

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6257622号
(P6257622)

(45) 発行日 平成30年1月10日 (2018. 1. 10)

(24) 登録日 平成29年12月15日 (2017. 12. 15)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 J 1/34 (2006. 01)

H O 1 J 1/34

G O 3 F 7/20 (2006. 01)

G O 3 F 7/20 5 2 1

G O 3 F 1/84 (2012. 01)

G O 3 F 1/84

G O 1 N 21/956 (2006. 01)

G O 1 N 21/956 A

H O 1 L 21/66 (2006. 01)

H O 1 L 21/66 J

請求項の数 20 (全 21 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2015-525489 (P2015-525489)
 (86) (22) 出願日 平成25年7月29日 (2013. 7. 29)
 (65) 公表番号 特表2015-536012 (P2015-536012A)
 (43) 公表日 平成27年12月17日 (2015. 12. 17)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2013/052546
 (87) 国際公開番号 W02014/022297
 (87) 国際公開日 平成26年2月6日 (2014. 2. 6)
 審査請求日 平成28年7月21日 (2016. 7. 21)
 (31) 優先権主張番号 61/679, 200
 (32) 優先日 平成24年8月3日 (2012. 8. 3)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (31) 優先権主張番号 13/947, 975
 (32) 優先日 平成25年7月22日 (2013. 7. 22)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 500049141
 ケーエルエーテンカー コーポレイショ
 ン
 アメリカ合衆国、95035、カリフォル
 ニア州、ミルピタス、ワン テクノロジイ
 ドライブ
 (74) 代理人 110001210
 特許業務法人 Y K I 国際特許事務所
 (72) 発明者 チュワーン ユインーホ アレックス
 アメリカ合衆国 カリフォルニア クパチ
 ーノ ファラロン ドライブ 10678
 (72) 発明者 フィールデン ジョン
 アメリカ合衆国 カリフォルニア ロス
 アルトス ヴィクトリア コート 202
 O

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ホウ素層を有するシリコン基板を含むフォトカソード

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

相対する第 1 面及び第 2 面を有するシリコン基板と、
 前記シリコン基板の第 2 面上に直接配置された主にホウ素から成る第 1 層と、
 前記第 1 層の上に配置された低仕事関数材料を備える第 2 層と
 を備えるフォトカソード。

【請求項 2】

前記低仕事関数材料は、アルカリ金属及びアルカリ金属酸化物のうちの 1 つを備える、
 請求項 1 記載のフォトカソード。

【請求項 3】

前記低仕事関数材料はセシウムを備える、請求項 2 記載のフォトカソード。

【請求項 4】

前記第 1 層は、1 nm から 5 nm の範囲内の厚みを有する、請求項 1 記載のフォトカ
 ソード。

【請求項 5】

前記シリコン基板の第 1 面上に直接配置された主にホウ素から成る第 3 層を更に備える
 、請求項 1 記載のフォトカソード。

【請求項 6】

前記第 3 層の上に配置された反射防止材料を備える第 4 層を更に備える、請求項 5 記載
 のフォトカソード。

【請求項 7】

前記シリコン基板の第 1 面と第 2 面との間に外部電位差を発生させるための手段を更に備える、請求項 4 記載のフォトカソード。

【請求項 8】

前記シリコン基板は、p 型拡散領域が、前記第 1 面から離れて配置された部分よりも前記第 1 面付近の部分において高い p 型ドーパント濃度を有するように、前記第 1 面から前記第 2 面へ向かって広がる p 型拡散領域を含む、請求項 1 記載のフォトカソード。

【請求項 9】

受光面上に導かれる光子に反応して電気信号を発生させるためのセンサであって、
前記光子に反応して光電子を放出するための前記受光面に隣接して配置されたフォトカ
ソードであって、

10

前記受光面に面した第 1 面及び前記受光面の外方を向く第 2 面を有するシリコン基板と、

前記シリコン基板の第 2 面上に直接配置された主にホウ素から成る第 1 層と、

前記第 1 層の上に配置された低仕事関数材料を備える第 2 層と

を含むフォトカソードと、

前記フォトカソードによって放出される前記光電子を検出するための手段及び前記検出された光電子に反応して前記電気信号を発生させるための手段を含む、前記第 2 層に面した検出面を有する検出素子と、

前記検出素子の検出面が、介在するギャップ領域によって前記フォトカソードの第 2 層から分離するように、前記フォトカソードと前記検出素子との間に作動的に連結された筐体と、

20

前記フォトカソードから前記ギャップ領域へ放出される電子が電界によって前記検出素子へ向かって加速するように、前記フォトカソードと前記検出素子との間に電界を発生させるための手段と

を備えるセンサ。

【請求項 10】

前記低仕事関数材料は、アルカリ金属及びアルカリ金属酸化物のうちの 1 つを備える、請求項 9 記載のセンサ。

【請求項 11】

30

前記低仕事関数材料はセシウムを備える、請求項 10 記載のセンサ。

【請求項 12】

前記第 1 層は、1 nm から 5 nm の範囲内の厚みを有する、請求項 9 記載のセンサ。

【請求項 13】

前記センサは、イメージインテンシファイア、電子衝撃型電荷結合素子 (EBCCD)、及び光電子増倍管のうちの 1 つを備える、請求項 9 記載のセンサ。

【請求項 14】

前記シリコン基板の第 1 面上に直接配置された主にホウ素から成る第 3 層を更に備える、請求項 9 記載のセンサ。

【請求項 15】

40

前記第 3 層の上に配置された反射防止材料を備える第 4 層を更に備える、請求項 14 記載のセンサ。

【請求項 16】

前記センサの受光面は、前記第 4 層の上面である、請求項 15 記載のセンサ。

【請求項 17】

前記受光面は、窓に配置された反射防止材料の層を備える、請求項 9 記載のセンサ。

【請求項 18】

前記検出素子は、第 2 のシリコン基板を備え、前記シリコン基板の検出面上に直接配置されたホウ素層を含む、請求項 9 記載のセンサ。

【請求項 19】

50

サンプル上に光子を送るための照明源と、
前記サンプルから光子を検出するためのセンサと、
前記照明源から前記サンプルへ、及び前記サンプルから前記センサへ前記光子を導くための光学系と
を備え、前記センサは、

前記光子に反応して光電子を放出するための受光面に隣接して配置されたフォトカソードであって、

前記光学系に向けられた第1面及び前記光学系の外方に向く第2面を有する単結晶シリコン基板と、

前記シリコン基板の第2面上に直接配置された主にホウ素から成る第1層と、

前記第1層の上に配置された低仕事関数材料を備える第2層と

を備えるフォトカソードと、

前記フォトカソードによって放出される光電子を検出するための手段及び検出された光電子に反応して電気信号を発生させるための手段を含む、前記第2層に面した検出面を有する検出素子と

を備える、検査システム。

【請求項20】

前記センサは、イメージンテンシファイア、電子衝撃型電荷結合素子（EBCCD）、及び光電子増倍管のうちの1つを備える、請求項19記載の検査システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願は、2012年8月3日出願の "Photocathode With Low Noise And High Quantum Efficiency, High Spatial Resolution Low-Noise Image Sensor And Inspection Systems Incorporating an Image Sensor" と題された米国特許仮出願第61/679200号に対する優先権を主張する。

【0002】

本発明は、一般に、半導体ウェハ、レチクル、又はフォトマスク検査システムと関連して用いられる低光感知検出器（センサ）に関し、特に、そのような検査システムのためのセンサにおいて用いられるフォトカソードに関する。

【背景技術】

【0003】

フォトカソードは、光電子増倍管、イメージンテンシファイア、及び電子衝撃型CCD（EBCCD）といった光検出素子において一般的に用いられる負帯電性電極である。フォトカソードは、光の量子（光子）によって衝撃を受けると、光電効果によって吸収された各光子に反応して1つ（又は複数）の電子を発生させる感光性化合物を備える。昨今のフォトカソードにおいて用いられる感光性化合物は通常、アルカリ金属を備える。アルカリ金属の低い仕事関数によって、ホスト画像センサ装置の他の構造による検出のために電子がフォトカソードから容易に抜け出ることができるためである。特に赤外線感光性装置のためのフォトカソードを生成するために、GaAs及びInGaAsといった化合物半導体も用いられる。シリコン製のフォトカソードが過去に生成されてきたが、シリコンは光の捕捉において効率が良いが、発生した電子のうちの僅かしかシリコンから抜け出ることができず、全体の能率を低下させるので、目立った商業的使用は見られなかった。

【0004】

フォトカソードは一般に、伝導フォトカソードと反射フォトカソードとの2つの大きなグループに分けられる。伝導フォトカソードは通常、測定される光の光源に面した窓（例えば、ガラス）の表面上に形成され、フォトカソードを出ていく電子は、検出のためにフォトカソードの出力面を通過する（すなわち、電子は光源から離れるように移動する）。反射フォトカソードは通常、同一の「被照射」面から光が入り電子が出ていく不透明な金属電極基盤上に形成される。反射フォトカソードは、以下で説明するフォトカソードの厚

10

20

30

40

50

みと感度とのトレードオフの一部を簡単にするが、例えばイメージインテンシファイア及びEBCCD装置のような撮像装置における使用に適さない(しかしそれらは、一部の光電子増倍管構成における使用には適しうる)。従って、以下の説明において「フォトカソード」という用語は、例外が明記されない限り、伝導フォトカソードを指す。

【0005】

フォトカソードは通常、適切なホストセンサの筐体(例えば、半導体又は真空管)に形成又は装着され、センサ筐体は、被照射面がターゲット光源に面するように(すなわち、フォトカソードが、ホストセンサの電子測定構造と光源との間に位置するように)位置付けられる。光子がフォトカソードによって吸収されると、発生した電子の平均約50%が、フォトカソードの被照射側面(すなわち、そこを通して光子がフォトカソードに入る、光源に面した側面)に向かって移動する。残りの50%の光電子は、フォトカソードの出力面へ移動し、光電子が十分なエネルギーを有する場合、センサの電子測定構造へ向かって放出される。電子がフォトカソードの出力面から放出されると、それらは通常、ホストセンサ内の電界によってアノードへ向かって加速し、1つ又は複数の光子の捕捉を示す、対応する測定可能な電圧又は電流を生成する。

【0006】

光電子増倍管は、フォトカソード、アノード、及び一連のダイノード(電極)を含む真空光電管であり、各ダイノードは、連続的に前のダイノードよりも正の電位であり、最後のダイノードよりも高い正電位のアノードを伴う。フォトカソードから放出される光電子は、フォトカソードのダイノード電界によって加速され、大抵、ダイノードに衝突し、それによって後続のダイノード対ダイノードの電界によって加速される複数の二次電子が放出される。これらの二次電子のほぼ全てが別のダイノードに衝突し、更なる電子を発生させる。大抵は複数のダイノードによる複数の増幅段階を経て、最終的に電子はアノードに到達する。従って光電子増倍管は、光子が吸収される度に電流のパルス(すなわち、電荷)を発生させ、適切な方向に光電子を放出する。発生した電荷は多数の電子における電荷と等しいので、利得が十分に高い場合、電子工学のノイズレベルを上回る電荷を発生させることが可能になる。そのため光電子増倍管は、電磁スペクトルの紫外域、可視域、及び近赤外域における光の非常に感度の高い検出器になりうる。これらの検出器は、複数のダイノード段階において、入射光によって生成された電流を1億回分(すなわち、160dB)増幅し、入射光束が非常に低い場合に、(例えば)個々の光子が検出されることを可能にする。

【0007】

イメージインテンシファイアは、例えば低光プロセスのビジュアル撮像を容易にするため、あるいは、例えば近赤外線すなわち短波長赤外線のような非可視光源を可視に変換するための光学系において検出される光の強度を増加させるために蛍光体を用いる、別の種類の真空管センサ装置である。典型的なイメージインテンシファイアにおいて、フォトカソードから放出された光電子は、高いエネルギー(通常、約1keVから約20keV)を伴って光電子が蛍光体に衝突し、その結果蛍光体が多数の光子を発生させるように、蛍光体に覆われた透明アノードに向かって加速される。いくつかのイメージインテンシファイアにおいて、各光電子から複数の二次電子を発生させるために、フォトカソードと蛍光体との間にマイクロチャネルプレートが配置される。マイクロチャネルプレートがない場合でも、吸収された各光子についてイメージインテンシファイアの出力において複数の光子が発生しうる。放出された光子は、(例えば光ファイバ束又はレンズのような)光学部材によって画像センサへ導かれる。吸収された各光子は、多数の出力光子を発生させることができるので、非常に低い光レベルが検出及び測定され、いくつかの条件下では1つの光子の可能性すらある。

【0008】

EBCCDは、イメージインテンシファイアと同様に作動する別のセンサである。出力として蛍光体スクリーンの代わりに、例えばCCDのような画像センサが、フォトカソードから放出され電界によって加速された電子を検出するために用いられる。EBCCDに

において、フォトカソードとCCDとの間の電界を発生させるために約 - 2 k V 以上の電位差を用いることが一般的であり、それによって、フォトカソードによって放出された電子が加速し、高いエネルギーでCCDに衝突し、その後捕捉される多数の電子をCCD内部で発生させる。検出される各光子について複数の電子が発生するので、CCDの読出し及びダークノイズは、光子の直接的な検出に関する場合よりも重要ではない。イメージインテンシファイアと比べると、EBCCDは、蛍光体から画像センサへ光を伝導するために必要な光学部材にかかる費用が省かれ、それら光学部材によって生じる画像解像度の低下も回避される。

【0009】

図11は、窓53、窓53の内側表面に配置されたフォトカソード54、及び、フォトカソード54が真空ギャップ56によってCCD55から分離されるように筐体52の下端部に配置された電荷結合素子(CCD)55を含む筐体52を備える従来のEBCCD50を示す。CCDの電圧に対して負である電圧をフォトカソードに加えることによって、フォトカソード54とCCD55との間に電界が生じる。入来する光子61が窓53を通過して入り、フォトカソード54によって吸収されることによって、光電子が発生する。光電子62が、フォトカソード54の出力側面を通過して(すなわち、図面内の下方へ)抜け出るために十分なエネルギーを有する場合、光電子62はギャップ領域56へ入る。CCD55は、フォトカソード54に対して通常2 k V以上の正電位にあるので、光電子62は、約2 k e Vを上回るエネルギーに達するようにCCD55に向かって加速し、それによって光電子は一般に複数の電子をCCD55の内部で発生させる。CCD55の内部で発生した電子はその後、検出された光電子に関連する画像又は他のデータを発生させるように構成された処理システム(図示せず)へ(例えば、ピン57によって)伝導される。

【0010】

従来技術によるフォトカソードは、光子の吸収と光電子の放出とに関連する、相反する要件の間の困難なトレードオフを必要とする。好適なフォトカソードは、関連する波長において光子を吸収する高い確率と、吸収された光子から1つ(又は複数)の光電子を発生させる高い確率とを有する必要がある。好適なフォトカソードはまた、吸収された光子によって発生したあらゆる光電子がフォトカソードから抜け出る高い確率を有する必要がある。分厚いフォトカソードは、入射光子が吸収される確率を高めるが、その結果放出された光電子が抜け出る前に再結合される(すなわち、失われる)確率も高める。具体的には、再結合は通常、フォトカソードを形成する材料における欠陥又は不純物において生じるので、光電子がフォトカソード材料を通過して移動しなければならない距離が長くなると、光電子が欠陥又は不純物に遭遇し、再結合する確率が高くなる。材料は、材料の仕事関数に近いが、又はそれを上回るエネルギーを有する光電子のみが材料を抜け出る妥当な確率を有するという理由から、低い仕事関数を有さなければならない。

【0011】

一般的なフォトカソードは、比較的狭い範囲の波長に関して最適化される。例えば、一般に小さな粒子から散乱する光の量は、他の要因よりもとりわけ粒子又は欠陥のサイズと波長との比に依存するため、紫外線波長は、小さな粒子及び半導体ウェハの欠陥を検出するための半導体製造業において特に有用である。ほとんどのフォトカソード材料が紫外線を強力に吸収する。従来技術による、紫外線波長に関して最適化されたフォトカソードは通常、被照射面の近くで紫外線光子が吸収されるために、薄い必要がある。フォトカソードが薄い場合、光電子は、フォトカソードの出力面から抜け出る確率が低くなりうる。一般に、蛍光体又は画像検出器に面したフォトカソードの側面において抜け出る光電子のみが出力信号を発生させることになる。紫外線波長に関して最適化されたそのような薄いフォトカソードは、長い波長における入射光子のうちの大半が吸収されずにフォトカソードを通過することにより、一般に可視波長及び赤外波長における低い感度を有することになる。

【0012】

従来技術によるフォトカソードの別の制限は、放出された光電子のエネルギーが、吸収さ

10

20

30

40

50

れた光の波長によって変化し、紫外線光子が吸収される場合、数 eV になりうる点である。光電子が放出される方向はランダムであるので、この電子エネルギーは、水平方向における信号の拡散をもたらす。更に、拡散は、吸収された光子の波長によって変化し、波長が短いほど大きくなる。厚いフォトカソードにおいて、光電子は通常、放出される前に複数の衝突を受け、フォトカソードの温度によって決定されるエネルギーに近いエネルギーを有する可能性が高くなる（すなわち、電子が熱化される可能性が高い）。しかし、電子がフォトカソード内で複数の衝突を受けると、電子は、従来技術によるフォトカソード材料の表面上の及び/又はその内部の高レベルの欠陥によって再結合し失われる可能性が高い。従って、エネルギー拡散の低減は、実質的な感度の低下という代償を払うことになる（ほとんどの入射光子がもはや信号を生成しないことになる）。

10

【0013】

1つの結晶の（単結晶）シリコンは、今説明した欠点の多くを克服するように思われる。シリコンは、約 $1.1 \mu\text{m}$ よりも短い波長の全てを吸収する。シリコン結晶は、非常に高い純度及び非常に少ない結晶欠陥を伴って成長しうる。高品質の単結晶シリコンにおける電子の再結合寿命は長いマイクロ秒数を有し、最高品質の材料においては何百マイクロ秒にもなりうる。そのような長い再結合寿命によって、表面から何ミクロンも離れて発生した電子が、低い再結合の可能性を伴って表面まで移動することが可能になる。

【0014】

しかし、多くの利点があるにも関わらず、商用目的のシリコンベースのフォトカソードの開発は、2つの主な欠点によって妨げられてきた。

20

【0015】

シリコンの1つの欠点は、光子の吸収によって発生する光電子の放出を妨害する比較的高い仕事関数（アレン（Allen）及びゴベルリ（Gobelli）著、「原始的に清浄なシリコンの仕事関数、光電子閾値、及び表面状態」（"Work Function, Photoelectric Threshold, and Surface States of Atomically Clean Silicon"）、1962年1月発行のフィジカル・レビュー127巻、150 - 158頁、によると約 4.8 eV ）を有することである。材料の仕事関数は、フェルミ準位における電子と真空準位における（すなわち、材料から抜け出た）電子との間のエネルギー差である。シリコンの比較的大きいバンドギャップは、熱化された電子がシリコンから抜け出ることができないことを意味する。シリコンの表面近くで吸収された紫外線光子でさえ、光電子が抜け出るために十分なエネルギーを有さないために、多くの光電流を生成しない。例えば、 6.5 eV の光子エネルギーは、（直接的な吸収は、そのような波長における間接的な吸収より起こりやすいので）約 3 eV のエネルギーを有する光電子を生成する。約 3 eV のエネルギーを有する光電子は、シリコンの仕事関数により、シリコンから抜け出ることができない。

30

【0016】

フォトカソード材料としてシリコンを用いることの第2のより深刻な問題は、シリコンは、その表面に自然酸化物を非常に生じ易いことである。真空状態でさえ、真空において存在する少量の酸素及び水分がシリコンの表面と反応すると、自然酸化物がやがて生じることになる。シリコンと二酸化シリコンとの間の境界面は、電子の再結合の可能性が非常に高い、（ダングリングボンドによる）欠陥を有する。更に、二酸化シリコンのバンドギャップは大きく（約 8 eV ）、酸化物が非常に薄い場合ですら（非常に滑らかなシリコン表面上の自然酸化物は通常約 2 nm の薄さである）、電子が抜け出るために克服しなければならない仕事関数を上回る更なる障害をもたらす。酸化物境界面に対するシリコンにおける欠陥密度は、自然酸化物を除去し、例えば約 $900 - 1000$ といった高温で熱酸化物を増大させることによって低減されうる。そのような層は、約 1.5 nm から 2 nm の厚さまで増大した場合、安定しうる。しかし、良質の熱酸化物は、シリコンとの境界面において著しい欠陥密度（通常、 cm^2 あたり 10^9 から 10^{11} の欠陥）を有し、 2 nm 付近の最小限の厚みで結合した酸化物の高いバンドギャップはやはり、仕事関数を克服することができて電子が抜け出ることに対する著しい障害を与える。シリコンにおける自然酸化物層の増大を防ぐために薄い窒化シリコン層が用いられうるが、欠陥の密度は、

40

50

二酸化シリコン境界面に対するシリコンよりも窒化シリコン境界面に対するシリコンにおいて高く、窒化シリコンに関するバンドギャップ（約 5 eV）は、大半の電子が表面から抜け出るのを妨げるのに十分なほど大きい。これらの理由により、シリコンは、フォトカソードとしての目立った商業的使用が見られなかった。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0017】

【特許文献1】米国特許出願公開第2006/0055321号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0018】

従って、必要とされるのは、従来技術の制限の一部あるいは全部を克服するフォトカソードである。

【課題を解決するための手段】

【0019】

本発明は、シリコン基板、シリコン基板の少なくとも出力面上に形成されたホウ素（第1）層、及びホウ素層の上に形成された低仕事関数（第2）層を含むフォトカソード構造に関する。シリコン基板は、捕捉すべき光の波長に部分的に依存する約10nmから約100μmの範囲の厚みを有する基本的に無欠陥の単結晶（1つの結晶の）シリコンであることが望ましい。ホウ素層は、1 - 5 nm（好適には約2 nm）の範囲内の厚みを有するピンホールフリーホウ素層を生成するように、清浄かつ滑らかなシリコンの上に（例えば、約600 から800 の間の）高温堆積処理を用いて形成されることが望ましく、それによって、ホウ素層は、酸化に対してシリコン表面を確実に密封することによってシリコンの酸化の問題を回避する。低仕事関数材料（例えば、セシウムのようなアルカリ金属か、あるいは酸化セシウムのようなアルカリ金属酸化物のいずれか）がその後、シリコン基板からの電子の放出を可能にするためにホウ素層の上に堆積され、それによって低仕事関数材料層は、負電子親和素子を効率的に生成することによってシリコンの比較的高い仕事関数の問題を回避する。このように、単結晶シリコン基板の上に形成された滑らかなホウ素層及び低仕事関数材料層の両方を有するフォトカソードを生成することによって、本発明は、シリコンベースのフォトカソードの広範な商業的使用を妨げていたマイナス面を回避しつつ、シリコンの有益な性質（すなわち、サブ - 1 μm波長の吸収、高い純度 / 少ない欠陥の材料、及び長い電子再結合時間）を提供する。

20

30

【0020】

本発明の様々な他の実施形態によると、創意的なフォトカソード構造の有益な性質を更に高めるために様々な追加の層及び構造が用いられる。いくつかの実施形態において、光子の吸収を低減しうる酸化物及び欠陥を更に防止するために、シリコン基板の被照射（第1）面上に第2のホウ素層（第3層）が形成され、光子の吸収を更に増やすために第3層の上に反射防止材料層（第4層）が配置される。いくつかの実施形態において、電子を出力面に向かって優先的に移動させるためにシリコン基板の被照射面と出力面との間に外部電位差を発生させるために、金属フレーム又は金属グリッド及び電圧源が用いられる。また別の実施形態において、電子が再結合し失われうる被照射シリコン表面から離すように電子を導く電位勾配を生じさせるために、ホウ素（又は別のp型ドーパント）は、p型ドーパント領域を形成するように被照射面を介してシリコン基板内へ拡散される。

40

【0021】

別の特定の実施形態によると、本発明の創意的なフォトカソード構造は、優れた低光感知性能を示すセンサを提供するために様々なセンサ構造に組み込まれる。（センサの受光面に隣接して位置付けられた）フォトカソードに加え、これらのセンサ構造は、フォトカソードの出力面に面し、かつ介在するギャップによって低仕事関数材料層から分離された検出面を有する検出素子（例えば、CCD又はCMOS画像センサ）を含み、検出素子は、フォトカソードの出力面を介して放出された光電子を検出し、光電子の捕捉を示す電気

50

信号を発生させるように機能する。いくつかのセンサ実施形態において、センサ構造は、フォトカソードの頂部に窓を有してよい（又は有さなくてもよい）電子衝撃型電荷結合素子（EBCCD）である。本発明の他の実施形態において、センサは、フォトカソードの頂部に窓を有してよい（又は有さなくてもよい）イメージインテンシファイアである。本発明のまた別の実施形態において、センサは、フォトカソードの頂部に窓を有してよい（又は有さなくてもよい）光電子増倍管である。

【0022】

いくつかのセンサ実施形態において、被照射面における酸化物の形成を防ぐためにフォトカソードの被照射面上に第2のホウ素層が形成され、光子の捕捉効率を高めるために第2のホウ素層の上に反射防止材料層が提供される。これらの実施形態のうちいくつかにおいて、反射防止材料層は、窓とフォトカソードとの間に配置されるが、他の実施形態では、反射防止材料層もセンサの受光面として機能し（すなわち、センサはフォトカソードの被照射面の上に窓を有さない）、センサによる光子の捕捉効率を更に高める。フォトカソードの被照射面の上に窓を含む他のセンサ実施形態において、光子捕捉効率を高めるために反射防止材料層が窓の上に提供される。

10

【0023】

本発明のいくつかの実施形態において、本発明のフォトカソードを含むセンサは、受光面上に追加のホウ素層を有する（すなわち、検出素子の表面がフォトカソードに面する）シリコンベースの検出素子も含む。例えば、センサが電子衝撃型CCD（EBCCD）であり検出素子が（通常、シリコン基板上に形成される）CCDである場合、CCDの受光面における二酸化シリコン層の形成を防ぐことによってセンサの電子捕捉効率を高めるために、製造中、CCDの受光面上に直接ホウ素層が形成される。他の実施形態において、センサは、（CCDの代わりに）CMOS検出器を含み、CMOS検出器の受光面上に追加のホウ素層が形成される。

20

【0024】

本発明の他の実施形態において、創意的なフォトカソードを含むセンサは、ウェハ、レチクル、又はフォトマスク検査システムにおいて用いられる。具体的には、創意的なシステムは、サンプル/ウェハ上に光を送るための照明源（例えば、レーザシステム）、サンプル/ウェハを通過する又はそれらによって反射した光子を検出するために本明細書で説明される創意的なフォトカソードのうちのいずれかを用いる1つ又は複数のセンサ（例えば、光電子増倍管、イメージインテンシファイア、又はEBCCD）、及び、照明源からサンプル（ウェハ、レチクル、又はフォトマスク）へ、及びサンプルからセンサへ光/光子を導くための関連光学系を含む。

30

【図面の簡単な説明】

【0025】

本発明は、添付の図面において、限定的にではなく一例として示される。

【0026】

【図1】本発明の簡略化した実施形態に従ってシリコン基板上に形成されたフォトカソードを示す断側面図である。

【図2（A）】本発明の別の特定の実施形態に従ってシリコンフォトカソードを示す断側面図である。

40

【図2（B）】本発明の別の特定の実施形態に従ってシリコンフォトカソードを示す断側面図である。

【図2（C）】本発明の別の特定の実施形態に従ってシリコンフォトカソードを示す断側面図である。

【図3】本発明の別の典型的な実施形態に従って形成されたフォトカソードのシリコン基板上に形成されたドーピング及び追加の構成を示す拡大された部分断側面図である。

【図4】本発明に従って形成されたフォトカソードのシリコン基板の内側の典型的な電子エネルギーレベルを示すエネルギー図である。

【図5（A）】本発明の別の特定の実施形態に従うフォトカソードを含む典型的なセンサ

50

を示す断側面図である。

【図５（Ｂ）】本発明の別の特定の実施形態に従うフォトカソードを含む典型的なセンサを示す断側面図である。

【図５（Ｃ）】本発明の別の特定の実施形態に従うフォトカソードを含む典型的なセンサを示す断側面図である。

【図６】本発明の別の実施形態に従う検査システムを示す簡略化した図である。

【図７（Ａ）】本発明の更なる実施形態に従う検査システムを示す簡略化した図である。

【図７（Ｂ）】本発明の更なる実施形態に従う検査システムを示す簡略化した図である。

【図７（Ｃ）】本発明の更なる実施形態に従う検査システムを示す簡略化した図である。

【図７（Ｄ）】本発明の更なる実施形態に従う検査システムを示す簡略化した図である。

【図８】本発明の別の実施形態に従う別の検査システムを示す簡略化した図である。

【図９】本発明の別の実施形態に従う別の検査システムを示す簡略化した図である。

【図１０】本発明の別の実施形態に従う別の検査システムを示す簡略化した図である。

【図１１】従来のセンサを示す断側面図である。

【発明を実施するための形態】

【００２７】

本発明は、半導体検査システムのための低光センサにおける改善に関する。以下の説明は、特定の応用及びその要件の文脈において提供されるように、当業者に、本発明の製造及び利用を可能にさせるために提示される。本明細書において用いられる場合、例えば「頂部」、「底部」、「上の」、「下の」、「上へ」、「上方へ」、「低い」、「下へ」及び「下方へ」といった方向を示す用語は、説明目的のために相対的な位置を提供することが意図されており、絶対的な構造の言及を示すことは意図されていない。好適な実施形態への様々な変更が当業者には明らかとなり、本明細書で定義される一般原理は他の実施形態にも適用されうる。従って本発明は、図示及び説明された特定の実施形態に限定されることは意図されておらず、本明細書に開示された原理及び新規特徴と整合が取れた最も広い範囲に一致する。

【００２８】

図１は、本発明の一般化された実施形態に従うフォトカソード１００を断面図で示す。フォトカソード１００は一般に、上向きの被照射（上／第１）面１０２及び反対側の下向きの出力（底／第２）面１０３を有するシリコン基板１０１と、少なくとも出力面１０３上に配置されたホウ素（第１）層１０４と、ホウ素層１０４の下面に配置された低仕事関数（第２）層１０５とを含む。フォトカソード１００は、正しく位置付けられた場合、被照射（上）面１０２を通してシリコン基板１０１へ入る光子１１０が吸収され、通常、出力面１０３を通して基板１０１から放出される光電子１１２を生成する、という点において、従来のフォトカソードと同様に作動する。但し、図１は被照射面１０２上に窓及び／又は保護被覆及び／又は反射防止被覆が任意選択的に存在することを示すために、被照射面１０２を囲む斜線の構造を示し、それらのうちいくつかは、以下で説明する様々な特定の実施形態において扱われる。

【００２９】

本発明の態様によると、シリコン基板１０１は好適には、約 10^{19} cm^{-3} を下回るレベル、すなわち、約 $0.005 \Omega \text{ cm}$ 以上の抵抗率のドーピングによってドーパされたｐ型の単結晶シリコン（すなわち、１つの結晶のシリコン）を備える。ドーパント濃度が高くなると少数キャリア寿命及び拡散距離が減少するので、例えば約 $1 \mu\text{m}$ よりも薄いシリコンのようにシリコンが非常に薄い場合、約 10^{19} cm^{-3} より高いドーパント濃度が用いられうるが、シリコンが約 $1 \mu\text{m}$ よりも厚い場合、約 10^{19} cm^{-3} より低いドーパント濃度が好適になりうる。他の実施形態において、シリコン基板１０１は、多結晶質シリコン、すなわち複数の結晶のシリコンを備える。フォトカソードの意図された波長動作範囲に依存して、シリコンは、約 10 nm から約 $100 \mu\text{m}$ の間の厚さであってよい。シリコン基板１０１は、約 1.1 eV のバンドギャップを示すので、約 $1.1 \mu\text{m}$ より短い真空波長を有する光が吸収される。シリコン基板１０１の 1.1 eV のバンドギャッ

ブは間接であるので、スペクトルの赤色及び赤外部分における波長の吸収は弱い。シリコン基板 101 は約 3.5 eV の直接バンドギャップも有するので、深い紫外線波長を強力に吸収する。フォトカソード 100 の意図された使用目的に依存して、シリコン基板 101 は、約 20 nm から約 100 μ m の範囲の厚み T1 を有する。例えば、スペクトルの赤外部分において光子を吸収する高い確率を容易にするために、シリコン基板 101 は、約 10 μ m 又は数十 μ m の厚み T1 を持つように形成される。あるいは、紫外線波長を吸収するために、シリコン基板 101 は、数十 nm から約 100 nm の範囲の厚み T1 を持つように形成される。実用的な実施形態において、シリコン基板 101 は、真空紫外線から可視スペクトルの赤端付近の約 670 nm までの波長範囲にわたって無反射入射光子の少なくとも 85% を吸収するために、約 1 μ m の厚み T1 を有する。シリコン基板 101 が、周知の技術を用いて非常に低い結晶欠陥の密度及び高い純度で増長された単結晶（1つの結晶の）構造を備える場合、シリコン基板 101 の内部で発生した光電子は、数十又は数百マイクロ秒（ μ s）の潜在寿命を有する。更に、単結晶構造により、光電子は、余分なエネルギーの大半を損失し、再結合の低い可能性を伴って部分的に又は大部分が熱化する。

10

【0030】

本発明の別の態様によると、ホウ素層 104 は、シリコン基板 101 の出力面 103 上に直接的に配置された実質的に純粋なホウ素を備える。本明細書において用いる場合、ホウ素とシリコンとの境界面に関連する「直接」という語句は、Si/B 境界面において生じうる可能性がある SiB_x の薄い層（すなわち、少量の単一層）ではなく、出力面 103 とホウ素層 104 とを分離する持続的に介在する層（例えば、酸化物又は SiN_x の層）が存在しないことを意味するように意図される。但し、「直接的に」という語句は、シリコンとホウ素の一部との間の酸化物の存在を除外するものではない。ホウ素層 104 は、ホウ素が、約 1 nm から 5 nm、好適には約 2 から 3 nm の範囲内の厚み T2 を有するピンホールフリー被覆を形成するように、F.サルツビ（F.Sarubbi）等の「調整されたナノメートル深の p+n 接合形成のためのシリコンにおける α -ホウ素層の化学蒸着」（"Chemical Vapor Deposition of α -Boron Layers on Silicon for Controlled Nanometer-Deep p+n Junction Formation"）（ジャーナル・オブ・エレクトロニック・マテリアルズ（Journal of Electronic Materials）、39 巻、第 2 号（2010 年 2 月）、162 - 173 頁、ISSN 0361-5235）によって教示された技術を用いて高い温度（すなわち、約 500 を上回る、好適には約 600 から 800 の間の温度）で、清浄かつ滑らかなシリコン上に形成される。サルツビ等が引用文献の 163 頁で説明するように、例えばホウ素を堆積させる前に水洗浄及びその後の原位置熱浄化によってシリコンから全ての自然酸化物を除去することが重要である。ホウ素のより低い温度による堆積も可能であるが、被覆が均一でなくなり、2 nm より厚いコーティングは、ピンホールフリーであることを確かめる必要があるだろう。ホウ素層 104 の利点は、清浄なシリコン表面に付加された場合、そのようなピンホールフリーコーティングが、出力面 103 における自然酸化物の形成を防ぐことである。シリコン基板 101 と低仕事関数材料層 105（例えば、アルカリ金属又はアルカリ金属酸化物）との間にホウ素層 104 を提供することの利点は、ホウ素が、低仕事関数材料とシリコンとの間に二酸化シリコン層が生じるのを防ぐことである。上述したように、二酸化シリコン層は高いバンドギャップを有し、薄い層でも、電子の大部分がシリコンから離れることを妨害しうる。従ってホウ素層によって、低いエネルギーを有する電子でも、シリコンから離れ、アルカリ金属又はアルカリ金属酸化物の層へ入ることが可能になる。例えば酸化セシウムのような低仕事関数材料を用いてシリコンフォトカソードを被覆することは当該技術において周知であるが、従来技術による装置は、シリコン層が被覆された時に酸化物を伴わない場合でも、シリコンと低仕事関数材料との間に二酸化シリコン境界面が生じることを回避することができなかった。すなわち、シリコン上の不浸透性ピンホールフリー保護層がない場合、酸素は結局シリコン表面へ移動し、酸化物層を形成する。ホウ素を用いて層 104 を形成する利点は、薄いピンホールフリーホウ素層ですら、酸素を浸透させずシリコンを保護することである。ホウ素

20

30

40

50

コーティングの別の利点は、シリコンとホウ素との境界面における界面トラップ及び欠陥の密度が、シリコンと二酸化シリコンとの境界面におけるそれよりも一般的に低いことである。

【0031】

本発明の別の態様によると、出力面103において負電子親和素子を生成することによって出力面103における仕事関数を低下させるために低仕事関数材料層105が提供される。一実施形態において、低仕事関数材料層105は、電子がシリコン基板101から容易に抜け出ることを可能にする低い仕事関数を有するアルカリ金属又はアルカリ金属酸化物のうちの少なくとも1つを備える。本発明の実施形態において、アルカリ金属又はアルカリ金属酸化物は、ホウ素層103の上端（すなわち、フォトカソード100の出力側）において被覆する。いくつかの実施形態において、それらのアルカリ金属又はアルカリ金属酸化物は、セシウム又は酸化セシウムである。他の実施形態において、他のアルカリ金属、他のアルカリ金属酸化物、様々なアルカリ金属又はアルカリ金属酸化物の混合物が用いられる。いくつかの実施形態において、（複数の）アルカリ金属又は（複数の）アルカリ金属酸化物に他の要素が追加される。好適な実施形態において、アルカリ金属又はアルカリ金属酸化物の層105は、約2nmを下回る厚みT3を有する。いくつかの実施形態において、層105は、約1nmを下回る厚みである。セシウム及び酸化セシウムの層は、何十年もの間、半導体フォトカソードにおいて負電子親和面を生成するために用いられてきた。最近の記述は、2009年8月7日付のB.S.ヘンダーソン（B.S.Henderson）による「負電子親和GaAsフォトカソードの研究」（"Study of Negative Electron Affinity GaAs Photocathodes"）と題された報告書において見ることができる。

【0032】

図2（A）から2（C）は、本発明の様々な別の実施形態に従う創意的なフォトカソードを示し、それらにおいて、創意的なフォトカソード構造の有利な特質を更に高めるために追加の層及び構造が用いられる。例示された典型的な実施形態は、網羅的であることは意図されておらず、以下で説明する追加の層及び構造の組み合わせを含むフォトカソードが可能であることが分かる。

【0033】

図2（A）は、第1の代替実施形態に従うフォトカソード100Aを断面図で示す。上述した構造と同様に、フォトカソード100Aは、出力面103上に配置されたホウ素層104と、ホウ素層104の上に配置された低仕事関数層105とを有するシリコン基板101を含む。更に、フォトカソード100Aは、ホウ素層103の形成に関して上述した技術を用いてシリコン基板101の上向きの被照射（第1）面102上に形成された第2のホウ素層（第3層）106を含む。ホウ素は紫外線波長において吸収するが、約3nm以下の厚みT4を有する第2のホウ素層106を形成することによって、入射光子のうちの僅かしか吸収されない。更に、ホウ素はシリコンにおけるp型ドーパントであるため、ホウ素被覆の存在は、被照射面102から光電子を引き離す傾向がある。そのため、被照射面102における電子の再結合の可能性が低減することによってフォトカソード100Aの効率が向上する。図3に関連して以下で説明するように、表面において非常に浅い層でp型ドーパントを注入することによって同様の結果に達することができる。本発明の他の実施形態（図示せず）において、被照射面103はホウ素層によって保護されていないが、代わりにホウ素（又は別のp型ドーパント）は被照射面102の下にシリコンに注入（拡散）される。被照射面における酸化物被覆の存在は、量子効率の著しい低下を必要とせず、酸化物の厚みを適切に選択することによって、関連する波長におけるシリコンの反射率を有効に低減することができる。

【0034】

図2（B）は、シリコン基板101、出力面103上に配置された下側ホウ素層104、ホウ素層104の上に配置された低仕事関数層105、及び被照射面102上に配置された上側ホウ素層106を含む、第2の代替実施形態に従うフォトカソード100Bを断面図で示す。フォトカソード100Bは、上側ホウ素層106の上に配置された1つ又は

複数の反射防止被覆層（第４層）１０７を更に含むという点において、上述した実施形態と異なる。反射防止被覆層１０７は、二酸化シリコン、窒化シリコン、フッ化マグネシウム、及び二酸化ハフニウム（に限定されないがそれら）を含む、紫外線及び深紫外線反射防止層のために使用できる材料を用いて形成される。紫外線波長における高い量子効率を必要とするフォトカソードの場合、紫外線光子は被照射面１０２付近で吸収されるので、被照射面１０２及びその付近におけるトラップ電荷及び欠陥の密度は低く維持されなければならない。上述したように、シリコン基板１０１の表面を直接的に覆うあらゆる誘電物質は、誘電物質の大部分及びその表面において欠陥及びトラップ電荷を生じ、特に表面付近で吸収される深紫外線波長に関して、フォトカソードの量子効率を低下させることになる。まず薄い（例えば、約２ｎｍから５ｎｍの）ピンホールフリー層として上側ホウ素層１０６を形成することによって、被照射面１０２は、基本的に欠陥及びトラップ電荷がない状態を維持し、フォトカソード１００Ｂは、反射防止被覆層１０７によって提供される改善された高い量子効率を含む。また上側ホウ素層１０６は、反射防止被覆層１０７の上に配置されるあらゆる追加の層におけるトラップ電荷からシリコン基板１０１を少なくとも部分的に保護することもできる。

10

【００３５】

図２（Ｃ）は、シリコン基板１０１、出力面１０３上に配置された下側ホウ素層１０４、ホウ素層１０４の上に配置された低仕事関数層１０５、及び被照射面１０２上に配置された上側ホウ素層１０６を含む、第３の代替実施形態に従うフォトカソード１００Ｃを示す。フォトカソード１００Ｃは、シリコン基板１０１において生じる電子を出力面１０３に向かつて優先的に移動させるために、被照射面１０２と出力面１０３との間の外部電位差を発生させるように外部電圧源１２０が接続されたという点において、上記実施形態と異なる。この実施形態において、出力面１０３は、被照射面１０２に対して正電位で保持される。基板１０１を形成している大量にドーパされたシリコンは弱い導体であるため、被照射面１０２と出力面１０３との間の適切な（例えば、約５Ｖを下回る）電位差の発生は、出力面１０３を通る光電子の高速な流れを発生させるために役立つ。いくつかの実施形態において、フォトカソード１００Ｃの相対する面の良好な電気接続を確実にするために、フォトカソードの端部周囲の金属縁（図示せず）又はまばらな金属グリッド１０８－１及び１０８－２が上側ホウ素層１０６及び低仕事関数層１０５の上にそれぞれ形成される。

20

30

【００３６】

図３は、シリコン内の光電子を出力面１０３の方へ向かわせるために、ドーパントのグラデーションが、被照射面１０２及び出力面１０３の一方又は両方から基板１０１内へ意図的に広げられた、本発明の別の実施形態に従うフォトカソード１００Ｄの断面図を示す。簡潔に示すために低仕事関数材料層は省かれる。示された実施形態（すなわち、被照射面１０３が上側ホウ素層１０６によって覆われた実施形態）において、薄いケイ化ホウ素層１２６がシリコンとホウ素との間に形成される。ホウ素の一部は、（影で表す領域によって示される）拡散領域１０１－１を成すようにシリコン内部へ広がることによって、電子を被照射面１０２から離し基板１０１の方へ動かすことに寄与する電位勾配が生じる。被照射面にホウ素被覆を有さない本発明のこれらの実施形態において、例えばホウ素のようなｐ型ドーパントは、拡散領域１０１－１を成すために、被照射面からシリコン内部へ注入又は拡散される。同様に、出力面１０３において、シリコン基板１０１とホウ素層１０４との間に非常に薄い（１つ又は少数の単一層の）ケイ化ホウ素層１３４が形成され、ホウ素の一部は、（影を付けて示された）拡散領域１０１－１を成すようにシリコン内部へ短い距離を拡散する。いくつかの実施形態において、拡散層１０１－２は、出力面１０３付近の電界の勾配を変更するために、シリコン内部へ注入される他のｐ型又はｎ型ドーパントを備えてよい。

40

【００３７】

図４は、上述した実施形態に従って形成された典型的な創意性のあるフォトカソードの断面における電子位置の関数として典型的なエネルギーレベルを示す図である。垂直方向は

50

エネルギーを表す。但し、この図は一定の縮尺ではなく歪みがあり、フォトカソードの重要な態様をより明確に示すために、いくつかの態様が強調される。フォトカソード 4 1 0 の被照射（上）面が左側に示され、出力（底）面 4 1 2 が右側に示される。点線 4 0 2 は、外部電圧がフォトカソードに加えられていない場合のフォトカソードにおけるフェルミ準位を表す。外部電圧が加えられていない場合、フェルミ準位は基本的に、フォトカソードのどの部分でも同一である。

【 0 0 3 8 】

線 4 0 3 は、半導体における価電子帯の頂部を表す。フォトカソードの被照射面 4 1 0 は、顕在するドーピングあるいは表面のホウ素被覆（存在しても僅か数 nm の厚みなので図示せず）からのホウ素の拡散のいずれか、又はその両者によって、大幅に p ドープされている。表面付近の大幅な p 型ドーピングによって、フェルミ準位は、価電子帯の頂部のすぐ上である。例えば、高いレベルのホウ素ドーピングの場合、フェルミ準位と価電子帯の頂部とのギャップは約 0.045 eV 程度に小さくなるはずである。表面から離れてドーピング濃度が下がるにつれ、フェルミ準位と価電子帯の頂部とのギャップは大きくなり、それによって、矢印 4 2 0 によって示すように伝導帯及び価電子帯は表面から離れると下へ曲がる。

【 0 0 3 9 】

線 4 0 4 は、伝導帯の底部を表す。伝導帯の底部と価電子帯の頂部との間の差分はバンドギャップと呼ばれる。シリコンの場合、バンドギャップは約 1.1 eV であるが、ドーパント濃度が高い場合は低減する。光子の吸収によって自由電子が生成された場合、その電子は伝導帯の中に存在する。電子は初めに、光子のエネルギーとバンドギャップとの差分に概ね等しいエネルギーを伴って生成される。シリコンにおいて、余分なエネルギーは大抵急速に失われるので、電子は、伝導帯の底部に近いエネルギーに迅速に達する。伝導帯において矢印 4 2 0 によって示される下方への傾斜が非照射面に近いたため、その表面付近で生成されたあらゆる電子は、その表面から迅速に離れていき、被照射面 4 1 0 又はその付近に存在するあらゆる欠陥において再結合する可能性が低い。深紫外線光子は、数 nm の被照射シリコン面 4 1 0 に非常に吸収されやすいので、表面付近のこのドーパントプロファイルによって深紫外線波長におけるフォトカソードの高い量子効率が可能になる。

【 0 0 4 0 】

フォトカソードの第 2 の表面 4 1 2 は、上述したように、シリコンに直接接する薄いホウ素層の上を低仕事関数材料によって被覆される。低仕事関数材料は伝導性であるので、そのフェルミ準位は伝導帯の中にある。これは、フェルミ準位と伝導帯との合流点として実線 4 2 5 によって示される。ホウ素層及び低仕事関数層の両方が僅か数 nm の厚さであるので、それらは 1 つの組み合わせさせた導電層として示される。上述したように、ホウ素の一部はシリコン内部へ拡散し、表面付近に p 型シリコンを生成する。いくつかの実施形態において、追加のドーパントがシリコンに含まれる。電子は、低仕事関数材料から p 型ドーパントシリコンへ移動することによって自身のエネルギーを低減しうる。それによって、表面 4 1 2 に正電荷が生じる。この正電荷により、伝導帯及び価電子帯は 4 2 2 で示すように下へ曲がる。4 2 2 に示す伝導帯及び価電子帯における傾斜の形状は、シリコン表面 4 1 1 から離れてシリコン内部へ向かうドーパント濃度プロファイルと、低仕事関数材料からシリコン内部への電子の移動によって生じる空乏領域との両方が存在することにより、単調にはならない。ドーパント濃度プロファイルの精密な形状に依存して、表面付近の伝導帯及び価電子帯のエネルギー曲線における小さい局所極小又は極大が存在しうる。単調な形状からのそのような小さな偏差は、素子の高さが僅か 10 分の何 eV かであり、及び / 又は任意の最大の幅が僅か数 nm である場合、素子の性能に著しい影響は与えない。

【 0 0 4 1 】

点線 4 0 5 は、真空エネルギーレベルを表す。4 0 5 と 4 2 5 との差は、フォトカソード表面 4 1 2 に接する低仕事関数材料の仕事関数を表す。いくつかの好適な実施形態において、低仕事関数材料の仕事関数は、真空レベル 4 0 5 が、シリコン内部の伝導帯の実質的に平坦な領域のエネルギーレベルを下回るのに十分なほど低い。その結果、負電子親和素子

10

20

30

40

50

として知られるものが生じる。シリコンの伝導帯の中にある電子は、表面 4 1 2 から容易に抜け出ることができるので、効率的なフォトカソードをもたらす。真空レベル 4 0 5 が、シリコン内部の伝導帯の実質的に平坦な領域を上回る 1 0 分の何 e V かである場合でも、抜け出る電子の可能性は未だ非常に高くなりうる。真空レベル 4 0 5 がシリコン内部の伝導帯の実質的に平坦な領域を上回る場合、電子は、表面 4 1 2 が表面 4 1 0 と比べて僅かに正になっている場合、表面 4 1 2 から容易に抜け出ることができる。

【 0 0 4 2 】

表面 4 1 0 に対して正の電圧を表面 4 1 2 へ加えることにより、左から右へのフェルミ準位の傾斜の下りがもたらされ、伝導帯及び価電子帯に本来備わっている傾斜に同様の傾斜が追加されることになる。それによって、表面 4 1 0 から表面 4 1 2 へ向かって移動している電子が加速し、抜け出る高い可能性を有するために十分なエネルギーを伴って表面 4 1 2 へ到達することができるだろう。

10

【 0 0 4 3 】

シリコンをベースとする従来技術のフォトカソードにおいて、シリコンの表面 4 1 1 上に薄い酸化物の層が存在するだろう。この酸化物は、僅かに約 2 n m ほどの厚さであるが、抜け出ようとするあらゆる電子に対する実質的な障害を意味する。二酸化シリコンのバンドギャップは、約 8 e V である。そのような大きなバンドギャップの結果、シリコン内部の伝導帯よりも数 e V 高い伝導帯中の局所ピークが生じる。表面 4 1 1 上のホウ素層は、シリコン表面に酸素又は水分が及ぶのを防止し、酸化物層の増大を防ぐので、効率的なフォトカソードを可能にする。

20

【 0 0 4 4 】

図 5 (A) から 5 (C) は、別の特定の実施形態に従う様々なセンサ構造を示す簡略化された断面図であり、センサの実施形態の各々は、上述した実施形態のうちの少なくとも 1 つに従う創意的なフォトカソード構造を含むので、例えば半導体検査システムにおいて用いることができる優れた低光感知性能を有するセンサを提供する。図 5 (A) から 5 (C) に示す簡略化されたセンサ構造は E B C C D 型センサと整合するが、図示されたセンサ構造は他のセンサ構造 (例えば、イメージインテンシファイアセンサ又は光電子増倍管センサ) にも同様に適用可能であることが分かる。

【 0 0 4 5 】

図 5 (A) は、本発明の第 1 のセンサ実施形態に従うセンサ 2 0 0 A を断面図で示す。センサ 2 0 0 A は一般に、上述したシリコンフォトカソード 1 0 0 と、検出素子 2 1 0 (例えば、C C D 又は C M O S 画像センサ) と、検出素子 2 1 0 の検出表面 2 1 2 が、介在するギャップ領域 2 0 6 によってフォトカソード 1 0 0 の低仕事関数材料 (第 2) 層 1 0 5 から分離されるように、フォトカソード 1 0 0 と検出素子 2 1 0 との間に作動的に連結された筐体 2 1 0 とを含む。フォトカソード 1 0 0 は、センサ 2 0 0 A の受光面 2 0 3 A に隣接して配置され、かつ被照射面 1 0 2 が検出素子 2 1 0 の外方へ向くように配置され、それによって、フォトカソード 1 0 0 が発光 (例えば、光子 1 1 0) を受け、介在するギャップ領域 2 0 6 を介して検出素子 2 1 0 へ光電子 1 1 2 を放出するようにフォトカソード 1 0 0 を方向付ける。図 1 に関連して上述したように、フォトカソード 1 0 0 は、(例えば、単結晶の) シリコン基板 1 0 1 の出力 (第 2) 面 1 0 3 上に形成されたホウ素 (第 1) 層 1 0 4、及びホウ素層 1 0 4 の上に配置された低仕事関数材料層 1 0 5 を有することによって特徴付けられる。ほとんどの C C D 及び C M O S 画像センサ素子と同様、検出素子 2 1 0 は、光電子 1 1 2 を検出するための感知構造と、検出された光電子に応じて (例えば、1 つ又は複数の出力ピン 2 1 7 による方法で) 電気信号 S を発生させるための回路とを含む。

30

40

【 0 0 4 6 】

例示した実施形態の態様によると、フォトカソード 1 0 0 は、内部が空にされた包体 (すなわち、主に真空中で満たされたギャップ領域 2 0 6) に関して、筐体 2 0 2 A の側壁及び他の部分と合わせて、非伝導性又は高抵抗性のガラス又はセラミック製窓 2 0 4 A に接着あるいは密閉封着されている。1 つの特定の実施形態において、窓 2 0 4 A とフォトカ

50

ソード１００との接着は、フォトカソード１００の端部周囲に配置された二酸化シリコン層によって形成される。いくつかの実施形態において、フォトカソード１００のシリコン基板１０１は、数十ミクロンから数百ミクロンの厚さであってよい。そのような厚みは、フォトカソードの上面に窓がなくても、外部からの気圧による力に十分に耐えるほど強い。窓２０４Ａを形成するために用いるのに適した材料は、融解石英、石英、アルミナ（サファイア）、フッ化マグネシウム、及びフッ化カルシウムを含む。

【００４７】

第１のセンサ実施形態の別の態様によると、適切な電圧源２２０がセンサ２００Ａに作動的に接続されると、検出素子２１０に向かってフォトカソードからギャップ領域２０６内へ放出される電子１１２を加速させるように作用する電界がフォトカソード１００と検出素子２１０との間に発生するように、センサ２００は、フォトカソード１００及び検出素子２１０に隣接して又はそれらの上に作動的に配置された（例えば、図２（Ｃ）に関連して上述したグリッド構造と同様の）伝導性構造を含む。いくつかの実施形態において、図２（Ｃ）に関連して上述したように、フォトカソード１００の出力面１０３は、第２の電圧源（図示せず）によって、被照射面１０２に対して約５Ｖより少なく正の電位に維持される。発光（光子）１１０が吸収されるとフォトカソード１００によって電子が放出され、フォトカソード１１０は電圧源２２０によって検出素子２１０に対して負の電位に維持されるので、ギャップ領域２０６内へ放出された電子１１２は、検出素子２１０へ向かって加速する。好適な実施形態において、電圧源２２０によって生じた電位差は、約１００Ｖから約１５００Ｖの範囲内である。

【００４８】

図５（Ｂ）は、フォトカソード１００Ｂ、（第２の）シリコン基板２１１Ｃ上に形成された検出素子２１０Ｂ（例えば、ＣＣＤ又はＣＭＯＳ画像センサ）、及び検出素子２１０Ｂから一定の距離にフォトカソード１００Ｂを保持する筐体２０２を含む第２のセンサ実施形態に従うセンサ２００Ｂを示す。図２（Ｂ）に関して上述したように、フォトカソード１００（Ｂ）は、シリコン基板１０１の被照射（第１）面１０２上に直接的に配置された第２のホウ素層（第３層）１０６と、第２のホウ素層１０６の上に配置された反射防止材料（第４）層１０７とを含むことによって特徴付けられる。この実施形態において、筐体２０２Ｂは、フォトカソード１００の上に配置された窓を含まないので、センサ２００Ｂの受光面２０３Ｂは、反射防止材料（第４）層１０７の出力（上）面によって形成される。従ってセンサ２００Ｂは、窓による反射又は吸収に起因する損失がないために窓を伴うセンサよりも感度が高い（すなわち、より少量の光を検出することができる）という利点を有する。そのためセンサ２００Ｂは、近赤外波長からエックス線波長までの比較的高い感度を示す。

【００４９】

図５（Ｃ）は、フォトカソード１００と、図５（Ａ）に関して上述したのと同様の方法で筐体２０２Ｃに固定されたシリコンベースの検出素子２１０Ｃ（例えば、（第２の）シリコン基板２１１Ｃ上に形成されたＣＣＤ又はＣＭＯＳ画像センサ）とを含む第３のセンサ実施形態に従うセンサ２００Ｃを示す。

【００５０】

第３のセンサ実施形態の態様によると、筐体２０２Ｃは、フォトカソード１００の上に配置された上窓部分２０４Ｃと、センサ２００Ｃによる光子の捕捉を改善するために窓２０４Ｃ上に形成された反射防止材料層２０７Ｃとを含む。別の実施形態において、フォトカソード１００と窓２０４Ｃとの間に追加の反射防止材料層（図示せず）が配置される（すなわち、フォトカソード１００は、例えば図２（Ｂ）に関して上述したフォトカソード１００Ｂを用いて実現される）。

【００５１】

第３のセンサ実施形態の別の態様によると、フォトカソード１００から放出される電子を画像センサ２１０Ｃによって効率的に吸収することを可能とするために、（第３の）ホウ素被覆層２１４Ｃは、フォトカソード１００に関して上述した技術を用いて画像センサ

210Cの検出(上)面212上に直接形成される。好適な実施形態において、フォトカソード100と画像センサ120との間のギャップ距離Gは、約100 μ mから約1mmの間である。ホウ素被覆層214Cは、低エネルギーの電子に関して画像センサ210Cの効率を改善するので、従来技術による素子における標準よりも低い加速電圧及び小さいギャップが用いられる。低い加速電圧及び小さいギャップの利点は、センサの空間分解能が改善され、応答時間が低減される(すなわち、最大動作周波数が増加する)ことである。シリコンフォトカソードにおける光電子の熱化も画像センサの空間分解能を改善する。

【0052】

本発明の他の実施形態において、ウェハ、レチクル又はフォトリソグラフィ検査システムは、サンプル/ウェハ上に光(光子)を送るための照明源(例えば、レーザシステム)と、サンプル/ウェハを通過するか又はそれらによって反射される光子を検出するために上述した創意的なフォトカソードのうちのいずれかを用いるセンサ(例えば、光電子増倍管、イメージンテンシファイア又はEBCCD)と、照明源からサンプル(ウェハ、レチクル又はフォトリソグラフィマスク)へ、及びサンプルからセンサへ光/光子を導くための関連する光学系を含む。それらの実施形態の例が図6から10に示される。

【0053】

図6は、暗視野及び明視野検査モードを有する検査システム300Aの主要成分を示す。システム300Aによって用いられる光学部材は、高開口数大視野対物レンズ128、倍率を設定又は調整するためのチューブレンズ139、及び上述した実施形態のうちのいずれかによって構成されるフォトカソードを含む検出器200を備える。暗視野モードで動作する場合、検出器200は、図5(A)から5(C)のうちのいずれかに示すものと同様のEBCCD又はイメージンテンシファイア構成における創意的なフォトカソードを含む。この検査システムの他の態様における更なる詳細は、参照によってその全体が本願に組み込まれる米国特許第7345825号において見るることができる。

【0054】

図7(A)から7(D)は、本発明の他の典型的な実施形態に従う創意的なフォトカソードを含む暗視野検査システムの態様を示す。図7(A)において、検査システム300B-1は、検査されているウェハ又はフォトリソグラフィマスク(サンプル)の表面20の上にレンズ又はミラー12を備える光学部材11を通過する光14によって直線18を照射する。集光光学部材21は、例えば22a及び22bのようなレンズ及び/又はミラーを用いて、その直線からセンサ200へ散乱光を向ける。集光光学部材の光軸28は、直線18の照射面にはない。いくつかの実施形態において、軸28は、直線18に対して概ね垂直である。センサ200は、例えば図5(A)、5(B)及び5(C)のうちのいずれかに示す実施形態に従う創意的なフォトカソードを含む、例えば線形アレイセンサのようなアレイセンサである。図7(B)、7(C)及び7(D)は、例えば図7(A)に示すような直線照射と組み合わせて、創意的なフォトカソードを伴う検出器200を含む複数の暗視野集光システムの別の構成(それぞれ300B-2、300B-3及び300B-4)を示す。これらの検査システムの更なる詳細は、参照によってその全体が本願に組み込まれる米国特許第7525649号において見るることができる。参照によってその全体が本願に組み込まれる米国特許第6608676号もまた、パターン付き又は非パターン付きウェハの検査に適した直線照射システムを記載する。

【0055】

図8は、本発明の別の典型的な実施形態に従う創意的なフォトカソードを含む非パターン付きウェハ検査システム300Cを示す。レーザ1014からの光は、偏光光学部材1016、ビームフォーミング光学部材1020、及び例えば1022及び1024のような反射鏡によってウェハ1012に向けられる。ウェハから散乱した光は、例えば1038及び1032のようなミラー及びレンズによって集光され、上述した実施形態のうちのいずれかによって構成されたフォトカソードを含む検出器200-1及び200-2へ送られる。いくつかの実施形態において、検出器200-1及び200-2は、創意的なフォトカソードを含む光電子増倍管を備える。非パターン付きウェハ検査システムにおける

更なる詳細は、参照によってその全体が本願に組み込まれる米国特許第 6 2 7 1 9 1 6 号において見る事ができる。

【 0 0 5 6 】

図 9 は、本発明の別の代替実施形態に従う投光照射ウェハ検査システム 3 0 0 D を示す。ウェハ（サンプル）のエリアは、軸外し光源によって照射される。ウェハから散乱した光は、集光対物レンズによって集光され、1 つ又は複数の開口部、スプリッタ、及び偏光子を通過し、その後、上述した実施形態のうちのいずれかに従って構成されたフォトカソードを含む 1 つ又は複数の画像センサ 2 0 0 - 1 及び 2 0 0 - 2 へ向かう。いくつかの実施形態において、画像センサ 2 0 0 - 1 及び 2 0 0 - 2 は、創意的なフォトカソードを含む E B C C D 又はイメージインテンシファイアを備える。この検査システムの更なる詳細は、参照によってその全体が本願に組み込まれる「ウェハ検査」（"Wafer Inspection"）と題されたロマノフスキー等による共有する同時継続中の米国特許出願第 2 0 1 3 / 0 0 1 6 3 4 6 号において見る事ができる。これらの検査システムの実施形態において、ウェハは、検査中動き続けることが望ましい。本発明のこの実施形態において用いられる画像センサは、参照によってその全体が本願に組み込まれる「電子衝撃型電荷結合素子及び E B C C D 検出器を用いた検査システム」（"Electron-Bombarded Charge-Coupled Device And Inspection Systems Using EBCCD Detectors"）と題された共有する同時継続中の米国特許出願第 2 0 1 3 / 0 1 4 8 1 1 2 号において説明される技術のうちのいずれかを有利に含むことができる。

10

【 0 0 5 7 】

図 1 0 は、本発明の別の代替実施形態に従うウェハ検査システム 3 0 0 E を示す。検査システム 3 0 0 E は、散乱光を集光し、その光を様々な開口部及び偏光ビームスプリッタを介して複数のセンサ 2 0 0 - 1 から 2 0 0 - 5 へ向ける、上述した実施形態のうちのいずれかに従う創意的なフォトカソードを含む図示した光学系によって傾斜照明及び実質的な通常照明を提供する照明サブシステム 1 1 0 E を含む。

20

【 0 0 5 8 】

従来技術によるイメージインテンシファイア及び電子衝撃型 C C D は、感度とスペクトル帯域幅との間で妥協して歩み寄らなければならない。最善でも、狭い範囲の波長についてしか良好な感度が可能ではない。本発明は、フォトカソードとしてのシリコンの使用を可能にすることで、より広範囲の波長にわたり高い感度を可能にする。更に、創意的なフォトカソードの高い効率及び低い仕事関数により、イメージインテンシファイア、光電子増倍管、及び電子衝撃型 C C D は、いくつかの実施形態において、より低い加速電圧で動作することができ、それによって装置の寿命が伸び、最大動作周波数及び / 又は空間分解能が改善する。

30

【 0 0 5 9 】

従来技術によるシリコンフォトカソードは、光電子が抜け出ることを妨げ、その結果低い効率をもたらす酸化物の層を各面に有する。シリコンの出力面上にホウ素層を形成することによって、電子がさらに容易に抜け出ることが可能になり、その結果高い効率をもたらされる。

【 0 0 6 0 】

創意的なフォトカソードとホウ素被覆された C C D 又は C M O S 画像センサとを併用する画像センサは、ホウ素被覆された C C D の改善した感度と併用されるフォトカソードにおいてより高い量子効率を示す。

40

【 0 0 6 1 】

創意的なフォトカソードを有する検出器を含む暗視野検査システムは、従来の画像及び光センサでは達成できない高い効率、非常に低いノイズレベル、及び高速動作の組み合わせを有する。

【 0 0 6 2 】

本発明は、ある特定の実施形態に関して説明されたが、本発明の創意的特徴は他の実施形態にも同様に適用可能であり、それらの全ては本発明の範囲内に収まるように意図され

50

ていることが当業者には明確に分かるだろう。

【図 1】

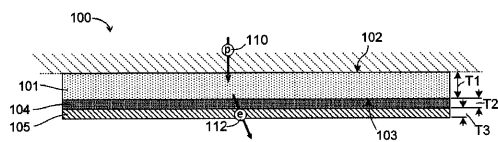


FIG. 1

【図 2 (A)】

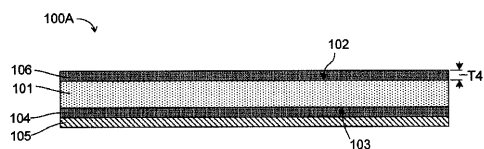


FIG. 2(A)

【図 2 (B)】

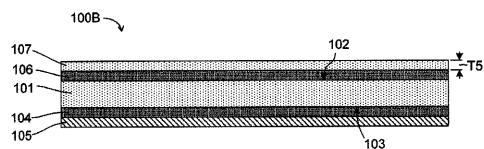


FIG. 2(B)

【図 2 (C)】

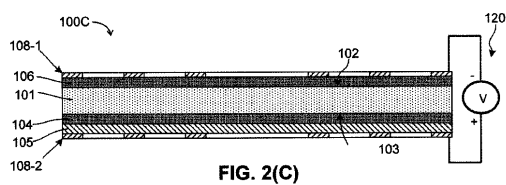


FIG. 2(C)

【図 3】

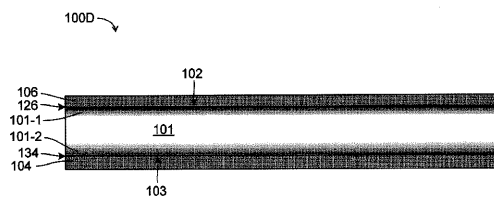
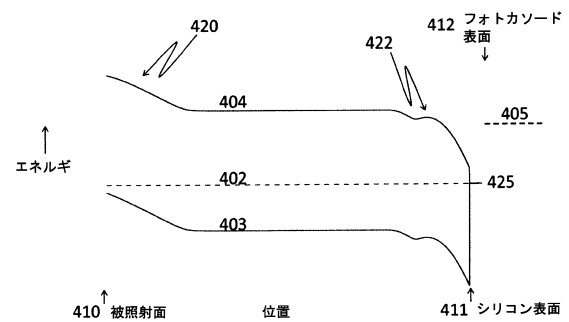
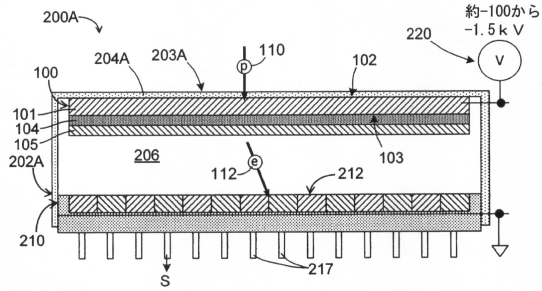


FIG. 3

【図 4】



【図 5 (A) 】



【図 5 (B) 】

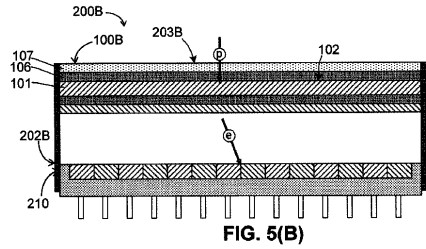


FIG. 5(B)

【図 5 (C) 】

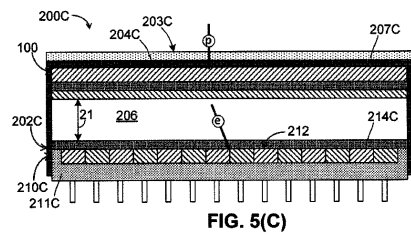


FIG. 5(C)

【図 6 】

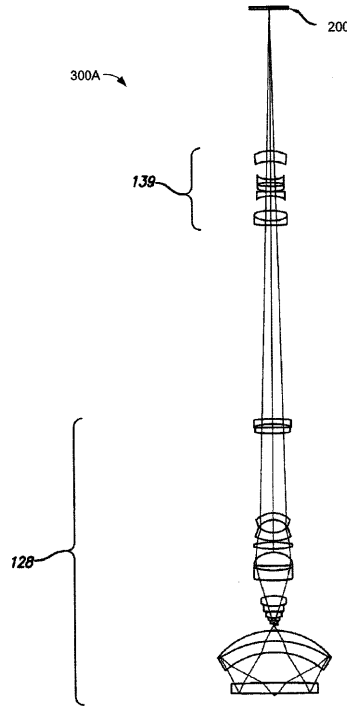


FIG. 6

【図 7 (A) 】

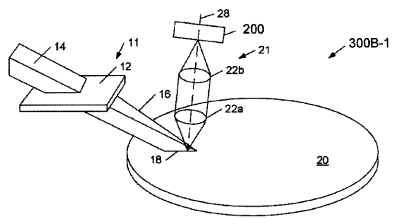


FIG. 7(A)

【図 7 (B) 】

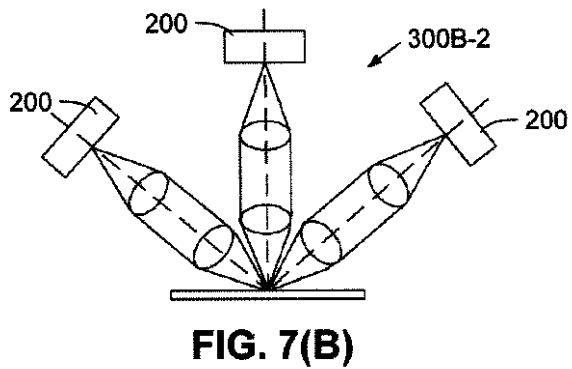


FIG. 7(B)

【図 7 (C) 】

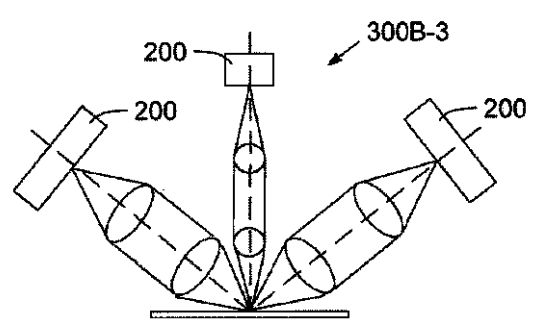


FIG. 7(C)

【図 7 (D) 】

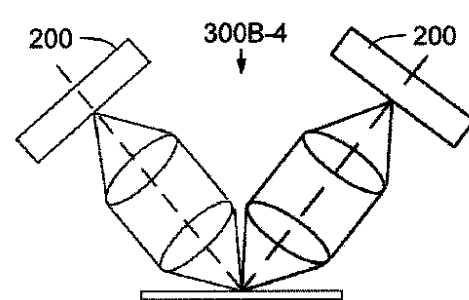
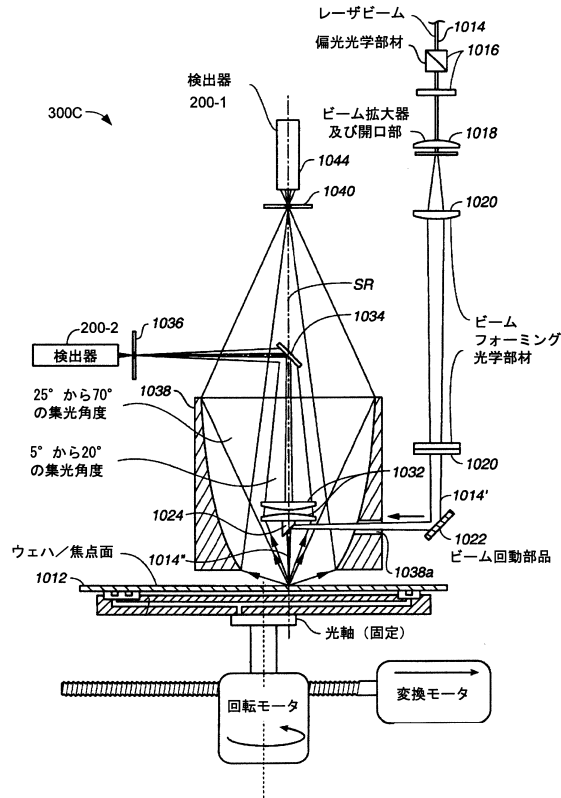
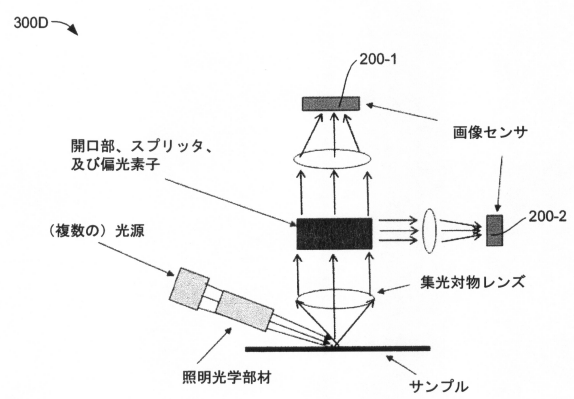


FIG. 7(D)

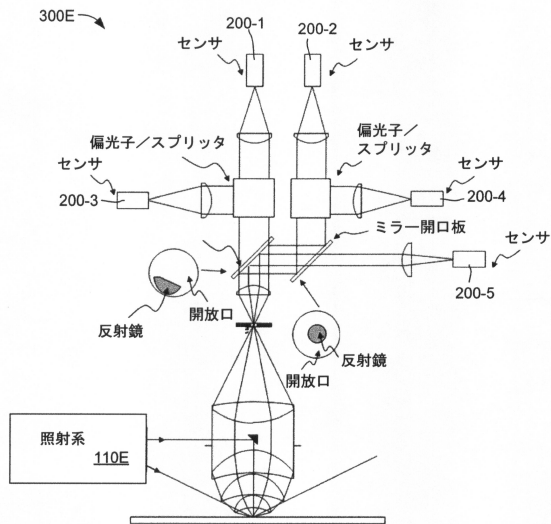
【図 8】



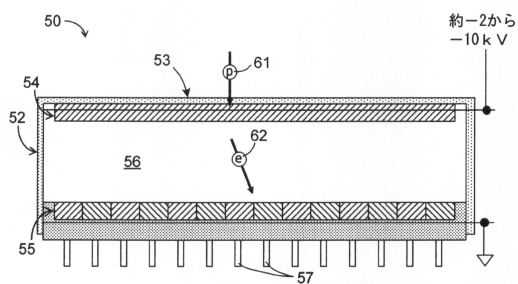
【図 9】



【図 10】



【図 11】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 J 43/04 (2006.01) H 0 1 J 43/04

審査官 杉田 翠

(56)参考文献 特開昭60-180052(JP,A)
米国特許第04099198(US,A)
特開平05-012989(JP,A)
米国特許出願公開第2004/0021061(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 J 1 / 0 0 - 1 / 1 2
1 / 3 2 - 1 / 9 8
5 / 0 0 - 9 / 1 8
1 9 / 0 0 - 1 9 / 0 6
1 9 / 0 8 - 2 1 / 3 6
2 9 / 3 6 - 2 9 / 4 5
3 1 / 0 8
3 1 / 2 6 - 3 3 / 0 4
4 0 / 0 0 - 4 9 / 4 8
9 9 / 0 0
J S T P l u s (J D r e a m I I I)
J S T 7 5 8 0 (J D r e a m I I I)
G o o g l e S c h o l a r