成される。位相シフト膜15中の単位薄膜18の第N層（Nは2以上の整数）は、同一の金属材料で形成される。例えば、位相シフト膜15を、Taを含む第1層15aと、Moを含む第2層15bと、Ruを含む第3層（図示せず）で構成することができる（Ru保護膜14\Ta\Ru\Mo\Ta・・・Ru\Mo\Ta）。なおこの場合、Ru保護膜14の上に接してTaを含む薄膜を更に形成している。この場合、位相シフト膜15中の、Ta層の含有比率を少なくできるので、位相シフト効果を得やすくなる。

20

【0090】

位相シフト膜15は、イオンビームスパッタリング法などの公知の成膜方法で形成することができる。例えば、イオンビームスパッタリング法による場合、第1層15a及び第2層15bの各金属材料で形成された二つのターゲットを準備し、Arガス等の不活性ガスの雰囲気中、二つのターゲットのうち、片方ずつ交互にビームを照射することによって第1層15a及び第2層15bを形成することができる。

30

【0091】

このような多層膜からなる位相シフト膜15は、EUV光に対する反射率が1～30%、位相シフト膜15からの反射光と、多層反射膜13からの反射光との位相差が170～190度となるように形成される。

【0092】

位相シフト膜15の膜厚は、各層に用いる金属材料の種類と、EUV光の反射率の設計値に応じて、かつ、屈折率及び膜厚が所定の関係を満たすように決定される。例えば、位相シフト膜15の膜厚は、100nm以下であり、好ましくは30～90nmである。このような薄い膜厚で形成される位相シフト膜15であれば、例えば、EUV露光の場合、シャドウイング効果を小さくすることが可能となる。また、多層膜からなる位相シフト膜15における第1層15a及び第2層15b等のそれぞれの膜厚は、EUV光の波長、多層膜の層数、各層の材料の種類、その洗浄耐性及び加工性等の特性を勘案し、適切な膜厚の組み合わせにて定められる。

40

【0093】

単位薄膜18の第1層15aと第2層15bの膜厚比は、各層の屈折率及び膜厚が、上述の式（1）～（3）のような所定の関係を満たすように定められる。第1層15aと第2層15bの膜厚比は、使用される金属材料に応じて、所定の関係を満たすように適宜決めることができる。例えば、Ta：Moの場合、20：1～1：5であることが好ましい

50

。T a層が厚く、M o層が薄過ぎる場合、位相シフト効果を得るための位相シフト膜15全体の膜厚が厚くなるという不都合がある。また、M oが酸化され易いため、T a層が薄くM o層が厚過ぎる場合には、位相シフト膜15全体の洗浄耐性が低くなるという不都合がある。

#### 【0094】

多層膜からなる位相シフト膜15の形成は、成膜開始から成膜終了まで大気に曝さず連続して成膜することが好ましい。例えば、位相シフト膜15は、その各層（例えば、第1層15a及び第2層15b）を非常に薄い膜厚で連続して成膜するのに有用なイオンビームスパッタリング法で形成することが好ましい。しかしながら、DCスパッタリング法及びRFスパッタリング法などの公知の方法で形成することもできる。

10

#### 【0095】

なお、例えば、イオンビームスパッタリング法を用いると、M o S iの多層反射膜13の成膜から、R uの保護膜14の成膜を経て、T a \ M o等の位相シフト膜15の各層（例えば、第1層15a及び第2層15b）の成膜まで、スパッタ装置から出さずに成膜できる。これらの成膜の際に、大気に触れることがないため、各膜の欠陥個数を抑制できる点で有利である。

#### 【0096】

位相シフト膜15の表面等が平滑でないと、位相シフト膜パターンのエッジラフネスが大きくなり、パターンの寸法精度が悪くなることがある。このため、成膜後の位相シフト膜15の表面粗さは、二乗平均平方根粗さ（RMS）で、0.5nm以下であることが好ましく、0.4nm以下であることがより好ましく、0.3nm以下であることが更に好ましい。

20

#### 【0097】

本発明の反射型マスクブランクでは、位相シフト膜15上に、更にエッチングマスク膜（図示せず）を形成することができる。エッチングマスク膜は、多層反射膜13の最上層16に対してエッチング選択性を有し、かつ、位相シフト膜15の最上層16が第1層15aに対するエッチングガスにてエッチング可能な（エッチング選択性がない）材料で形成される。具体的には、エッチングマスク膜は、例えば、C r又はT aを含む材料によって形成される。C rを含む材料としては、C r金属単体、並びにC rにO、N、C、H、及びBなどの元素から選ばれる一種以上の元素を添加したC r系化合物などが挙げられる。T aを含む材料としては、T a金属単体、T aとBを含有するT a B合金、T aとその他遷移金属（例えば、H f、Z r、P t、W）を含有するT a合金、T a金属、並びそれらの合金にN、O、H及び/又はCなどを添加したT a系化合物などが挙げられる。ここで、位相シフト膜15の最上層16（第1層15a）がT aを含む場合、エッチングマスク膜を形成するための材料としては、C rを含む材料が選択される。また、位相シフト膜15の最上層16（第1層15a）がC rを含む場合、エッチングマスク膜を形成するための材料としては、T aを含む材料が選択されることが好ましい。

30

#### 【0098】

エッチングマスク膜の形成は、DCスパッタリング法及びRFスパッタリング法などの公知の方法により行うことができる。

40

#### 【0099】

エッチングマスク膜の膜厚は、ハードマスクとしての機能確保という観点から5nm以上であることが好ましい。反射型マスクの作製工程において、エッチングマスク膜は、位相シフト膜15のエッチング工程の際のフッ素系ガスによって、位相シフト膜15と同時に除去されるものである。そのため、エッチングマスク膜は、位相シフト膜15と概ね同等の膜厚であることが好ましい。位相シフト膜15の膜厚を考慮すると、エッチングマスク膜の膜厚は、5nm以上20nm以下、好ましくは、5nm以上15nm以下が望ましい。

#### 【0100】

基板12の裏面側（多層反射膜13の形成面の反対側）には、図1及び図2に示すよう

50

に、静電チャック用の裏面導電膜 11 が形成される。静電チャック用の裏面導電膜 11 に求められる電気的特性は、通常  $100 \text{ } \Omega/\text{sq}$  以下のシート抵抗である。裏面導電膜 11 の形成は、例えば、クロム若しくはタンタル等の金属、又はそれらの合金のターゲットを使用して、マグネトロンスパッタリング法又はオンビームスパッタリング法により行うことができる。裏面導電膜 11 を、例えば、CrN で形成する場合には、Cr ターゲットを用い、窒素ガス等の N を含むガス雰囲気で、上述のスパッタリング法により、成膜することができる。裏面導電膜 11 の膜厚は、静電チャック用としての機能を満足する限り特に限定されないが、通常  $10 \sim 200 \text{ nm}$  である。

#### 【0101】

以上、実施形態による反射型マスクブランク 10 の構成について各層ごとに説明をした。

10

#### 【0102】

なお、本発明の反射型マスクブランク 10 は、上述のような実施形態に限られるものではない。例えば、本発明の反射型マスクブランク 10 は、位相シフト膜 15 上に、エッチングマスクとしての機能を有するレジスト膜を備えることができる。また、本発明の反射型マスクブランク 10 は、多層反射膜 13 上に保護膜 14 を備えずに、多層反射膜 13 の上に接して位相シフト膜 15 を備えることができる。

#### 【0103】

< 反射型マスク及びその製造方法 >

本発明は、上述の本発明の反射型マスクブランク 10 における位相シフト膜 15 がパターンニングされた位相シフト膜パターンを有する反射型マスクである。上述の本発明の反射型マスクブランク 10 を使用して、本発明の反射型マスクを作製することができる。EUV リソグラフィ用反射型マスクの製造には、高精細のパターンニングを行うことができるフォトリソグラフィー法が最も好適である。

20

#### 【0104】

本実施形態では、フォトリソグラフィー法を利用した反射型マスクの製造方法について、図 1 に示す反射型マスクブランク 10 を用いる場合を例に説明する。

#### 【0105】

まず、図 1 に示した反射型マスクブランク 10 の最表面（位相シフト膜 15 の最上層 16）の上に、レジスト膜（図示せず）を形成する。レジスト膜の膜厚は、例えば、 $100 \text{ nm}$  とすることができる。次に、このレジスト膜に所望のパターンを描画（露光）し、更に現像・リンスすることによって所定のレジストパターン（図示せず）を形成する。

30

#### 【0106】

次に、多層膜からなる位相シフト膜 15 に対し、レジストパターン（図示せず）をマスクとして、 $\text{SF}_6$  等のフッ素系ガスを含むエッチングガスによるドライエッチングを実施することにより、位相シフト膜パターン（図示せず）を形成する。この工程において、レジストパターン（図示せず）が除去される。

#### 【0107】

ここで、位相シフト膜 15 のエッチングレートは、位相シフト膜 15 を形成する材料、及びエッチングガス等の条件に依存する。異なる材料の多層膜からなる位相シフト膜 15 の場合、異なる各材料の層ごとにエッチングレートが多少変化する。しかしながら、各層の膜厚が小さいので、位相シフト膜 15 全体におけるエッチングレートは、略一定となると考えられる。

40

#### 【0108】

上記工程によって、位相シフト膜パターンが形成される。多層膜からなる位相シフト膜 15 の各層（例えば第 1 層 15a 及び第 2 層 15b）を、一種類のエッチングガスによるドライエッチングにより、連続的にエッチングすることができる。その場合には、工程簡略化の効果をえられる。次に、酸性又はアルカリ性の水溶液を用いたウェット洗浄を行い、高い反射率を達成した EUV リソグラフィ用反射型マスクが得られる。

#### 【0109】

50



なお、エッチングガスとしては、 $\text{SF}_6$  の他、 $\text{CHF}_3$ 、 $\text{CF}_4$ 、 $\text{C}_2\text{F}_6$ 、 $\text{C}_3\text{F}_8$ 、 $\text{C}_4\text{F}_6$ 、 $\text{C}_4\text{F}_8$ 、 $\text{CH}_2\text{F}_2$ 、 $\text{CH}_3\text{F}$ 、 $\text{C}_3\text{F}_8$ 、及び F 等のフッ素系ガス、並びにこれらのフッ素ガス及び  $\text{O}_2$  を所定の割合で含む混合ガスを用いることができる。多層膜からなる位相シフト膜 15 の各層（例えば第 1 層 15 a 及び第 2 層 15 b）のエッチングの際には、加工に有用なガスであれば、他のガスを用いてもよい。他のガスとして、例えば、 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{SiCl}_4$ 、 $\text{CHCl}_3$ 、 $\text{CCl}_4$ 、 $\text{BCl}_3$  等の塩素系のガス及びこれらの混合ガス、塩素系ガス及び He を所定の割合で含む混合ガス、塩素系ガス及び Ar を所定の割合で含む混合ガス、フッ素ガス、塩素ガス、臭素ガス及び沃素ガスから選択される少なくとも一つを含むハロゲンガス、並びにハロゲン化水素ガスからなる群から選択される少なくとも一種類又はそれ以上が挙げられる。更に、これらのガスと、酸素ガスとを含む混合ガス等が挙げられる。

10

#### 【0110】

また、位相シフト膜が最上層 16 と下層 17 との 2 層構造で、最上層 16 に対してエッチング耐性を有する材料で下層 17 を形成する場合には、上述したエッチングガスから 2 種類用いて 2 段階のドライエッチングを行うことも可能である。

#### 【0111】

本発明の反射型マスクの製造のためには、上述の反射型マスクブランク 10 を用いるので、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜 15 を有する反射型マスクを得ることができる。

#### 【0112】

20

#### <半導体装置の製造>

本発明は、上述の本発明の反射型マスクを用いて半導体基板 12 上にパターンを形成するパターン形成工程を含む、半導体装置の製造方法である。

#### 【0113】

上述の本発明の反射型マスクを使用して、EUV リソグラフィ用により半導体基板上に反射型マスクの位相シフト膜パターンに基づく転写パターンを形成することができる。その後、その他種々の工程を経ることで、半導体基板上に種々のパターン等が形成された半導体装置を製造することができる。転写パターンの形成には、公知のパターン転写装置を用いることができる。

#### 【0114】

30

本発明の半導体装置の製造方法によれば、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜パターンを有する反射型マスクを用いることができるので、微細でかつ高精度の転写パターンを有する半導体装置を製造することができる。

#### 【実施例】

#### 【0115】

以下、本発明を、各実施例に基づいて説明する。

#### 【0116】

#### (実施例 1)

#### <反射型マスクブランク 10 の作製>

次に述べる方法で、実施例 1 の反射型マスクブランク 10 を作製した。実施例 1 の反射型マスクブランク 10 は、CrN 裏面導電膜 \ 基板 12 \ MoSi 多層反射膜 13 \ Ru 保護膜 14 \ 位相シフト膜 15 という構造を有する。

40

#### 【0117】

まず、 $\text{SiO}_2$  -  $\text{TiO}_2$  系ガラス基板 12 を準備した。

#### 【0118】

この基板 12 の裏面に CrN からなる裏面導電膜 11 をマグネトロンスパッタリング法により次の条件にて形成した。すなわち、Cr ターゲットを用い、 $\text{Ar} + \text{N}_2$  ガス雰囲気 ( $\text{Ar} : \text{N}_2 = 90\% : 10\%$ ) 中で、膜厚 20 nm になるように、裏面導電膜を形成した。

#### 【0119】

50

次に、裏面導電膜 11 を形成した側と反対側の基板 12 の主表面上に、多層反射膜 13 を形成した。基板 12 上に形成される多層反射膜 13 として、13.5 nm の EUV 光に適した、Mo/Si 周期多層反射膜 13 を採用した。多層反射膜 13 は、Mo ターゲットと Si ターゲットを使用し、イオンビームスパッタリング (Ar ガス雰囲気) により、基板 12 上に Mo 層及び Si 層を交互に積層して形成した。まず、Si 膜を膜厚 4.2 nm で成膜し、続いて、Mo 膜を膜厚 2.8 nm で成膜した。これを一周期とし、同様にして 40 周期積層し、最後に Si 膜を膜厚 4.0 nm で成膜し、多層反射膜 13 を形成した (合計膜厚: 284 nm)。

#### 【0120】

引き続き、Ru ターゲットを使用したイオンビームスパッタリング (Ar ガス雰囲気) により、多層反射膜 13 の最上層の Si 膜上に、Ru を含む保護膜 14 を膜厚 2.5 nm で成膜した。

#### 【0121】

次に、保護膜 14 上に、以下の方法で 2 層構造からなる位相シフト膜 15 を形成した。

#### 【0122】

最初に、下層 17 を、次のように形成した。すなわち、Xe + N<sub>2</sub> ガス雰囲気 (Xe : N<sub>2</sub> = 66% : 34%) 中で Ta ターゲットを使用した反応性スパッタリングを行って、膜厚 63 nm の TaN 膜からなる下層 17 を形成した。次に、最上層 16 を、次のように形成した。すなわち、Ar ガス雰囲気中で SiO<sub>2</sub> ターゲットを使用した RF スパッタリングを行って、下層 17 上に膜厚 4 nm の SiO<sub>2</sub> 膜からなる最上層 16 を形成した。

#### 【0123】

表 1 に、実施例 1 の位相シフト膜 15 の最上層 16 (第 1 層 15a) の SiO<sub>2</sub> 膜の屈折率 ( $n_1$ ) 及び膜厚 ( $d_1$ )、並びに下層 17 (第 2 層 15b) の TaN 膜の屈折率 ( $n_2$ ) 及び膜厚 ( $d_2$ ) を示す。実施例 1 の位相シフト膜 15 は、一对の最上層 16 及び下層 17 からなるので、周期は 1 である。なお、この周期の数は、下記の実施例 2 ~ 4 及び比較例 1 ~ 2 においても同様である。

#### 【0124】

##### (実施例 2)

実施例 2 として、位相シフト膜 15 の最上層 16 (SiO<sub>2</sub> 膜) の膜厚  $d_1$  を 3.375 nm、下層 17 の TaN 膜の膜厚  $d_2$  を 60 nm とした以外は、実施例 1 と同様に、反射型マスクブランク 10 を作製した。表 1 に、実施例 2 の位相シフト膜 15 の最上層 16 の SiO<sub>2</sub> 膜の屈折率 ( $n_1$ ) 及び膜厚 ( $d_1$ )、並びに下層 17 の TaN 膜の屈折率 ( $n_2$ ) 及び膜厚 ( $d_2$ ) を示す。

#### 【0125】

##### (実施例 3)

実施例 3 として、位相シフト膜 15 の最上層 16 (SiO<sub>2</sub> 膜) の膜厚  $d_1$  を 3.7 nm、下層 17 の TaN 膜の膜厚  $d_2$  を 60 nm とした以外は、実施例 1 と同様に、反射型マスクブランク 10 を作製した。表 1 に、実施例 3 の位相シフト膜 15 の最上層 16 の SiO<sub>2</sub> 膜の屈折率 ( $n_1$ ) 及び膜厚 ( $d_1$ )、並びに下層 17 の TaN 膜の屈折率 ( $n_2$ ) 及び膜厚 ( $d_2$ ) を示す。

#### 【0126】

##### (実施例 4)

実施例 4 として、位相シフト膜 15 の最上層 16 (SiO<sub>2</sub> 膜) の膜厚  $d_1$  を 18 nm、下層 17 の TaN 膜の膜厚  $d_2$  を 61.5 nm とした以外は、実施例 1 と同様に、反射型マスクブランク 10 を作製した。表 1 に、実施例 4 の位相シフト膜 15 の最上層 16 の SiO<sub>2</sub> 膜の屈折率 ( $n_1$ ) 及び膜厚 ( $d_1$ )、並びに下層 17 の TaN 膜の屈折率 ( $n_2$ ) 及び膜厚 ( $d_2$ ) を示す

#### 【0127】

##### (比較例 1)

比較例 1 として、位相シフト膜 15 の最上層 16 (SiO<sub>2</sub> 膜) を設けず、下層 17 (

10

20

30

40

50

TaN膜)の膜厚 $d_2$ を65nmとした以外は、実施例1と同様に、反射型マスクブランク10を作製した。表1に、比較例1の位相シフト膜15の下層17のTaN膜の屈折率( $n_2$ )及び膜厚( $d_2$ )を示す。

【0128】

(比較例2)

比較例1として、位相シフト膜15の最上層16(SiO<sub>2</sub>膜)の膜厚 $d_1$ を1.5nm、下層17(TaN膜)の膜厚 $d_2$ を65nmとした以外は、実施例1と同様に、反射型マスクブランク10を作製した。表1に、比較例1の位相シフト膜15の最上層16のSiO<sub>2</sub>膜の屈折率( $n_1$ )及び膜厚( $d_1$ )、並びに下層17のTaN膜の屈折率( $n_2$ )及び膜厚( $d_2$ )を示す。

10

【0129】

(実施例1~4及び比較例1~2の評価)

表2に、実施例1~4の反射型マスクブランク10の $n_1$ と $d_1$ との積( $n_1 \cdot d_1$ )、並びに露光波長 $\lambda = 13.5\text{nm}$ 及び $m = 0$ のときの、 $\lambda / 4 \times (2m + 1) - 1.5\text{(nm)}$ 及び $\lambda / 4 \times (2m + 1) + 1.5\text{(nm)}$ の値を示す。表2から明らかなように、実施例1~4の $n_1$ 及び $n_2$ は、上述の式(1)の関係を満たしている。また、実施例1~3の $n_1 \cdot d_1$ は、及び $m = 0$ の場合の上述の式(2)の関係を満たしている。また、実施例4の $n_1 \cdot d_1$ は、 $m = 2$ の場合の上述の式(2)の関係を満たしている。

【0130】

表1に示すように、比較例1の反射型マスクブランク10は、下層17の1層のみからなる位相シフト膜15なので、 $n_1$ 及び $d_1$ を観念できない。したがって、上述の式(1)及び式(2)の関係を満たしていない。

20

【0131】

表2に、比較例2の $n_1$ と $d_1$ との積( $n_1 \cdot d_1$ )、並びに露光波長 $\lambda = 13.5\text{nm}$ 及び $m = 0$ のときの、 $\lambda / 4 \times (2m + 1) - 1.5\text{(nm)}$ 及び $\lambda / 4 \times (2m + 1) + 1.5\text{(nm)}$ の値を示す。表2から明らかなように、比較例2の $n_1 \cdot d_1$ は、 $m = 0$ の場合の上述の式(2)の下限 $\lambda / 4 \times (2m + 1) - 1.5\text{(nm)}$ より小さい値である。 $m$ はゼロ以上の整数であるから、比較例2の $n_1$ と $d_1$ との積は、上記の式を満足する値を取ることができない。したがって、比較例2は、上述の式(2)の関係を満たしていない。

30

【0132】

図3に、シミュレーションによって得られた、実施例1~4及び比較例1~2の位相シフト膜15の厚さと、位相差との関係を示す。なお、ここで位相差とは、位相シフト膜パターンにおいて入射する露光光の一部が多層反射膜13により反射される光と、位相シフト膜パターンのない部分で入射する露光光が反射される光との間の位相差を意味する。図3に示すように、実施例1~4及び比較例1~2では、位相シフト膜15の最表面からの反射光と、位相シフト膜15の下に存在する多層反射膜13からの反射光との干渉によって、位相差の膜厚依存性に振動構造が生じていることが理解できる。

【0133】

図4に、位相差180度付近の実施例1~4及び比較例1~2の位相シフト膜15の厚さと、位相差との関係を示す。図4は、図3の実施例1及び比較例1の拡大図である。図4では、実施例1及び比較例1において位相差変動が10度(175度~185度)となる膜厚範囲を示している。実施例1では、175度となる膜厚が64.6nm、185度となる膜厚が69.5nmであったため、位相差変動が10度となる膜厚範囲は4.6nmであった。また、比較例1では、175度となる膜厚が64.6nm、185度となる膜厚が65.4nmであったため、位相差変動が10度となる膜厚範囲は0.8nmであった。実施例2~4及び比較例2でも同様に、位相差変動が10度となる膜厚範囲を算出すると、表2に示す通りの値になった。なお、位相差変動が10度となる膜厚範囲は、位相差が160度~200度の範囲内で一番良好となる領域を選択しており、極値を含んでもよい。

40

50

## 【 0 1 3 4 】

表 2 から明らかなように、実施例 1 ~ 4 において、位相差 1 6 0 度 ~ 2 0 0 度の範囲内から選択された位相差変動が 1 0 度となる膜厚範囲は、4 . 0 n m 以上であり、広い範囲を示した。また、実施例 1 は、位相差変動が 1 0 度となる領域に極値を含んでいないため、実施例 1 ~ 4 のなかで最も位相差変動が安定したものであった。これに対し、比較例 1 及び 2 の位相差 1 6 0 度 ~ 2 0 0 度の範囲内から選択された位相差変動が 1 0 度となる膜厚範囲は、0 . 8 n m であり、狭い範囲を示した。このことは、実施例 1 ~ 4 の反射型マスクブランク 1 0 の場合には、所望の位相シフトである位相差 1 6 0 度 ~ 2 0 0 度での位相差の膜厚依存性が小さいことを意味する。

## 【 0 1 3 5 】

10

( 実施例 5 ) ( 位相シフト膜 1 5 が多層膜の場合 )

次に、実施例 5 として、保護膜 1 4 上に、以下の方法で多層膜からなる位相シフト膜 1 5 を形成した以外は実施例 1 と同様に、反射型マスクブランク 1 0 を製造した。

## 【 0 1 3 6 】

実施例 5 の位相シフト膜 1 5 の成膜では、M o ターゲットと T a ターゲットを用い、イオンビームスパッタリング ( A r ガス雰囲気 ) により、最初に、M o 層 ( 第 2 層 1 5 b ) を膜厚 2 . 4 n m で成膜し、次に、T a 層 ( 第 1 層 1 5 a ) を膜厚 2 . 4 n m で成膜した ( 膜厚比 1 : 1 ) 。これを 1 周期とし、1 0 周期を連続して成膜して、最上層 1 6 を T a 層 ( 第 1 層 1 5 a ) とした、合計膜厚 4 8 n m の位相シフト膜 1 5 ( 膜構成 : M o \ T a \ M o \ T a \ \cdots M o \ T a ) を形成した。実施例 5 の位相シフト膜 1 5 は、T a 層 ( 第 1 層 1 5 a ) 及び M o 層 ( 第 2 層 1 5 b ) からなる単位薄膜 1 8 を 1 0 周期有する構造である。

20

## 【 0 1 3 7 】

表 3 に、実施例 5 の位相シフト膜 1 5 の最上層 1 6 の T a 膜の屈折率 (  $n_1$  ) 及び膜厚 (  $d_1$  ) 、並びに下層 1 7 として形成した M o 膜の屈折率 (  $n_2$  ) 及び膜厚 (  $d_2$  ) を示す。

## 【 0 1 3 8 】

( 実施例 6 )

実施例 6 として、位相シフト膜 1 5 の周期の数を 1 5 とした以外は、実施例 5 と同様に、反射型マスクブランク 1 0 を作製した。したがって、実施例 5 の位相シフト膜 1 5 は、T a 層 ( 第 1 層 1 5 a ) 及び M o 層 ( 第 2 層 1 5 b ) からなる単位薄膜 1 8 を 1 5 周期有する構造である。表 3 に、実施例 6 の位相シフト膜 1 5 の最上層 1 6 の T a 膜の屈折率 (  $n_1$  ) 及び膜厚 (  $d_1$  ) 、並びに下層 1 7 として形成した M o 膜の屈折率 (  $n_2$  ) 及び膜厚 (  $d_2$  ) を示す。

30

## 【 0 1 3 9 】

( 実施例 7 )

実施例 7 として、位相シフト膜 1 5 の周期の数を 2 0 とした以外は、実施例 5 と同様に、反射型マスクブランク 1 0 を作製した。したがって、実施例 5 の位相シフト膜 1 5 は、T a 層 ( 第 1 層 1 5 a ) 及び M o 層 ( 第 2 層 1 5 b ) からなる単位薄膜 1 8 を 2 0 周期有する構造である。表 3 に、実施例 7 の位相シフト膜 1 5 の最上層 1 6 の T a 膜の屈折率 (  $n_1$  ) 及び膜厚 (  $d_1$  ) 、並びに下層 1 7 として形成した M o 膜の屈折率 (  $n_2$  ) 及び膜厚 (  $d_2$  ) を示す。

40

## 【 0 1 4 0 】

( 実施例 5 ~ 7 の評価 )

表 4 に、実施例 5 ~ 7 の反射型マスクブランクの  $n_1$  と  $d_1$  との積 (  $n_1 \cdot d_1$  ) 、  $n_2$  と  $d_2$  との積 (  $n_2 \cdot d_2$  ) 、  $n_1 \cdot d_1$  及び  $n_2 \cdot d_2$  の和、並びに露光波長  $\lambda = 13.5 \text{ nm}$  及び  $m = 2$  のときの、 $\lambda / 4 \times (2m + 1) - 1.5 \text{ (nm)}$  及び  $\lambda / 4 \times (2m + 1) + 1.5 \text{ (nm)}$  の値を示す。表 2 から明らかなように、実施例 5 ~ 7 の  $n_1 \cdot d_1$  及び  $n_2 \cdot d_2$  の和は、 $m = 2$  の場合の上述の式 ( 3 ) の関係を満たしている。なお、実施例 5 ~ 7 は、 $n_{i+1} < n_i$  ( すなわち、 $n_2 < n_1$  ) 、かつ  $n_1 < 1$  との関係

50

も満たしている。

#### 【 0 1 4 1 】

図 6 に、実施例 5 ～ 7 の位相シフト膜 1 5 の厚さと、位相差との関係を示す。また、実施例 1 ～ 4 の場合と同様に、実施例 5 ～ 7 の反射型マスクブランク 1 0 について、位相差 1 6 0 度 ～ 2 0 0 度の範囲内から選択された位相差変動が 1 0 度となる膜厚範囲を算出した。その結果を、表 4 に示す。

#### 【 0 1 4 2 】

表 4 から明らかなように、実施例 5 ～ 7 の位相差 1 6 0 度 ～ 2 0 0 度の範囲内から選択された位相差変動が 1 0 度となる膜厚範囲は、4 . 9 nm 以上であり、実施例 1 ～ 4 の場合と同様に、広い範囲を示した。このことは、実施例 5 ～ 7 の反射型マスクブランク 1 0 の場合には、所望の位相シフトである位相差 1 6 0 度 ～ 2 0 0 度での位相差の膜厚依存性が小さいことを意味する。また、実施例 5 ～ 7 は、位相差変動が 1 0 度となる領域に極値を含んでいないため、実施例 1 と同様に位相差変動が特に安定したものであった。

#### 【 0 1 4 3 】

##### < 反射型マスクの作製 >

次に、上述のようにして製造した実施例 1 ～ 7 の反射型マスクブランク 1 0 の位相シフト膜 1 5 上に、レジスト膜を膜厚 1 0 0 nm で形成し、描画・現像によりレジストパターンを形成した。その後、このレジストパターンをマスクとし、フッ素系の S F<sub>6</sub> ガスを用いて、位相シフト膜 1 5 をドライエッチングし、位相シフト膜パターンを形成した。その後、レジストパターンを除去して、反射型マスクを作製した。

#### 【 0 1 4 4 】

##### < 半導体装置の製造 >

実施例 1 ～ 7 のマスクブランク用基板 1 2 を用いて製造した反射型マスクを E U V スキャナにセットし、半導体基板 1 2 上に被加工膜とレジスト膜が形成されたウエハに対して E U V 露光を行った。そして、この露光済レジスト膜を現像することによって、被加工膜が形成された半導体基板 1 2 上にレジストパターンを形成した。

#### 【 0 1 4 5 】

実施例 1 ～ 7 のマスクブランク用基板 1 2 0 を用いて製造した反射型マスクは、位相差の膜厚依存性が小さい位相シフト膜 1 5 を有する反射型マスクを用いることができるので、微細でかつ高精度の転写パターンを有する半導体装置を製造することができた。

#### 【 0 1 4 6 】

このレジストパターンをエッチングにより被加工膜に転写し、また、絶縁膜、導電膜の形成、ドーパントの導入、あるいはアニールなど種々の工程を経ることで、所望の特性を有する半導体装置を高い歩留まりで製造することができた。

#### 【 0 1 4 7 】

##### 【表 1】

|       | 周期 | n <sub>1</sub><br>(SiO <sub>2</sub> 膜) | n <sub>2</sub><br>(Ta <sub>2</sub> N <sub>5</sub> 膜) | d <sub>1</sub><br>(SiO <sub>2</sub> 膜)<br>(nm) | d <sub>2</sub><br>(Ta <sub>2</sub> N <sub>5</sub> 膜)<br>(nm) |
|-------|----|--|--|--|--|
| 実施例 1 | 1  | 0.978                                  | 0.949  | 4  | 63   |
| 実施例 2 | 1  | 0.978                                  | 0.949  | 3.375  | 60   |
| 実施例 3 | 1  | 0.978                                  | 0.949  | 3.7  | 60   |
| 実施例 4 | 1  | 0.978                                  | 0.949  | 18   | 61.5   |
| 比較例 1 | 1  | —                                      | 0.949  | 0  | 65   |
| 比較例 2 | 1  | 0.978                                  | 0.949  | 1.5  | 65   |

#### 【 0 1 4 8 】

【表 2】

|      | $n_1 \cdot d_1$<br>(nm) | m | $\lambda/4 \times (2m+1) - 1.5$<br>(nm) | $\lambda/4 \times (2m+1) + 1.5$<br>(nm) | 位相差変動が10度と<br>なる膜厚範囲(nm) |
|------|-------------------------|---|---|---|--------------------------|
| 実施例1 | 3.912                   | 0 | 1.875                                   | 4.875                                   | (位相差175~185度)<br>4.9     |
| 実施例2 | 3.301                   | 0 | 1.875                                   | 4.875                                   | (位相差165~175度)<br>4.0     |
| 実施例3 | 3.619                   | 0 | 1.875                                   | 4.875                                   | (位相差166~176度)<br>4.0     |
| 実施例4 | 17.604                  | 2 | 15.375                                  | 18.375                                  | (位相差175~185度)<br>6.2     |
| 比較例1 | —                       | — | —                                       | —                                       | (位相差175~185度)<br>0.8     |
| 比較例2 | 1.467                   | 0 | 1.875                                   | 4.875                                   | (位相差175~185度)<br>0.8     |

【0149】

【表 3】

|      | 周期 | $n_1$<br>(Ta膜) | $n_2$<br>(Mo膜) | $d_1$<br>(Ta膜)<br>(nm) | $d_2$<br>(Mo膜)<br>(nm) |
|------|----|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| 実施例5 | 10 | 0.943          | 0.921          | 2.4                    | 2.4                    |
| 実施例6 | 15 | 0.943          | 0.921          | 1.6                    | 1.6                    |
| 実施例7 | 20 | 0.943          | 0.921          | 1.2                    | 1.2                    |

【0150】

【表 4】

|      | $n_1 \cdot d_1$<br>(nm) | $n_2 \cdot d_2$<br>(nm) | $n_1 \cdot d_1$<br>+ $n_2 \cdot d_2$<br>(nm) | m | $\lambda/4 \times (2m+1) - 1.5$<br>(nm) | $\lambda/4 \times (2m+1) + 1.5$<br>(nm) | 位相差変動が10<br>度(位相差175~1<br>85度)となる膜厚<br>範囲(nm) |
|------|-------------------------|-------------------------|--|---|---|---|---|
| 実施例5 | 2.263                   | 2.210                   | 4.474  | 2 | 1.875                                   | 4.875                                   | 4.9   |
| 実施例6 | 1.509                   | 1.474                   | 2.982  | 2 | 1.875                                   | 4.875                                   | 5.3   |
| 実施例7 | 1.132                   | 1.105                   | 2.237  | 2 | 1.875                                   | 4.875                                   | 5.4   |

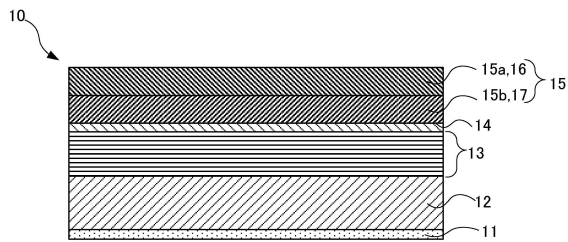
【符号の説明】

【0151】

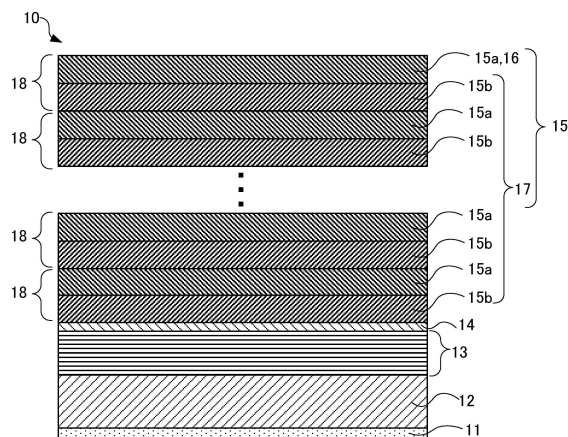
- 10 反射型マスクブランク
- 12 基板
- 13 多層反射膜
- 14 保護膜
- 15 位相シフト膜

- 1 5 a 第1層
- 1 5 b 第2層
- 1 6 最上層
- 1 7 下層
- 1 8 単位薄膜

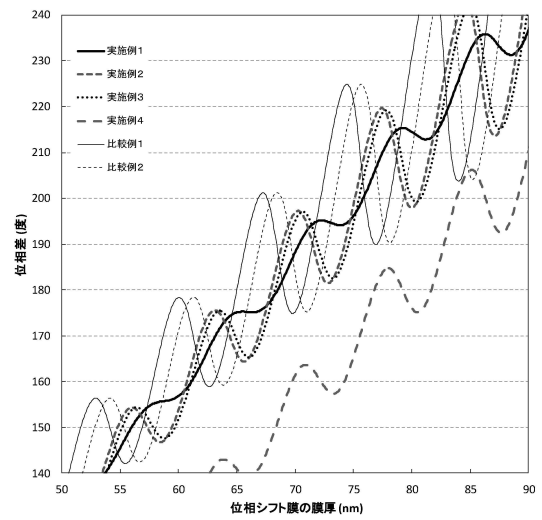
【図1】



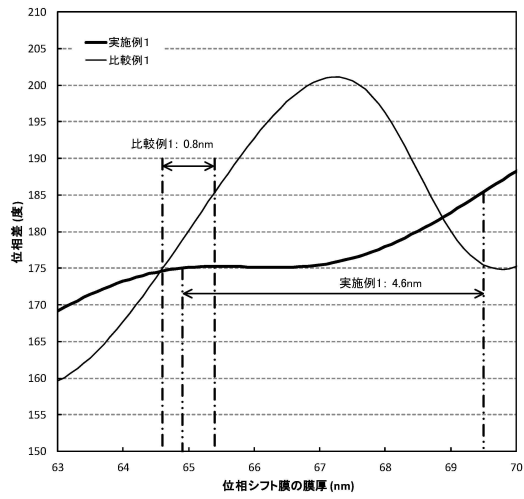
【図2】



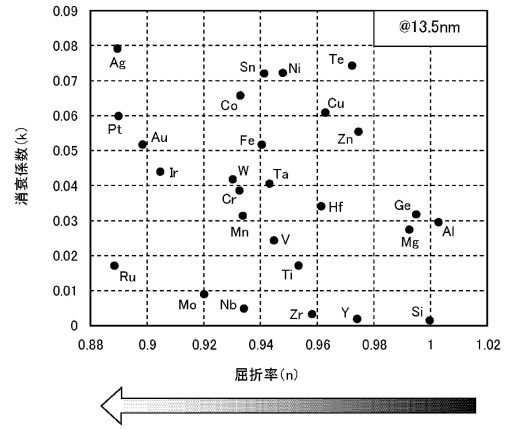
【図3】



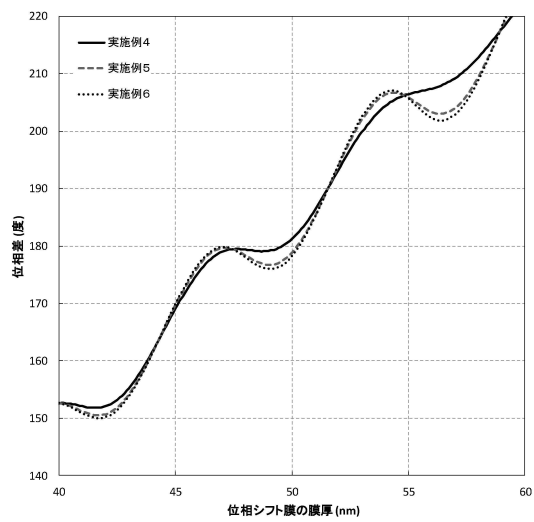
【図 4】



【図 5】



【図 6】





---

フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 3 F      1 / 2 4

G 0 3 F      1 / 2 6

G 0 3 F      7 / 2 0

H 0 1 L      2 1 / 3 0 6 5