

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4635085号
(P4635085)

(45) 発行日 平成23年2月16日(2011.2.16)

(24) 登録日 平成22年11月26日(2010.11.26)

(51) Int.Cl.

H01L 21/027 (2006.01)
G03F 1/08 (2006.01)

F 1

H01L 21/30 502 P
G03F 1/08 D
H01L 21/30 515 D

請求項の数 10 (全 37 頁)

(21) 出願番号 特願2008-330621 (P2008-330621)
 (22) 出願日 平成20年12月25日 (2008.12.25)
 (65) 公開番号 特開2009-239254 (P2009-239254A)
 (43) 公開日 平成21年10月15日 (2009.10.15)
 審査請求日 平成22年2月5日 (2010.2.5)
 (31) 優先権主張番号 特願2008-52450 (P2008-52450)
 (32) 優先日 平成20年3月3日 (2008.3.3)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 000003078
 株式会社東芝
 東京都港区芝浦一丁目1番1号
 (74) 代理人 100108855
 弁理士 蔵田 昌俊
 (74) 代理人 100091351
 弁理士 河野 哲
 (74) 代理人 100088683
 弁理士 中村 誠
 (74) 代理人 100109830
 弁理士 福原 淑弘
 (74) 代理人 100075672
 弁理士 峰 隆司
 (74) 代理人 100095441
 弁理士 白根 俊郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】半導体装置の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

照明光源からの照明光を、透明領域と非透明領域とから構成されるマスクパターンを含むフォトマスクに照射し、投影光学系を介して、前記フォトマスクからの回折光を基板上に投影することにより、前記基板上に前記マスクパターンに応じたフォトレジストパターンを形成する半導体装置の製造方法であって、

前記マスクパターンは、第1の方向に一定の第1の間隔を有して、前記第1の方向と直交する第2の方向に延びる複数本の平行線上に、それぞれの中心が個々の前記平行線上ごとに前記第2の方向に一定の第2の間隔で配置された前記透明領域である複数の開口パターンを含み、かつ、前記複数本の平行線のうちの隣り合う平行線上に配置された前記複数の開口パターンは、それぞれの中心が前記第2の方向に前記第2の間隔の1/2だけそれぞれずれて配置されているマスクパターンであり、

前記照明光源は、前記フォトマスクからの前記回折光のうち、3個の回折光が前記投影光学系の瞳を通過するように照明形状が設定され、

前記フォトマスクは、前記3個の回折光の振幅が等しくなるように、前記複数の開口パターンの寸法と前記非透明領域の複素振幅透過率とが設定されている

ことを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項2】

前記マスクパターンは、さらに、前記複数の開口パターンとは寸法が異なる、前記フォトレジストパターンとして形成されない複数の開口パターンを含む

ことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項 3】

前記マスクパターンは、前記透明領域を通過する光に対して、前記非透明領域を通過する光の位相を 180 度シフトさせる

ことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項 4】

前記照明光源は、その中心から前記第 2 の方向に沿う二方向にずれてそれぞれ配置された第 1 の発光領域と第 2 の発光領域とを有する、二重極照明であって、

露光波長を λ 、投影レンズの開口数を N_A 、前記第 1 の間隔を P_x 、前記第 2 の間隔を $2P_y$ としたとき、前記第 1 の発光領域および前記第 2 の発光領域は、前記照明光源の中心から下記式 (1) で示される距離だけ前記第 2 の方向に沿う前記二方向にずれた点をそれぞれ含む

ことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体装置の製造方法。

【数 1】

$$\frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{P_y} + \frac{P_y}{P_x^2} \right) \quad (1)$$

【請求項 5】

二重極照明からの照明光が照射される前記複数の開口パターンは、NAND 型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホールを形成するためのものであって、

前記複数本の平行線が 2 本とされた

ことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項 6】

前記照明光源は、その中心から前記第 1 の方向および前記第 2 の方向にずれた四領域にそれぞれ配置された第 1 の発光領域と第 2 の発光領域と第 3 の発光領域と第 4 の発光領域とを有する、四重極照明であって、

露光波長を λ 、投影レンズの開口数を N_A 、前記第 1 の間隔を P_x 、前記第 2 の間隔を $2P_y$ としたとき、前記第 1 の発光領域ないし前記第 4 の発光領域は、前記照明光源の中心から下記式 (2) で示される距離だけ前記第 1 の方向に、下記式 (3) で示される距離だけ前記第 2 の方向にずれた点をそれぞれ含む

ことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体装置の製造方法。

【数 2】

$$\frac{\lambda}{2NAP_x} \quad (2)$$

【数 3】

$$\frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{P_y} - \frac{P_y}{P_x^2} \right) \quad (3)$$

【請求項 7】

四重極照明からの照明光が照射される前記複数の開口パターンは、NAND 型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホールを形成するためのものであって、

前記複数本の平行線が 2 本とされ、

前記マスクパターンは、さらに、前記ビット線コンタクト用のコンタクトホールとは周期が異なる、周辺回路用の孤立したコンタクトホールを形成するための開口パターンを含む、

ことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項 8】

10

20

30

40

50

前記照明光源は、その中心から前記第1の方向および前記第2の方向にずれた四領域にそれぞれ配置された第1の発光領域と第2の発光領域と第3の発光領域と第4の発光領域と、前記第2の方向に沿う二方向にずれてそれぞれ配置された第5の発光領域と第6の発光領域とを有する、六重極照明であって、

露光波長を λ 、投影レンズの開口数を NA 、前記第1の間隔を P_x 、前記第2の間隔を P_y としたとき、前記第1の発光領域ないし前記第4の発光領域は、前記照明光源の中心から下記式(4)で示される距離だけ前記第1の方向に、下記式(5)で示される距離だけ前記第2の方向にずれた点をそれぞれ含むとともに、前記第5の発光領域および前記第6の発光領域は、前記照明光源の中心から下記式(6)で示される距離だけ前記第2の方向に沿う前記二方向にずれた点をそれぞれ含む

ことを特徴とする請求項1に記載の半導体装置の製造方法。

【数4】

$$\frac{\lambda}{2NA P_x} \quad (4)$$

【数5】

$$\frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{P_y} - \frac{P_y}{P_x^2} \right) \quad (5)$$

【数6】

$$\frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{P_y} + \frac{P_y}{P_x^2} \right) \quad (6)$$

【請求項9】

六重極照明からの照明光が照射される前記複数の開口パターンは、NAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホールを形成するためのものであって、

前記複数本の平行線が2本とされ、

前記マスクパターンは、さらに、前記ビット線コンタクト用のコンタクトホールとは周期が異なる、周辺回路用の孤立したコンタクトホールを形成するための開口パターンを含む、

ことを特徴とする請求項1に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項10】

前記非透明領域の複素振幅透過率を γ 、前記第1の間隔を P_x 、前記第2の間隔を P_y 、前記開口パターンの前記第1の方向の寸法および前記第2の方向の寸法をそれぞれ q_x 、 q_y としたとき、 $x = q_x / P_x$ 、 $y = q_y / P_y$ により、下記式(7)を満たすように、前記非透明領域の複素振幅透過率 γ と、前記第1の方向の寸法 q_x および前記第2の方向の寸法 q_y とが設定されている

ことを特徴とする請求項1に記載の半導体装置の製造方法。

【数7】

$$\gamma = \frac{2\pi^2 \epsilon_x \epsilon_y - 2 \sin(\epsilon_x \pi) \sin(\epsilon_y \pi)}{2\pi^2 \epsilon_x \epsilon_y - 1 - 2 \sin(\epsilon_x \pi) \sin(\epsilon_y \pi)} \quad (7)$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、半導体装置の製造方法に関するもので、たとえば、NANDセルユニットの選択トランジスタの拡散層に接続されるビット線コンタクトの形成などに用いられるもの

10

20

30

40

50

である。

【背景技術】

【0002】

半導体装置において、高集積化のためには、高密度でパターンを形成することが重要である。そのため、たとえばNAND型フラッシュメモリでは、ビット線コンタクト用の複数のコンタクトホールを互いにずらして配置することが提案されている（たとえば、特許文献1参照）。

【0003】

しかしながら、上記コンタクトホールを形成するためのマスクパターンは、開口パターンが斜め方向に“密”である。これは、コンタクトホール形成用の開口（透明領域）が互いにずらされて配置されているためである。そのため、露光量余裕度および焦点深度が小さくなり、露光工程での寸法誤差を抑制することが困難であった。つまり、NAND型フラッシュメモリにおいては、開口パターンが規則的に配列された密集ホールパターンであって、ホールが直交格子状配列でない微細パターンを形成する必要があるものの、従来は高精度に形成することが難しいという問題があった。

【特許文献1】特許第3441140号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

本発明は、微細なホールパターンの形成に好適で、特に、密集ホールパターンであって、ホールが直交格子状配列でない微細パターンを高精度に形成することが可能な半導体装置の製造方法を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本願発明の一態様によれば、照明光源からの照明光を、透明領域と非透明領域とから構成されるマスクパターンを含むフォトマスクに照射し、投影光学系を介して、前記フォトマスクからの回折光を基板上に投影することにより、前記基板上に前記マスクパターンに応じたフォトレジストパターンを形成する半導体装置の製造方法であって、前記マスクパターンは、第1の方向に一定の第1の間隔を有して、前記第1の方向と直交する第2の方向に延びる複数本の平行線上に、それぞれの中心が個々の前記平行線上ごとに前記第2の方向に一定の第2の間隔で配置された前記透明領域である複数の開口パターンを含み、かつ、前記複数本の平行線のうちの隣り合う平行線上に配置された前記複数の開口パターンは、それぞれの中心が前記第2の方向に前記第2の間隔の1/2だけそれぞれずれて配置されているマスクパターンであり、前記照明光源は、前記フォトマスクからの前記回折光のうち、3個の回折光が前記投影光学系の瞳を通過するように照明形状が設定され、前記フォトマスクは、前記3個の回折光の振幅が等しくなるように、前記複数の開口パターンの寸法と前記非透明領域の複素振幅透過率とが設定されている、ことを特徴とする半導体装置の製造方法が提供される。

【0006】

また、本願発明の一態様によれば、照明光源からの照明光を、透明領域と非透明領域とから構成されるマスクパターンを含むフォトマスクに照射し、投影光学系を介して、前記フォトマスクからの回折光を基板上に投影することにより、前記基板上に前記マスクパターンに応じたフォトレジストパターンを形成する半導体装置の製造方法であって、前記マスクパターンは、第1の方向に一定の第1の間隔を有して、前記第1の方向と直交する第2の方向に延びる複数本の平行線上に、それぞれの中心が個々の前記平行線上ごとに前記第2の方向に一定の第2の間隔で配置された前記透明領域である複数の開口パターンを含み、かつ、前記複数本の平行線のうちの隣り合う平行線上に配置された前記複数の開口パターンは、それぞれの中心が前記第2の方向に前記第2の間隔の1/3だけそれぞれずれて配置されているマスクパターンであり、前記照明光源は、前記フォトマスクからの前記回折光のうち、3個の回折光が前記投影光学系の瞳を通過するように照明形状が設定され

10

20

30

40

50

ている、ことを特徴とする半導体装置の製造方法が提供される。

【発明の効果】

【0007】

上記の構成により、微細なホールパターンの形成に好適で、特に、密集ホールパターンであって、ホールが直交格子状配列でない微細パターンを高精度に形成することが可能な半導体装置の製造方法を提供できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0008】

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して説明する。ただし、図面は模式的なものであり、各図面の寸法および比率などは現実のものとは異なることに留意すべきである。また、図面の相互間においても、互いの寸法の関係および／または比率が異なる部分が含まれていることは勿論である。特に、以下に示すいくつかの実施の形態は、本発明の技術思想を具体化するための装置および方法を例示したものであって、構成部品の形状、構造、配置などによって、本発明の技術思想が特定されるものではない。この発明の技術思想は、その要旨を逸脱しない範囲において、種々の変更を加えることができる。

【0009】

【第1の実施形態】

図1は、本発明の第1の実施形態にしたがった、フォトマスクの一例を示すものである。なお、本実施形態では、NAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホール（いわゆる、密集ホールパターンであって、ホールが直交格子状配列でない微細パターン、たとえばNAND-CB層の2連千鳥配置ホール）を形成する場合を例に説明する。

【0010】

図1において、フォトマスクは、メイン開口（第1のメイン開口）11、メイン開口（第2のメイン開口）12、アシスト開口（第1のアシスト開口）21、アシスト開口（第2のアシスト開口）22、アシスト開口（第3のアシスト開口）23、および、アシスト開口（第4のアシスト開口）24を、それぞれ複数個ずつ有している。これらの開口11, 12, 21, 22, 23, 24は、遮光領域（非透明領域）31によって囲まれている。遮光領域31は、たとえばクロム膜が形成された遮光領域、あるいは、たとえばモリブデンシリサイド膜が形成された半透明のハーフトーン位相シフト領域である。

【0011】

メイン開口11, 12は互いに同一形状および同一寸法であり、アシスト開口21, 22, 23, 24は互いに同一形状および同一寸法である。また、アシスト開口21, 22, 23, 24は、メイン開口11, 12よりも小さい。

【0012】

メイン開口11, 12は、ビット線コンタクト用のコンタクトホールパターンに対応した開口パターン（転写パターン）であり、露光工程および現像工程の後、メイン開口11, 12に対応したパターンがフォトレジストに形成される。アシスト開口21, 22, 23, 24は補助的なパターン（非解像のアシストパターン）であり、露光工程および現像工程を経ても、アシスト開口21, 22, 23, 24に対応したパターンはフォトレジストには形成されない。

【0013】

メイン開口11は、ビット線方向（第2の方向）に延びた直線（第1の直線）41上に、ピッチ2Py（第2の間隔）で複数配置されている。すなわち、各メイン開口11の中心が直線41上に位置している。メイン開口11に隣接するメイン開口12は、ビット線方向に延びた直線（第2の直線）42上に、ピッチ2Pyで複数配置されている。すなわち、各メイン開口12の中心が直線42上に位置している。

【0014】

直線41と直線42とは互いに平行であり、直線41と直線42との距離（第1の方向（ワード線方向）の第1の距離（第1の間隔））はPxである。また、メイン開口11と

10

20

30

40

50

メイン開口 1 2 とは、ピット線方向に互いに P_y だけずれて配置されている。

【0015】

メイン開口 1 1 に隣接するアシスト開口 2 1 は、ピット線方向に延びた直線（第 3 の直線）4 3 上に、ピッチ 2 P_y で複数配置されている。すなわち、各アシスト開口 2 1 の中心が直線 4 3 上に位置している。メイン開口 1 2 に隣接するアシスト開口 2 2 は、ピット線方向に延びた直線（第 4 の直線）4 4 上に、ピッチ 2 P_y で複数配置されている。すなわち、各アシスト開口 2 2 の中心が直線 4 4 上に位置している。アシスト開口 2 1 に隣接するアシスト開口 2 3 は、ピット線方向に延びた直線（第 5 の直線）4 5 上に、ピッチ 2 P_y で複数配置されている。すなわち、各アシスト開口 2 3 の中心が直線 4 5 上に位置している。アシスト開口 2 2 に隣接するアシスト開口 2 4 は、ピット線方向に延びた直線（第 6 の直線）4 6 上に、ピッチ 2 P_y で複数配置されている。すなわち、各アシスト開口 2 4 の中心が直線 4 6 上に位置している。10

【0016】

直線 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5 および 4 6 は互いに平行である。直線 4 1 と直線 4 3 との距離（第 1 の間隔）は P_x であり、直線 4 2 と直線 4 4 との距離も P_x である。また、直線 4 3 と直線 4 5 との距離は P_x であり、直線 4 4 と直線 4 6 との距離も P_x である。

【0017】

アシスト開口 2 1 はメイン開口 1 1 に対して、ピット線方向に P_y だけずれて配置されている。同様に、アシスト開口 2 2 はメイン開口 1 2 に対して、ピット線方向に P_y だけずれて配置されている。したがって、アシスト開口 2 1 とアシスト開口 2 2 とは、ピット線方向に互いに P_y だけずれて配置されている。一方、アシスト開口 2 3 はアシスト開口 2 1 に対して、ピット線方向に P_y だけずれて配置されている。同様に、アシスト開口 2 4 はアシスト開口 2 2 に対して、ピット線方向に P_y だけずれて配置されている。つまり、ピット線方向において、アシスト開口 2 2, 2 3 はメイン開口 1 1 と同一ピッチ（2 P_y ）で配置されている。また、アシスト開口 2 1, 2 4 はメイン開口 1 2 と同一ピッチ（2 P_y ）で配置されている。20

【0018】

以上の説明から分かるように、アシスト開口 2 3、アシスト開口 2 1、メイン開口 1 1 、メイン開口 1 2 、アシスト開口 2 2 、および、アシスト開口 2 4 は、斜め方向に同一ピッチで配置されている。すなわち、図 1 に示したフォトマスクは、アシスト開口 2 1, 2 2, 2 3, 2 4 を付加することで、斜め方向の周期性を高めるようにしている（たとえば、特開 2008-066586 号公報参照）。30

【0019】

ここで、投影レンズの開口数を NA 、露光波長を λ とし、開口パターンのワード線方向のピッチ P_x およびピット線方向のピッチ P_y が、下記数 3 の式（10）の関係を満たすとすると、たとえば、 $NA = 1.3$ 、 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、 $P_x = 80 \text{ nm}$ 、 $P_y = 90 \text{ nm}$ のような場合が考えられる。

【0020】

【数 3】

$$\sqrt{P_x^2 + P_y^2} < \frac{\lambda}{NA} \quad \cdots (10)$$

【0021】

このような条件（波長 λ および開口数 NA ）によって微細なホールパターンを形成しようとする場合、従来のような一般的な照明（垂直照明光）を用いると、基板上に形成される像のコントラストが不十分となり、露光量またはフォーカスの誤差に対する条件としては脆弱となる。そのため、必要とするホールパターンを形成することができない。また、フォトマスク上の開口パターンの大きさを、基板上のホールパターンの目標寸法を投影レンズの倍率で割った数値とするとき、開口パターンのピッチ P_x , P_y が大きい場合には50

問題ない。しかし、ピッチ P_x , P_y が小さい場合には、開口パターンの大きさが問題となる。

【0022】

本実施形態は、ホールパターンの露光に使用される光リソグラフィ技術において、開口パターンの最小パターンピッチが $/NA$ となる条件での露光に適した、微細なホールパターン（密集ホールパターンであって、ホールが直交格子状配列でない微細パターン）の形成を可能にする。

【0023】

図2は、本実施形態における、照明の構成例を示すものである。本実施形態の場合、照明としては、変形照明である二重極照明が用いられる。

10

【0024】

図2に示すように、二重極照明は、発光領域（第1の発光領域）51および発光領域（第2の発光領域）52を有している。これらの発光領域51, 52は、非発光領域61によって囲まれている。

【0025】

発光領域51と発光領域52とは、照明の中心70に対して、互いに対称となる位置に設けられている。すなわち、発光領域51と発光領域52とは互いに同一形状および同一寸法であり、発光領域51の中心と発光領域52の中心とが照明の中心70に対して互いに対称な位置にある。また、発光領域51および発光領域52は、それぞれ、点71（第1の点）および点72（第2の点）を内包する。点71および点72は、照明の中心70に対して互いに対称である。また、点71および点72は、照明の中心70を通り、かつ、ピット線方向（y方向、第2の方向）に垂直なワード線方向（x方向、第1の方向）に伸びた直線81に対して互いに対称である。すなわち、照明の中心70と点71との距離（dy）および照明の中心70と点72との距離（dy）は互いに等しい。

20

【0026】

理想的には、発光領域51の中心と点71とが一致し、発光領域52の中心と点72とが一致していることが望ましい。この場合には、発光領域51と発光領域52とが、直線81に対して互いに対称となる。

【0027】

なお、照明光の波長を λ 、照明光が通過する投影レンズの開口数をNAとすると、照明の中心70と点71との距離dyおよび照明の中心70と点72との距離dyは、照明の座標系において、下記数4の式（11）の関係を満たしていることが望ましい。座標系については後述する。

30

【0028】

【数4】

$$dy = \frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{P_y} + \frac{P_y}{P_x^2} \right) \quad \cdots (11)$$

【0029】

40

上述した変形照明からの斜め照明光を、上述したフォトマスク（図1参照）を介して、フォトトレジストに照射することで、そのフォトトレジスト上に寸法誤差が抑制された高精度のコンタクトホールパターンを形成することができる。

【0030】

図3は、露光および現像工程後のフォトトレジストに形成されたコンタクトホールパターンの一例を示すものである。

【0031】

図3に示すように、フォトトレジスト90にコンタクトホールパターン91, 92が形成される。すなわち、図1に示したメイン開口11, 12に対応したパターンが、コンタクトホールパターン91, 92として、フォトトレジスト90に形成される。また、図1に示

50

したアシスト開口 21, 22, 23, 24 に対応したパターンは、フォトレジスト 90 には形成されない。

【0032】

ここで、図4を参照して、上述した 座標系について説明する。

【0033】

図4において、111は照明光学系、112はフォトマスク、113は投影光学系(投影レンズ)、114は基板(半導体ウェハ)、115は光軸である。照明光学系111の射出側開口数は $\sin(1)$ 、投影光学系113の入射側開口数は $\sin(2)$ であり、 値は $\sin(1) / \sin(2)$ と定義される。

【0034】

二重極照明のような変形照明では、上記 値の定義を拡張して、 座標系を用いるのが一般的である。 座標系は、光軸を原点とし、投影光学系の入射側開口数を「1」に規格化した座標系である。したがって、図4のT点の照明位置は、 座標系で表すと、

$$(x, y) = (\sin(1) / \sin(2), 0)$$

となる。

【0035】

以下に、上述したフォトマスク(図1参照)および変形照明(図2参照)を用いた露光方法により、寸法誤差が抑制された高精度のコンタクトホールパターンを形成できる理由について説明する。

【0036】

パターン間隔が基板上の寸法で $/NA$ よりも小さい場合、垂直照明光を用いると、回折角が大きいため、0次回折光以外の回折光は基板に到達しない。そのため、たとえば図5に示すように、光の干渉が起きず、像が形成されない。斜め照明光を用いた場合には、たとえば図6に示すように、0次回折光と1次回折光との干渉により、像を形成することが可能である。

【0037】

斜め照明光を用いた場合、周期パターンの方が孤立パターンよりも焦点深度が大きくなる。そこで、本実施形態では、図1に示したようなアシスト開口21, 22, 23, 24を付加し、パターン全体に周期性を持たせている。すなわち、図1に示したメイン開口11およびメイン開口12は斜め方向に配置されているため、アシスト開口21, 22, 23, 24を付加することで、斜め方向の周期性を高めるようにしている。

【0038】

次に、図2に示した二重極照明が望ましい理由について説明する。なお、以下では、説明の簡単化のため、図1に示したフォトマスクに代えて、図7に示すマスクパターン(フォトマスク)を用いた場合を想定して説明する。

【0039】

図1に示したフォトマスクは、回折格子としては、図7に示したマスクパターンと同じ方向に回折光を発生することができる。図7において、121は遮光領域、122は開口を示している。

【0040】

図7に示したマスクパターンに、図8に示すような照明(小 照明)からの垂直照明光を照射した場合を考える。すなわち、図8の照明では、照明の中心部に発光領域131が設けられている。この場合、投影レンズ瞳に相当する面での回折光は、図9に示すような分布を示す。図9の座標系は、投影レンズ瞳の半径(値)を「1」に規格化した 座標系である。つまり、図9は、図7に示したマスクパターンをフーリエ変換したときの、投影レンズ瞳面における回折光の分布を示すものである。

【0041】

図9において、141gは0次回折光、141fは1次回折光である。4つの1次回折光141fの座標位置は、それぞれ、

$$(+Qx, +Qy)$$

10

20

30

40

50

$$\begin{aligned} & (+Qx, -Qy) \\ & (-Qx, +Qy) \\ & (-Qx, -Qy) \end{aligned}$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} Qx &= / (2Py \times NA) \\ Qy &= / (2Px \times NA) \end{aligned}$$

である。なお、 P は照明光の波長、 NA は投影レンズ（投影光学系）の開口数である。また、図 7 における、開口 122 の x 方向のピッチが P_x であり、開口 122 の y 方向のピッチが P_y である。また、図 9 の、142 は投影レンズ瞳の有効領域（単位円）であり、有効領域 142 内の回折光のみが基板上に到達する。よって、図 9 の場合には、1 つの回折光（0 次回折光）141g しか基板上に到達しないため、光の干渉が起こらず、基板上には像が形成されない。10

【0042】

図 7 に示したマスクパターンに、図 10 に示すような変形照明（斜め照明）からの斜め照明光を照射した場合を考える。斜め照明光の位置（発光領域 132）を y 軸方向に適当にシフト（シフト量 s ）させることにより、たとえば図 11 に示すように、投影レンズ瞳の有効領域 142 内に 3 つの回折光 141a, 141b, 141c を位置させることができる。したがって、3 つの回折光 141a, 141b, 141c が投影レンズを通過して基板上に到達するため、光の干渉が生じ、基板上に像を形成することができる。20

【0043】

図 12 は、図 11 に示した 3 つの回折光 141a, 141b, 141c の干渉により、図 7 の開口 122 に対応した像（図 13 参照）が基板上に形成される場合を例に示すものである。20

【0044】

図 12 に示すように、回折光 141a および回折光 141b の干渉により、基板上に 1 次元状の干渉縞 151 が生成される。同様に、回折光 141b および回折光 141c の干渉により、基板上に干渉縞 152 が生成され、回折光 141c および回折光 141a の干渉により、基板上に干渉縞 153 が生成される。なお、実線は干渉縞の明部ピーク、破線は干渉縞の暗部ピークを示している。3 つの干渉縞 151, 152, 153 の明部が重なった部分 155 で、光強度が特に高くなる。したがって、図 13 に示すように、ポジ型フォトレジスト 90a を用いた場合には、上記部分 155 に対応する位置にコンタクトホールパターン 93 が形成されることになる。30

【0045】

なお、図 13 は、図 7 に示したマスクパターンを用いた場合の例である。図 1 に示したようなフォトマスクを用いた場合には、メイン開口 11, 12 およびアシスト開口 21, 22, 23, 24 のサイズに応じた像強度で基板上に像を形成することで、メイン開口 11, 12 に対応したコンタクトホールパターン 91, 92 のみをフォトレジスト 90 に形成することができる（図 3 参照）。

【0046】

ここで、投影レンズ瞳における回折光の位置と強度との関係について説明する。40

【0047】

図 14 において、回折光 141a はマスクを直進する光、すなわち 0 次回折光である。回折光 141b, 141c は、1 次回折光である。通常使われるバイナリマスクもしくはハーフトーン位相シフトマスクにおいては、回折光 141b, 141c の光の振幅および位相は共通となる。マスクパターンが、バイナリマスクもしくはハーフトーン位相シフトマスクによって形成されている場合、マスク遮光体（遮光領域）の複素振幅透過率を（負の場合は位相シフトマスク、0 の場合はバイナリマスク）とすると、投影レンズ瞳における回折光 141a の振幅（強度） A 、および、回折光 141b, 141c の振幅 B, C は、下記数式（12），（13）で表される。

【0048】

10

20

30

40

50

【数5】

$$A = \gamma + 2(1-\gamma)\epsilon_x\epsilon_y \quad \dots (12)$$

$$B = C = 2(1-\gamma) \frac{\sin(\epsilon_x \pi)}{\pi} \frac{\sin(\epsilon_y \pi)}{\pi} \quad \dots (13)$$

ただし、 $\epsilon_x = \frac{q_x}{P_x}$, $\epsilon_y = \frac{q_y}{P_y}$ である。また、 q_x, q_y は開口 122 の x 方向
および y 方向の寸法である。

10

【0049】

< 照明位置の最適化 >

照明のシフト量 s が、下記数 6 の式 (14) を満たすようにする。

【0050】

【数6】

$$\sigma_s = \frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{P_y} + \frac{P_y}{P_x^2} \right) \quad \dots (14)$$

20

【0051】

この場合、3 個の回折光 141a, 141b, 141c の瞳中心からの距離 a, b, c が等しくなる。その結果、後で計算する基板上の干渉縞において、デフォーカス依存性がなくなる。すなわち、焦点深度が十分に大きくなる。

【0052】

さらに、フォーカスに対する像の位置ずれをなくすために、照明は軸対称であるべきである。したがって、軸対照に照明領域を配置した図 2 の二重極照明が望ましい。

【0053】

< 干渉波振幅の最適化 >

基板上に形成される干渉波の強度分布 $I(x, y)$ は、下記数 7 の式 (15) によって表される。

30

【0054】

【数7】

$$I(x, y) = |A \exp(-i\mathbf{k}_a \cdot \mathbf{x}) + B \exp(-i\mathbf{k}_b \cdot \mathbf{x}) + C \exp(-i\mathbf{k}_c \cdot \mathbf{x})|^2 \quad \dots (15)$$

ただし、 $\mathbf{k}_a, \mathbf{k}_b, \mathbf{k}_c$ はそれぞれ回折光 141a, 141b, 141c の波数ベクトル、
 \mathbf{x} は位置ベクトルである。

【0055】

この式 (15) に上記式 (12), (13) を代入して展開すると、下記数 8 の式 (16) が得られる。

40

【0056】

【数8】

$$I(x, y) = (A^2 + 2B^2) + 2AB\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}xS - \frac{3}{2}yS\right) + 2AB\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}xS + \frac{3}{2}yS\right) + 2B^2\cos(\sqrt{3}xS) \quad \cdots (16)$$

なお、 $S = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta$ である。

10

【0057】

ただし、 S は各回折光の進行方向と基板面の法線とがなす角である。また、上記式(16)の右辺第1項は一律成分、第2項および第3項はそれぞれ回折光141aと回折光141bとの干渉および回折光141aと回折光141cとの干渉により生成される干渉波である。第4項は回折光141bと回折光141cとの干渉により生成される干渉波である。

【0058】

ここで、上記式(14)の条件を満たすように照明を与えていため、上記式(16)には、 z に依存する成分が現れない。このことは、干渉縞がベストフォーカス近傍ではデフォーカスの影響を受けないことを示している。

20

【0059】

干渉波のコントラストを考えるために、図15に示す明部156および2種類の暗部157, 158の光強度について説明する。明部156および2種類の暗部157, 158の光強度は、それぞれ、下記数9の式(17), (18), (19)により与えられる。なお、図示した箇所以外にも複数の明部、暗部が存在するが、対称性から、それらの強度は共通である。それぞれの強度は、上記式(16)から求められる。

【0060】

【数9】

$$\text{明部(156)の強度 } I_0 = I(0,0) = A^2 + 4B^2 + 4AB \quad \cdots (17)$$

30

$$\text{暗部(157)の強度 } I_1 = I\left(\frac{\pi}{\sqrt{3}S}, \frac{\pi}{3S}\right) = A^2 \quad \cdots (18)$$

$$\text{暗部(158)の強度 } I_2 = I\left(0, \frac{2\pi}{3S}\right) = (A - 2B)^2 \quad \cdots (19)$$

【0061】

図15の場合には、2種類のコントラストが定義できる。すなわち、下記数10の式(20), (21)に示すように、明部156 - 暗部157 - 明部156に沿ったコントラスト C_1 、および、明部156 - 暗部158 - 明部156に沿ったコントラスト C_2 、である。

40

【0062】

【数10】

$$C_1 = \frac{I_0 - I_1}{I_0 + I_1} = \frac{2B(A + B)}{A^2 + 2B^2 + 2AB} \quad \cdots (20)$$

$$C_2 = \frac{I_0 - I_2}{I_0 + I_2} = \frac{8AB}{2A^2 + 8B^2} \quad \cdots (21)$$

【0063】

50

それぞれのコントラスト C_1 , C_2 が最大になる条件を考える。まず、明部 156 - 暗部 157 - 明部 156 に沿ったコントラスト C_1 の最大値は、暗部 157 の強度が 0 になる条件、すなわち上記式(18)より “ $A = 0$ ” の場合である。このとき、“ $C_1 = 1$ ”となるが、“ $C_2 = 0$ ”となるため、所望の像ができない。一方、明部 156 - 暗部 158 - 明部 156 に沿ったコントラスト C_2 の最大値は、暗部 158 の強度が “0” になる条件、すなわち上記式(19)より、“ $A = 2B$ ” の場合である。このとき、“ $C_1 = 0.6$, $C_2 = 1$ ” である。つまり、コントラスト C_1 の強度は十分ではない。

【0064】

そこで、“ $C_1 = C_2$ ”となる条件を最適条件とすると、これは暗部 157 および暗部 158 の強度が等しい場合であるから、上記式(18), (19)より、“ $A = B$ ” の場合と判明する。このとき、“ $C_1 = C_2 = 0.8$ ”となる。

10

【0065】

以上のことから、結像に用いられる 3 個の回折光 141a, 14ab, 14ac の振幅 A , B , C が等しい場合に、望ましい結像状態が得られることが明らかになった。

【0066】

<マスクバイアスおよび遮光部振幅透過率の最適化>

望ましい結像状態は “ $A = B$ ” のときであるから、上記式(12), (13), (14)より、下記数 11 の式(22)が成立する場合と言い換えることができる。

【0067】

【数 11】

20

$$\gamma + 2(1-\gamma)\epsilon_x\epsilon_y = 2(1-\gamma)\frac{\sin(\epsilon_x\pi)}{\pi}\frac{\sin(\epsilon_y\pi)}{\pi} \quad \cdots (22)$$

【0068】

この式(22)を変形すると、下記数 12 の式(23)となる。

【0069】

【数 12】

30

$$\gamma = \frac{2\pi^2\epsilon_x\epsilon_y - 2\sin(\epsilon_x\pi)\sin(\epsilon_y\pi)}{2\pi^2\epsilon_x\epsilon_y - 1 - 2\sin(\epsilon_x\pi)\sin(\epsilon_y\pi)} \quad \cdots (23)$$

【0070】

つまり、マスクバイアス()とハーフトーン位相シフトマスクの複素振幅透過率()とが上記式(23)で表される所定の関係を満たす場合に、望ましい結像状態となる。

【0071】

ここで、簡単化のため “ $x = y =$ ” とすると、上記式(23)は、下記数 13 の式(24)で表される。

【0072】

【数 13】

40

$$\gamma = \frac{2\pi^2\epsilon^2 - 2\sin^2(\epsilon\pi)}{2\pi^2\epsilon^2 - 1 - 2\sin^2(\epsilon\pi)} \quad \cdots (24)$$

【0073】

図 16 は、マスクバイアス()とハーフトーン位相シフトマスクの複素振幅透過率()との関係を示すものである。“ ” が負であるとは、光透過領域を通過する光に対して、ハーフトーン領域(マスク遮光体)を通過する光の位相が 180 度ずれている状態を表している。この曲線上にあるすべての状態において、回折光強度が等しくなる条件が満たされる。

50

【0074】

図17は、マスクバイアス（マスク上の開口の寸法）と回折光振幅Aとの関係を示すものである。本図から、マスクバイアスが大きく、マスク遮光体の複素振幅透過率が負側に大きい場合に像が明るくなることが分かる。像の明るさは、所望のスループット、レジスト感度、レーザ輝度安定性などに応じて設定する必要があるが、マスクバイアスと複素振幅透過率との組み合わせを適当に選ぶことにより設定できる。

【0075】

上記したように、本実施形態によれば、図1に示したようなアシスト開口21, 22, 23, 24を有するフォトマスクを用いるとともに、図2に示したような発光領域51, 52を有する二重極照明を用いることにより、パターンが微細化されても、図3に示したような、寸法誤差が抑制された高精度のコンタクトホールパターン91, 92を形成することが可能となる。
10

【0076】

したがって、上述したフォトマスクおよび変形照明を半導体装置の製造（ホールパターンの露光）に適用することにより、NAND型フラッシュメモリにおいては、たとえば、NANDセルユニットの選択トランジスタの拡散層に接続される、ピット線コンタクト用のコンタクトホールを高精度に形成できる。

【0077】

なお、上記した第1の実施形態の場合、数5の式(12), (13)で示した回折光振幅は、マスクパターンが無限に薄い膜で構成されているとするモデル、すなわちキルヒ霍フ近似モデルをもとに導出されている。近年、マスクパターンの最小寸法が波長程度か、それ以下の条件では、マスクの厚みの影響でキルヒ霍フ近似モデルが成り立たなくなることが知られてきた。この場合、回折光強度は、数5の式(12), (13)のような簡単な式で表すことができず、マックスウェル方程式を数値的に解くことによって求められる。つまり、3個の回折光の強度が等しくなる条件は、たとえば図18に示すように、マスクの複素振幅透過率およびコンタクトホールパターンの寸法を変化させながら繰り返し計算することによって求められる。
20

【0078】

特に、マスクの厚みの影響を考慮した計算を行う必要がない場合には、ハーフトーン膜(HT)の光学定数をHT透過率に代えて、図18に示した演算を実行すればよい。
30

【0079】

また、上記した実施形態においては、4列のアシスト開口を設けた場合を例に説明したが、これに限らず、たとえば6列、あるいは、それ以上のアシスト開口を設けるようにしてもよい。

【0080】

また、メイン開口およびアシスト開口の形状は正方形に限らず、たとえば、長方形、円形、橢円形などであってもよい。

【0081】

また、変形照明の発光領域の形状も円形に限定されず、橢円形などであってもよい。

【0082】

また、変形照明としては、上記した二重極照明に限らず、たとえば、四重極照明を用いることも可能である。
40

【0083】

図19は、NAND型フラッシュメモリのピット線コンタクト用のコンタクトホール（たとえば、NAND-CB層の2連千鳥配置ホール）の形成に用いて好適な、四重極照明の構成例を示すものである。

【0084】

図19に示すように、変形照明である四重極照明は、発光領域（第1の発光領域）251、発光領域（第2の発光領域）252、発光領域（第3の発光領域）253、および、発光領域（第4の発光領域）254を有している。これらの発光領域251, 252, 2
50

53, 254は、非発光領域261によって囲まれている。

【0085】

発光領域251, 252, 253, 254は、照明の中心270に対して、x方向およびy方向にほぼ対称となる×字方向の各位置（領域）に設けられている。すなわち、発光領域251, 252, 253, 254は互いに同一形状および同一寸法であり、たとえば、照明の中心270と発光領域251が内包する点との距離（）は下記数14の式（25）, (26), (27)によって与えられる。

【0086】

【数14】

$$\sigma_x = \frac{\lambda}{2NAp_x} \quad \cdots (25)$$

$$\sigma_y = \frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{p_y} - \frac{p_y}{p_x^2} \right) \quad \cdots (26)$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{p_y} + \frac{p_y}{p_x^2} \right) \quad \cdots (27)$$

10

【0087】

ただし、NAは投影レンズの開口数、 λ は露光波長、 p_x は開口パターンのワード線方向のピッチ、 p_y は開口パターンのピット線方向のピッチである。

【0088】

因みに、照明の中心270と発光領域251が内包する点との距離（）は、 x , y によって、照明の中心270と発光領域252が内包する点との距離（）は、 x , $-y$ によって、照明の中心270と発光領域253が内包する点との距離（）は、 $-x$, y によって、照明の中心270と発光領域254が内包する点との距離（）は、 $-x$, $-y$ によって、それぞれ与えられる。

【0089】

なお、理想的には、発光領域251の中心と内包する点とが一致し、発光領域252の中心と内包する点とが一致し、発光領域253の中心と内包する点とが一致し、発光領域254の中心と内包する点とが一致していることが望ましい。この場合には、発光領域251, 252, 253, 254は、照明の中心270からの距離（）が互いに等しくなる。

【0090】

すなわち、x方向およびy方向で規定されるそれぞれの方向に発光領域251, 252, 253, 254を有する四重極照明は、フォトマスクからの回折光のうち、3個の回折光が投影レンズ瞳を通過するように照明形状が設定されている。図7に示したマスクパターンの場合、この四重極照明によれば、たとえば図20に示すように、投影レンズ瞳の有効領域242a, 242b, 242c, 242d内にそれぞれ3つの回折光241a, 241b, 241cを位置させることができる。したがって、3つの回折光241a, 241b, 241cが投影レンズを通過して基板上に到達するため、たとえば図15に示したような光の干渉（干渉縞の明部ピーク、暗部ピーク）が生じ、基板上に像を形成することができる。

【0091】

図21は、発光領域251, 252, 253, 254を有する四重極照明による露光マージンを、発光領域51, 52を有する二重極照明（図2参照）による露光マージンと比較して示すものである。なお、図中に示す必要マージンとは、所定のマスクパターンをある露光量、焦点で露光した際に形成されるコンタクトホールパターンが所望の寸法となる

20

30

40

50

場合を基準に、実際に形成されたコンタクトホールパターンの寸法がどれだけずれると、露光量、焦点ずれとして許容できなくなるかの目安である。

【0092】

本図からも明らかなように、二重極照明の場合(図示)も、四重極照明の場合(図示)とほぼ同等の露光マージン(露光量変動マージン(EL)および焦点深度(DOF))が得られる。

【0093】

その結果、図1のフォトマスクを用いた場合には、たとえば図22に示すように、フォトレジスト90にコンタクトホールパターン91, 92が形成される。

【0094】

また、四重極照明の採用により、フォトレジスト90に、コンタクトホールパターン91, 92のような周期性を有する密集ホールパターンとは別に、たとえばランダムに配置された孤立のコンタクトホールパターン190の形成が可能となる。

【0095】

発光領域251, 252, 253, 254を有する四重極照明の場合、90度回転させたときの対称性が、発光領域51, 52を有する二重極照明の場合よりも優れる。そのため、たとえば図23(a)に示すように、フォトマスクの開口222を少しだけ横長に補正することにより、たとえば図23(b)に示すように、孤立のコンタクトホールパターン190を良好な円形状に形成できる。なお、221は、フォトマスクの遮光領域である。

【0096】

したがって、NAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホールを形成する場合において、孤立したコンタクトホールを形成するための開口パターンを含むフォトマスクを用いることにより、ビット線コンタクト用のコンタクトホールのみならず、たとえば、ビット線コンタクト用のコンタクトホールとは周期が異なる、周辺回路用の孤立したコンタクトホールを同時に形成することが可能となる。

【0097】

さらに、照明としては、上記した二重極照明および四重極照明に限らず、たとえば図24に示すように、発光領域(第5, 第6の発光領域)51, 52と発光領域(第1ないし第4の発光領域)251, 252, 253, 254とを有する六重極照明を用いることも可能である。これらの発光領域51, 52, 251, 252, 253, 254は、互いに同一形状および同一寸法であり、非発光領域261によって囲まれている。

【0098】

発光領域51, 52, 251, 252, 253, 254は、照明の中心に対して、互いにy方向に対象となる位置と、x方向およびy方向にほぼ対称となる×字方向の各位置(領域)と、に設けられている。たとえば、照明の中心と発光領域251が内包する点との距離()は下記数15の式(28), (29)によって、照明の中心と発光領域51が内包する点との距離()は下記数15の式(30)によって、それぞれ与えられる。

【0099】

10

20

30

【数15】

$$\sigma_x = \frac{\lambda}{2NAp_x} \quad \cdots (28)$$

$$\sigma_y = \frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{p_y} - \frac{p_y}{p_x^2} \right) \quad \cdots (29)$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{4NA} \left(\frac{1}{p_y} + \frac{p_y}{p_x^2} \right) \quad \cdots (30)$$

10

【0100】

ただし、NAは投影レンズの開口数、 λ は露光波長、 p_x は開口パターンのワード線方向のピッチ、 p_y は開口パターンのビット線方向のピッチである。

【0101】

因みに、照明の中心と発光領域251が内包する点との距離()は、 x , y によって、照明の中心と発光領域252が内包する点との距離()は、 x , $-y$ によって、照明の中心と発光領域253が内包する点との距離()は、 $-x$, y によって、照明の中心と発光領域254が内包する点との距離()は、 $-x$, $-y$ によって、照明の中心と発光領域51が内包する点との距離()は、 y によって、照明の中心と発光領域52が内包する点との距離()は、 $-y$ によって、それぞれ与えられる。

20

【0102】

なお、理想的には、発光領域51の中心と内包する点とが一致し、発光領域52の中心と内包する点とが一致し、発光領域251の中心と内包する点とが一致し、発光領域252の中心と内包する点とが一致し、発光領域253の中心と内包する点とが一致し、発光領域254の中心と内包する点とが一致していることが望ましい。この場合には、発光領域51, 52, 251, 252, 253, 254は、照明の中心からの距離()が互いに等しくなる。

【0103】

30

すなわち、発光領域51, 52, 251, 252, 253, 254を有する六重極照明は、フォトマスクからの回折光のうち、3個の回折光が投影レンズ瞳を通過するように照明形状が設定されている。図7に示したマスクパターンの場合、この六重極照明によれば、たとえば図25に示すように、投影レンズ瞳の有効領域242a, 242b, 242c, 242d, 242e, 242f内にそれぞれ3つの回折光241a, 241b, 241cを位置させることができる。したがって、3つの回折光241a, 241b, 241cが投影レンズを通過して基板上に到達するため、たとえば図15に示したような光の干渉が生じ、基板上に像を形成することができる。つまり、四重極照明の場合と同様に、NAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホールを形成する場合においては、孤立したコンタクトホールを形成するための開口パターンを含むフォトマスクを用いることにより、ビット線コンタクト用のコンタクトホールのみならず、たとえば、ビット線コンタクト用のコンタクトホールとは周期が異なる、周辺回路用の孤立したコンタクトホールを同時に形成することが可能となる。

40

【0104】

[第2の実施形態]

図26は、本発明の第2の実施形態にしたがった、フォトマスクの一例を示すものである。なお、本実施形態では、NAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホール(いわゆる、密集ホールパターンであって、ホールが直交格子状配列でない微細パターン、たとえばNAND-CB層の3連千鳥配置ホール)を形成する場合を例に説明する。

50

【0105】

すなわち、本実施形態の場合、たとえば図27に示すように、NAND型フラッシュメモリにおいて、ハーフピッチ(HPnm)幅のビット線BLにそれぞれ接続されるビット線コンタクト用のコンタクトホールCBが、位置をずらしながら3列に配置(3連千鳥配置)される。この場合、6HPnm離れたビット線BLには、それぞれ同じ位置に、コンタクトホールCBが配置される。これにより、ビット線BLの細線化およびビット線BL間の狭ピッチ化が図られたNAND型フラッシュメモリにおいて、ビット線コンタクト用のコンタクトホールCBを高精度に配置(形成)することが可能となる。

【0106】

図26において、フォトマスクは、メイン開口(第1のメイン開口)311、メイン開口(第2のメイン開口)312、メイン開口(第3のメイン開口)313、アシスト開口(第1のアシスト開口)321、アシスト開口(第2のアシスト開口)322、アシスト開口(第3のアシスト開口)323、アシスト開口(第4のアシスト開口)324、アシスト開口(第5のアシスト開口)325、および、アシスト開口(第6のアシスト開口)326を、それぞれ複数個ずつ有している。これらの開口311, 312, 313, 321, 322, 323, 324, 325, 326は、遮光領域(非透明領域)331によって囲まれている。遮光領域331は、たとえばクロム膜が形成された遮光領域、あるいは、たとえばモリブデンシリサイド膜が形成された半透明のハーフトーン位相シフト領域である。

【0107】

メイン開口311, 312, 313は互いに同一形状および同一寸法であり、アシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326は互いに同一形状および同一寸法である。また、アシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326は、メイン開口311, 312, 313よりも小さい。

【0108】

メイン開口311, 312, 313は、ビット線コンタクト用のコンタクトホールパターンに対応した開口パターン(転写パターン)であり、露光工程および現像工程の後、メイン開口311, 312, 313に対応したパターンがフォトレジストに形成される。アシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326は補助的なパターン(非解像のアシストパターン)であり、露光工程および現像工程を経ても、アシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326に対応したパターンはフォトレジストには形成されない。

【0109】

メイン開口311は、ビット線方向(第2の方向)に延びた直線(第1の直線)341上に、ピッチPx(第2の間隔)で複数配置されている。すなわち、各メイン開口311の中心が直線341上に位置している。メイン開口311に隣接するメイン開口312は、ビット線方向に延びた直線(第2の直線)342上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各メイン開口312の中心が直線342上に位置している。メイン開口312に隣接するメイン開口313は、ビット線方向に延びた直線(第3の直線)343上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各メイン開口313の中心が直線343上に位置している。

【0110】

直線341と直線342と直線343とは互いに平行であり、直線341と直線342と直線343との距離(第1の方向(ワード線方向)の第1の距離(第1の間隔))はPyである。また、メイン開口311とメイン開口312とメイン開口313とは、ビット線方向に互いにPx/3(2HPnm)だけずれて配置されている。

【0111】

メイン開口311に隣接するアシスト開口321は、ビット線方向に延びた直線(第4の直線)344上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各アシスト開口321の中心が直線344上に位置している。メイン開口313に隣接するアシスト開口32

10

20

30

40

50

2は、ピット線方向に延びた直線（第5の直線）345上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各アシスト開口322の中心が直線345上に位置している。アシスト開口321に隣接するアシスト開口323は、ピット線方向に延びた直線（第6の直線）346上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各アシスト開口323の中心が直線346上に位置している。アシスト開口322に隣接するアシスト開口324は、ピット線方向に延びた直線（第7の直線）347上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各アシスト開口324の中心が直線347上に位置している。アシスト開口323に隣接するアシスト開口325は、ピット線方向に延びた直線（第8の直線）348上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各アシスト開口325の中心が直線348上に位置している。アシスト開口324に隣接するアシスト開口326は、ピット線方向に延びた直線（第9の直線）349上に、ピッチPxで複数配置されている。すなわち、各アシスト開口326の中心が直線349上に位置している。
10

【0112】

直線341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348および349は互いに平行である。直線341と直線344との距離（第1の間隔）はPyであり、直線343と直線345との距離もPyである。また、直線344と直線346との距離はPyであり、直線345と直線347との距離もPyである。また、直線346と直線348との距離はPyであり、直線347と直線349との距離もPyである。

【0113】

なお、ピット線方向において、アシスト開口322, 325はメイン開口311と同一ピッチ（Px）で配置されている。また、アシスト開口323, 324はメイン開口312と同一ピッチ（Px）で配置されている。また、アシスト開口321, 326はメイン開口313と同一ピッチ（Px）で配置されている。つまり、アシスト開口321, 326とアシスト開口323, 324とアシスト開口322, 325とは、それぞれ、ピット線方向にPx/3ずつずれて配置されている。
20

【0114】

以上の説明から分かるように、アシスト開口325、アシスト開口323、アシスト開口321、メイン開口311、メイン開口312、メイン開口313、アシスト開口322、アシスト開口324、および、アシスト開口326は、斜め方向に同一ピッチで配置されている。すなわち、図26に示したフォトマスクは、アシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326を付加することで、斜め方向の周期性を高めるようにしている。
30

【0115】

ここで、投影レンズの開口数をNA、露光波長をλとし、開口パターンのワード線方向のピッチPyおよびピット線方向のピッチPxが、下記数16の式（31）の関係を満たすとすると、たとえば、NA = 1.3, λ = 193 nm, Px = 110 nm, Py = 110 nmのような場合が考えられる。

【0116】

【数16】

$$\sqrt{\left(\frac{Px}{3}\right)^2 + P_y^2} < \frac{\lambda}{NA} \quad \cdots (31) \quad 40$$

【0117】

このような条件（波長λおよび開口数NA）によって微細なホールパターンを形成しようとする場合、従来のような一般的な照明（垂直照明光）を用いると、基板上に形成される像のコントラストが不十分となり、露光量またはフォーカスの誤差に対する条件としては脆弱となる。そのため、必要とするホールパターンを形成することができない。また、フォトマスク上の開口パターンの大きさを、基板上のホールパターンの目標寸法を投影レンズの倍率で割った数値とするとき、開口パターンのピッチPx, Pyが大きい場合には
50

問題ない。しかし、ピッチ P_x , P_y が小さい場合には、開口パターンの大きさが問題となる。

【0118】

本実施形態は、ホールパターンの露光に使用される光リソグラフィ技術において、開口パターンの最小パターンピッチが $/NA$ となる条件での露光に適した、微細なホールパターン（密集ホールパターンであって、ホールが直交格子状配列でない微細パターン）の形成を可能にする。

【0119】

図28は、本実施形態における、照明の構成例を示すものである。本実施形態の場合、照明としては、変形照明である変形二重極照明が用いられる。

10

【0120】

図28に示すように、変形二重極照明は、発光領域（第1の発光領域）451および発光領域（第2の発光領域）452を有している。これらの発光領域451, 452は、非発光領域461によって囲まれている。

【0121】

発光領域451と発光領域452とは、照明の中心470に対して、 x 方向および y 方向により規定される対称の位置に設けられている。すなわち、発光領域451と発光領域452とは互いに同一形状および同一寸法であり、発光領域451の中心と発光領域452の中心とが照明の中心470に対して互いに対称な位置にある。この場合、照明の中心470と発光領域451の中心との距離（）および照明の中心470と発光領域452の中心との距離は互いに等しい。理想的には、発光領域451の中心と内包する点とが一致し、発光領域452の中心と内包する点とが一致していることが望ましい。

20

【0122】

なお、照明光の波長を λ 、照明光が通過する投影レンズの開口数を NA とすると、照明の中心470と内包する点との距離 σ は、下記数17の式（32）, (33) によって与えられる。

【0123】

【数17】

$$\sigma_x = \frac{\lambda}{18NA} \left(\frac{9}{P_x} + \frac{2P_x}{P_y^2} \right) \quad \cdots (32)$$

30

$$\sigma_y = -\frac{\lambda}{6P_y NA} \quad \cdots (33)$$

【0124】

上述した変形照明からの斜め照明光を、上述したフォトマスク（図26参照）を介して、フォトトレジストに照射することで、そのフォトトレジスト上に寸法誤差が抑制された高精度のコンタクトホールパターンを形成することができる。

【0125】

40

図29は、露光および現像工程後のフォトトレジストに形成されたコンタクトホールパターンの一例を示すものである。

【0126】

図29に示すように、フォトトレジスト490にコンタクトホールパターン491, 492, 493が形成される。すなわち、図26に示したメイン開口311, 312, 313に対応したパターンが、コンタクトホールパターン491, 492, 493として、フォトトレジスト490に形成される。また、図26に示したアシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326に対応したパターンは、フォトトレジスト490には形成されない。

【0127】

50

以下に、上述したフォトマスク(図26参照)および変形照明(図28参照)を用いた露光方法により、寸法誤差が抑制された高精度のコンタクトホールパターンを形成できる理由について説明する。

【0128】

パターン間隔が基板上の寸法で $/NA$ よりも小さい場合、小 照明のような垂直照明光を用いると、回折角が大きいため、0次回折光以外の回折光は基板に到達しない。そのため、たとえば図5に示したように、光の干渉が起きず、像が形成されない。変形二重極照明のような斜め照明光を用いた場合には、たとえば図6に示したように、0次回折光と1次回折光との干渉により、像を形成することが可能である。

【0129】

斜め照明光を用いた場合、周期パターンの方が孤立パターンよりも焦点深度が大きくなる。そこで、本実施形態では、図26に示したようなアシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326を付加し、パターン全体に周期性を持たせている。すなわち、図26に示したメイン開口311, 312, 313は斜め方向に配置されているため、アシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326を付加することで、斜め方向の周期性を高めるようにしている。

【0130】

次に、図28に示した変形二重極照明が望ましい理由について説明する。なお、以下では、説明の簡単化のため、図26に示したフォトマスクに代えて、図30に示すマスクパターン(フォトマスク)を用いた場合を想定して説明する。

【0131】

図26に示したフォトマスクは、回折格子としては、図30に示したマスクパターンと同じ方向に回折光を発生することができる。図30において、521は遮光領域、522は開口を示している。

【0132】

図30に示したマスクパターンに、図8に示したような照明(小 照明)からの垂直照明光を照射した場合を考える。すなわち、図8の照明では、照明の中心部に発光領域131が設けられている。この場合、投影レンズ瞳に相当する面での回折光は、図31に示すような分布を示す。図31の座標系は、投影レンズの開口数NAで規格化した座標系である。つまり、図31は、図30に示したマスクパターンをフーリエ変換したときの、投影レンズ瞳面における回折光の分布を示すものである。

【0133】

図31において、541gは0次回折光、541fは1次回折光である。また、図30における、開口522のx方向のピッチがPxであり、開口522のy方向のピッチがPyである。また、図31の、542は投影レンズ瞳の有効領域(単位円)であり、有効領域542内の回折光のみが基板上に到達する。よって、図31の場合には、1つの回折光(0次回折光)541gしか基板上に到達しないため、光の干渉が起こらず、基板上には像が形成されない。

【0134】

図30に示したマスクパターンに、図10に示したような変形照明(斜め照明)からの斜め照明光を照射した場合を考える。斜め照明光の位置(発光領域132)をx軸方向、y軸方向に適当にシフト(シフト量x, y)させることにより、たとえば図32に示すように、投影レンズ瞳の有効領域542内に3つの回折光541a, 541b, 541cを位置させることができる。したがって、3つの回折光541a, 541b, 541cが投影レンズを通過して基板上に到達するため、光の干渉が生じ、基板上に像を形成することができる。

【0135】

図33は、図32に示した3つの回折光541a, 541b, 541cの干渉により、図30の開口522に対応した像が基板上に形成される場合を例に示すものである。

【0136】

10

20

30

40

50

図33に示すように、回折光541a(A)および回折光541b(B)の干渉により、基板上に1次元状の干渉縞551が生成される。同様に、回折光541b(B)および回折光541c(C)の干渉により、基板上に干渉縞552が生成され、回折光541c(C)および回折光541a(A)の干渉により、基板上に干渉縞553が生成される。なお、実線は干渉縞の明部ピーク、破線は干渉縞の暗部ピークを示している。3つの干渉縞551, 552, 553の明部555が重なった部分で、光強度が特に高くなる。したがって、ポジ型フォトレジストを用いた場合には、上記明部555が重なった部分に対応する位置にコンタクトホールパターンが形成されることになる。

【0137】

よって、図26に示したようなフォトマスクを用いた場合には、メイン開口311, 312, 313およびアシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326のサイズに応じた像強度で基板上に像を形成することで、メイン開口311, 312, 313に対応したコンタクトホールパターン491, 492, 493のみをフォトレジスト490に形成することができる(図29参照)。

【0138】

ここで、投影レンズ瞳における回折光の位置と強度との関係について説明する。

【0139】

図32において、回折光541aはマスクを直進する光、すなわち0次回折光である。回折光541b, 541c, 541fは、1次回折光である。通常使われるバイナリマスクもしくはハーフトーン位相シフトマスクにおいては、回折光541b, 541c, 541fの光の振幅および位相は共通となる。マスクパターンが、バイナリマスクもしくはハーフトーン位相シフトマスクによって形成されている場合、マスク遮光体(遮光領域)の複素振幅透過率を(負の場合は位相シフトマスク、0の場合はバイナリマスク)とすると、投影レンズ瞳における回折光541aの振幅(強度)A、および、回折光541b, 541c, 541fの振幅B, C, Dは、下記数18の式(34), (35), (36), (37)で表される。

【0140】

【数18】

$$A = 3\{\gamma + (1 - \gamma)\varepsilon_x \varepsilon_y\} \quad \cdots (34)$$

10

20

30

$$B = \frac{9(1 - \gamma)}{\pi^2} \sin(\pi \varepsilon_x) \sin\left(\frac{\pi \varepsilon_y}{3}\right) \quad \cdots (35)$$

$$C = \frac{9(1 - \gamma)}{2\pi^2} \sin(\pi \varepsilon_x) \sin\left(\frac{2}{3}\pi \varepsilon_y\right) \quad \cdots (36)$$

$$D = \frac{3(1 - \gamma)}{\pi} \varepsilon_x \sin(\pi \varepsilon_y) \quad \cdots (37)$$

40

ただし、 $\varepsilon_x = w_x / p_x$, $\varepsilon_y = w_y / p_y$ であり p_x, p_y, w_x, w_y はそれぞれ

図30に示されるマスクの寸法である。

【0141】

<照明位置の最適化>

変形二重極照明のシフト量は、上記式(32), (33)を満たすように、照明の中心470に対して、 x , y だけシフトする。

【0142】

この場合、図34に示すように、3個の回折光541a, 541b, 541cの瞳中心からの距離 r_1, r_2, r_3 が等しくなる。その結果、後に計算する基板上の干渉縞に

50

おいて、デフォーカス依存性がなくなる。すなわち、焦点深度が十分に大きくなる。

【0143】

<干渉波振幅の最適化>

3個の回折光541a, 541b, 541cにより基板上に形成される干渉波の強度分布I(x, y, z)は、下記数19の式(38)によって表される。

【0144】

【数19】

$$I(x, y, z) = |A \exp(-ik_a \cdot \mathbf{x}) + B \exp(-ik_b \cdot \mathbf{x}) + C \exp(-ik_c \cdot \mathbf{x})|^2 \quad \cdots (38)$$

10

【0145】

ただし、A, B, Cは図32に示した3個の回折光541a, 541b, 541cの振幅、xは基板上の位置ベクトルであり、k_a, k_b, k_cはそれぞれ図35に示す波数ベクトルである。この波数ベクトルk_a, k_b, k_cは、下記数20の式(39), (40), (41)で表される。

【0146】

【数20】

$$\mathbf{k}_a = (s_x, s_y, k_z) \quad \cdots (39)$$

20

$$\mathbf{k}_b = \left(s_x - \frac{2\pi}{P_x}, s_y - \frac{2\pi}{3P_y}, k_z \right) \quad \cdots (40)$$

$$\mathbf{k}_c = \left(s_x - \frac{2\pi}{P_x}, s_y + \frac{2\pi}{3P_y}, k_z \right) \quad \cdots (41)$$

【0147】

ただし、s_x, s_yは変形二重極照明のシフト量(x, y)を表す量であり、この値が上記式(32), (33)を満たすとき、3個の回折光541a, 541b, 541cは基板に対して同じ角度で入射する。そのため、k_zは、波数ベクトルk_a, k_b, k_cの共通z成分となる。

30

【0148】

式(39), (40), (41)を上記式(38)に代入して展開すると、下記数21の式(42)が得られる。

【0149】

【数21】

$$I(x, y, z) = A^2 + B^2 + C^2 + 2AB\cos(\mathbf{k}_a \cdot \mathbf{x} - \mathbf{k}_b \cdot \mathbf{x}) + 2BC\cos(\mathbf{k}_b \cdot \mathbf{x} - \mathbf{k}_c \cdot \mathbf{x})$$

40

$$+ 2CA\cos(\mathbf{k}_c \cdot \mathbf{x} - \mathbf{k}_a \cdot \mathbf{x})$$

$$= A^2 + B^2 + C^2 + 2AB\cos\left(\frac{2\pi}{P_x}x + \frac{2\pi}{3P_y}y\right)$$

… (42)

$$+ 2BC\cos\left(-\frac{2\pi}{P_y}y\right) + 2CA\cos\left(-\frac{2\pi}{P_x}x + \frac{4\pi}{3P_y}y\right)$$

【0150】

ただし、上記式(42)の右辺第1項は一律成分、第2項および第3項はそれぞれ回折光541aと回折光541bとの干渉および回折光541aと回折光541cとの干渉に

50

より生成される干渉波である。第4項は回折光541bと回折光541cとの干渉により生成される干渉波である。

【0151】

ここで、上記式(35)の条件を満たすように照明を与えていため、上記式(42)には、 z に依存する成分が現れない。このことは、干渉縞がベストフォーカス近傍ではデフォーカスの影響を受けないことを示している。つまり、上記式(32), (33)によって与えられるシフト量が、照明領域を配置する最適な位置であるといえる。

【0152】

干渉波のコントラストを考えるために、図33に示す明部555および3種類の暗部556(暗部1), 557(暗部2), 558(暗部3)の光強度について説明する。明部555および3種類の暗部556, 557, 558の光強度は、図36に示すように、それぞれ明部555の座標を原点に取ると、下記数22の式(43), (44), (45), (46)により与えられる。

【0153】

【数22】

$$\text{明部(555)の強度: } I(0, 0) = A^2 + B^2 + C^2 + 2AB + 2BC + 2CA \quad \cdots (43)$$

$$\text{暗部(556)の強度: } I\left(\frac{P_x}{2}, 0\right) = A^2 + B^2 + C^2 - 2AB + 2BC - 2CA \quad \cdots (44)$$

$$\text{暗部(557)の強度: } I\left(\frac{P_x}{3}, \frac{P_y}{2}\right) = A^2 + B^2 + C^2 - 2AB - 2BC + 2CA \quad \cdots (45)$$

$$\text{暗部(558)の強度: } I\left(-\frac{P_x}{6}, \frac{P_y}{2}\right) = A^2 + B^2 + C^2 + 2AB - 2BC - 2CA \quad \cdots (46)$$

【0154】

図33の場合には、下記数23の式(47), (48), (49)に示すように、3種類のコントラスト C_1 , C_2 , C_3 が定義できる。

【0155】

【数23】

$$C_1 = \frac{2AB + 2CA}{A^2 + B^2 + C^2 + 2BC} \quad \cdots (47)$$

$$C_2 = \frac{2AB + 2BC}{A^2 + B^2 + C^2 + 2CA} \quad \cdots (48)$$

$$C_3 = \frac{2BC + 2CA}{A^2 + B^2 + C^2 + 2AB} \quad \cdots (49)$$

【0156】

それぞれのコントラスト C_1 , C_2 , C_3 が最大になる条件を考える。つまり、コントラスト C_1 , C_2 , C_3 のうち、最小値が最も大きくなる条件が、3個の回折光541a, 541b, 541cの振幅 A , B , C の最適値であるといえる。

【0157】

ここで、 $B = pA$, $C = qA$ とおくと、上記式(47), (48), (49)は、下記数24の式(50), (51), (52)のようになる。

【0158】

【数24】

$$C_1 = \frac{2p + 2q}{1 + p^2 + q^2 + 2pq} \quad \cdots (50)$$

$$C_2 = \frac{2p + 2pq}{1 + p^2 + q^2 + 2q} \quad \cdots (51)$$

$$C_3 = \frac{2pq + 2q}{1 + p^2 + q^2 + 2p} \quad \cdots (52)$$

【0159】

10

図37は、コントラスト C_1 , C_2 , C_3 の最小値と p , q との関係を示すものである。本図より、 $p = 1$, $q = 1$ のとき、コントラスト C_1 , C_2 , C_3 の最小値が最も大きくなることが分かる。このとき、“ $A = B = C$ ”となり、高いコントラスト ($C_1 = C_2 = C_3 = 0.8$) を得ることができる。

【0160】

以上のことから、図34のような回折光のとり方をした場合には、結像に用いられる3個の回折光 541a , 541b , 541c の振幅 A , B , C が等しい場合に、望ましい結像状態が得られることが明らかになった。

【0161】

<マスクバイアスおよび遮光部振幅透過率の最適化>

20

望ましい結像状態は“ $A = B = C = D$ ”のときである。そこで、“ $B = C$ ”の場合について考えてみる。上記式(35) , (36)より、下記数25の式(53)が求められる。

【0162】

【数25】

$$\frac{9(1-\gamma)}{\pi^2} \sin(\pi \varepsilon_x) \sin\left(\frac{\pi \varepsilon_y}{3}\right) = \frac{9(1-\gamma)}{2\pi^2} \sin(\pi \varepsilon_x) \sin\left(\frac{2}{3}\pi \varepsilon_y\right) \quad \cdots (53)$$

【0163】

30

この式(53)を展開していくと、下記数26の式(54)が得られる。

【0164】

【数26】

$$\cos(\pi \varepsilon_y') = 1 \quad \cdots (54)$$

【0165】

しかしながら、上記式(54)は、下記数27の式(55)であることが明らかである。

【0166】

40

【数27】

$$\cos(\pi \varepsilon_y') \neq 1 \quad \cdots (55)$$

【0167】

すなわち、“ $B = C$ ”になることはありえない状態であるといえる。したがって、“ $A = B = C = D$ ”を成立させることは不可能である。

【0168】

そこで、“ $A = B = C = D$ ”に最も近い状態を与えるために、下記数28の式(56)により与えられる（デルタ）を最小化することが最適な状態であると定義する。

50

【0169】

【数28】

$$\Delta = \left| \frac{\max(A, B, C, D) - \min(A, B, C, D)}{A + B + C + D} \right| \quad \cdots (56)$$

【0170】

図38は、マスクバイアス = x = yとした際の、ととの関係を示すものである。本図より、(ハーフトーン位相シフトマスクの複素振幅透過率)の絶対値が大きくなるにつれて、を最小とするは大きくなることが分かる。

10

【0171】

図39は、と回折光541aの振幅Aとの関係を示すものである。本図より、が大きくなるにつれて、像が明るくなることが分かる。像の明るさは、所望のスループット、レジスト感度、レーザ輝度安定性などに応じて設定する必要があるが、マスクバイアスと複素振幅透過率との組み合わせを適当に選ぶことにより設定できる。

10

【0172】

上記したように、本実施形態によれば、図26に示したようなアシスト開口321, 322, 323, 324, 325, 326を有するフォトマスクを用いるとともに、図28に示したような発光領域451, 452を有する変形二重極照明を用いることにより、パターンが微細化(たとえば、最小パターンピッチが/NA以下)されても、図29に示したような、寸法誤差が抑制された高精度のコンタクトホールパターン491, 492, 493を形成することが可能となる。

20

【0173】

したがって、上述したフォトマスクおよび変形照明を半導体装置の製造(ホールパターンの露光)に適用することにより、NAND型フラッシュメモリにおいては、たとえば図27に示したように、ビット線BLに接続される、ビット線コンタクト用のコンタクトホールCBを高精度に形成できる。

【0174】

なお、上記した第2の実施形態の場合も、式(34), (35), (36), (37)で示した回折光振幅は、マスクパターンが無限に薄い膜で構成されているとするキルヒホフ近似モデルをもとに導出されているが、キルヒホフ近似モデルが成り立たない場合には、たとえば図18に示したように、マスクの複素振幅透過率およびコンタクトホールパターンの寸法を変化させながら繰り返し計算することによって求められる。

30

【0175】

特に、マスクの厚みの影響を考慮した計算を行う必要がない場合には、ハーフトーン膜(HT)の光学定数をHT透過率に代えて、図18に示した演算を実行すればよい。

【0176】

また、上記した実施形態においては、6列のアシスト開口を設けた場合を例に説明したが、これに限らず、たとえば8列、あるいは、それ以上のアシスト開口を設けるようにしてもよい。

40

【0177】

また、メイン開口およびアシスト開口の形状は正方形に限らず、たとえば、長方形、円形、橢円形などであってもよい。

【0178】

また、変形照明の発光領域の形状も円形に限定されず、橢円形などであってもよい。

【0179】

また、変形照明としては、上記した変形二重極照明に限らず、たとえば、変形四重極照明を用いることも可能である。

【0180】

図40は、NAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホール(

50

たとえば、NAND-CB層の3連千鳥配置ホールの形成に用いて好適な、変形四重極照明の構成例を示すものである。

【0181】

図40に示すように、変形四重極照明は、発光領域（第1の発光領域）651、発光領域（第2の発光領域）652、発光領域（第3の発光領域）653、および、発光領域（第4の発光領域）654を有している。これらの発光領域651, 652, 653, 654は、非発光領域661によって囲まれている。

【0182】

発光領域651と発光領域654および発光領域652と発光領域653とは、照明の中心670に対して、それぞれ、 x 方向および y 方向により規定される対称の位置に設けられている。発光領域651の中心と発光領域654の中心とが照明の中心670に対して互いに対称な位置にあり、発光領域652の中心と発光領域653の中心とが照明の中心670に対して互いに対称な位置にある。

【0183】

因みに、照明の中心670と発光領域651が内包する点との距離（ ）は、 x ,
 y によって、照明の中心670と発光領域652が内包する点との距離（ ）は、 x ,
 y によって、照明の中心670と発光領域653が内包する点との距離（ ）は、 x ,
 y によって、照明の中心670と発光領域654が内包する点との距離（ ）は、
 x , y によって、それと与えられる。

【0184】

理想的には、発光領域651の中心と内包する点とが一致し、発光領域652の中心と内包する点とが一致し、発光領域653の中心と内包する点とが一致し、発光領域654の中心と内包する点とが一致していることが望ましい。この場合には、発光領域651, 652, 653, 654は、照明の中心670からの距離（ ）が互いに等しくなる。

【0185】

なお、照明光の波長を λ 、照明光が通過する投影レンズの開口数をNAとすると、照明の中心670と発光領域651が内包する点との距離（ ）は下記数29の式(57), (58)によって与えられる。ただし、 P_x は開口パターンのビット線方向のピッチ、 P_y は開口パターンのワード線方向のピッチである。

【0186】

【数29】

$$\sigma_x = \frac{\lambda}{18NA} \left(\frac{9}{P_x} - \frac{2P_x}{P_y^2} \right) \quad \cdots (57)$$

$$\sigma_y = \frac{\lambda}{2P_y NA} \quad \cdots (58)$$

【0187】

この場合、3個の回折光541a, 541b, 541cは、図41に示すような状態を取りえる。

【0188】

また、図40において、たとえば、照明の中心670と発光領域652が内包する点との距離（ ）は下記数30の式(59), (60)によって与えられる。

【0189】

10

20

30

40

【数30】

$$\sigma_x = \frac{\lambda}{18NA} \left(\frac{9}{P_x} - \frac{2P_x}{P_y^2} \right) \quad \cdots (59)$$

$$\sigma_y = -\frac{\lambda}{2P_y NA} \quad \cdots (60)$$

【0190】

この場合、3個の回折光541a, 541b, 541cは、図42に示すような状態を 10 取りえる。

【0191】

上記したように、x方向およびy方向で規定されるそれぞれの方向に発光領域651, 652, 653, 654を有する変形四重極照明は、フォトマスクからの回折光のうち、3個の回折光541a, 541b, 541cが投影レンズ瞳を通過するように照明形状が設定されている。したがって、3つの回折光541a, 541b, 541cが投影レンズを通過して基板上に到達するため、たとえば図33に示したような光の干渉（干渉縞の明部ピーク、暗部ピーク）が生じ、基板上に像を形成することができる。その結果、図26のフォトマスクを用いた場合には、たとえば図29に示したように、フォトレジスト490にコンタクトホールパターン491, 492, 493が形成される。 20

【0192】

また、変形四重極照明の採用により、フォトレジスト490に、コンタクトホールパターン491, 492, 493のような周期性を有する密集ホールパターンとは別に、たとえばランダムに配置された孤立のコンタクトホールパターン（図示していない）の形成が可能となる。

【0193】

さらに、変形照明としては、上記した変形二重極照明および変形四重極照明に限らず、たとえば図43に示すように、発光領域（第5, 第6の発光領域）451, 452と発光領域（第1ないし第4の発光領域）651, 652, 653, 654とを有する変形六重極照明を用いることも可能である。これらの発光領域451, 452, 651, 652, 653, 654は、互いに同一形状および同一寸法であり、非発光領域661によって囲まれている。 30

【0194】

たとえば、照明の中心670と発光領域451, 452がそれぞれ内包する点との距離（ ）は、上記式（32）, （33）によって与えられる。また、照明の中心670と発光領域651, 654がそれぞれ内包する点との距離（ ）は、上記式（57）, （58）によって与えられる。また、照明の中心670と発光領域652, 653がそれぞれ内包する点との距離（ ）は、上記式（59）, （60）によって与えられる。

【0195】

上記したように、発光領域451, 452, 651, 652, 653, 654を有する変形六重極照明は、フォトマスクからの回折光のうち、3個の回折光541a, 541b, 541cが投影レンズ瞳を通過するように照明形状が設定されている。したがって、3つの回折光541a, 541b, 541cが投影レンズを通過して基板上に到達するため、たとえば図33に示したような光の干渉が生じ、基板上に像を形成することができる。つまり、変形四重極照明の場合と同様に、NAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホールを形成する場合においては、孤立したコンタクトホールを形成するための開口パターンを含むフォトマスクを用いることにより、ビット線コンタクト用のコンタクトホールのみならず、たとえば、ビット線コンタクト用のコンタクトホールとは周期が異なる、周辺回路用の孤立したコンタクトホールを同時に形成することが可能となる。 40 50

【0196】

なお、上記した第1、第2の実施形態においては、いずれもNAND型フラッシュメモリのビット線コンタクト用のコンタクトホールを形成する場合を例に説明したが、これに限定されるものではない。たとえば、各種の半導体装置において、配線用のパターン溝を形成する場合にも適用できる。

【0197】

その他、本願発明は、上記(各)実施形態に限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で種々に変形することが可能である。さらに、上記(各)実施形態には種々の段階の発明が含まれており、開示される複数の構成要件における適宜な組み合わせにより種々の発明が抽出され得る。たとえば、(各)実施形態に示される全構成要件からいくつかの構成要件が削除されても、発明が解決しようとする課題の欄で述べた課題(の少なくとも1つ)が解決でき、発明の効果の欄で述べられている効果(の少なくとも1つ)が得られる場合には、その構成要件が削除された構成が発明として抽出され得る。

10

【図面の簡単な説明】

【0198】

【図1】本発明の第1の実施形態にしたがった、フォトマスクの一例を示す平面図である。

【図2】第1の実施形態にしたがった、二重極照明の構成例を示す図である。

【図3】第1の実施形態にしたがった、フォトレジストに形成されたコンタクトホールパターンの一例を示す平面図である。

20

【図4】照明の座標系について説明するために示す図である。

【図5】垂直照明光を用い、像が形成されない場合について説明するために示す図である。

【図6】斜め照明光を用い、像が形成される場合について説明するために示す図である。

【図7】二重極照明が望ましい理由について説明するために示す、マスクパターンの平面図である。

【図8】二重極照明が望ましい理由について説明するために、垂直照明光を照射する小照明の構成例を示す図である。

【図9】二重極照明が望ましい理由について説明するために、垂直照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の分布を示す図である。

30

【図10】二重極照明が望ましい理由について説明するために、斜め照明光を照射する斜め照明の構成例を示す図である。

【図11】二重極照明が望ましい理由について説明するために、斜め照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の分布を示す図である。

【図12】二重極照明が望ましい理由について説明するために、3つの回折光の干渉により、基板上に像が形成される場合を例に示す図である。

【図13】二重極照明が望ましい理由について説明するために、図7のマスクパターンを用いてフォトレジストにコンタクトホールパターンを形成した場合を例に示す図である。

【図14】二重極照明が望ましい理由について説明するために、投影レンズ瞳における回折光の位置と強度との関係を説明するために示す図である。

40

【図15】干渉波振幅の最適化について説明するために示す図である。

【図16】マスクバイアスとハーフトーン位相シフトマスクの複素振幅透過率との関係を示す図である。

【図17】マスクバイアスと回折光振幅との関係を示す図である。

【図18】キルヒホッフ近似モデルが成り立たない場合を例に示す、回折光強度を求めるためのフローチャートである。

【図19】四重極照明の構成例を示す図である。

【図20】四重極照明が望ましい理由について説明するために、斜め照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の分布を示す図である。

50

【図21】四重極照明による露光マージンと二重極照明による露光マージンとを比較して示す図である。

【図22】四重極照明が望ましい理由について説明するために、フォトレジストにコンタクトホールパターンを形成した場合を例に示す図である。

【図23】四重極照明が望ましい理由について説明するために、フォトレジストに孤立のコンタクトホールパターンを形成する場合を例に示す図である。

【図24】六重極照明の構成例を示す図である。

【図25】六重極照明が望ましい理由について説明するために、斜め照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の分布を示す図である。

【図26】本発明の第2の実施形態にしたがって、フォトマスクの一例を示す平面図である。
10

【図27】NAND型フラッシュメモリを例に、ビット線コンタクト用のコンタクトホールの3連千鳥配置を示す図である。

【図28】第2の実施形態にしたがって、変形二重極照明の構成例を示す図である。

【図29】第2の実施形態にしたがって、フォトレジストに形成されたコンタクトホールパターンの一例を示す平面図である。

【図30】変形二重極照明が望ましい理由を説明するために示す、マスクパターンの平面図である。

【図31】変形二重極照明が望ましい理由を説明するために、垂直照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の分布を示す図である。
20

【図32】変形二重極照明が望ましい理由を説明するために、斜め照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の分布を示す図である。

【図33】変形二重極照明が望ましい理由を説明するために、3つの回折光の干渉により、基板上に像が形成される場合を例に示す図である。

【図34】変形二重極照明が望ましい理由について、投影レンズ瞳の中心と回折光の位置との関係を説明するために示す図である。

【図35】変形二重極照明が望ましい理由を説明するために、投影レンズ瞳の中心に対する回折光の波数ベクトルを示す図である。

【図36】変形二重極照明が望ましい理由について、明部および暗部の光強度を説明するために示す図である。
30

【図37】回折光振幅とコントラストとの関係について説明するために示す図である。

【図38】ととの関係について説明するために示す図である。

【図39】と回折光振幅Aとの関係について説明するために示す図である。

【図40】変形四重極照明の構成例を示す図である。

【図41】変形四重極照明が望ましい理由を説明するために、斜め照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の分布を示す図である。

【図42】変形四重極照明が望ましい理由を説明するために、斜め照明光を照射した場合の、投影レンズ瞳に相当する面での回折光の他の分布を示す図である。

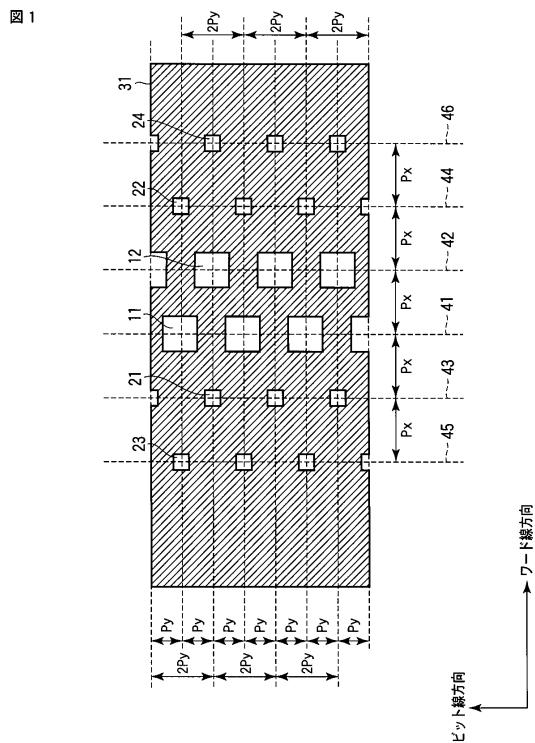
【図43】変形六重極照明の構成例を示す図である。

【符号の説明】
40

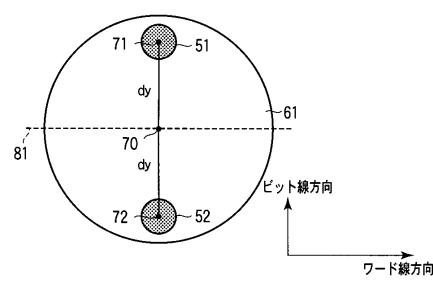
【0199】

11, 12, 311, 312, 313...メイン開口、21, 22, 23, 24, 321
, 322, 323, 324, 325, 326...アシスト開口、31, 331...遮光領域、
51, 52, 251, 252, 253, 254, 451, 452, 651, 652, 653, 654...発光領域、91, 92, 190, 491, 492, 493...コンタクトホールパターン、111...照明光学系、112...フォトマスク、113...投影光学系、114...基板、141a, 141b, 141c, 541a, 541b, 541c...回折光、142, 542...投影レンズ瞳の有効領域。

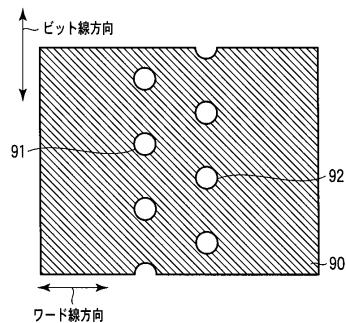
【図1】



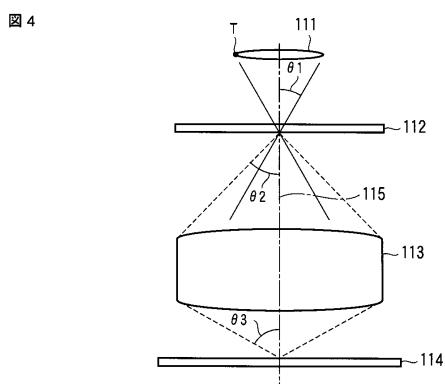
【図2】



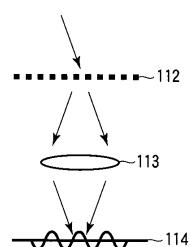
【図3】



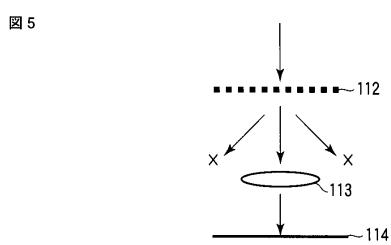
【図4】



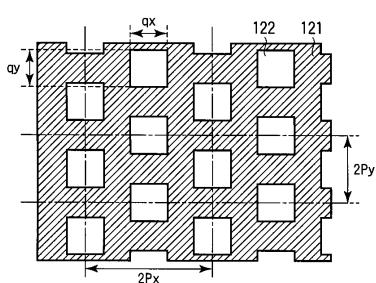
【図6】



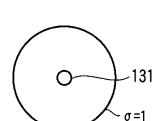
【図5】



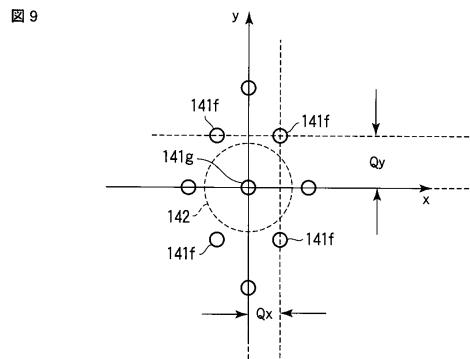
【図7】



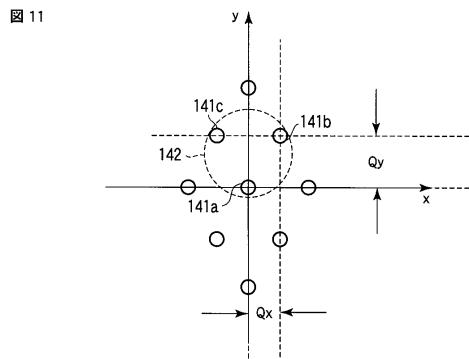
【図8】



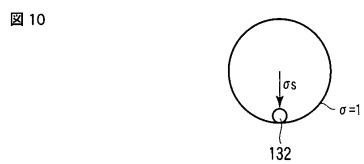
【図 9】



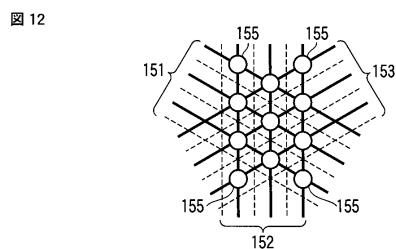
【図 11】



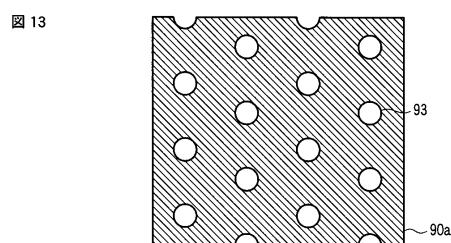
【図 10】



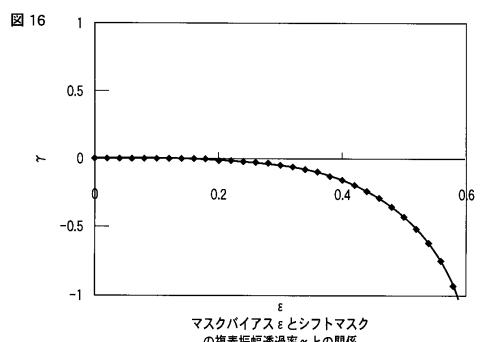
【図 12】



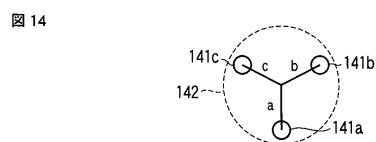
【図 13】



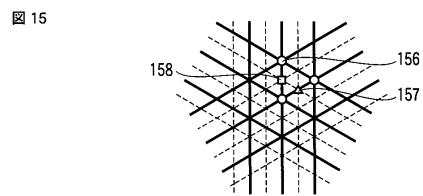
【図 16】



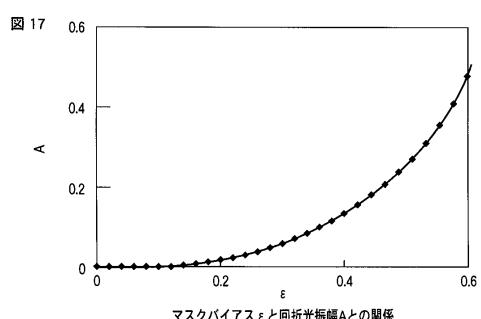
【図 14】



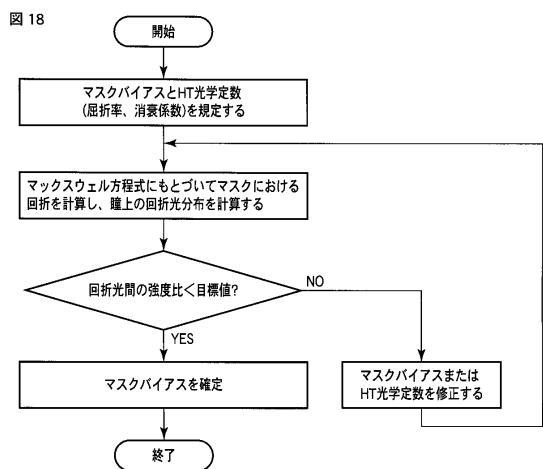
【図 15】



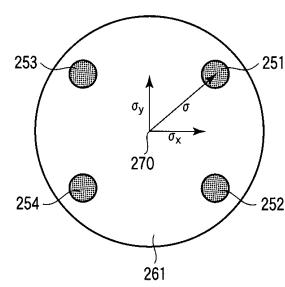
【図 17】



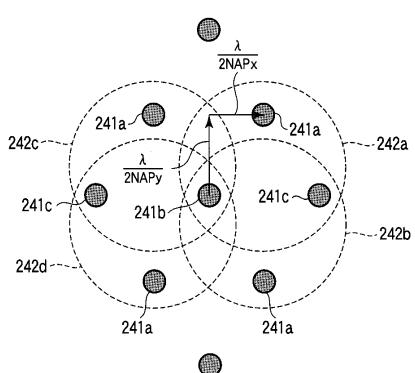
【図 18】



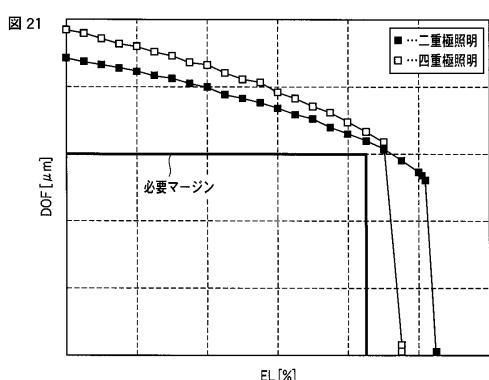
【図 19】



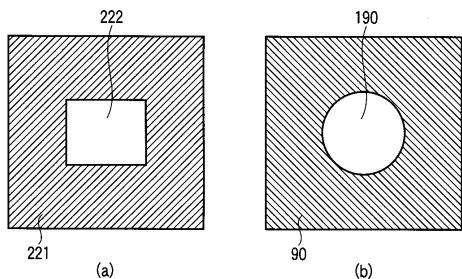
【図 20】



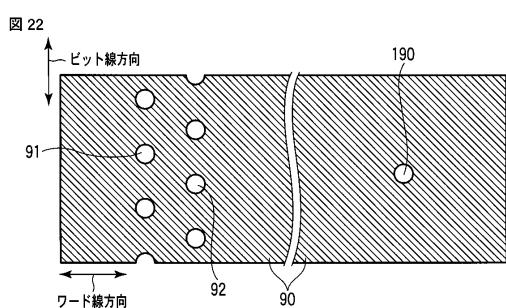
【図 21】



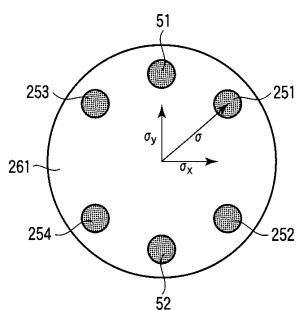
【図 23】



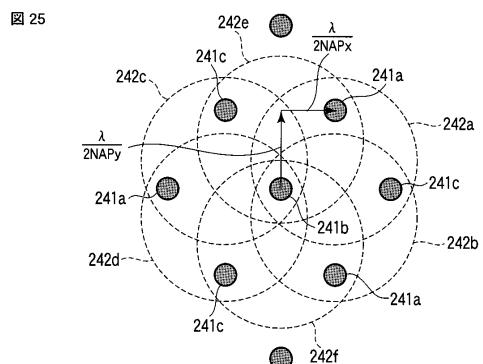
【図 22】



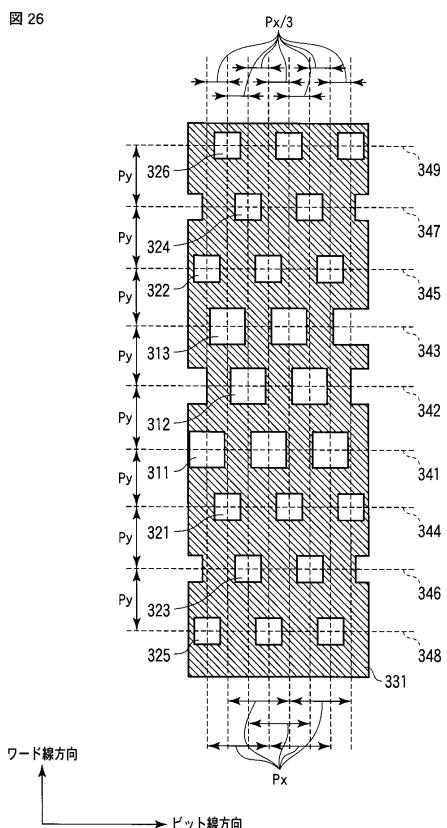
【図 24】



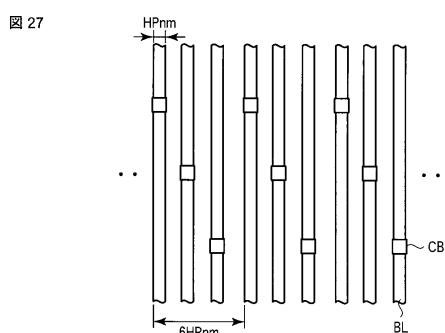
【図25】



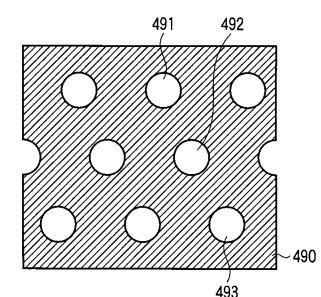
【図26】



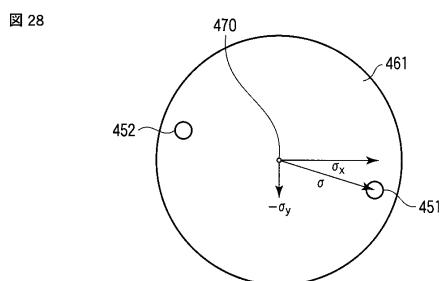
【図27】



【図29】

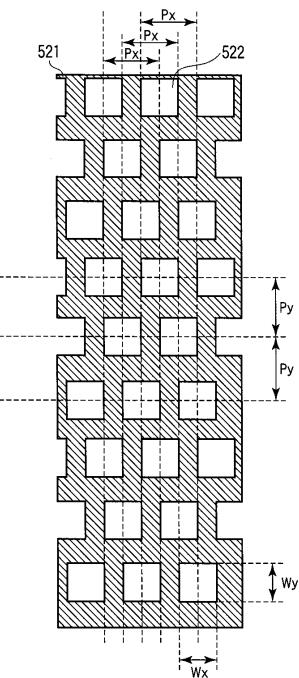


【図28】



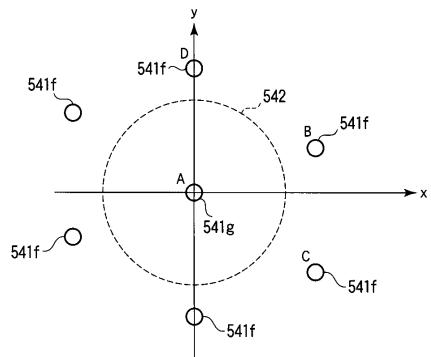
【図30】

図30



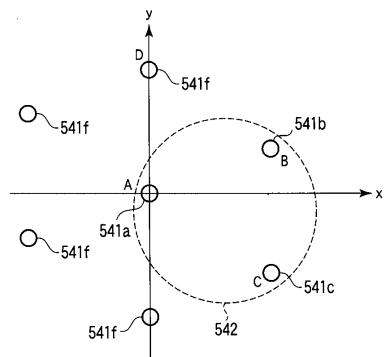
【図31】

図31



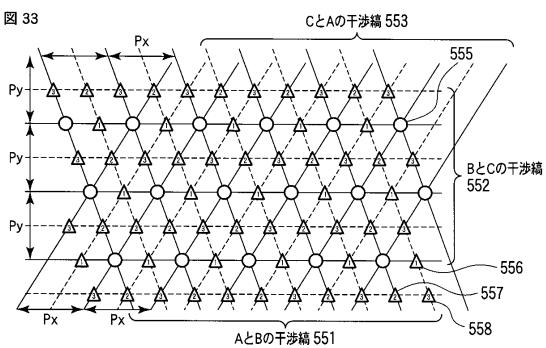
【図32】

図32



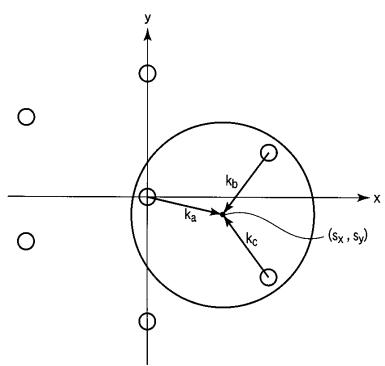
【図33】

図33



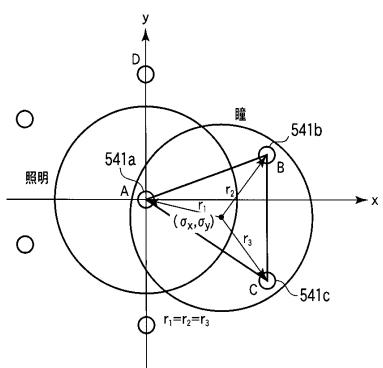
【図35】

図35



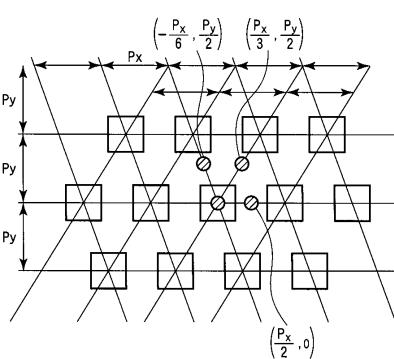
【図34】

図34

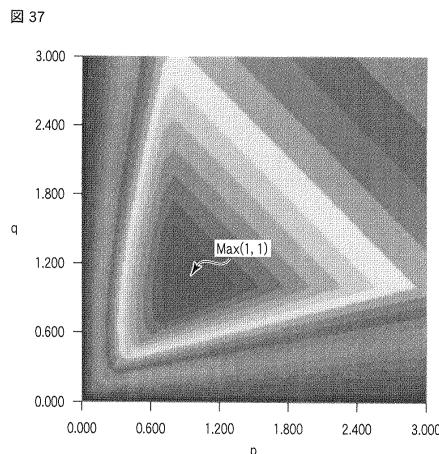
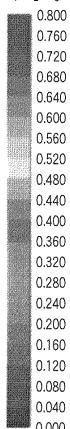


【図36】

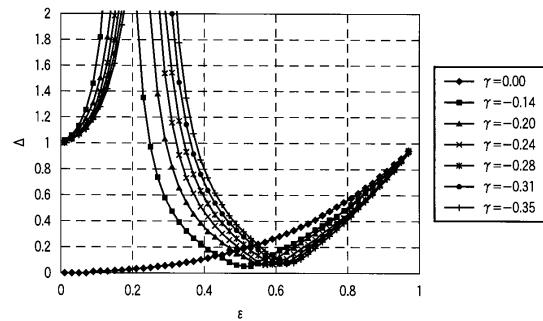
図36



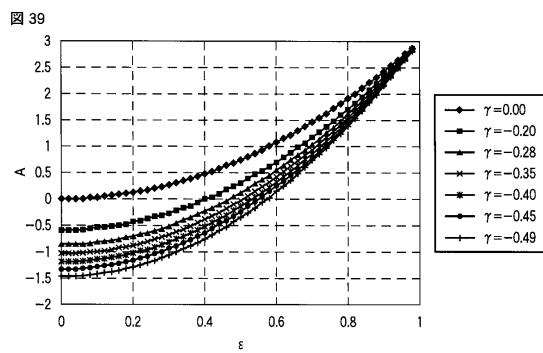
【図37】

Min(C₁, C₂, C₃)

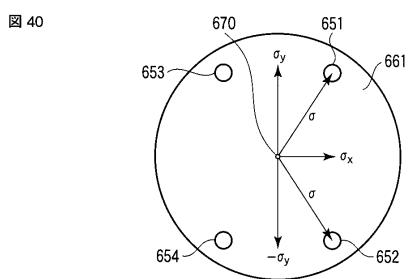
【図38】



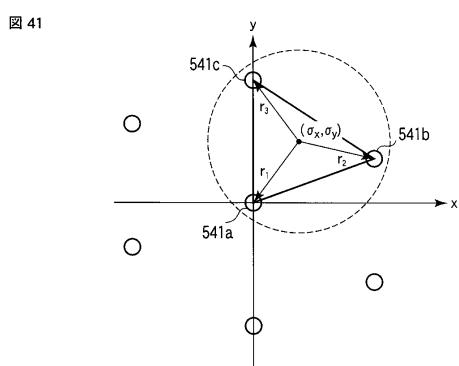
【図39】



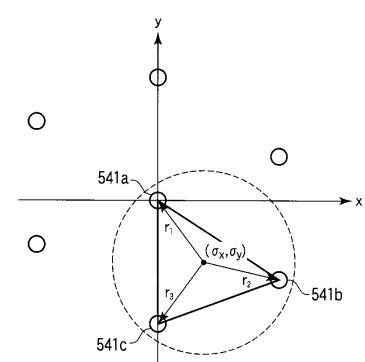
【図40】



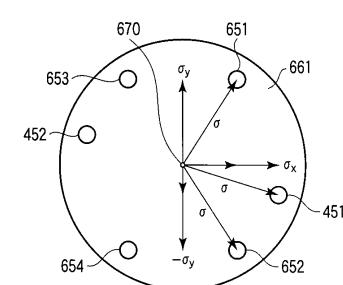
【図41】



【図42】



【図43】



フロントページの続き

(74)代理人 100084618
弁理士 村松 貞男
(74)代理人 100103034
弁理士 野河 信久
(74)代理人 100119976
弁理士 幸長 保次郎
(74)代理人 100153051
弁理士 河野 直樹
(74)代理人 100140176
弁理士 砂川 克
(74)代理人 100100952
弁理士 風間 鉄也
(74)代理人 100101812
弁理士 勝村 紘
(74)代理人 100070437
弁理士 河井 将次
(74)代理人 100124394
弁理士 佐藤 立志
(74)代理人 100112807
弁理士 岡田 貴志
(74)代理人 100111073
弁理士 堀内 美保子
(74)代理人 100134290
弁理士 竹内 将訓
(74)代理人 100127144
弁理士 市原 卓三
(74)代理人 100141933
弁理士 山下 元
(72)発明者 福原 和也
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
(72)発明者 橋本 隆希
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
(72)発明者 甲斐 康伸
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
(72)発明者 益川 和之
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 秋田 将行

(56)参考文献 特開2004-272228 (JP, A)
特開2005-055878 (JP, A)
特開平07-202143 (JP, A)
特開2007-109969 (JP, A)
特開2002-090979 (JP, A)
特開2000-206667 (JP, A)
特開2008-066586 (JP, A)
特開2007-201298 (JP, A)
特開平05-036586 (JP, A)

特開2009-031320(JP, A)
特開2002-031883(JP, A)
特開2007-123333(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

H 01 L 21 / 027
G 03 F 1 / 08