

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5744579号
(P5744579)

(45) 発行日 平成27年7月8日(2015.7.8)

(24) 登録日 平成27年5月15日(2015.5.15)

| | |
|---------------|---------------|
| (51) Int.Cl. | F 1 |
| HO 1 L 21/027 | (2006.01) |
| GO 3 F 7/20 | (2006.01) |
| HO 1 J 37/305 | (2006.01) |
| HO 1 J 37/12 | (2006.01) |
| | HO 1 L 21/30 |
| | GO 3 F 7/20 |
| | HO 1 L 21/30 |
| | HO 1 J 37/305 |
| | HO 1 J 37/12 |
| | |
| | |
| | |

請求項の数 8 (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2011-56811(P2011-56811)
 (22) 出願日 平成23年3月15日(2011.3.15)
 (65) 公開番号 特開2012-195368(P2012-195368A)
 (43) 公開日 平成24年10月11日(2012.10.11)
 審査請求日 平成26年3月17日(2014.3.17)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100126240
 弁理士 阿部 琢磨
 (74) 代理人 100124442
 弁理士 黒岩 創吾
 (72) 発明者 加藤 貴久
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤ
 ノン株式会社内
 (72) 発明者 ▲瀬▼戸本 豊
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤ
 ノン株式会社内

審査官 新井 重雄

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】荷電粒子線レンズおよびそれを用いた露光装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

静電型の荷電粒子線レンズであって、

前記荷電粒子線レンズは、光軸方向を法線とする第1の面と、前記第1の面とは反対側の第2の面とを有する平板からなり、

前記平板は、前記第1の面から前記第2の面に貫通する貫通孔を有し、

前記貫通孔の法線に垂直な面での開口面を開口断面とし、

前記開口断面を挟む、中心が同一な2つの同心円のなかで、2つの同心円の半径の差が最小になる2つの同心円を、半径の小さい方からそれぞれ内接円、外接円とするとき、

前記第1の面側である第1の領域における開口断面の内接円と外接円の半径の差と、

前記第2の面側である第2の領域における開口断面の内接円と外接円の半径の差とが各々、前記第1の面と前記第2の面とで挟まれた前記平板の内部の領域である第3の領域における開口断面の内接円と外接円の半径の差よりも小さく、

前記第1の領域及び前記第2の領域における開口断面の少なくとも一方は、

前記開口断面の内接円と外接円の半径の差が、前記第1の領域及び前記第2の領域の少なくとも一方の内部から、前記第1の面又は前記第2の面に近づくにつれて小さくなることを特徴とする荷電粒子線レンズ。

【請求項 2】

前記開口断面の回帰分析により得られた円の直径を代表直径とするとき、

前記第1の領域及び前記第2の領域における開口断面の代表直径は、

10

20

前記第3の領域における開口断面の代表直径より小さいことを特徴とする請求項1に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項3】

前記第1の領域及び前記第2の領域における開口断面の代表直径は、

前記第3の領域における開口断面の代表直径の40%より大きいことを特徴とする請求項2に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項4】

前記第1の領域及び前記第2の領域の厚さは、

前記第3の領域の厚さよりも小さいことを特徴とする請求項1～3の何れか1項に記載の荷電粒子線レンズ。

10

【請求項5】

前記第1の領域の厚さは、前記第1の領域における開口断面の代表直径の1/8より大きく、

前記第2の領域の厚さは、前記第2の領域における開口断面の代表直径の1/8より大きいことを特徴とする請求項1～4の何れか1項に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項6】

前記第1の領域及び前記第2の領域の少なくとも一方が、前記第3の領域に対して積層又は接合された構造であることを特徴とする請求項1～5の何れか1項に記載の荷電粒子線レンズ。

【請求項7】

前記平板は、電気伝導性膜で覆われていることを特徴とする請求項1～6の何れか1項に記載の荷電粒子線レンズ。

20

【請求項8】

請求項1に記載された荷電粒子線レンズと、

前記荷電粒子線レンズを通る電子ビームを放射する電子源と、

前記荷電粒子線レンズと前記電子源とを制御する制御手段と、を有することを特徴とする露光装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

30

本発明は、電子ビーム等の荷電粒子線を用いた装置に使用される電子光学系の技術分野に属し、特に露光装置に用いられる電子光学系に関するものである。また、本発明において、光とは広義の光を意味し、可視光だけでなく、電子線等の電磁波も含む。

【背景技術】

【0002】

半導体デバイスの生産において、電子ビーム露光技術は、0.1 μm以下の微細パターン露光を可能とするリソグラフィの有力候補である。これらの装置では、電子ビームの光学特性を制御するための電子光学素子が用いられる。電子レンズには、電磁型と静電型があり、静電型は電磁型に比べコイルコアを設ける必要がなく構成が容易であり小型化に有利となる。また、電子ビーム露光技術のうち、マスクを用いずに複数本の電子ビームで同時にパターンを描画するマルチビームシステムの提案がなされている。マルチビームシステムでは電子レンズを1次元または2次元のアレイ状に配列した電子レンズアレイが用いられる。電子ビーム露光技術では、微細加工の限界が電子ビームの回折限界より主に電子光学素子の光学収差で決定されるので、収差の小さい電子光学素子を実現することが重要である。

40

【0003】

特許文献1には、複数の電極基板を有する静電レンズ装置であって、複数の電極基板は光軸に対して垂直な面内に配置された開口を有し、各電極の開口の配置を調整して組み立てる静電レンズ装置が開示されている。また特許文献2には、セラミックスで形成された筒状基材と、前記筒状基材の内周面に沿って形成された第1の金属層と、前記筒状基材の

50

前記内周面のエッジを覆うように形成された第2の金属層とを含む電極を備える荷電ビーム装置が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2007-019194

【特許文献2】特開2006-139958

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

静電型の荷電粒子線レンズは、電磁型のレンズと比較すると相対的に構造は単純だが、レンズ開口の製造誤差に対する光学収差の敏感度が高い。特に開口が円形の場合の真円度（円であるべき部分の幾何学的円からの狂いの大きさ）のような開口形状の対称性に対する非点収差が敏感である。非対称性を有する開口の形状の影響を受けて収束された電子ビームは非点収差やその他の高次項の収差を持つ。

【0006】

特に、電子ビームが複数本あり、個々のビームが異なる非点収差を持つ場合、通常の非点収差補正器を用いて補正することができないため重要な課題となる。

【0007】

また、電極の剛性が低いと電子光学特性を制御するための電圧による静電引力で電極が変形する。電極に変形が生じるとレンズの焦点距離に誤差が生じることとなる。

【0008】

特に、複数本の電子ビームを制御する電子レンズアレイの場合、開口をアレイ状に配置するため電極面積が大きくなり電極の剛性が低下しやすいため重要な課題となる。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、静電型の荷電粒子線レンズであって、前記荷電粒子線レンズは、光軸方向を法線とする第1の面と、前記第1の面とは反対側の第2の面とを有する平板からなり、前記平板は、前記第1の面から前記第2の面に貫通する貫通孔を有し、前記貫通孔の法線に垂直な面での開口面を開口断面とし、前記開口断面を挟む、中心が同一な2つの同心円のなかで、2つの同心円の半径の差が最小になる2つの同心円を、半径の小さい方からそれぞれ内接円、外接円とするとき、前記第1の面側である第1の領域における前記開口断面の内接円と外接円の半径の差と、前記第2の面側である第2の領域における前記開口断面の内接円と外接円の半径の差とが各々、前記第1の面と前記第2の面とで挟まれた前記平板の内部の領域である第3の領域における前記開口断面の内接円と外接円の半径の差よりも小さく、前記第1の領域及び前記第2の領域における開口断面の少なくとも一方は、前記開口断面の内接円と外接円の半径の差が、前記第1の領域及び前記第2の領域の少なくとも一方の内部から、前記第1の面又は前記第2の面に近づくにつれて小さくなることを特徴とする。

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、レンズ全体の非点収差やそれより高次の収差を決定することができる。そして、レンズの収差の増加を抑えながら電極全体の厚さを厚くすることができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】(a)本発明の実施例1の荷電粒子線レンズの断面図である。(b)本発明の実施例1の荷電粒子線レンズの上面図である。

【図2】(a)図1(a)の破線Mで囲まれた領域の拡大した断面図である。(b)本発明の実施例1の別の開口断面図である。(c)本発明の実施例1の別の開口断面図である。

。

10

20

30

40

50

【図3】(a)図2(a)の破線Yで囲まれた領域の拡大した断面図である。(b)図3(a)の線分PQで示される領域の変位を示すグラフである。(c)図3(b)のグラフの微分係数を示すグラフである。

【図4】本発明の実施例1の第1・第2領域の非点収差が全体に占める割合を示すグラフである。

【図5】本発明の実施例1の設計例を示す表である。

【図6】荷電粒子線レンズの収束効果を説明する概念図である。

【図7】荷電粒子線レンズの開口表面付近の電位分布を示す概念図である。

【図8】本発明の実施例3の荷電粒子線レンズの断面図である。

【図9】(a)図8破線Uで囲まれた領域の拡大断面図である。(b)従来技術による開口を示した断面図である。 10

【図10】(a)～(f)本発明の開口断面の真円度・代表半径・代表直径を説明する上面図である。

【図11】本発明の実施例2の荷電粒子線レンズを示す断面図である。

【図12】(a)～(c)開口断面の代表直径・代表半径の定義を説明する概念図である。 。

【図13】本発明の実施例4の描画装置を示す概念図である。

【図14】厚さ方向への代表直径の定義を説明する概念図である。

【図15】本発明の実施例1の開口断面の断面図である。

【図16】本発明の実施例1の第3の領域の収差の寄与率を示すグラフである。 20

【図17】(a)第3の領域の真円度の分布を示すグラフである。(b)第3の領域の収差の寄与率を示すグラフである。

【図18】第3の領域の直径と収差分布を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0012】

本発明において第1の面、第2の面とは、本発明の荷電粒子線レンズを構成する電極の一方の面(表面)とその反対側の面(裏面)を意味する。また、第1の領域、第2の領域、及び第3の領域は、上記電極を厚さ方向で所定の厚さに3つに分割した場合の各々の領域を意味する。

【0013】

本発明において、「第Xの面から第Yの面へ貫通する貫通孔(X、Yは1から6の整数)」とは、第Xの面と第Yの面とを連通するように形成された貫通孔を意味するものであって、貫通孔形成時の孔を開ける向きは問わない。即ち第Xの面側から貫通孔を形成しても良く、第Yの面側から貫通孔を形成しても良く、第Xの面側と第Yの面側の両方から貫通孔を形成しても良い。

【0014】

本発明の荷電粒子線レンズは、第1の領域・第2の領域の開口と第3の領域の開口とに荷電粒子が通過する開口を電極の厚さ方向に分割して構成する。そして、第1の領域、第2の領域の開口の形状誤差(本発明の真円度(定義は後述))は第3の領域の開口の形状誤差よりもが小さくなるように構成する。但し、本発明における上記「分割」とは必ずしも物理的に分離されている必要はなく、一体的に形成されていても良い。要するに3つの領域に分割して真円度を設計することが本発明の特徴の1つである。このように開口を複数の領域に分けて分割して設計することにより、第1・第2の領域の開口断面がレンズ全体の収差に与える影響を大きくすることができる。本発明において開口断面とは、電極に形成した貫通孔の、電極面の法線である光軸に垂直な面での開口部の断面をいう。即ち貫通孔の注目している領域/部分において、光軸に垂直な面における開口部の断面がその領域/部分における開口断面となる。したがって、第3の領域の開口断面の精度が悪くても、第1・第2の領域の形状精度によってレンズ全体の非点収差やそれより高次の収差を決定することができる。そして、第3の領域の厚さを大きくすることでレンズの収差の増加を抑えながら電極全体の厚さを厚くすることができる。

50

20

30

40

50

【0015】

また本発明の荷電粒子線レンズは、第1・第2の領域の開口の代表直径をD1とし、第3の領域の開口の代表直径をD2とすると、直径D1 < D2とすることにより、第1・第2の開口のレンズ収差への寄与率を更に上げることができる。そのため第1・第2の領域の厚さを薄く設定することができ加工を容易とし加工精度も向上することができる。そして、第3の領域の開口のレンズ収差への寄与率を下げるため、この部分の許容誤差を大きくすることができる。許容誤差が大きくなれば、この部分（第3の領域）の厚さをより厚くして電極全体の剛性を向上させることができる。

【0016】

また本発明の荷電粒子線レンズは、前記第1の領域および前記第2の領域の代表直径を前記第3の領域における代表直径の40%より大きくすることが好ましい。このような構成とすることで、第1・第2の領域が第3の領域の開口へ突出した形状の変形と第1・第2・第3の領域の開口の加工誤差に対する変形ばらつきの両方を小さくすることができる。そのため変形により第1・第2の領域の開口の真円度がばらついたり、実効的な直径D1がばらついたりするのを低減することができる。

10

【0017】

また本発明の荷電粒子線レンズは、第1・第2の領域の厚さを第3の領域の厚さよりも小さくすることにより、第1・第2の領域の開口の形状加工の精度を第3の形状加工の精度よりも高精度とすることが可能となる。また、許容誤差の大きい第3の領域の開口加工を厚い（深い）貫通孔加工とすることができますため、基板貫通孔加工の難易度を下げ低コストに加工を行うことが可能となる。

20

【0018】

また本発明の荷電粒子線レンズは、第1・第2の領域の開口の収差の合計が電極全体の収差の80%を決定する構造とすることができる。この時、第3の領域の開口の真円度は第1・第2の2倍以上許容できる構造となる。第3の領域の開口の真円度を第1・第2の領域より2倍以上許容することができれば、第3の領域の厚さを第1・第2の領域と比べて大きくしても実際の加工を容易とすることが可能となる。

【0019】

また本発明の荷電粒子線レンズは、形状精度が必要な第1・第2の領域の開口を形成する工程と第3の領域の開口を形成する工程を別々に行うことができる。そのため、半導体製造技術により微細・高精度な開口を形成しエッチング条件の制御や歩留まりを向上することができる。特に、フォトリソグラフとドライエッチングといった高精度の加工技術と平坦性の高いシリコンウエハを介したウエハ接合により微細な開口を有する電極を高精度に形成可能となる。数十 μm オーダの開口径をnmオーダの真円度で静電型の荷電粒子線レンズ形成することが可能となる。この際、必要に応じてウエハを複数接合して積層構造とすることもできる。例えば、ウエハの厚さが厚くなると一般に加工精度が低下するため、1枚のウエハの厚さは求められる加工精度に応じて決定（精度を高くする場合には薄くする）する。その結果電極全体の厚さが不足する場合に複数層のウエハを積層するが好ましい。さらに積層するものは、ウエハには限定されず、例えばスパッタ法、CVD法、気相又は液相のエピタキシャル成長法、めっき法等で必要な堆積膜を形成することにより電極とすることもできる。

30

【0020】

また本発明の荷電粒子線レンズは、必要に応じて電極全体を電気伝導性膜で覆うことにより電極電位を一定とし、意図しない帯電により荷電粒子線が揺らぐのを防ぐことができる。

40

【0021】

また本発明の荷電粒子線レンズによれば、電極が複数の開口を有する荷電粒子線レンズアレイとすることができます。レンズ収差に寄与の大きい第1・第2の領域の開口断面を高精度加工だったので、レンズアレイの個々のレンズの開口断面の真円度のばらつきを低減することができる。レンズアレイの場合、個々のレンズの真円度は偶然誤差なので、個別

50

に補正を行うことは難しい。しかし本発明により開口断面の真円度のばらつきを低減できるので、大規模なレンズアレイとしても個別の補正の必要性を無くすか若しくは大きく低減することができる。そして、接合構造による電極を用いる場合は、開口断面のばらつきを十分に低減することができる。接合のアライメント精度により第1・第2の領域の開口の位置ずれが生じるが、このずれはレンズアレイ全体の系統的な位置ずれであるため補正することが容易である。そのため、大規模なレンズアレイに好適な形態となる。

【0022】

また本発明の荷電粒子線レンズは、収差への誤差の寄与率が低い位置に加工誤差の最も悪い部分を形成することができるため、収差の増加を抑えることができる。また、寄与率が最も高い電極の表裏面に真円度が最もよい部分を形成することができるため、収差を低減することができる。これは、特に、シリコンの深堀ドライエッティングを用いるときに有効で、基板へのエッティング方向を変更するだけで収差を低減することができる。

10

【0023】

また本発明の露光装置は、収差の少ない本発明の荷電粒子線レンズを用いることで、高精度の微細パターンが形成可能な露光装置とすることができます。

【0024】

また本発明の露光装置によれば、収差の少ない本発明の荷電粒子線レンズを用い、複数の荷電粒子線を用いることで、高精度の微細パターンを描画時間を短く形成可能な露光装置とすることができる。

20

【実施例】

【0025】

以下実施例により本発明をさらに詳細に説明するが本発明はこれらの実施例によって何ら限定されるものではない。

【0026】

(実施例1)

図1～図7を用いて、本発明の実施例1を説明する。

【0027】

図1(a)は本発明の荷電粒子線レンズの図1(b)A-A'線における断面図、(b)は荷電粒子線レンズの上面図である。

【0028】

30

図1(a)に示すように、本発明の荷電粒子線レンズは電極3A、3B、3Cの3枚の電極を有している。3枚の電極は、光軸Jを法線とする平板であり、一方の面である第1の面とその反対側の面である第2の面を有しており、各電極は互いに電気的に絶縁されている。第1の面は典型的には表面であり、第2の面は典型的には裏面である。但しこでいう、「表」、「裏」とは相対的な関係を示す便宜的な表現である。電極3A、3B、3Cはそれぞれ給電パッド10を有しており、このパッドを介して電極の電位を規定することができる。また光軸Jの矢印の方向に、図示しない光源から射出された荷電粒子線が通過する。

【0029】

3枚の電極は、少なくとも第1の領域5、第2の領域6、と第1、第2の領域に挟まれた第3の領域7の3つの領域を有している。光軸Jの方向の寸法を電極の厚さとすれば、第1の領域5は、図1(a)の通り光軸Jの光源側の電極の表面を含んで一定の厚さを有して形成されている。同様に第2の領域6は、光軸Jの光源とは反対側の電極の表面を含んで一定の厚さを有して形成されている。そして、第3の領域7は、第1・第2の領域に挟まれた一定の厚さを有する領域であり、電極の残りの領域として定義される。

40

【0030】

第1・第2・第3の領域5～7は、開口2A、2B、2Cをそれぞれ有している。そして、図示の通り開口2A、2B、2Cは電極を厚さ方向へ貫通する貫通孔である。荷電粒子線がこの開口を通過することができる。また、図1(b)のように開口2Aは円形形状を有している。同様に、光軸Jを法線とする平面での開口を開口断面とすれば、開口2B

50

、2Cの開口断面も開口2Aとほぼ同心円状の円形形状である。ただし、開口2Cの開口断面は2A、2Bに比べて直径が大きく図1(a)に示すように電極3A、3B、3Cは、出入口の直径が小さい開口で形成される貫通孔のプロファイルを有することなる。ここで光軸とは電子線が通過する方向である。

【0031】

例えは、電極3Bには、負極性の静電圧を印加し、電極3A、3Cはアース電位として、いわゆるAINTELL型の静電レンズを構成することができる。本発明において、AINTELL型の静電レンズとは、複数(典型的には3つ)の電極を間に所定の間隔をおいて配置し、最外部に位置する電極をアース電位とし、他の電極を正又は負の極性の電位を印加する構成を有する静電レンズを意味する。3つの電極から構成される場合であれば荷電粒子線の入射側から1つ目と3つ目の電極がアース電位で、2つ目の電極が正又は負の極性の電位を印加する構成となる。荷電粒子線は、電極3A、3B、3Cの開口を順に通過することで、レンズの効果を受ける。同時に、電極3A、3Bまたは、3B、3C間に静電引力が発生する。

【0032】

そして、本発明の荷電粒子線レンズでは、第1の領域5、第2の領域6に形成された開口2A、2Bは、第3の領域7に形成された開口2Cの開口断面に比べ円形形状の真円度が高くなっている(つまり真円に近い円形形状となっている)。

【0033】

本発明の荷電粒子線レンズは、このように第1、第2の領域の開口断面のみ対称性を高くすることで、電極の剛性を保ちながら静電型の荷電粒子線レンズの収差を低減することが可能となる。

【0034】

まず、図10を用いて本発明の荷電粒子線レンズの説明に必要な開口断面の対称性の定義を行う。静電型の荷電粒子線レンズのレンズ効果を生じる静電場は開口断面によって形成される。特に光軸Jを軸とした回転対称性のずれの大きさにより非点収差やより高次の収差が発生するため、真円からのずれが重要な指標となる。

【0035】

図10(a)は理想的な円形の開口断面4を示している。一方、(b)には橈円の開口断面4を示している。本発明の荷電粒子線レンズの非点収差やより高次の収差に影響を与える形状誤差として次のような指標を定義する。図10(b)の橈円の開口断面4を2つの同心円で挟む。内側の円を内接円11、外側の円を外接円12とする。このような同心円の組み合わせは同心円の中心を選べば様々な存在するが、その内で内接円・外接円の半径の差が最も小さい2つを選ぶ。このように選択した内接円・外接円の半径の差の1/2を真円度と呼ぶ。真円度は、図10(a)のような完全に円形の開口断面4の場合、外接円と内接円が一致するため0となる。

【0036】

そして図10(c)のように、橈円以外の任意の形状についても同様の方法で真円度を定義することができる。

【0037】

また円形形状が理想形状ではなく、図10(d)に示すように多角形(以下の説明では一例として八角形)を設計上の理想形状とした場合でも以下の方法により、真円度・代表半径・代表直径を定義(代表半径・代表直径の定義は後述)できる。即ち、上記の真円度・代表半径・代表直径を定義して理想の八角形からの対称性のずれと開口の大きさを比較することができる。図10(d)は理想的な正八角形の外接円11・内接円12を示している。このように八角形の場合は、理想状態でも真円度は0以上となる。しかし、図10(e)に示すように八角形に形状誤差が生じ正八角形からずれた場合、外接円11・内接円12は図示のようになる。したがって、図10(d)と(e)の真円度を比較すれば、正八角形より真円度は大きくなる。

【0038】

10

20

30

40

50

これらの真円度は、断面形状を実際に測定して定義することができる。周長に対して十分な分割数で測定し、画像処理で外接円11・内接円12を求めて算出することができる。

【0039】

ここで、上記した代表直径・代表半径は以下のように定義する。図12には図10(c)の開口断面4の代表直径を決定する手順を示している。図12(a)のような開口断面4は図12(b)に示すように輪郭線を十分に細かい間隔の離散的な測定点13の集合として測定する。必要な間隔は開口断面4の凹凸の代表的な周期の半分より細かいことが望ましい。このようにして測定した測定点13を用いて図12(c)に示すように、代表円14を1つ決定することができる。測定点13を用いて、回帰分析を行い円の方程式に幾何学的にフィッティングを行う。回帰分析には最小自乗法を用いることができるが、その他のアルゴリズムを用いてもよい。このようにして決定した代表円14の直径・半径をそれぞれ代表直径・代表半径とすることができます。荷電粒子線は、開口の中心を通過するため光軸上とその付近の電位分布を規定する代表形状として代表円の代表直径・代表半径は重要となる。

【0040】

また、図10(f)に示すように開口断面4のほとんどの部分が円形であり、ごく一部が突出したような形状の開口断面の場合でも、上記の方法で、光軸付近の静電場に寄与している代表形状として代表円を決定し、代表直径・代表半径を求めることができる。そして、このような円が得られれば、フィッティングで求めた円の中心と同心円を描き、外接円11・内接円12を定義することができる。

【0041】

次に、厚さ方向への第1・第2・第3の領域における開口断面の真円度について説明する。図14は、シリコンの深堀ドライエッチングによる貫通孔を図2(a)の第3の領域7へ適用した場合を示している。図14には特に第3の領域7だけを抜粋して示している。図の矢印T1~T5に示すように深さ方向の任意の位置で開口断面を定義することができる。このような個々の開口断面について前述した代表直径・真円度を定義することができる。ここで第3の領域7の代表直径・真円度とはこのよう開口の深さ方向へ任意の位置で定義される。領域の最表面以外の代表直径・真円度の測定については、開口を一度メッキ等で埋め戻し研磨することで観察して確認することができる。また、このような直接の測定を行わずに最表面の測定で代表することもできる。第1・第2・第3の領域の最表面以外の箇所は、後述するように収差への寄与が更に少なくなる部分であり、最表面に比べ代表直径・真円度ともオーダが同程度の変化ならば収差への影響が少ない。したがって、開口の厚み方向の断面観察を数か所行って代表直径・真円度とも大きく値が異ならない(例えばオーダが異なる(位が異なる)ような分布がない)ことを確認すれば、最表面の代表直径・真円度(つまり図14の場合T1、T5の位置)を測定しその平均値で代表することができる。

【0042】

上記の定義により、任意の開口断面についての真円度・代表半径・代表直径を定義する。以下明細書では、円形形状の開口断面を理想とする場合の説明とするが、開口断面の理想形は、八角形やその他任意の曲線でもよい。その場合でも、真円度・代表半径・代表直径を定義して本発明を実施することが可能となる。

【0043】

次に本発明の第1・第2の領域の開口断面が収差に与える効果について詳細に説明する。

【0044】

まず、図6を用いて静電型の荷電粒子線レンズが荷電粒子線を収束させるメカニズムについて説明する。図ではレンズの半径方向をR軸、光軸方向をJ軸とし図のように原点Oとする。そして、AINツェル型レンズをJ軸と平行な平面で切断した時に横から見た図である。AINツェル型レンズを構成する3枚の電極のうち、電極3A、3Cはアース電

10

20

30

40

50

位とし、電極 3 B には負の電位が印加されている。また荷電粒子線は負の電荷を有している。3 枚の電極 3 A、3 B、3 C は光軸 J を法線とする 3 枚の平板である。

【0045】

その状態における電気力線を実線の矢印 H で示した。また、J 方向で 3 枚の電極 3 A、3 B、3 C の中間面と 3 枚の電極間隔の中間面を破線 I で示した。さらに、図のように、J 軸の破線で区分される区間をそれぞれ区間 I、区間 II、区間 III、区間 IV とする。そして、特にAINツェル型レンズの主なレンズ効果を説明するために、区間 I より原点 O 側の区間、区間 IV より J がより大きい区間には電位はないものと近似する。

【0046】

R > 0 の領域での前記破線 I で区切られた区間 I、区間 II、区間 III、区間 IV における R 方向の電界の向きをそれぞれ f 1、f 2、f 3、f 4 の矢印で示す。つまり、区間 I、区間 II、区間 III、区間 IV それぞれで負、正、正、負となっている。そのため、ある像高 r 0 を通過する荷電粒子線の軌跡は矢印 E で示すようになる。つまり、区間 I では荷電粒子線は発散され、領域 II では収束され、領域 III では収束され、領域 IV では発散される。これは、J 軸方向に光学的な凹レンズ・凸レンズ・凸レンズ・凹レンズが並んでいるのと等価である。

10

【0047】

そして、荷電粒子線が収束される理由は以下の 2 つである。第 1 の理由は、荷電粒子線が受ける力は像高が高いほど強くなるため、区間 II と区間 III における収束作用が区間 I と区間 IV における発散作用を上回るからである。第 2 の理由は、区間 I に比べ区間 II が、区間 IV に比べ区間 III が荷電粒子線の走行時間が長いからである。運動量変化は力積に等しいため、走行時間が長い領域が電子ビームに与える効果が大きくなる。

20

【0048】

以上の理由から収束効果をうけることとなる。なお、電極 3 B に正の電位を印加した場合も同様に荷電粒子線は収束される。また荷電粒子線の有する電荷を正電荷としても収束される。電極 3 B の電位・荷電粒子線の電荷の正負のいずれの組み合わせにおいても収束効果が現れる。そして、区間 I ~ IV の静電場を形成している開口の形状誤差により、収束場の対称性が崩れる場合、静電レンズは非点収差のような高次の収差を有することとなる。したがって、静電型の荷電粒子線レンズは電極に形成された開口の形状誤差が収差に敏感に影響を与えるため、開口形状を正確に形成することが必要となる。

30

【0049】

開口の形状誤差は厚い電極へ開口を加工するほど低減するのが困難となる。電極の厚さが厚いと電極表裏の開口形状やその内部に渡って形状誤差を制御するのが難しくなる。そのため加工のコストが高くなり、精度によっては実現するのが困難になる場合がある。一方、加工難易度を下げるため電極の厚さを薄くすることが考えられる。この場合、電極に印加する電圧による静電引力によって電極の変形が生じてしまう。静電型のレンズの収差を小さくするためには、レンズの焦点距離を短くしてレンズの球面収差を低減することも必要となる。この場合電極間に印加する電界強度が大きくなるため静電引力が大きくなり電極の変形が顕著な課題となる。電極の変形が生じると電極間隔の誤差となり、開口が光軸 J から傾き後述するように荷電粒子線へのレンズ効果としての実質的な開口形状の対称性が崩れる場合がある。そのため、球面収差を低減してもそれより高次の収差が増加する、或いは 1 つの電極に開口が複数形成されるレンズアレイの場合には、個々のレンズの焦点距離にはらつきが生じる場合がある。

40

【0050】

このように、静電型の荷電粒子線レンズの収差を低減するためには、形状誤差の少ない開口を有する剛性の高い電極が必要であり、このことが、静電型の荷電粒子線レンズの低収差化の課題となっていた。さらに、静電型のレンズアレイを形成するためには焦点距離のばらつきを低減するためにも上記課題は重要となる。

【0051】

本発明の荷電粒子線レンズは、第 1 の領域 5、第 2 の領域 6 の開口 2 A、2 B と第 3 の

50

領域 7 の開口 2 C とに荷電粒子が通過する開口を分割し、開口 2 C より開口 2 A、2 B の形状誤差が小さくなっている。本発明の荷電粒子線レンズはこのような開口の分割により、開口 2 C より開口 2 A、2 B の形状がレンズ全体の収差に与える影響を大きくすることができます。したがって、開口 2 C の形状精度が悪くても、開口 2 A、2 B の形状精度によつて荷電粒子線レンズ全体の非点収差やそれより高次の収差を決定することができる。そして、開口 2 C の部分の厚さを大きくすることでレンズの収差の増加を抑えながら電極全体の厚さを厚くすることができる。

【 0 0 5 2 】

次に図 7 を用いて、第 1 の領域 5、第 2 の領域 7 の開口 2 A、2 B のような電極表面付近の開口形状が収差に対して大きな影響有することを説明する。図 7 に図 6 の破線 Z で囲まれた領域を拡大した。曲線 K、L、M は電極 3 B の開口 2 の表面付近の空間の等電位線をしめしている。また、曲線 H は、開口 2 A の最表面に対応する電気力線を示している。図のように、電気力線 H の開口 2 が形成されていない側（以下、電気力線 H の外側とする）の領域では、曲線 K、L、M は電極 3 B の表面にほぼ平行となっている。したがって、この領域での電気力線は電極の法線方向と平行な方向に形成されることとなる。そのため、この部分の電極形状は、レンズ効果の場となる R 方向の電界（図 6 f 1、f 2、f 3、f 4 を参照）に対してほとんど影響していない。

【 0 0 5 3 】

一方、電気力線 H より開口 2 が形成される側（以下、電気力線 H の内側とする）の領域において、等電位線 K、L、M は、開口 2 の内部に回り込んでいることが分かる。したがって、電気力線 H とそれより内側の電気力線によって、図 6 で説明したレンズ効果の場となる R 方向の電界が主に形成されることとなる。荷電粒子線は、立体的には光軸 J を法線とする平面において、光軸 J を中心として周方向のいずれの方向についても図 6 で示したレンズ効果の場となる R 方向の電界の影響を受けている。電気力線 H とそれより内側の電気力線のこのような光軸 J を中心として周方向の対称性（つまり円形形状における真円度）に影響するのは、光軸 J を法線とする平面での開口 2 の断面形状の対称性となる。そして、等電位線 K、L、M の間隔は、開口 2 の光軸 J に向かうにつれて大きくなっている。電気力線の密度は、電気力線 H から内側に向かうにつれ、又、光軸 J の方向に厚さが増すにつれ疎となっていく。したがって、開口 2 の断面形状の荷電粒子線の収束への影響は、電極の最表面が最も大きく、厚さ方向へ深くなるにつれて少なくなっていく。

【 0 0 5 4 】

また上記と同様の理由で区間 I、区間 I II、区間 I V の電界の向き f 1、f 3、f 4 についても電極の最表面の位置の開口 2 の断面形状が荷電粒子線への収束へ最も影響し、厚み方向へ最表面から遠ざかるにつれて影響が小さくなっていく。

【 0 0 5 5 】

また、図 6、図 7 では特に 3 枚の電極構成のレンズの説明をしたが、電極の枚数が 3 枚以外の場合であっても同じ性質を有している。つまり、開口周辺に形成される電場と荷電粒子線への収束の対称性が電極の表面付近の開口形状が最も影響が大きく、厚み方向に遠ざかるにつれ小さくなっていく性質は同じである。

【 0 0 5 6 】

このように、本実施例の荷電粒子線レンズの電極 3 A、3 B、3 C は第 1 の領域 5、第 2 の領域 6 の開口 2 A、2 B が第 3 の領域 7 の開口 2 C よりもレンズの収差に大きく影響することとなる。したがって、開口 2 C の形状誤差が大きくてレンズの収差への影響を低減することができる。

【 0 0 5 7 】

次に、本実施例の荷電粒子線レンズの開口 2 A、2 B、2 C の直径と厚さの関係による効果について説明する。

【 0 0 5 8 】

図 2 (a) は、図 1 (a) の破線 M で囲まれた領域を拡大した断面図である。図 2 (a) に示すように、第 1 の領域 5、第 2 の領域 6、第 3 の領域 7 の開口 2 A、2 B、2 C で

10

20

30

40

50

荷電粒子線を通過させることができる貫通した開口を形成している。ここで、第1の領域5の自由表面側の面が、電極3Bの第1の面であり、第2の領域6の自由表面側の面が第2の面である。即ち電極3Bは第1の面とその反対側の第2の面を有する。第1の領域5、第2の領域6はそれぞれ電極の最表面に相当する光軸Jを法線とする第1の面8、第2の面9を含んでいる。また界面13、14により第3の領域7とそれぞれ区別されている。

【0059】

そして、開口2A、2B、2Cはそれぞれ厚さt、t、t'を有している。また、開口2A、2B、2Cはそれぞれ直径がほぼ一定で第1の領域5、第2の領域6は直径D1、第3の領域7は直径D2で代表される。図2(a)では直径D1より直径D2が大きい。

10

【0060】

また、本発明の別の実施の形態として、図2(b)、(c)のような形態が考えられる。図2(b)(c)は、図2(a)の直径D1、直径D2の大小関係のみが異なっている。図2(b)では直径D1と直径D2が同一の場合、図2(c)は直径D1が直径D2より大きい場合である。

【0061】

図2(a)(b)(c)いずれの場合においても開口2A、2Bは開口2Cより真円に近い形状となっている。そして、図2(a)～(c)いずれの場合でも開口2Cは開口2A、2Bよりレンズの収差へ与える影響を小さくすることができる。

20

【0062】

図4は、図2(a)(b)の場合の開口2A、2Bの収差の合計がレンズの非点収差へ占める割合(寄与率)を示している。横軸は、開口2A、2Bの直径D1と開口2A、2Bの厚さtとの比である。中実の丸印が直径D1と直径D2が等しい場合である。

20

【0063】

直径D1、D2が等しい場合、開口2A、2Bの厚さtが直径D1の1/8の厚さで、開口2A、2Bの収差の合計が全体収差の80%を占めることができる。開口2A、2Bは互いに若干の差があるため、開口2A、2B、2Cの寄与率の内訳はそれぞれ44%、36%、20%となっている。

【0064】

そして、この寄与率の関係は、開口2Cの厚さt'を変えてても変化しない。したがって、開口2Cの厚さを大きくすることで寄与率の関係を変えないで電極全体の厚さを厚くすることができる。

30

【0065】

この寄与率にそれぞれの開口2A、2B、2Cの形状誤差の比率をかけたものが各開口の収差の相対的な大小関係となる。そして、電極3Bの最終的な収差は、開口2A、2B、2Cの各収差の自乗和平均で表現することができる。そのため開口2Cの形状誤差は、開口2Cの収差が開口2A、2Bの収差と同程度の大きさとなる形状誤差まで許容することができる。開口2A、2Bの収差の合計が80%の寄与率の場合、このような開口2Cの形状誤差は開口2A、2Bの形状誤差の2倍となる。

40

【0066】

実際の加工を行う場合、開口2Cの形状誤差を2倍以上許容することができれば、開口2Cの厚さを開口2A、2Bと比べて大きくすることができる。そのため、開口2A、2Bの厚さtは直径D1の1/8以上が望ましい値となる。

【0067】

また、 $t < t'$ の領域では、形状誤差が大きくなる厚い部分を第3の領域7として、加工誤差が大きい厚い開口の寄与率を低くし、全体の収差を低減することができる。

【0068】

一方、中空の丸印は、直径D1がD2の0.8倍の場合である。直径D1がD2の0.8倍の場合では、直径D1、D2が等しい場合に比べ、厚さtが小さくても開口2A、2Bの寄与率が大きくなる。厚さtが直径D1の1/8で約94%、1/5で96%の寄与

50

率となる。そして、この寄与率も開口 2 B の厚さ t' を変えてても変化しない。このように特に直径 $D_1 < D_2$ となる領域では、開口 2 A、2 B の寄与率を更にあげることができる。厚さ t が小さくても寄与率が高くなるため、薄い部分への開口加工は加工誤差が少なくなり寄与率も高いため電極全体の収差を低減することが可能となる。反面、寄与率が低い開口 2 C には大きな形状誤差を許容できるため、より厚い電極を実現することができる。

【0069】

次に図 3 を用いて、直径 $D_1 < D_2$ の場合の更に望ましい範囲について説明する。図 3 (a) は図 2 (a) の破線 Y で囲まれた領域の拡大図である。そして、図 1 (a) 電極 3 A、電極 3 C にはアース電位を、電極 3 B には負極性の電位を印加している。したがって、第 1 の領域 5 の上面には、静電引力が生じている。以下この静電引力は分布荷重 w として近似して扱う。

10

【0070】

直径 $D_1 < D_2$ では図 3 (a) のように第 1 の領域 5 が第 3 の領域 7 ヘリング状に突出した形状となる。この突出した形状が静電引力を受けると分布荷重 w の方向へ変形してしまう。今、突出した形状の先端の面 (図 3 (a) 断面図の線分 P Q) の分布荷重方向の変形を y とすれば、

【0071】

【数 1】

$$y = K_f \cdot \frac{w \cdot D_2^4}{16D} \quad (\text{式 } 1)$$

20

【0072】

【数 2】

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1-v^2)} \quad (\text{式 } 2)$$

30

【0073】

ただし、 E はヤング率、 v はポワソン比

【0074】

式 1 の係数 K_f は、直径 D_1 と直径 D_2 の比の関数で、リング状の突出した形状の剛性における直径 $D_1 \cdot D_2$ の形状因子の係数となる。係数 K_f は変位 y の比例係数なので値が大きいほど剛性が低くなる。

【0075】

図 3 (b) に係数 K_f を直径 $D_1 \cdot D_2$ の比の関数としてプロットした。 D_1 / D_2 が 1 に近づくにつれて (つまり突出した形状が少なくなるにつれて) 剛性が増加しているのが分かる。更に図 3 (c) にこの係数 K_f を D_1 / D_2 で微分した関数をプロットした。係数 K_f の微分係数は $D_1 / D_2 = 0.4$ 付近で極小となる変化を示すことがわかる。

40

【0076】

係数 K_f の微分係数の極小付近では絶対値が最大となっており、 D_1 / D_2 の変化に対する係数 K_f の変化率が最も大きい領域となる。つまり、加工誤差により D_1 / D_2 が変化した場合剛性の変化が大きくなってしまう。そのため、突出した形状の変位 y が大きく変化する。このように加工誤差に敏感に変位がばらつくと、開口 2 A の真円度がばらついたり、変形により実効的な直径 D_1 がばらついたりする。また、電極が複数の開口を有するレンズアレイの場合には、個々の開口間の変形ばらつきが大きくなってしまう。

【0077】

50

したがって、望ましい D_1 / D_2 は $0.4 \leq D_1 / D_2 < 1.0$ となる。この範囲において、係数 K_f とその微分係数の絶対値が小さい領域とすることができ、突出した形状の変形と開口の加工誤差に対する変形ばらつきの両方を小さくすることができる。

【0078】

また、 $0.8 \leq D_1 / D_2 < 1.0$ の範囲で用いれば更に変形と変形ばらつきを低く抑えることができるため好適な範囲となる。

【0079】

次に本実施例の具体的な材料・寸法例を説明する。電極 3A、3B、3C の第 1 の領域 5、第 2 の領域 6、第 3 の領域 7 とも単結晶シリコンで形成される。厚さはそれぞれ $6 \mu m$ 、 $88 \mu m$ 、 $6 \mu m$ である。開口 2A、2B の直径 D_1 は $30 \mu m$ 、開口 2C の直径 D_2 は $36 \mu m$ である。給電パッド 10 はシリコンと密着性がよく通電性が高く酸化しにくい金属膜で形成される。例えば、チタン・白金・金の多層膜を用いることができる。界面 9A、9B にはシリコン酸化膜が形成されている。電極 3A、3B、3C の第 1 の面 8、第 2 の面 9 や開口 2A、2B、2C の内壁面はすべて金属膜で覆ってもよい。この場合、酸化しにくい白金族の金属や酸化物に導電性がみられるモリブデンのような金属を用いることができる。電極 3A、3B、3C はそれぞれ $400 \mu m$ 離間して光軸 J を法線とする平面に平行に設置される。それぞれの電極は電気的に絶縁されている。電極 3A、3C にはアース電位を印加し、電極 3B には $-3.7 kV$ の電位を印加してAINツェル型のレンズとして機能する。荷電粒子線は電子であり、加速電圧を $5 keV$ としたとき本実施例の電極 3B の非点収差は図 5 のとおりとなる。開口 2A、開口 2B の真円度は $9 nm$ 、開口 2C の真円度は $90 nm$ で形成されている。表に示すように、それぞれの非点収差の内訳は $2.14 nm$ 、 $2.94 nm$ 、 $1.74 nm$ であり、開口 2C の真円度は、開口 2A、2B の 10 倍にもかかわらず、トータルの電極 3B の非点収差は $4.0 nm$ となる。（非点収差の値はすべてガウス分布の $1/e$ 半径を示している。）これは、従来技術に相当する開口 2A、2B、2C すべての直径が $30 \mu m$ と等しく、厚さ $100 \mu m$ すべての断面形状の真円度が $9 nm$ である場合の非点収差に等しい。

【0080】

高い真円度（真円度 $9 nm$ に相当）が必要な箇所は厚さ $6 \mu m$ の加工でよいため、加工の難易度を下げ開口全面にわたって $9 nm$ のような高精度の真円開口を形成することができる。一方、剛性を保つ開口 2C の領域は厚さ $88 \mu m$ の貫通孔加工が必要となるが、この部分の真円度は 10 倍悪くてもよいため加工難易度を下げることができる。一方、従来技術に相当する厚さ $100 \mu m$ に直径 $30 \mu m$ の開口を真円度 $9 nm$ で形成するのは非常に困難となる。

【0081】

次に、第 3 の領域 7 の厚み方向の真円度分布と収差の寄与率の関係について説明する。前述の設計例において電極 2B の開口について図 15 に示すように、第 3 の領域 7 を厚み方向へ $10 \mu m$ 每の S1 ~ S9 の領域に分割する。そのそれぞれの領域に真円度の違いがある場合の真円度の非点収差への感度解析を行う。図 16 は、横軸を S1 ~ S9 の深さ位置（領域の中心深さを代表位置とした）、縦軸をその領域が第 3 の領域 7 全体の収差に占める割合（寄与率）を示している。つまり S1 ~ S9 の真円度が等しい場合の非点収差への影響の大小関係を示している。図示の通り最表面の $20 \mu m$ の領域（S1 ~ S2 ~ S8 ~ S9）合計で 84% 程度の収差が決定される。また厚さの中央付近の領域（S4 ~ S5 ~ S6）はそれぞれ 2% 以下の寄与率となりこの領域はほとんど収差に寄与しないことが分かる。

【0082】

次に、真円度の分布を実際に与えた収差の大小関係を説明する。図 17 (a) は真円度の S1 ~ S9 までの真円度の分布を示している。中空三角印は S1 ~ S9 まで等しい真円度、中空丸印は S1 ~ S9 が最小の真円度で S5 に向かって徐々に大きくなる場合、中実丸印は S1 から S9 へ向かうにつれて徐々に大きくなる場合である。

【0083】

10

20

30

40

50

図9に示したように一方向からシリコンを深堀ドライエッチングする場合は中実丸印の真円度分布となる傾向がある。また、表面・裏面それぞれから深堀ドライエッチングを施す場合は、中空丸印となる傾向がある。そのため、これら2つの場合は実際の加工で現れる真円度分布の典型であるため重要である。そして、図17(b)は、非点収差の寄与率を示している。グラフのプロットのタイプがそれぞれの場合に対応している。中実丸印においては、真円度が低い側の最表面(S1・S2)の寄与率は低下しているが、反対側の最表面(S8・S9)の寄与率は増加する。そして、結果として最表面20μmの領域(S1・S2・S8・S9)合計で84%程度の収差が決定される。中空丸印においては、厚さ中央付近の領域(S4・S5・S6)の寄与率は増加するがこの部分の寄与率はもともと低いため全体への影響は少ない。したがって、結果として最表面20μmの領域(S1・S2・S8・S9)合計で76%程度の収差が決定される。

【0084】

以上のように第3の領域7の総厚さが100μmの内、最表面20μmの真円度でいずれの真円度分布の場合もほとんどの収差が決定される。とくに最表面の寄与率は大きい。また実質的に厚さの内部において真円度が数倍になる図17(a)中空丸印の場合も最表面の影響が最も大きい。領域内での開口の厚み方向のプロファイル観察を行ってオーダが異なるような極端な形状の変化・表面状態の変化が生じていなければ、表裏の最表面の真円度のみを測定しその平均値でその領域の平均の真円度とすることができます。このような測定で決定した代表的な真円度を用いても収差の確認計算には十分よい近似となる。したがって、真円度の厚さ分布を測定することが困難な場合は、このような方法で測定方法を簡略化して本発明の開口断面の形状を確認することが可能である。

【0085】

また、図18には図17(a)の中実丸印の真円度分布を仮定して、第3の領域7の直径が34μmと38μmの場合の実際の非点収差の値を示している。直径が大きいほど収差が小さくなることは前述のとおりだが、特に最表面20μmの領域の変化が大きくなる。このように直径の変化についても最表面の影響が最も大きい。したがって、真円度と同様に、領域内での開口の厚み方向のプロファイル観察を行ってオーダが異なるような極端な形状の変化・表面状態の変化が生じていなければ、表裏面の開口断面の代表直径の平均値をその領域の平均の代表直径とすることができる。

【0086】

次に、本実施例の製造方法を説明する。第1の領域5、第2の領域6、第3の領域7を第1の界面15、第2の界面16で接合して形成する。第1の領域5、第2の領域6となる厚さ6μmのデバイス層を有するSOI(シリコンオンインシュレータ)基板を用意する。まず、開口2A、2Bをこのデバイス層に高精度のフォトリソグラフとシリコンのドライエッチングにより形成する。その後全体を熱酸化する。次に第3の領域7と同じ厚さ88μmのシリコン基板にフォトリソグラフとシリコンの深堀ドライエッチングにより開口2Cを形成する。そして、開口2A、開口2Bが形成されたSOI基板のデバイス層を開口2Cが形成されたシリコン基板の表裏面に熱酸化膜を介して直接接合する。その後、2枚のSOIウエハのハンドル層と埋め込み酸化膜層、開口2A、2Bの接合界面以外の熱酸化膜を順次除去することで、第1の領域5、第2の領域6、第3の領域7を有する電極3A、3B、3Cを形成することができる。

【0087】

上記のように接合した構造とすることで、形状精度が必要な開口2A、2Bを形成する工程と開口2Cを形成する工程を別々に行うことができるため、エッチング条件の制御や歩留まりを向上することができる。特に、単結晶シリコンを用いることで、フォトリソグラフとドライエッチングといった高精度の開口形成と平坦性の高い平面を介したウエハ接合により本実施例の電極を高精度に形成可能となる。そして、この設計例のように数十μmオーダの開口径をnmオーダの真円度で形成することが可能となる。

【0088】

(実施例2)

10

20

30

40

50

図11を用いて本発明の実施例2を説明する。図11は、荷電粒子線レンズの断面図である。尚、実施例1と同じ機能を有する個所には、同じ記号を付し、同じ効果についても説明を省略する。本実施例では電極3A、3B、3Cが有する開口2A、2B、2Cが複数形成されている。本実施例では、図示のとおり1つの電極に5つの開口が形成されるレンズアレイとなっている。

【0089】

開口2Cの直径は開口2Aの直径より大きく設定されている。しかし、隣接する開口のピッチよりは小さくなっているため、第3の領域7で隣接する開口2Cがつながることはない。そのため、電極全体の剛性を低下させることなくレンズアレイを形成することができる。

10

【0090】

さらに、開口断面を高精度加工できるので、レンズアレイの個々のレンズの開口断面の真円度のばらつきを低減することができる。レンズアレイの個々のレンズの真円度が偶然誤差なので、個別に補正を行うことが非常に難しくなる。したがって、開口断面の真円度のばらつきを低減できることにより、大規模なレンズアレイを形成することが可能となる。

【0091】

特に、実施例1と同様の方法で製造される接合構造による電極を用いる場合は、開口断面のばらつきを十分に低減することができる。接合のアライメント精度により開口2Aと開口2Bの位置ずれが生じるが、このずれはレンズアレイ全体で1つのずれとなるため補正することが容易である。そのため、大規模なレンズアレイに好適な形態となる。

20

【0092】

(実施例3)

図8を用いて本発明の実施例3を説明する。図8は、荷電粒子線レンズの断面図である。尚、前述の実施例と同じ機能を有する個所には、同じ記号を付し、説明を省略する。

【0093】

本実施例は実施例1と異なり電極3A、3B、3Cは界面9A、9Bで規定されるような接合面を有しておらず単体の単結晶シリコン基板で形成されている。図示のように3枚の電極はそれぞれ開口2を有している。

【0094】

30

図8の破線Uで囲まれた部分の拡大図が図9(b)である。また比較のため従来技術の開口2の拡大図(a)を示す。

【0095】

図9(b)は矢印Nの方向に単結晶シリコン基板を貫通する深堀ドライエッチングを施した断面形状を示している。深堀ドライエッチングでは、エッチングと保護のガスを交互に切り替えながらエッチングが進行する。そのため、側壁にはスキヤロップと呼ばれる小さな凹凸が図示のように形成される。これらの凹凸はエッチングが進行するにつれてエッチング・保護のガスの供給や排気、化学反応に伴う発熱の度合い等の誤差因子が増加する。そのため、凹凸のピッチや深さが場所により変化したりして真円度が悪化してしまう。また貫通する間際になると貫通する先の界面の影響でエッチングガスの進路が曲げられ破線Sで囲んだ領域のようにノッティングとよばれる孔が広がる現象が生じることが知られている。これらの効果により、このような開口では矢印Nに進むにつれて真円度が悪化することとなる。したがって破線Sで囲まれた領域が最も真円度が悪い。このような開口を電極として用いると特に破線Sで囲まれた領域の開口断面の真円度の悪さが著しくレンズの収差を増加させてしまう。

40

【0096】

一方、本実施例では、図9(a)の矢印Nで示すように、シリコン基板の表裏面両方から深堀ドライエッチングを施している。したがって、破線Sで囲まれた最も真円度の悪い領域は、シリコン基板の表裏面から厚み方向に最も離れた領域とすることができます。したがって、前述したとおり収差への誤差の寄与率が低い位置に加工誤差の最も悪い部分を形

50

成することができるため、収差の増加を抑えることができる。また、寄与率が最も高い電極の表裏面に真円度が最もよい部分を形成することができるため、収差を低減することができる。

【0097】

本実施例により、単結晶シリコン基板へのエッティング方向を変更するだけで収差を低減することが可能となる。

【0098】

また、本実施例は、実施例2のように、開口を複数形成したレンズアレイを形成することもできる。開口断面を高精度加工できるので、レンズアレイの個々のレンズの開口断面の真円度のばらつきを低減することができる。レンズアレイの個々のレンズの真円度が偶然誤差なので、個別に補正を行うことが非常に難しくなる。したがって、開口断面の真円度のばらつきを低減できることにより、大規模なレンズアレイを形成することが可能となる。10

【0099】

特に、エッティングマスクの両面アライメント精度により開口2Aと開口2Bの位置ずれが生じるが、このずれはレンズアレイ全体で1つのずれとなるため補正することが容易である。そのため、大規模なレンズアレイに好適な形態となる。

【0100】

(実施例4)

図13は本発明の荷電粒子線レンズを用いたマルチ荷電粒子ビーム露光装置の構成を示す図である。本実施形態は個別に投影系をもついわゆるマルチカラム式である。20

【0101】

電子源108からアノード電極110によって引き出された放射電子ビームは、クロスオーバー調整光学系111によって照射光学系クロスオーバー112を形成する。

【0102】

ここで電子源108としてはLaB6やBaO/W(ディスペンサー・カソード)などのいわゆる熱電子型の電子源が用いられる。

【0103】

クロスオーバー調整光学系111は2段の静電レンズで構成されており、1段目・2段目共に静電レンズは3枚の電極からなり、中間電極に負の電圧を印加し上下電極は接地する、いわゆるAINツェル型の静電レンズである。30

【0104】

照射光学系クロスオーバー112から広域に放射された電子ビームは、コリメータレンズ115によって平行ビームとなり、アパーチャアレイ117へと照射される。アパーチャアレイ117によって分割されたマルチ電子ビーム118は、集束レンズアレイ119によって個別に集束され、プランカーアレイ122上に結像される。

【0105】

ここで集束レンズアレイ119は3枚の多孔電極からなる静電レンズで、3枚の電極のうち中間の電極のみ負の電圧を印加し上下電極は接地する、AINツェル型の静電レンズアレイである。40

【0106】

またアパーチャアレイ117はNA(集束半角)を規定する役割も持たせるため、集束レンズアレイ119の瞳面位置(集束レンズアレイの前側焦点面位置)に置かれている。

【0107】

プランカーアレイ122は個別の偏向電極を持ったデバイスで、描画パターン発生回路102、ピットマップ変換回路103、プランギング指令回路107によって生成されるプランギング信号に基づき、描画パターンに応じて個別にビームのON/OFFを行う。

【0108】

ビームがONの状態のときには、プランカーアレイ122の偏向電極には電圧を印加せず、ビームがOFFの状態のときには、プランカーアレイ122の偏向電極に電圧を印加50

してマルチ電子ビームを偏向する。プランカーアレイ122によって偏向されたマルチ電子ビーム125は後段にあるストップアパーチャアレイ123によって遮断され、ビームがOFFの状態となる。

【0109】

本実施例においてプランカーアレイは2段で構成されており、プランカーアレイ122及びストップアパーチャアレイ123と同じ構造の、第2プランカーアレイ127および第2ストップアパーチャアレイ128が後段に配置されている。

【0110】

プランカーアレイ122を通ったマルチ電子ビームは第2集束レンズアレイ126によって第2プランカーアレイ127上に結像される。さらにマルチ電子ビームは第3・第四集束レンズによって集束されてウエハ133上に結像される。ここで、第2集束レンズアレイ126・第3集束レンズアレイ130・第四集束レンズアレイ132は集束レンズアレイ119同様に、AINツェル型の静電レンズアレイである。

【0111】

特に第四集束レンズアレイ132は対物レンズとなっており、その縮小率は100倍程度に設定される。これにより、プランカーアレイ122の中間結像面上の電子ビーム121（スポット径がFWHMで2um）が、ウエハー133面上で100分の1に縮小され、FWHMで20nm程度のマルチ電子ビームがウエハー上に結像される。そして、この第四集束レンズアレイ132が本発明の実施例2に示す荷電粒子線レンズアレイとなっている。

【0112】

ウエハー上のマルチ電子ビームのスキャンは偏向器131で行うことができる。偏向器131は対向電極によって形成されており、x、y方向について2段の偏向を行うために4段の対向電極で構成される（図中では簡単のため2段偏向器を1ユニットとして表記している）。偏向器131は偏向信号発生回路104の信号に従って駆動される。

【0113】

パターン描画中はウエハー133はX方向にステージ134によって連続的に移動する。そして、レーザー測長機による実時間での測長結果を基準としてウエハー面上の電子ビーム135が偏向器131によってY方向に偏向される。そして、プランカーアレイ122及び第2プランカーアレイ127によって描画パターンに応じてビームのon/offが個別になされる。これにより、ウエハ133面上に所望のパターンを高速に描画することができる。

【0114】

本発明の荷電粒子線レンズアレイを用いることによって収差の少ない結像が実現できる。そのため微細なパターンを形成するマルチ荷電粒子ビーム露光装置を実現することができる。また、マルチビームが通過する開口形成エリアを大きくしても電極の厚さを厚くできるためマルチビームの本数を多く構成することができる。そのためパターンを高速に描画する荷電粒子ビーム露光装置を実現することができる。

【0115】

また、本発明の荷電粒子線レンズアレイは、集束レンズアレイ119・第2集束レンズアレイ126・第3集束レンズアレイ130といったいずれの集束レンズアレイとしても用いることができる。

【0116】

なお、本発明の荷電粒子線レンズは、図13の複数のビームが1本となった場合の荷電粒子線描画装置にも適用することができる。その場合でも、収差の少ないレンズを用いることによって微細なパターンを形成する荷電粒子ビーム露光装置を実現することができる。

【符号の説明】

【0117】

1A、1B スペーサ

10

20

30

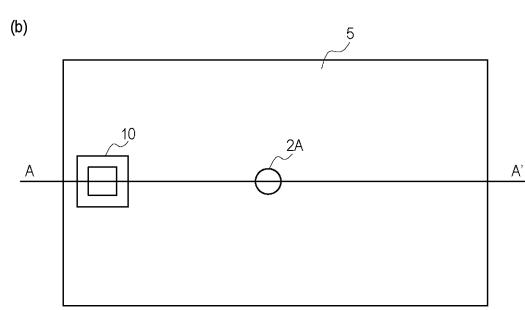
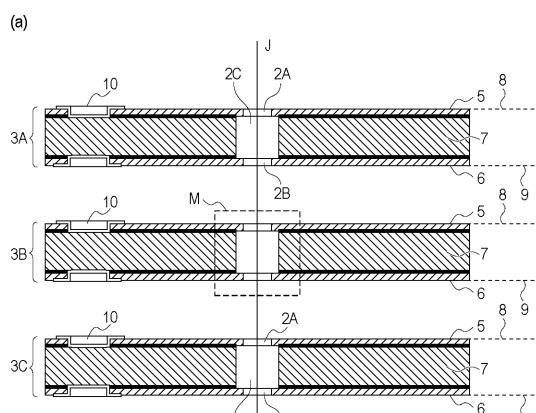
40

50

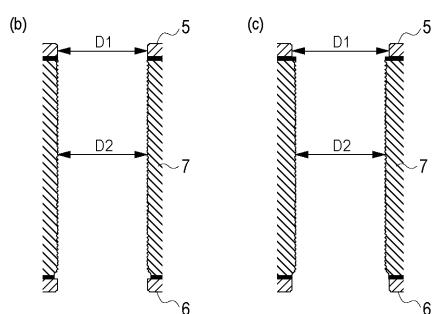
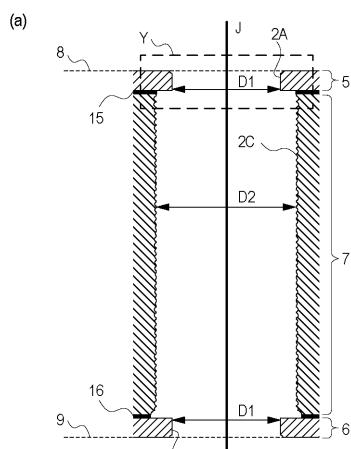
- 2、2A、2B 開口
 3A、3B、3C 電極
 4 開口断面
 5 第1の領域
 6 第2の領域
 7 第3の領域
 8 第1の面
 9 第2の面
 10 給電パッド
 11 内接円
 12 外接円
 13 測定点
 14 代表円
 15 第1の界面
 16 第2の界面

10

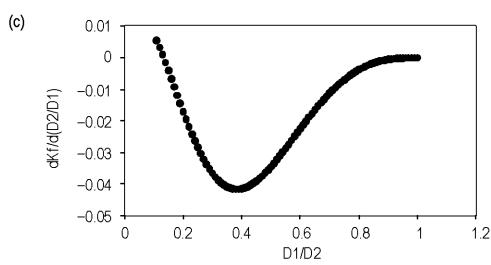
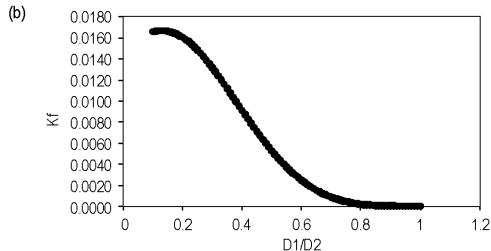
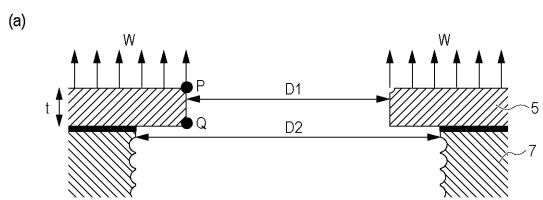
【図1】



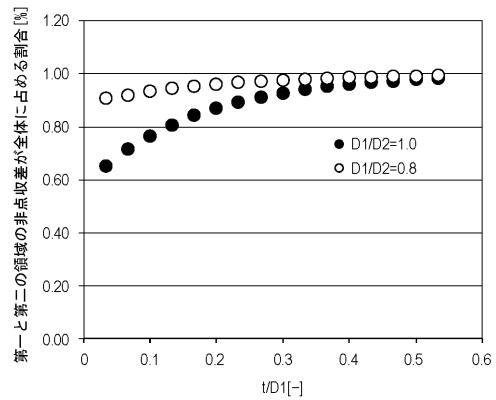
【図2】



【図3】



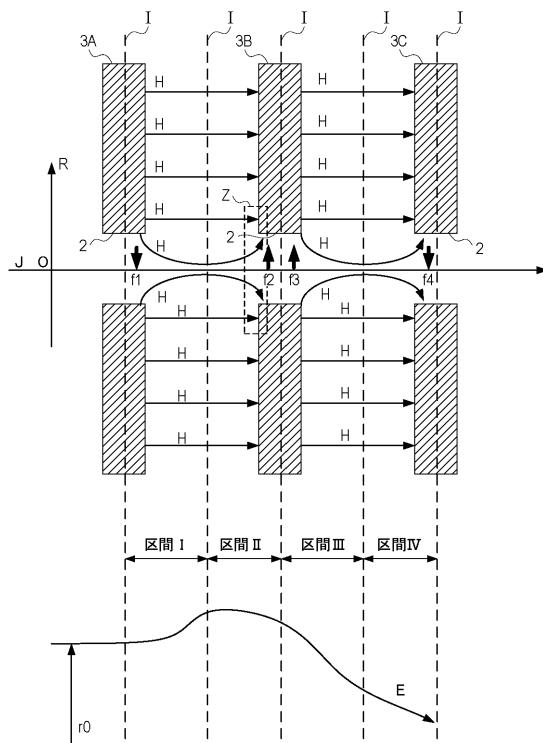
【図4】



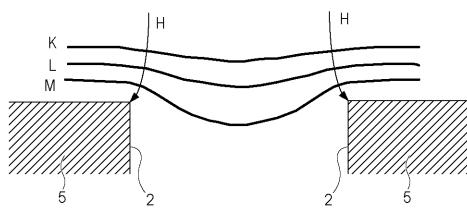
【図5】

| 項目 | 第一の領域 | 第三の領域 | 第二の領域 | 単位 |
|----------|-------|-------|-------|------|
| 真円度 | 誤差 | 9 | 90 | 9 |
| 非点 収差 | 内訳 | 2.14 | 2.94 | 1.74 |
| | トータル | | 4.0 | nm |

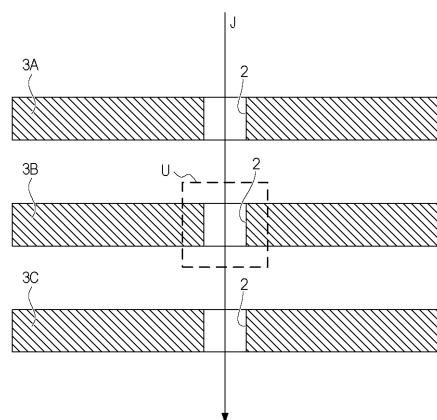
【図6】



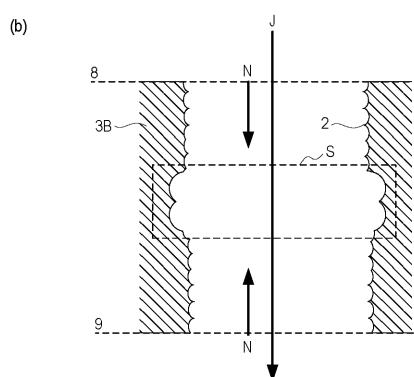
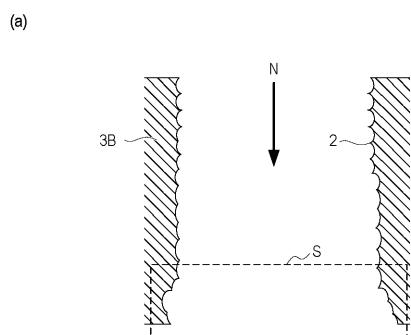
【図7】



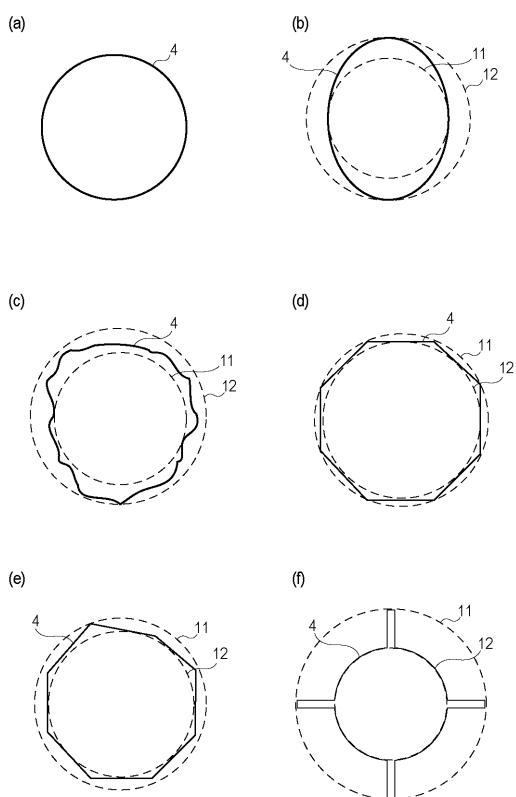
【図8】



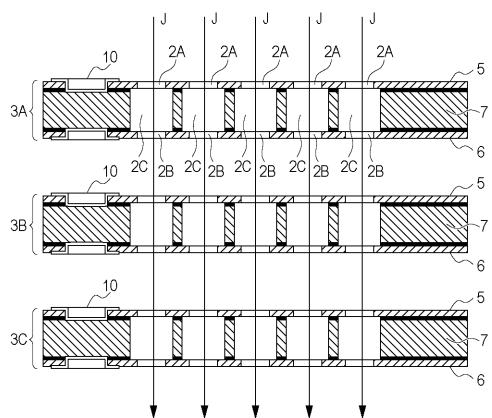
【図9】



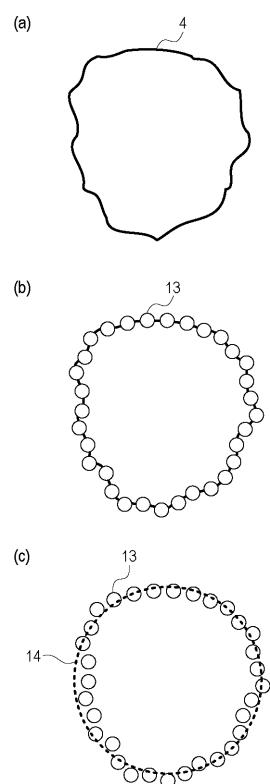
【図10】



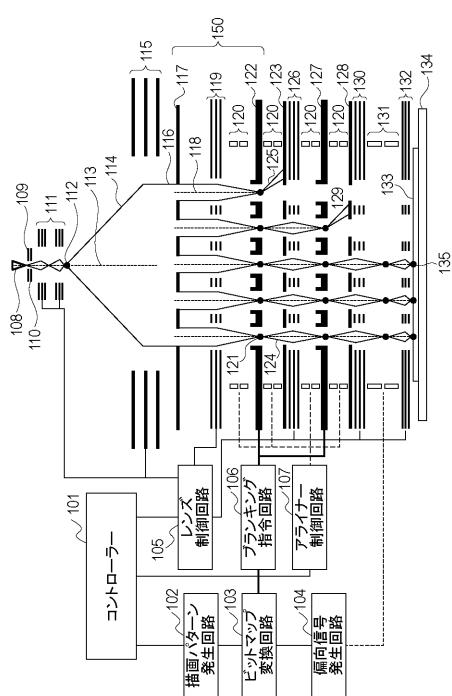
【図11】



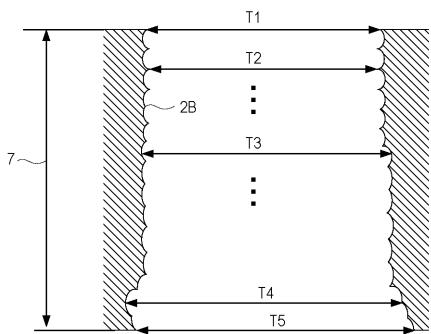
【図12】



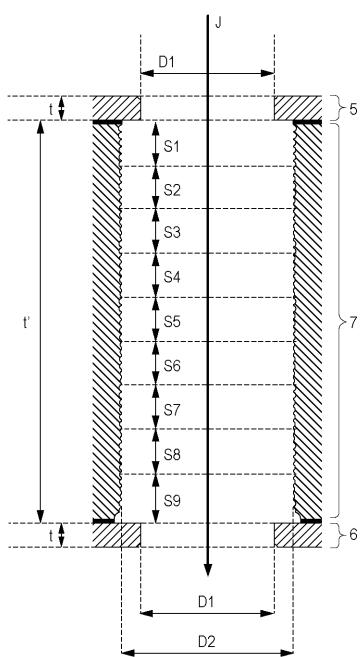
【図13】



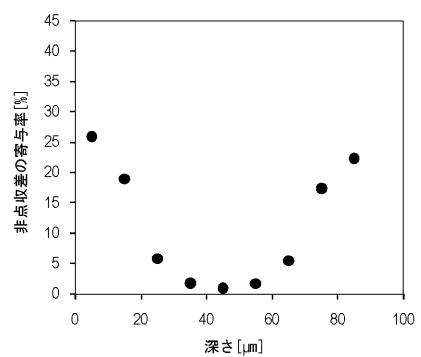
【図14】



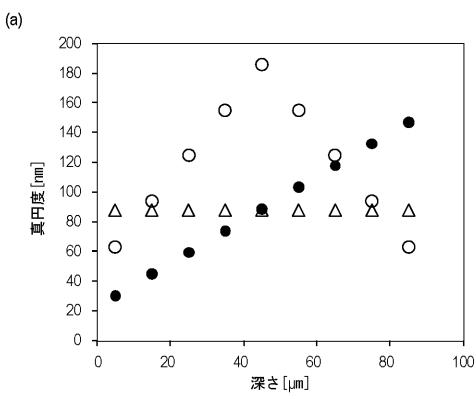
【図15】



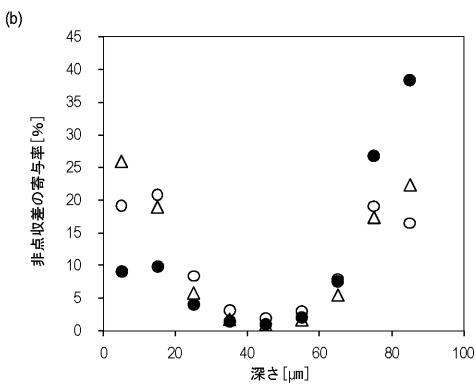
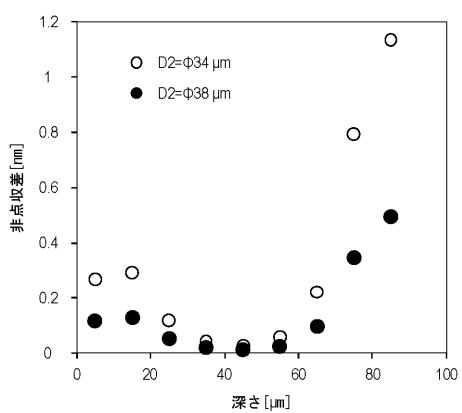
【図16】



【図17】



【図18】



フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許第03899711(US,A)
特開2005-268788(JP,A)
特開2006-049703(JP,A)
特開2004-235435(JP,A)
米国特許第04419182(US,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/027
G03F 7/20
H01J 37/12
H01J 37/305