

(19)



Deutsches
Patent- und Markenamt



(10) **DE 10 2017 126 882 B3** 2019.01.10

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2017 126 882.0**

(22) Anmeldetag: **15.11.2017**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **10.01.2019**

(51) Int Cl.: **H01J 37/07 (2006.01)**
H01J 49/44 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**GST Gesellschaft für systembezogene
Technologieentwicklung mbH, 55130 Mainz, DE**

(74) Vertreter:
**Walther Hinz Bayer PartG mbB Patentanwälte,
34130 Kassel, DE**

(72) Erfinder:
**Schönhense, Gerd, Prof. Dr., 55130 Mainz, DE;
Schönhense, Benedikt Marian, London, GB**

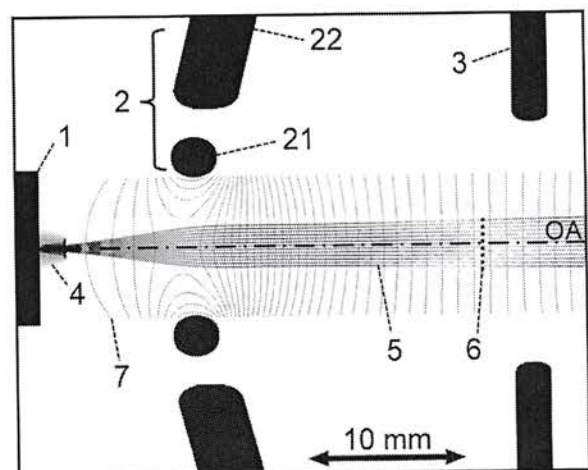
(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	4 675 524	A
US	4 794 259	A

**SCHÖNHENSE, G. [et al.]: Correction of the
deterministic part of space-charge interaction in
momentum microscopy of charged particles. In:
Ultramicroscopy, Vol. 159, 2015, No. 3, S. 488-496.
– ISSN 0304-3991**

(54) Bezeichnung: **Anordnung zur Reduzierung der Raumladungswirkung in elektronen-spektroskopischen
Geräten**

(57) Zusammenfassung: Gegenstand der Erfindung ist eine Anordnung zur Reduzierung der Raumladungswirkung eines von einer Probenoberfläche (1) ermittelten Elektronenstrahls, umfassend eine oder mehrere Steuerelektroden (2) die dazu eingerichtet sind, im Bereich unmittelbar vor der Probenoberfläche ein retardierendes elektrisches Feld (7) zu erzeugen, um so eine möglichst schnelle Abtrennung des Untergrundes aus langsameren Elektronen (4) vom zu untersuchenden Signal der Primärelektronen (5) zu bewirken.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Anordnung zur Reduzierung der Raumladungswirkung eines von einer Probenoberfläche emittierten Elektronenstrahls.

[0002] Bekannt sind verschiedene Anordnungen von Elektronenlinsensystemen für den Transport und die Fokussierung von Elektronen aus einer Festkörperprobe zum jeweiligen elektronenspektroskopischen Gerät. Insbesondere für Photoelektronen und Auger-Elektronen wurden verschiedene Arten von Spektrometern und dazugehörige Transportoptiken entwickelt; einen ausführlichen Überblick geben S. Hüfner [„Photoelectron Spectroscopy - Principles and Applications“, Springer, Berlin (2003)], sowie S. Suga und A. Sekiyama [„Photoelectron Spectroscopy. Bulk and Surface Electronic Structures“, Springer, Berlin (2014)].

[0003] Wichtige Anwendungen solcher Spektrometersysteme bestehen im Bereich der zerstörungsfreien chemischen Analyse, der Untersuchung von elektronischen Eigenschaften, in jüngster Zeit auch der Topologie von Energieflächen im Impulsraum. Mit zunehmendem Komplexitätsgrad werden immer höhere Anforderungen an Energie- und Winkelauflösung gestellt. Kommerzielle Spektrometer erreichen aktuell Energieauflösungen im Bereich bis unter 1 Millielektronenvolt (meV) und Winkelauflösungen von $< 0.1^\circ$. Zunehmend werden solche Spektroskopie-Experimente auch zeitaufgelöst durchgeführt. Dabei wird das elektronische System durch einen „Pump-Puls“, z.B. einen starken Infrarotlaserpuls, aus dem Gleichgewichtszustand getrieben und die Relaxation in den Ausgangszustand durch einen zweiten, sog. „Probe-Puls“ mit definierter Zeitverzögerung abgetastet. Diese rapide an Bedeutung gewinnende Methode erlaubt es erstmalig, sehr kurzlebige, sog. transiente Zustände zu studieren. Dadurch lassen sich wichtige Informationen über die Dynamik, z.B. von chemischen Reaktionen oder von ultraschnellen Magnetisierungsprozessen, gewinnen. Dieses neue Forschungsfeld hat parallel die Entwicklung von Ultrakurzpuls-Lichtquellen (z. B. Pulslaser im Niederenergiebereich bis hin zu Freie-Elektronen-Lasern für höhere Photonenenergien bis in den harten Röntgenbereich) stark intensiviert.

[0004] Ein fundamentales Problem solcher Experimente mit gepulster Anregung besteht in der durch den gepulsten Betrieb stark erhöhten Coulombwechselwirkung im Strahl, auch Raumladungseffekt genannt. Die Coulombkräfte wirken auf Energieverteilung und Elektronentrajektorien und verfälschen damit auch die Winkelverteilung, welche wichtige Information über die elektronischen Eigenschaften beinhaltet. Im Fall von Festkörperproben ist die Energieverteilung von Photoelektronen oder das En-

ergieverlustspektrum nach Anregung mit Elektronen nicht monoenergetisch sondern beinhaltet im Allgemeinen viele Energien. Außer den Primärelektronen bei höheren Energien (z. B. Photoelektronen aus den für elektrischen Transport höchst bedeutsamen Leitungsbändern, charakteristische Auger-Elektronen als Fingerabdruck für die chemische Zusammensetzung oder elastisch gestreute Elektronen, welche Beugungsinformation über die Struktur beinhalten) weisen die Spektren einen hohen Untergrund von niederenergetischen Sekundärelektronen auf. Die Intensität dieses Untergrundes kann das Signal der Primärelektronen um Größenordnungen übertreffen. Dies ist insbesondere bei Anregung im Röntgenbereich der Fall, einem Spektralbereich der aktuell stark an Bedeutung gewinnt, da die hohe Informationstiefe den Zugriff auf Volumenzustände und „vergrabene Schichten“ erlaubt (z. B. „Direct 3D mapping of the Fermi surface and Fermi velocity“, [Nature Materials 16, 615-621 (2017)] und S. Suga und A. Sekiyama [s.o.]).

[0005] In zeitaufgelösten Experimenten tritt eine weitere Quelle von störenden niederenergetischen Untergrundelektronen auf, die durch den intensiven Pumpaser aus der Probe ausgelöst werden. Obwohl die Photonenenergie des hochintensiven Kurzpuls-Infrarotlasers für normale Photoemission nicht ausreicht, kann durch Multiphotonen-Photoemission eine intensive Ladungswolke von niederenergetischen Elektronen erzeugt werden. Experimente zeigten (siehe z. B. L.-P. Oloff et al. [Journal of Applied Physics 119, 225106 (2016); doi: 10.1063/1.4953643], dass ihre Intensität die des echten Signals um Größenordnungen übersteigen kann. Diese zweite Art von Untergrundelektronen trägt in der gleichen Weise zur Coulombwechselwirkung im Strahl bei, wie der (konventionelle) Sekundärelektronenuntergrund. Bei den zeitaufgelösten Experimenten kommt hinzu, dass zwischen der durch den Infrarotlaser ausgelösten niederenergetischen Elektronenwolke und den durch den Probe-Strahl, erzeugt durch beispielsweise eine Synchrotronstrahlungsquelle oder eine Laserquelle für höhere harmonische, oder Freie-Elektronen-Laser, ausgelösten Photoelektronen ein definierter zeitlicher Unterschied besteht. Diese Zeitdifferenz hat Einfluss auf die Coulombwechselwirkung, die je nach zeitlicher Korrelation sowohl beschleunigend als auch abbremsend auf die Primärelektronen wirken kann. Experimente zeigten, dass die daraus resultierende Energieverschiebung bereits bei Experimenten mit Synchrotronstrahlung die Größenordnung von 10 eV erreichen kann. Solche großen Energieverschiebungen machen hochauflösende Spektroskopieexperimente unmöglich. Die von B. Schönhense et al. [New Journal of Physics, 20, 033004 (2018)] beschriebene Methode einer nachträglichen numerischen Korrektur reduziert die Energieverschiebung a posteriori, der Raumladungseffekt selbst bleibt aber unverändert. Der übliche Weg des

Umgangs mit der Raumladungswchselwirkung besteht in einer Reduktion der Signalstärke auf ein für das Experiment tolerierbares Maß.

[0006] Die Literaturstellen [DE 10 2013 005 173 B4, EP 1559126 B9, DE 10 2014 019408 B4] befassen sich allesamt mit spektroskopischen Verfahren unter dem Einsatz einer Kathodenlinse, bei der die Elektronen mittels eines starken elektrostatischen Extraktorfeldes in das Elektronenlinsensystem hineinbeschleunigt werden. So gewinnt man einerseits eine hohe Sammlungseffizienz für die zu untersuchenden Primärelektronen, jedoch sind die von den langsamen Untergrundelektronen ausgehenden Coulombkräfte besonders groß, da diese Elektronen durch das Extraktorfeld vollständig in die Elektronenoptik hineingezogen werden.

[0007] Aus der US 4,675,524 A ist eine Anordnung zur Reduzierung der Raumladungswirkung eines von einer Probenoberfläche emittierten Elektronenstrahls bekannt, da die Blende R nahe an der Probe angeordnet ist, wobei eine oder mehrere Steuerelektroden vorgesehen sind, die dazu eingerichtet sind, im Bereich unmittelbar vor der Probenoberfläche ein retardierendes elektrisches Feld zu erzeugen, um so eine möglichst schnelle Abtrennung des Untergrundes aus langsamen Elektronen vom zu untersuchenden Signal der Primärelektronen zu bewirken.

Eine ähnliche Anordnung ist auch der US 4,794,259 A zu entnehmen, die ebenfalls retardierende Felder zur Kontrolle der Raumladung und zur Signalgewinnung einsetzt.

[0008] Beide Patente beschreiben Anordnungen auf Basis einer Rastertechnik.

[0009] Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe besteht darin, die raumladungs-induzierte Verfälschung der Energie- und Winkelverteilung der schnelleren Primärelektronen in einem abbildenden elektronenoptischen System, insbesondere auf Basis von Kathodenlinsen, schon am Entstehungsort kurz vor der Probenoberfläche weitmöglichst zu eliminieren.

[0010] Zur Lösung der Aufgabe dienen die Merkmale des Anspruchs 1. Hierbei wird mit geeigneten Elektrodenanordnungen, im folgenden Steuerelektroden genannt, ein abbremsendes und, je nach Einsatzfall, divergierendes oder konvergierendes elektrisches Feld unmittelbar vor der Probenoberfläche erzeugt. Dieses Feld führt zu einer schnellen Separation der langsamen von den schnellen Elektronen innerhalb von wenigen Picosekunden. Die Separation geschieht innerhalb einer Strecke von typisch 100 Mikrometern vor der Probenoberfläche, sodass der Effekt der Coulombkräfte zwischen langsamen und schnellen Elektronen raumzeitlich auf das unvermeidbare Mindestmaß reduziert wird. Es hat sich gezeigt, dass es mög-

lich ist, die langsamen Elektronen bereits nach weniger als 50 Mikrometern von den schnellen zu trennen. Da in einem Puls die Zahl an langsamen Elektronen die der schnellen um mehrere Größenordnungen übertreffen kann, wird damit die Raumladungswirkung jenseits des Umkehrpunktes der langsamen Elektronen praktisch „ausgeschaltet“. Die verbleibende Coulombwechselwirkung im Ensemble der wenigen schnellen Elektronen ist um Größenordnungen schwächer und damit vernachlässigbar.

[0011] Mithilfe der erfindungsgemäßen Anordnung kann somit eine substanzielle Reduzierung der Coulombwechselwirkung zwischen langsamen und schnellen Elektronen in einem Elektronenstrahl, der aus einer Festkörperoberfläche mittels Licht oder durch Elektronenbeschuss ausgelöst wurde, erreicht werden. Die Anordnung umfasst spezielle Geometrien von Elektroden, welche unmittelbar vor der Probenoberfläche ein retardierendes und divergierendes oder konvergierendes elektrisches Feld erzeugen. Dadurch werden die langsamen Elektronen des Untergrundsignals innerhalb der geringstmöglichen Zeit von den spektroskopisch zu untersuchenden schnellen Elektronen (Photoelektronen, Auger-Elektronen oder gestreute Elektronen) abgetrennt und so die Wirkung der Coulombkräfte der langsamen auf die schnellen Elektronen substanziell reduziert.

[0012] Zur möglichst schnellen Abtrennung der unerwünschten langsamen Untergrundelektronen aus dem analysierten Elektronenstrahl werden in den erfindungsgemäßen Anordnungen segmentierte Steuerelektroden beschrieben, durch die sich Form und Stärke des elektrischen Feldes unmittelbar vor der Probenoberfläche einstellen lassen. Insbesondere eine Segmentierung in konzentrische Ringe erlaubt es, die divergierende Wirkung des Feldes so einzustellen, dass die langsamen Elektronen von der elektronenoptischen Achse weg nach außen abgelenkt werden, um die in der Nähe der Achse fliegenden schnelleren Primärelektronen möglichst wenig zu beeinflussen. Durch eine Segmentierung in sektorförmige Teilelektroden lässt sich zusätzlich eine nicht-axialsymmetrische Feldkomponente überlagern, sodass laterale Inhomogenitäten der Untergrundelektronen kompensiert werden können. Dies bewirkt eine Reduktion der integralen Raumladungswirkung um 1-3 Größenordnungen im Vergleich zum konventionellen Betriebsmodus eines vergleichbaren Kathodenlinsengerätes ohne Steuerelektrode. Die unten gezeigten Simulationen belegen, dass das Verfahren in einem großen Spektralbereich der Primärelektronen, insbesondere im Hochenergiebereich von mehreren keV Energie (bei Photonenanregung harter Röntgenbereich genannt), im Mittelenergiebereich von mehreren Hundert eV (weicher Röntgenbereich) und im Niederenergiebereich oberhalb von ca. 20 eV (Vakuum-Ultraviolettbereich) funktioniert. Aufgrund des abbremsenden anstelle eines beschleunigenden Fel-

des an der Probenoberfläche unterscheiden sich die erfindungsgemäßen Anordnungen substanziell von den aus der Literatur bekannten Kathodenlinsengeräten [DE 10 2013 005 173 B4, EP 1559126 B9, DE 10 2014 019408 B4; Review of Scientific Instruments 85, 113704 (2014) =<https://doi.org/10.1063/1.4902141>]. Bei allen bisher existierenden Kathodenlinsengeräten werden die aus der Probenoberfläche austretenden Elektronen in die Objektivlinse hinein beschleunigt. Die Sammlungseffizienz ist für die unerwünschten langsamen Elektronen sogar besonders groß. In der Arbeit von B. Schönhense et al. [New Journal of Physics, 20, 033004 (2018)] ist gezeigt, dass aus diesem Sammeleffekt eine sehr starke Coulombabstoßung resultiert, die sich bei gängigen Objektivgeometrien über eine Distanz von typisch 80 mm erstreckt und deren integrale Kraftwirkung über diesen langen Weg zu den erwähnten großen Energieverschiebungen in der Größenordnung von 10 eV führt (berechnet und gemessen). Diese neuen Ergebnisse belegen, dass der Raumladungseffekt in solchen konventionellen Mikroskopoptiken wesentlich langreichweitiger ist, als in früheren Arbeiten vermutet wurde, siehe G. Schönhense et al. [Ultramicroscopy 159, 488 (2015)].

[0013] Eine Besonderheit der durch einen Pumplaser ausgelösten Elektronen liegt darin, dass ihre Verteilung lateral stark inhomogen sein kann. Der intensive, gepulste Infrarotstrahl kann lokalisierte Plasmonen anregen, deren Zerfall zu extrem starker lokaler Elektronenemission führt, siehe z. B. F. Schertz et al. [Nano Letters 12, 1885 (2012) und Phys. Rev. Lett. 108, 237602 (2012)]. Die Elektronen aus solchen Emissionszentren können Coulombkräfte senkrecht zur optischen Achse hervorrufen, die zu einer nicht-axialsymmetrischen Deformation der Verteilung der Primärelektronen führen. Diese transversalen Coulombkräfte lassen sich durch sektorförmig segmentierte Steuerelektroden kompensieren.

[0014] Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung der beigefügten Zeichnungen ersichtlich. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Querschnittsansicht einer ersten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung auf Basis einer in konzentrische Ringe segmentierten Steuerelektrode mit eingezeichneten Äquipotentiallinien und Elektronentrajektorien;

Fig. 2 a-b eine Elektrodenanordnung auf Basis einer einzigen ringförmigen Steuerelektrode (a) im Vergleich mit der konventionellen Anordnung einer Kathodenlinse (b).

Fig. 3 eine Elektrodenanordnung, bei der die äußere Steuerelektrode probenseitig vor der inneren angeordnet ist;

Fig. 4 a-b den Fall eines sehr starken Abbremsfeldes von 70 V/mm zwischen Probe und Steuerelektrode, wobei die Primärelektronen praktisch ungestört das Abbremsfeld durchlaufen und die langsamen Elektronen bereits nach 100 Mikrometern Flugstrecke ihre Bewegungsrichtung umkehren (Detailbild (b));

Fig. 5 eine weitere Ausführungsart der Steuerelektrode, welche in mehrere konzentrische Ringe segmentiert ist, sodass die divergierende oder konvergierende Wirkung des Feldes auf die langsamen Elektronen optimiert werden kann;

Fig. 6 eine weitere Ausführungsart der Steuerelektrode, welche sektorförmig strukturiert ist, um inhomogene Verteilungen von langsamen Elektronen in ihrer Kraftwirkung zu kompensieren.

[0015] Bei der folgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung wird beispielhaft auf die Anordnung einer einzelnen ringförmigen Steuerelektrode und einer in zwei Ringe segmentierten Steuerelektrode Bezug genommen.

[0016] **Fig. 1** zeigt eine bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung zur Reduzierung der Coulombkräfte in einem Elektronenstrahl aus einer Probenoberfläche (1) auf Basis einer in zwei konzentrische Ringe segmentierten Steuerelektrode (2) vor einer stark beschleunigenden Extraktorelektrode (3). An die innere Ringelektrode (21) wird eine negative Spannung (hier -3600 V) und an die äußere Elektrode (22) eine positive Spannung (+ 5000 V) in Bezug auf die Probe (0V) angelegt, um so am Ort der Probenoberfläche ein retardierendes stark divergierendes elektrisches Feld, erkenntlich an den gekrümmten Äquipotentiallinien (7), zu erzeugen. Durch dieses Feld werden die Trajektorien der langsamen Elektronen (4) (Startenergie hier 200 eV) weg von der optischen Achse (OA) abgelenkt und zur Probenoberfläche zurückgelenkt, während die Primärelektronen (5) (Startenergie 4000 eV) durch das Feld gebündelt und in ein reziprokes Bild (6) fokussiert werden. **Fig. 1** stellt den Hochenergiefall dar und entspricht dem harten Röntgen-Spektralbereich, genannt HAXPES (Hard X-ray PhotoElectron Spectroscopy). Der unter flachem Winkel einfallende Lichtstrahl oder Elektronenstrahl ist der Übersichtlichkeit halber in allen Figuren nicht eingezeichnet. Bei den tatsächlichen Startenergien der Untergrundelektronen im Bereich von 0 bis 10 eV liegt der Umkehrpunkt bereits ca. 50 Mikrometer vor der Probenoberfläche.

[0017] **Fig. 2 a** zeigt eine Elektrodenanordnung mit nur einer Steuerelektrode (2), welche sich auf einem negativen Potential (hier - 300 V) bezüglich der Probenoberfläche (1) befindet und so die Trajektorien der langsamen Elektronen umkehrt, hier gezeigt für

Startenergien von 2 eV (41) und 10 eV (42). Hingegen werden die Primärelektronen mit 500 eV Startenergie (5) durch die Steuerelektrode und nachfolgende Extraktorelektrode (3) (+ 2000 V) so fokussiert, dass am rechten Bildrand ein reziprokes Bild (6) entsteht. Um die Details des retardierenden Feldes nahe der Probenoberfläche zu zeigen, variiert die Schrittweite zwischen benachbarten Äquipotentiallinien (7) von 5 V im linken Bildbereich bis 200 V im rechten Bildbereich.

[0018] Fig. 2 b zeigt zum Vergleich die Trajektorien für eine vergleichbare Optik im normalen Betrieb eines Kathodenlinsen-Gerätes mit stark beschleunigender Extraktorelektrode (3) (hier auf + 8000 V). Die langsamen Elektronen mit Startenergien von 2 eV (41) und 10 eV (42) sowie die Primärelektronen mit 500 eV Startenergie (5) laufen parallel zur optischen Achse (OA), was zu stark erhöhter Coulombabstoßung über eine lange Wegstrecke führt. Die Äquipotentiallinien (7) haben eine gleichmäßige Schrittweite von 250 V, das reziproke Bild liegt außerhalb des gezeigten Bereiches. Die Startenergie von 500 eV stellt den Mittelenergiefall dar und entspricht dem weichen Röntgen-Spektralbereich, genannt soft-XPS (soft X-ray Photoelectron Spectroscopy).

[0019] Fig. 3 zeigt eine Elektrodenanordnung, bei der sich die innere Steuerelektrode (21) auf schwach beschleunigenden Potenzial von + 40 V bezüglich der Probenoberfläche (1) befindet, während die äußere Steuerelektrode (22) auf retardierendem Potential (-108 V) liegt und so die Trajektorien der langsamen Elektronen umkehrt, hier gezeigt für Startenergien von 2 eV (41) und 1 eV (43). Hingegen werden die Primärelektronen mit 20 eV Startenergie (5) durch die Steuerelektrode und nachfolgende beschleunigende Elektrode (3) (+ 180 V) so fokussiert, dass ein reziprokes Bild (6) entsteht. In diesem Beispiel erweist sich ein konvergierendes Feld an der Probenoberfläche als vorteilhaft. Die Startenergie von 20 eV stellt den Niederenergiefall dar und entspricht dem Vakuum-Ultraviolett-Spektralbereich (VUV).

[0020] Fig. 4 a zeigt den Fall von nur einer Steuerelektrode (2) und eines sehr starken Abbremsfeldes von 70 V/mm an der Probenoberfläche (1), wodurch die langsamen Untergrundelektronen mit Startenergien von 2 eV (41) und 10 eV (42) sehr nah vor der Probenoberfläche bereits umkehren, während die Primärelektronen mit 500 eV Startenergie (5) praktisch ungestört das Abbremsfeld durchlaufen und in ein unverzerrtes Impulsbild (6) fokussiert werden. Die Äquipotentiallinien (7) haben einen Abstand von 50 V.

[0021] Fig. 4 b zeigt den Detailbereich unmittelbar vor der Probenoberfläche (markiertes Rechteck in (a)), wo die langsamen Elektronen (hier aus einem größeren Bereich) bereits nach kurzer Flugstrecke

ihre Bewegungsrichtung umkehren. Die Punkte an den Trajektorien markieren identische Flugzeiten (Isochronen) nach dem Lichtpuls. Bereits nach 50 ps erreichen die langsamen Elektronen mit Startenergie 2 eV (81) ihren Umkehrpunkt, die Elektronen mit 10 eV nach 100 ps (82). Die entsprechende 100 ps-Isochrone für die Primärelektronen (83) liegt bereits ca. 1,5 mm vor der Probenoberfläche, sodass die Coulombkräfte zwischen langsamen und schnellen Elektronen zu diesem Zeitpunkt bereits stark abgefallen sind. Die Ladungswolke der langsamen Elektronen in geringem Abstand von der Größenordnung einiger 10 Mikrometer vor einer leitfähigen Probenoberfläche wird zum Teil durch die sog. Bildladung (positive Ladungsverteilung auf der Oberfläche) abgeschirmt, was die Coulombkräfte auf die schnellen Primärelektronen weiter reduziert.

[0022] Fig. 5 zeigt eine weitere Ausführungsart der Steuerelektrode, welche in mehrere konzentrische Ringe segmentiert ist (23), sodass die divergierende oder konvergierende Wirkung des Feldes auf die langsamen Elektronen variiert werden kann und sich die gewünschte Feldform durch Höhe und Verhältnis der Spannungen ($U_1, U_2, \dots U_N$) an den Segmenten einstellen lässt. Die Blickrichtung ist entlang der optischen Achse.

[0023] Fig. 6 zeigt eine weitere Ausführungsart der Steuerelektrode, welche sektorförmig strukturiert ist (24), sodass sich durch Anlegen von verschiedenen Spannungen ($U_1, U_2, \dots U_N$) an die einzelnen Sektoren inhomogene Verteilungen von langsamen Elektronen in ihrer Kraftwirkung kompensieren lassen.

Bezugszeichenliste

- | | |
|----|---|
| 1 | Probenoberfläche |
| 2 | Steuerelektrode |
| 3 | beschleunigende Elektrode (Extraktor) |
| 4 | Untergrundelektronen |
| 5 | Primärelektronen |
| 6 | reziprokes Bild |
| 7 | Feldverteilung (Äquipotentialflächen) |
| 8 | Isochronen mit 100 Pikosekunden Schrittweite |
| 21 | innere Steuerelektrode |
| 22 | äußere Steuerelektrode |
| 23 | ringförmig segmentierte Steuerelektrode mit verschiedenen Potentialen $U_1 \dots U_N$ |
| 24 | sektorförmig segmentierte Steuerelektrode mit verschiedenen Potenzialen $U_1 \dots U_N$ |
| 41 | Untergrundelektronen mit 2 eV Startenergie |

- 42 Untergrundelektronen mit 10 eV Startenergie
- 81 Isochronen für Elektronen mit 2 eV Startenergie
- 82 Isochronen für Elektronen mit 10 eV Startenergie
- 83 Isochronen für Elektronen mit 500 eV Startenergie
- OA optische Achse
- r Radiuskoordinate

Patentansprüche

1. Anordnung zur Reduzierung der Raumladungswirkung eines von einer Probenoberfläche (1) emittierten Elektronenstrahls in einem abbildenden Elektronenmikroskop mit einem retardierenden Feld bezüglich aus der Probenoberfläche austretender Elektronen, umfassend eine oder mehrere Steuerelektroden (2), die dazu eingerichtet sind, im Bereich unmittelbar vor der Probenoberfläche ein retardierendes elektrisches Feld (7) zu erzeugen, wobei die hinter den Steuerelektroden (2) angeordnete beschleunigende Elektrode (3) die Funktion eines Extraktors einer Kathodenlinse aufweist, um so eine möglichst schnelle Abtrennung des Untergrundes aus langsameren Elektronen (4) vom zu untersuchenden Signal der Primärelektronen (5) zu bewirken.

2. Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass Form und Stärke des elektrischen Feldes (7) vor der Probenoberfläche (1) durch die Wahl der Spannungen an den Steuerelektroden (2) veränderbar ist, um zusätzlich zur Retardierung eine divergierende oder konvergierende Feldkomponente zu erzeugen und so die Raumladungswirkung der langsamen Untergrundelektronen (4) zu verringern.

3. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass hinter den Steuerelektroden (2) eine beschleunigende Elektrode (3) angeordnet ist, um ein reziprokes Bild (6) des zu analysierenden Elektronenstrahls (5) zu erzeugen.

4. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zu analysierenden Primärelektronen durch harte Röntgenstrahlung, weiche Röntgenstrahlung oder Vakuum-Ultraviolettstrahlung aus der Probenoberfläche (1) ausgelöst werden.

5. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zu analysierenden Primärelektronen durch Elektronenbeschuss der Probenoberfläche (1) ausgelöst werden oder elastisch gestreut werden.

6. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der anregende Lichtstrahl oder Elektronenstrahl zeitlich gepulst ist.

7. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der anregende Lichtstrahl oder Elektronenstrahl zeitlich konstant ist.

8. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass vor der ersten beschleunigenden Elektrode (3) eine oder mehrere Steuerelektroden (2) zur Erzeugung einer bestimmten Form und Größe des elektrischen Feldes (7) unmittelbar vor der Probenoberfläche (1) angeordnet sind.

9. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuerelektrode (2) in der Form eines einzelnen Ringes ausgebildet ist.

10. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuerelektrode aus mehreren konzentrischen Ringelementen (21, 22, 23) besteht, welche auf unterschiedliche Spannungen gelegt werden können, um die abbremsende und divergierende oder konvergierende Wirkung des elektrischen Feldes (7) auf die Untergrundelektronen (4) zu optimieren.

11. Anordnung nach einem oder mehreren der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuerelektrode aus mehreren sektorförmigen Elementen (24) besteht, welche auf unterschiedliche Spannungen gelegt werden können, um so die Kraftwirkung von lateral inhomogenen Untergrundelektronen (4) zu kompensieren.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

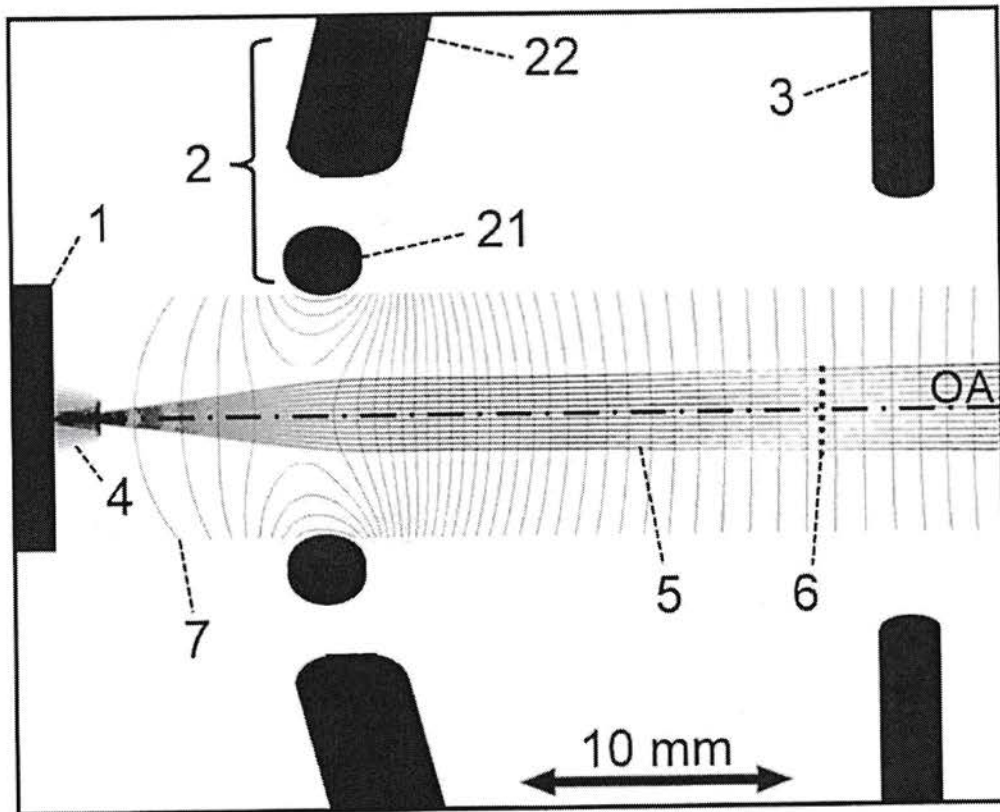
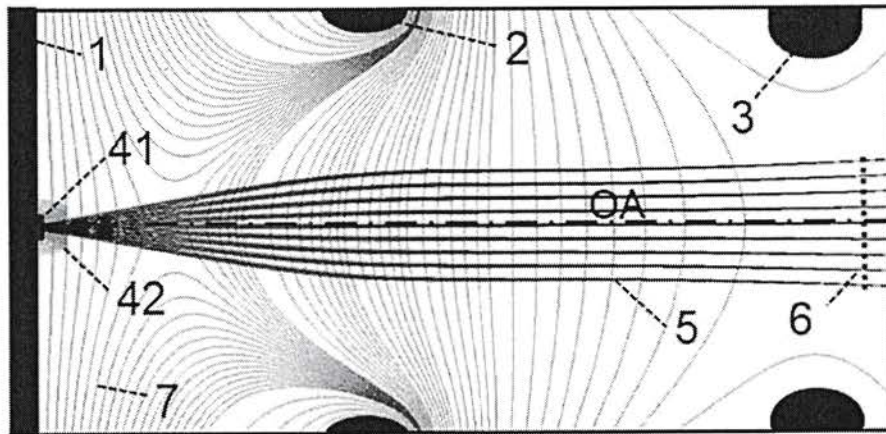


Fig. 1

(a)



(b)

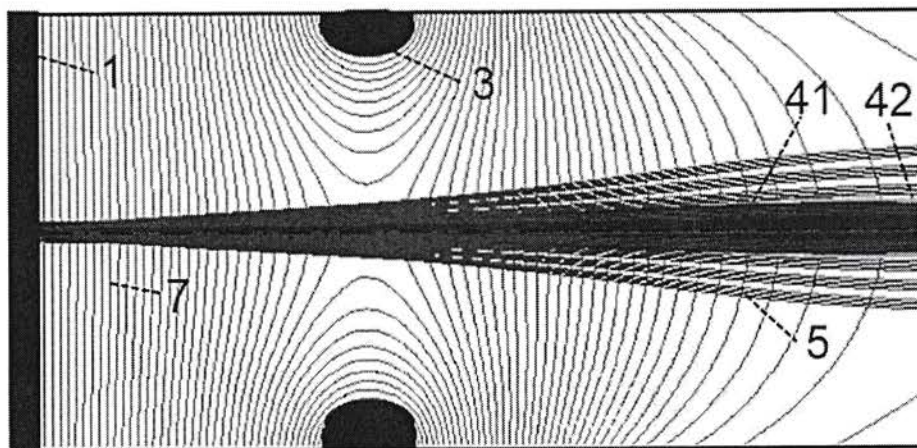


Fig. 2

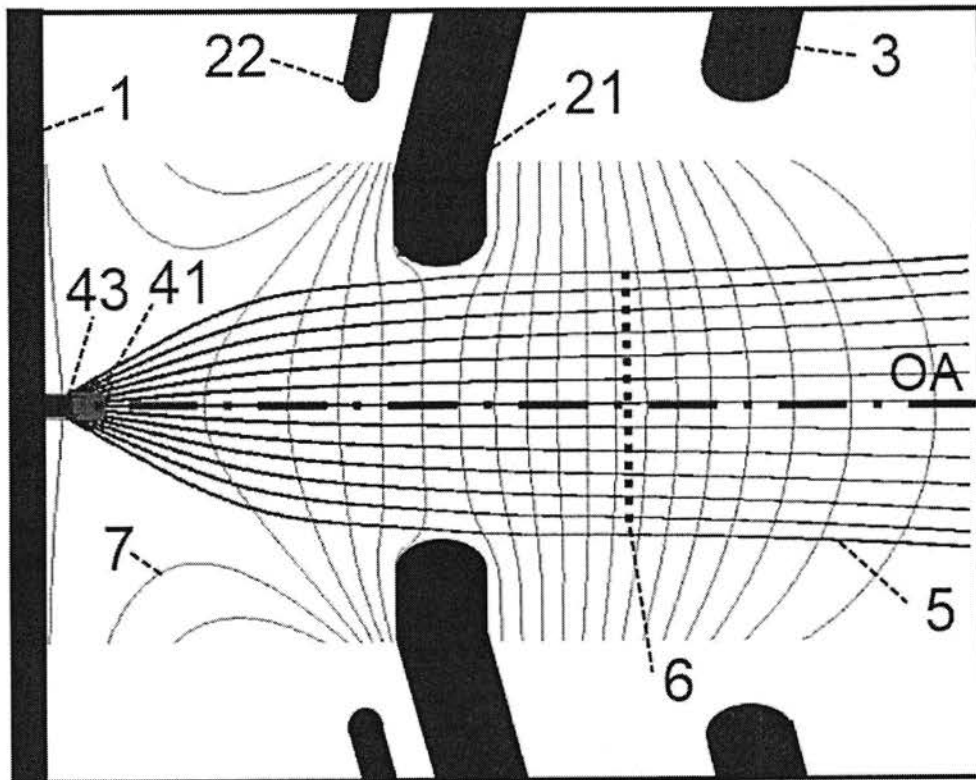
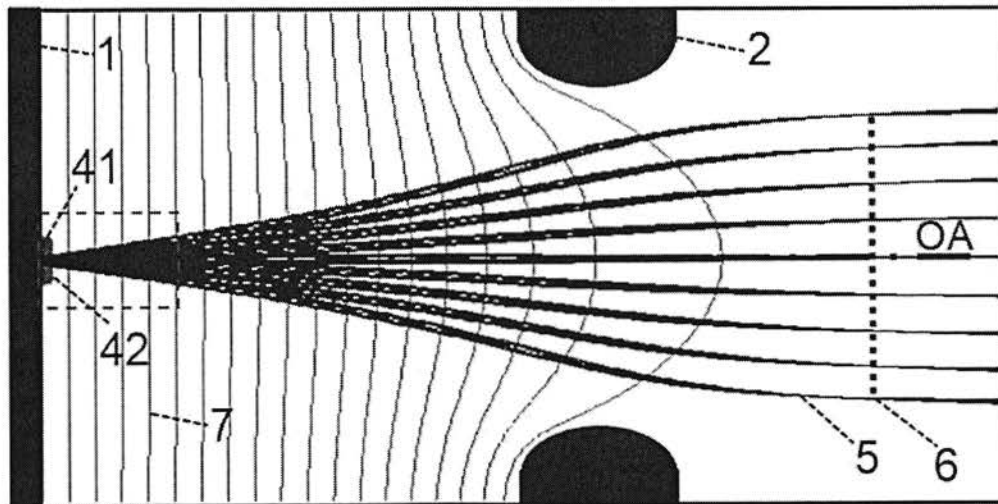


Fig. 3

(a)



(b)

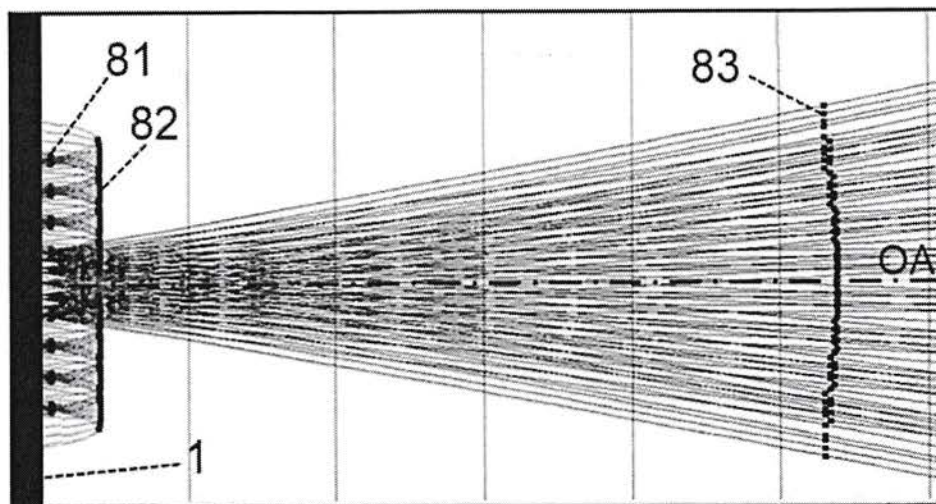


Fig. 4

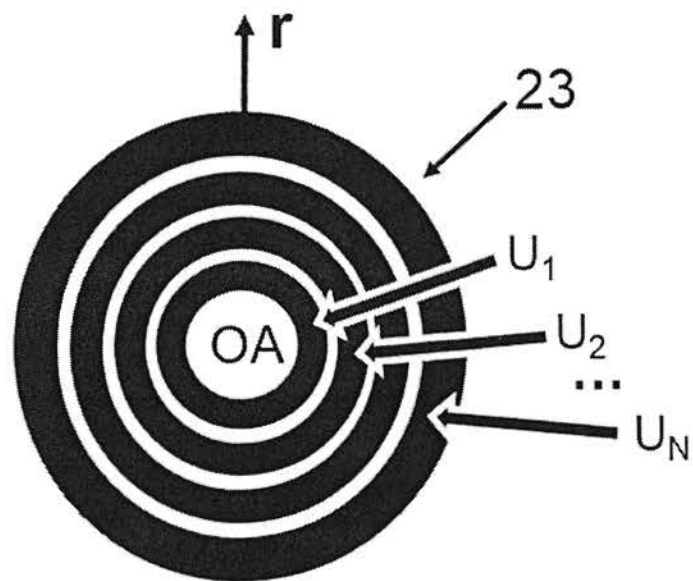


Fig. 5

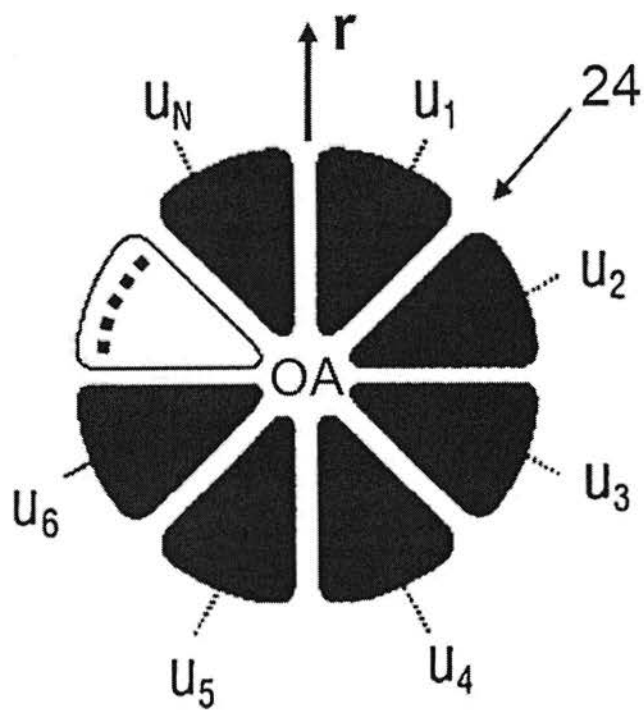


Fig. 6

Urkunde

über die Erteilung des
Patents Nr. 10 2017 126 882

Bezeichnung:

Anordnung zur Reduzierung der Raumladungswirkung in elektronen-
spektroskopischen Geräten

IPC:

H01J 37/07

Inhaber/Inhaberin:

GST Gesellschaft für systembezogene Technologieentwicklung mbH, 55130
Mainz, DE

Erfinder/Erfinderin:

Schönhense, Gerd, Prof. Dr., 55130 Mainz, DE; Schönhense, Benedikt Marian, London, GB

Tag der Anmeldung:

15.11.2017

Tag der Veröffentlichung der Patenterteilung:

10.01.2019

Die Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamts



Cornelia Rudloff-Schäffer

München, 10.01.2019

