

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5116321号

(P5116321)

(45) 発行日 平成25年1月9日(2013.1.9)

(24) 登録日 平成24年10月26日(2012.10.26)

(51) Int.Cl.  
H01J 37/295 (2006.01)F I  
H01J 37/295

請求項の数 12 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2007-60060 (P2007-60060)	(73) 特許権者	504020452
(22) 出願日	平成19年3月9日(2007.3.9)		カール・ツァイス・エヌティーエス・ゲー
(65) 公開番号	特開2007-250541 (P2007-250541A)		エムペーハー
(43) 公開日	平成19年9月27日(2007.9.27)		Carl Zeiss NTS GmbH
審査請求日	平成22年2月17日(2010.2.17)		ドイツ連邦共和国、73447 オベルコ
(31) 優先権主張番号	102006011615.1		ッヘン、カールツァイスシュトラッセ
(32) 優先日	平成18年3月14日(2006.3.14)		56
(33) 優先権主張国	ドイツ(DE)	(74) 代理人	100147485
			弁理士 杉村 憲司
		(74) 代理人	100134005
			弁理士 澤田 達也
		(74) 代理人	100119530
			弁理士 富田 和幸
		(74) 代理人	100147692
			弁理士 下地 健一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 位相差電子顕微鏡

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

後焦点面を有する対物レンズと、前記対物レンズの前記後焦点面を拡大して回折中間像面に結像させる第1の回折レンズと、主面が前記回折中間像面の近傍に配置されている第2の回折レンズと、前記回折中間像面内またはその近傍に配置されている位相シフト素子とを有する位相差電子顕微鏡。

【請求項2】

後焦点面を有する対物レンズと、前記対物レンズの前記後焦点面を回折中間像面に結像させる第1の回折レンズと、前記対物レンズの前記後焦点面内に配置されている第1の位相シフト素子と、前記回折中間像面内またはその近傍に配置されている第2の位相シフト素子とを有する位相差電子顕微鏡。

【請求項3】

主面が前記回折中間像面の近傍に配置されている第2の回折レンズが設けられている請求項2に記載の位相差電子顕微鏡。

【請求項4】

前記対物レンズが、または前記第1の回折レンズと共に前記対物レンズが、前記対物レンズの入力像面を中間像面に結像し、前記中間像面は光線の方角に見て前記回折中間像面の前に位置し、前記中間像面の領域内に偏向系が配置されている請求項1に記載の位相差電子顕微鏡。

【請求項5】

10

20

前記対物レンズが、または前記第1の回折レンズと共に前記対物レンズが、前記対物レンズの入力像面を中間像面に結像し、前記中間像面は光線の方向に見て前記回折中間像面の前に位置し、前記中間像面の領域内に偏向系が配置されている請求項2または3に記載の位相差電子顕微鏡。

【請求項6】

前記偏向系が、電子ビームを互いに垂直な2方向に偏向する二重偏向系である請求項4に記載の位相差電子顕微鏡。

【請求項7】

前記偏向系が、電子ビームを、前記回折中間像面で円形の経路上を移動させる請求項6に記載の位相差電子顕微鏡。

10

【請求項8】

さらに電子源とコンデンサ系が設けられ、前記コンデンサ系が、前記電子源から出射する電子から電子ビームを形成する電子レンズを備える請求項1から3のいずれか一項に記載の位相差電子顕微鏡。

【請求項9】

さらに電子源とコンデンサ系が設けられ、前記コンデンサ系が、前記電子源から出射する電子から電子ビームを形成する電子レンズを備える請求項4から7のいずれか一項に記載の位相差電子顕微鏡。

【請求項10】

前記コンデンサ系が前記対物レンズの物体平面を照明する請求項8または9に記載の位相差電子顕微鏡。

20

【請求項11】

前記第2の回折レンズが前記中間像面を第2の中間像面に結像し、前記第2の中間像面を拡大して最終像面に結像させる投影系が設けられている、請求項4から7、請求項9、及び請求項9を引用する請求項10のいずれか一項に記載の位相差電子顕微鏡。

【請求項12】

前記電子顕微鏡が、非励起または弱励起対物レンズを有するローレンツ顕微鏡として動作可能である請求項1から11のいずれか一項に記載の位相差電子顕微鏡。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0001】

本発明は、位相差電子顕微鏡、特に透過型位相差電子顕微鏡（位相差TEM）に関する。

【背景技術】

【0002】

電子顕微鏡の対象物は通常、100KeV以上の範囲の高い電子エネルギーによって透過型電子顕微鏡（TEM）中で極めて僅かな振幅コントラストしか生じない位相物体である。したがってこのような物体は、通常のTEM中ではTEMの開口収差の位相シフト作用を利用することによってのみコントラストを生じ、したがって通常のTEM中ではそれに対応して低いコントラストで結像される。したがって、光学顕微鏡でゼルニッケの位相物体で位相コントラストを発生する場合と類似して、TEMの対物レンズの後焦点面に位相板を配置すると、基本的に大きなコントラスト利得が得られる。その場合の問題はもちろん、TEMで必要な寸法である。特にいわゆる近軸光線、すなわち対象物で回折されない光線だけが位相シフトされる必要があり、それに対して対象物で1次またはそれ以上の次数で回折される光線は位相板によって影響を受けないままに留まる必要がある場合には、近軸光線の直径が1μm未満と小さいと、位相板に汚染がなく、帯電がなく、誘電強度が高いことが必要なので、著しく高度な技術が要求される。

40

【0003】

位相シフト効果を発生させるために、基本的に2つの手法が知られている。第1の手法では、近軸光線だけに位相シフトを加え、より高次の回折は全くまたはほとんど影響を受

50

けないようにする、対応して小型に形成された静電レンズとして位相板が実現される。第2の手法では、TEMで利用される電子エネルギーの電子のほとんどを透過する、必要な構造を備えた薄い箔が使用される。第2の手法では、拡散電子ビームまたは近軸光線に所望の位相シフトを加えるために、材料内部の静電電位が利用される。その際、第1の手法は、小型の静電レンズには必然的に外部の保持構造、すなわちより高次で回折する電子の通る経路を遮断する領域が必要であり、それによって画像生成にとって重要な情報が失われてしまうという欠点がある。これに対して第2の手法には、近軸光線に対しては元々極めて弱い高次回折が、箔の避けがたい材料吸収によってさらに弱くなるという欠点がある。このような技術上の問題から、位相コントラストを生成する基本原理は50年以上前から知られていたにも関わらず、従来は位相シフト素子を有する位相差電子顕微鏡は市場で成功を収める商用製品として確立されなかった。

10

## 【0004】

位相差電子顕微鏡は既に、米国特許第6,744,048号、米国特許第6,797,956号に記載されている。

## 【0005】

米国特許第6,744,048号では、レンズ系によって対物レンズの後焦点面に結像し、レンズ系によって生成される対物レンズの回折面の像面に位相シフト素子を配置することが既に提案されている。

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

20

## 【0006】

本発明の第1の目的は、位相シフト素子の寸法上の要件を軽減する位相差電子顕微鏡を提供することにある。この目的は、請求項1に記載の特徴を有する位相差電子顕微鏡によって達成される。

## 【0007】

本発明のさらなる目的は、位相差電子顕微鏡での情報損失を回避することにある。この目的は、請求項2に記載の特徴を有する位相差電子顕微鏡によって達成される。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

本発明の有利な実施態様は、従属請求項の特徴から明らかになる。

30

## 【0009】

本発明の第1の態様による位相差電子顕微鏡は、後焦点面を有する対物レンズと、対物レンズの前記後焦点面を拡大して回折中間像面に結像させる第1の回折レンズとを備えている。第1の回折レンズの後に、電子の伝播方向に、主面が回折中間像面の近傍に配置されている第2の回折レンズが続いている。回折中間像面内またはその近傍には位相シフト素子が配置されている。

## 【0010】

本発明の第2の態様による位相差電子顕微鏡は、後焦点面を有する対物レンズと、対物レンズの後焦点面を回折中間像面に結像させる第1の回折レンズとを備えている。第1の位相シフト素子が、対物レンズの後焦点面内またはその近傍に配置され、第2の位相シフト素子が、前記回折中間像面内またはその近傍に配置されている。その際、第1の回折レンズによって行われる後焦点面の回折中間像面への結像は、好ましくは拡大される。

40

## 【0011】

対物レンズの回折面が、拡大して回折格子中間像面に結像されることによって、位相シフト素子はそれに対応して幾何的に拡大して結像されるので、位相シフト素子に対する寸法上の要件が軽減される。同時に、位相板のハードウェア、特に電極と保持ウエブによる電子の絞りが、これらの部品の寸法を等しいままにしておくことができるので、軽減される。さらに同時に、補助回折レンズの収差によって解像度の劣化が発生せず、回折レンズ系の背後の回折面の像が、やはり対物レンズの物体平面と共役する像面の背後に明確に位置することが保証される。

50

## 【 0 0 1 2 】

本発明の第1の態様によれば、第2の回折レンズが回折中間像面内またはその近傍に位置されることによって、回折中間像面は、ほぼ対物レンズの物体平面と共役する像面の位置にしか影響を及ぼさず、回折中間像面のさらなる結像にはほとんど影響を及ぼさない。それによって必要な全長の拡大を僅かなものに保つことができる。

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【 0 0 1 3 】

次に本発明のさらなる詳細を、図示した例示的实施形態に基づいてより詳しく説明する。

## 【 0 0 1 4 】

図1の透過型電子顕微鏡は、電子源(1)、例えば熱電界放出源を備えている。電子源(1)の後には、まずその電位によって電子を電子源(1)から吸収する抽出電極(2)と、電子源の位置を光学的に固定するための1つまたは複数の集束電極(3)と、1つまたは複数の陽極(4)とが続く。陽極(4)の電位によって、電子源(1)から出た電子は100KeVまたはそれ以上の所望の電子エネルギーへと加速される。

## 【 0 0 1 5 】

陽極の後には、電子の移動方向に多段コンデンサが続いている。図示した例示的实施形態では、コンデンサは、3つの個別磁気レンズ(5、6、7)と、コンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)からなる入射側部品とを備えている。このようなコンデンサにより、磁気レンズ(5、6、7、8)のレンズ電流を適宜に調整することによって、照明アパーチャと、物体平面(9)の電子ビームによって照射される、コンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)の主面における視野が、独立に調整可能である。照明野とアパーチャが異なって照射される場合のコンデンサ内での光線の案内に関しては、米国特許第5,013,913号を参照されたい。したがってここではより詳細に言及する必要はない。もちろん、全体で4段のコンデンサの代わりに、例えば米国特許第6,531,698号に記載のより簡単なコンデンサを設けてもよい。

## 【 0 0 1 6 】

コンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)の前では、前視野が最後のコンデンサ・レンズとして、また後視野が対物レンズとして機能する。物体平面はほぼコンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)の磁極片間隙の高さに位置している。物体平面(9)内にはゴニオメーターの形の試料マニピュレータ(図示せず)が配置され、これはコンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)の磁極片を貫いている。

## 【 0 0 1 7 】

コンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズの代わりに、他の対物レンズを設けてもよい。

## 【 0 0 1 8 】

コンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)の後に、やはり磁気レンズとして形成された第1の回折レンズ(11)が続いている。この第1の回折レンズ(11)はコンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)の後焦点面ないしは回折面(10)を拡大して回折中間像面(21)に結像させる。同時に第1の回折レンズ(11)は、物体平面(9)の中間実像(14)を生成する。第1の回折レンズ(11)によって生成される中間像(14)の面内には第1の偏向系(12)が配置されている。この第1の偏向系(12)の後に第2の偏向系が続き、その後には第2の回折レンズ(15)が続く。その際、回折中間像(21)は同時に第2の回折レンズ(15)の主面内またはその近傍に位置している。

## 【 0 0 1 9 】

回折中間像面(21)内には位相板(16)が配置されている。対物レンズの後回折面(10)の像、またはコンデンサ-オブジェクトィブ-シングルフィールドレンズ(8)の対物レンズとして機能する後視野の像は、第1の回折レンズ(11)によって生成され

10

20

30

40

50

る結像の結像倍率によって拡大されるので、位相板(16)の直径は、対物レンズの後焦点面(10)の直後の位相板(16)の配置に対して前記結像倍率だけ拡大される。これに対して保持ウエブ(22、27)の幅や環状電極の肉厚のような位相板(16)のその他の寸法は同じ寸法に保つことができ、したがってこれらの構成部品による電極の絞りが全体的に軽減される。

【0020】

回折面(21)が回折中間像面内結像される拡大倍率は2倍より大きく、好ましくは3倍より大きくあるべきである。回折面(21)が回折中間像面内に結像される拡大倍率は、10倍の拡大倍率を超えないものとし、好ましくは3倍の倍率から7倍の倍率の間とする。

10

【0021】

第2の回折レンズ(15)は、その主面が回折中間像面内またはその近傍に配置されるので、回折中間像面(21)のさらなる結像に影響を及ぼさず、またはさしたる影響を及ぼさない。この第2の回折レンズ(15)は、第1に物体平面(9)の中間像(14)を投影レンズ系(18、19)の入力像面(17)に結像する。それによって後続の物体平面(9)の像面と回折面(10)の適宜に大きな間隔が保証される。投影レンズ系(18、19)は次いで、物体平面(9)内に配置され、投影系(18、19)の入力像面(17)に結像される試料の大きく拡大された像を検出器(20)上に生成する。

【0022】

図1で(OA)は全電子光学系の光軸を示している。

20

【0023】

第1の回折レンズ(11)と第2の回折レンズ(15)の間の偏向系(12、13)を用いて、対物レンズの後回折面(10)の像の横方向位置を位相板(16)に対して微調整することができる。第1の偏向系は物体平面の中間像(14)が生じる面内に配置され、またはこの面内で作用するので、この第1の偏向系によって行われる偏向は、投影系の入力像面(17)内に生じる物体平面(9)の像の横方向位置に全く影響を及ぼさず、位相板(16)に対する回折像の位置をシフトさせるだけである。

【0024】

対物レンズ(8)と第1の投影レンズ(18)の間の前述の結像特性は、図2に光線の経路に基づいて明確に示されている。そこでは、物体平面(9)から光軸(OA)と平行に出射する電子の放射経路、すなわちいわゆる照明光路またはひとみ光路が実線で示され、また光軸(OA)に対して角度をなして物体平面(9)から光軸(OA)上に出射する電子の放射経路、すなわちいわゆる結像光路が破線で示されている。

30

【0025】

図3には静電位相板(16)が平面図で示されている。位相板(16)は、丸い穴(26)があいた電子を透過しない外部支持体(21)を有している。穴(26)内には光軸(OA)と同心に中心の環状開口(24)を有する環状電極(23)が配置されている。環状電極(23)は、2つまたは3つの薄い保持ウエブ(22、27)を介して支持体(21)と連結されている。環状電極に静電電位を加えることによって、物体平面(9)で回折されない光線のうち環状開口(24)を通過した近軸光線には位相シフトが加えられ、一方、物体平面でより高次で回折された、または散乱された光線は影響を受けされないままとなる。位相板(16)の構造に関するさらなる詳細については、米国特許第6,797,956号を参照されたい。

40

【0026】

第2の回折レンズ(15)の励起の変化によって、このレンズによって行われる像回転により位相板(16)に対する回折像の配向を変更することができる。それによって像の生成にとって重要な、保持ウエブ(22、27)に入射する回折反射光学系(25)は、破線で示した円で示す円形経路を移動し、それによって保持ウエブ(22、27)によって妨げられずに位相板が通過できる領域内に回転することができる。

【0027】

50

図4には、米国特許第6,797,956号に従って円錐形の照明によって位相コントラストを発生する場合の放射経路が示されている。物体平面(49)内で回折されない近軸光線は、対物レンズ(48)の後回折面(50)で合焦され、第1の回折レンズ(51)によって回折中間像面(53)に結像される。回折中間像面(56)の近傍の第1の偏向系(52)が、光束を環状位相板(57)の位相シフト領域を経て環状に回折中間像面(53)へと導く。次いで、主面が回折中間像面(53)内またはその近傍に位置する第2の回折レンズ(58)が、再び物体平面(49)の中間像を第1の投影レンズ(54)の入力像面内に生成する。第1の投影レンズ(54)の入力像面内に配置された、第1の偏向系(52)と同期して動作される別の偏向系(55)によって、第1の投影レンズ(54)の入力像面内の光線を再び光軸に戻るよう偏向させる。

10

## 【0028】

回折中間像面(53)内に配置された環状の位相板によって、円形経路を案内される近軸光線に位相シフトが加えられ、一方、位相板の中心開口の縁部から離れて通過する、物体平面(49)内で高い回折次数で回折された電子は、位相板からの影響を受けないままとなる。次いで、このより高次の回折と位相シフトされた近軸光線との干渉によって再び位相コントラストが生ずる。

## 【0029】

図5の配置は、基本的に図4の配置と同様に構成されている。もちろん、図5の配置は2枚の位相板を有している。第1の位相板(58)は対物レンズの後回折面(15)内に配置され、また第2の位相板(57)は、第2の回折レンズ(53)の主面内またはその近傍に位置しこれと共役する第1の回折レンズ(51)の像面内に配置される。前述の実施形態の場合と同様に、第2の回折レンズは第1と第2の回折レンズ(51、53)の間に位置する、物体平面(49)の単一の中間実像を投影系(54)の入力像面に結像させる。

20

## 【0030】

両方の位相板(57、58)は、それぞれ異なり互いに相補的な、回折像の空間領域に影響を及ぼすように形成されている。図5に示されているように、対物レンズの回折面(15)内に配置されている位相板(58)は、図5に陰影で示されている光線の円錐セグメント内で位相シフトを生じ、一方、回折中間像面内に配置されている第2の位相板(57)は陰影がない光線円錐セグメント内で位相シフトを生ずる。この場合、位相シフトは互いの共役する2つの回折像内で順次行われ、したがって両方の共同の寄与によって近軸光線と回折光線の間で所望の位相シフトが生じる。この方法によって基本的に、材料不要の、また収差のない静電位相板を実現することが可能になる。その上、両方の位相板(57、58)をそれぞれ、場合によっては存在する保持ウエブが全体として画像生成に悪影響を及ぼさないように形成することができる。散乱電子だけが半平面の位相板によっての位相シフトを受け、したがって微分的干渉コントラスト(微分干渉コントラスト)を生ずることができる。

30

## 【0031】

図6には、図1および2を参照して既に記載した実施形態とやや異なる光線案内が示されている。重要な相違は、対物レンズ(60)が、第1の回折レンズ(62)の主面内またはその近傍にも物体平面(61)の中間像を生じるほど強く励起されることである。第1の回折レンズ(62)はやはり対物レンズ(60)の後回折面(65)を第2の回折レンズ(63)の主面内またはその近傍に結像し、したがってやはりそこに回折中間像面が生ずる。そこで回折中間像面内にやはり位相シフト素子(67)が配置される。図2の実施形態と同様に、第2の回折レンズ(63)は、第1の回折レンズの主面内または主面の近傍に生ずる物体平面(61)の中間像を後続の投影系(64)の入力像面(66)に結像する。

40

## 【0032】

図7にはシステムをローレンツ顕微鏡として動作させる場合に、または倍率がより低い場合に実現される光路が示されている。ローレンツ顕微鏡として動作する場合は、対物レ

50

レンズ(70)がなくされ、倍率がより低い場合(いわゆる低倍率モード)は、対物レンズは極めて弱くしか励起されない。第1の回折レンズ(73)の励起は、その焦点面が第2の回折レンズ(74)の主面内に位置するように選択される。第2の回折レンズの主面内にはやはり位相板(77)が配置される。第2の回折レンズ(74)は、後続の投影系(75)の入力像面(76)内に、第1の回折レンズ(73)によって生成された物体平面(71)の虚像(77)の実像を生成する。次に投影レンズ(75)は物体平面(71)内に位置する物体の10.000倍までに拡大された像を生成する。したがって、この光線案内によって従来の低倍率拡大の約5倍の最高拡大倍率が可能になる。

【0033】

図2の光線案内で必要な寸法に関しては、ほぼ以下のように見積もることができる。対物レンズ(8)の焦点距離が約3mmで、所望の望遠鏡拡大率が10倍の場合は(対物レンズ(8)と第1の回折レンズ(11)は望遠鏡的に動作されるので)、第1の回折レンズ(11)について約30mmの焦点距離になる。このような望遠鏡系では、対物レンズだけを有するシステムの場合とは異なり、開口収差の増大は無視できる程度である。

10

【0034】

回折中間像面を対物レンズ(8)の後回折面(10)に比べて約5倍に拡大すべき場合は、第1の回折レンズ(11)は、対物レンズ(8)の後回折面(10)から約36mmの距離でなければならず、第1の回折レンズ(11)と第2の回折レンズ(15)の間には180mmの間隔が必要である。第2の回折レンズ(15)は、第1の回折レンズ(11)の後焦点面(14)に生ずる物体平面(9)の中間像をより低い拡大率で投影系(18)の入射像面(17)に結像するので、第2の回折レンズ(15)の焦点距離が約75mmである場合、第2の回折レンズ(15)と投影系(18)の入力像面(17)の間の必要な間隔は約150mmとなる。その場合、対物レンズ(8)が中間実像を投影系の入力像面内に直接生成する構成の場合よりも全長が約260mm拡大する。

20

【図面の簡単な説明】

【0035】

【図1】位相差透過電子顕微鏡の概略断面図である。

【図2】図1の電子顕微鏡の第1の動作モードでの放射経路図である。

【図3】図1の電子顕微鏡の静電位相板の平面図である。

【図4】円錐形の照明アパーチャを有する位相差電子顕微鏡の放射経路図である。

30

【図5】それぞれ互いに共役する面内に配置された2枚の位相板を有するシステム内の放射経路図である。

【図6】図1の電子顕微鏡の第2の動作モードでの放射経路図である。

【図7】図1の電子顕微鏡の、ローレンツ顕微鏡として動作する場合、ならびにより低い倍率の場合の放射経路図である。

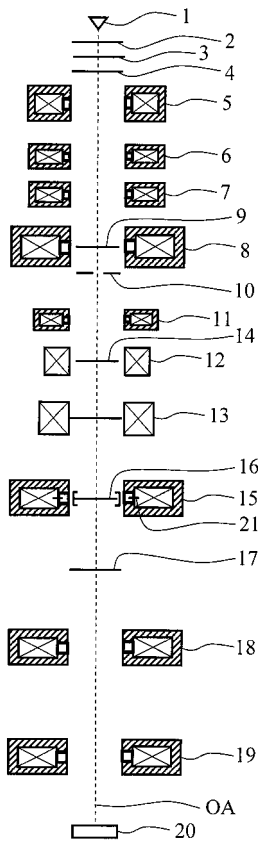
【符号の説明】

【0036】

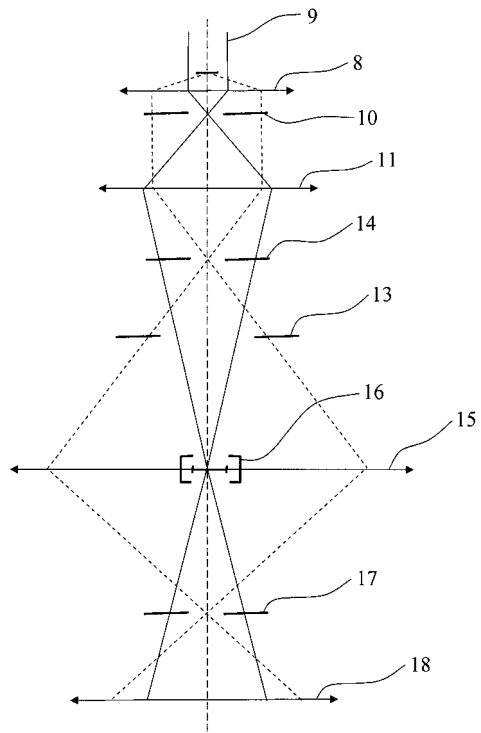
1...電子源、2...抽出電極、3...集束電極、4...陽極、5,6,7...磁気レンズ、8...コンデンサ-オブジェクティブ-シングルフィールドレンズ、9...物体平面、10...回折面、11...回折レンズ、14...中間実像、15...回折レンズ、16...位相板

40

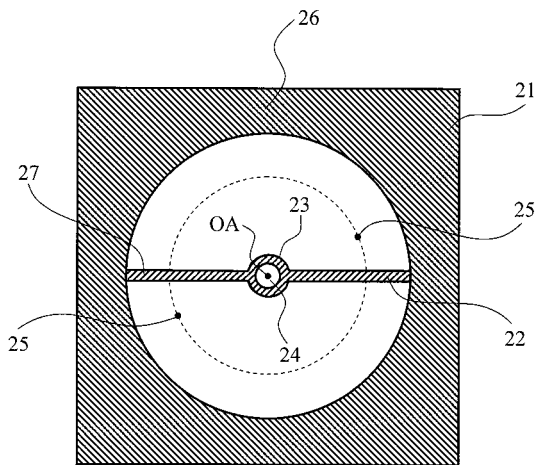
【図1】



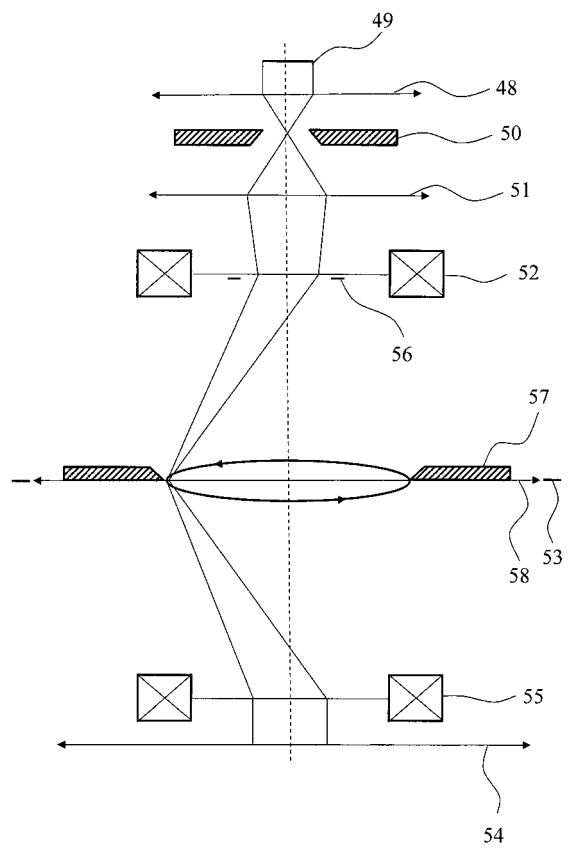
【図2】



【図3】



【図4】





---

フロントページの続き

(72)発明者 ゲルト・ベンナー

ドイツ連邦共和国・73434・アーレン・ミランヴェーク・95

(72)発明者 マルコ・マチジェヴィック

ドイツ連邦共和国・72622・ニュティンゲン・ベアベルスヴェーク・11

審査官 遠藤 直恵

(56)参考文献 特開2002-237272(JP,A)

特開平09-237603(JP,A)

特開2003-014667(JP,A)

特開平07-335172(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01J 37/22

H01J 37/26

H01J 37/28

H01J 37/295