



(10) **DE 10 2015 108 893 B3** 2016.02.11

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 108 893.2**

(22) Anmeldetag: **05.06.2015**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **11.02.2016**

(51) Int Cl.: **H01J 37/073** (2006.01)
H01J 37/04 (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:

**Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26129
Oldenburg, DE**

(74) Vertreter:

ZACCO Dr. Peters und Partner, 28195 Bremen, DE

(72) Erfinder:

**Vogelsang, Jan, 26133 Oldenburg, DE; Robin,
Jörg, 26131 Oldenburg, DE; Lienau, Christoph,
Prof. Dr., 26129 Oldenburg, DE; Groß, Petra, Dr.,
48431 Rheine, DE**

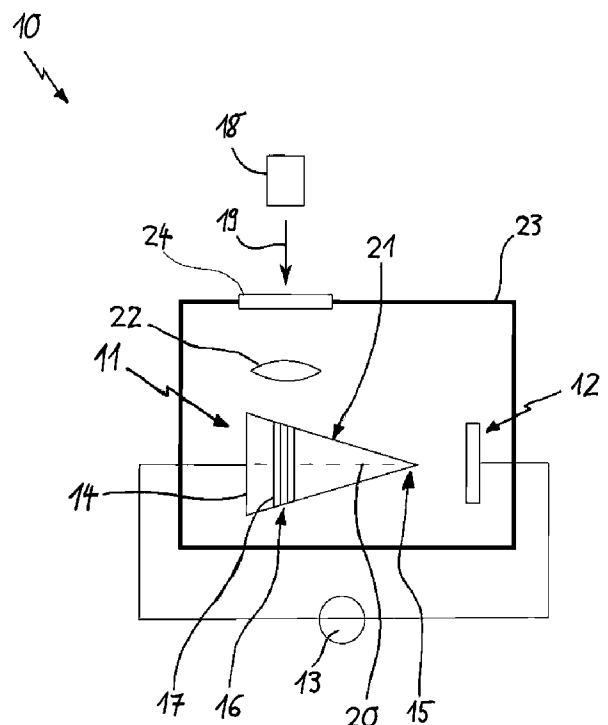
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 11 2009 003 724 T5
US 2011 / 0 220 792 A1

**P. Dombi et al., Ultrafast strong-field
photoemission from plasmonic nanoparticles,
Nano letters 13 (2013), S. 674 - 678**

(54) Bezeichnung: **Elektronenquelle und Verfahren zum Erzeugen eines Elektronenstrahls, Verfahren zum Herstellen einer solchen Elektronenquelle sowie deren Verwendung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Elektronenquelle (10) zum Erzeugen eines Elektronenstrahls und/oder Elektronenimpulses, mit einer Kathode (11). Um eine höhere zeitliche Auflösung und/oder einen geringeren Abstand zwischen der Elektronenquelle (10) und einer Probe zu ermöglichen, ist die Elektronenquelle dadurch gekennzeichnet, dass die Kathode (11) eine sich verjüngende metallische Struktur (14) aufweist und die metallische Struktur (14) eine Nanospitze (15) zum Fokussieren von mindestens einem Plasmon und zum Abgeben von Elektronen hat, wobei die metallische Struktur (14) beabstandet von der Nanospitze (15) ein Koppelement (16) zum Anregen des Plasmon mittels einer elektromagnetischen Welle (19) hat.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Elektronenquelle zum Erzeugen eines Elektronenstrahls mit einer Kathode. Des Weiteren betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Erzeugen eines Elektronenstrahls mit einer solchen Elektronenquelle sowie ein Verfahren zum Herstellen einer solchen Elektronenquelle.

[0002] Eine derartige Elektronenquelle ist aus dem Dokument DE 11 2013 001 852 T5 bekannt. Hierbei ist die Elektronenquelle Bestandteil eines Rasterelektronenmikroskops.

[0003] Darüber hinaus ist es bekannt, Elektronenmikroskope zu verwenden, um Strukturen mit atomarer räumlicher Auflösung zu untersuchen. Zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen können mittels eines Lasers durchgeführt werden, die aufgrund breiter Spektren und/oder kurzer Wellenlängen eine Pulsdauer im Femtosekundenbereich und darunter ermöglichen.

[0004] Um gleichzeitig eine hohe räumliche und eine hohe zeitliche Auflösung zu ermöglichen, kann die räumliche Auflösung von Elektronenmikroskopen mit der zeitlichen Auflösung und/oder Pulsdauer von Lasern verbunden werden. Bei derartigen sogenannten ultraschnellen Elektronenmikroskopen können kurze Elektronenimpulse mittels Photoemission aufgrund eines ultrakurzen Laserimpulses erzeugt werden. Eine solche Photoemission ist beispielsweise aus P. Dombi et al., Ultrafast strong-field photoemission from plasmonic nanoparticles, Nano Letters 13, 2, 674–678 bekannt.

[0005] Hierbei kann die zeitliche Auflösung des Laserimpulses, zumindest in erster Näherung, auf den Elektronenimpuls übergehen. Mit dem ultrakurzen Elektronenimpuls kann eine Probe bestrahlt werden, wobei vorzugsweise die Probe zuvor mittels mindestens einem zweiten ultrakurzen Energieimpulses und/oder Elektronenimpulses angeregt wurde. Mittels der Variation der Verzögerung zwischen dem Eintreffen der beiden Impulse auf der Probe kann die zeitliche Entwicklung abgebildet werden.

[0006] Für unterschiedliche Anwendungen und/oder Untersuchungen ist es wünschenswert, die zeitliche Auflösung möglichst zu erhöhen. Hierzu ist es bekannt, abbildende Optiken zu verwenden oder eine laserbasierte Elektronenpunktquelle direkt zur Abbildung einer Probe in einem Punktprojektionsmikroskop zu verwenden. Hierdurch kann der Abstand zwischen der Elektronenquelle und der Probe bis auf etwa 10 µm verkleinert werden. Mittels geeigneter Maßnahmen kann die zeitliche Auflösung und/oder die Elektronenimpulsdauer auf etwa 100 fs erhöht werden.

[0007] Bei den bekannten Elektronenquellen, wie beispielsweise aus der DE 11 2009 003 724 T5 und/oder Elektronenmikroskopen, insbesondere den ultraschnellen Elektronenmikroskopen, bestehen jedoch einige Nachteile. Wenn beispielsweise die Elektronen durch einen in seiner Größe beugungsbegrenzten Lichtfleck erzeugt werden, der bei moderater Fokussierung einige Mikrometer groß sein kann, besteht die Gefahr, dass eine Probe in den Lichtfleck bewegt wird. Dies kann zu einer unerwünschten Erwärmung der Probe, potenziell zur Auslösung unerwünschter zusätzlicher Elektronen und/oder potenziell zur Abschattung einer Elektronen emittierenden Spitze der Elektronenquelle führen. Somit besteht das Risiko, dass kein kontrollierter Elektronenimpuls und/oder gar keine Elektronen mehr ausgelöst werden.

[0008] Für räumlich hoch auflösende Projektionsbilder ist ein möglichst geringer Abstand zwischen der Elektronenquelle und der Probe notwendig. Insbesondere ist es wünschenswert, dass der Abstand nur wenige hundert Nanometer beträgt. Auch für zeitlich hoch aufgelöste Messungen sollte der Abstand zwischen der Elektronenquelle und der Probe möglichst klein sein, was beispielsweise in dem in US 2011/0220792 A1 beschriebenen ultraschnellen Elektronenmikroskop nicht gegeben ist. Eine Verringerung des Abstandes ist jedoch aufgrund der Gefahr einer Bestrahlung der Probe durch eine Lichtquelle, insbesondere einen Laser, zum Auslösen der Elektronen nicht möglich.

[0009] Bei einer starken Fokussierung des Elektronen auslösenden Lichtstrahls und/oder Laserimpulses zur Verkleinerung des Lichtflecks am Ort der Auslösung der Elektronen ist zwar ein geringerer Abstand zwischen der Elektronenquelle und der Probe realisierbar, jedoch nimmt hierbei der Öffnungswinkel des Lichtkegels zu. Dieser Lichtkegel, insbesondere mit einem Öffnungswinkel von einigen zehn Grad, muss freigehalten werden und steht somit nicht zur Platzierung von z. B. Elektronenlinsen zur Verfügung. Hierdurch besteht die Gefahr, dass das Design und/oder die Konstruktion von entsprechenden Linsensystemen stark eingeschränkt ist.

[0010] Des Weiteren ist von Nachteil, dass die Größe des fokussierten Lichtes, insbesondere im Bereich einiger Mikrometer, und der Elektronenquelle, insbesondere im Bereich einiger Nanometer, üblicherweise nicht übereinstimmen. Hierdurch entsteht der Nachteil, dass ein großer Teil der Laserenergie nicht zur Emission von Elektronen genutzt werden kann.

[0011] Bei einer Beleuchtung einer Spitze einer Elektronenquelle mit einem Fernfeld wird zudem nicht nur die Spitze beleuchtet, an der auch tatsächlich die Elektronen ausgelöst werden, sondern auch weitere Bestandteile der Elektronenquelle, insbeson-

dere ein Teil des Spitzenschaftes und/oder der sich verjüngenden metallischen Struktur. Hierdurch besteht die Gefahr einer unerwünschten Erwärmung der Elektronenquelle, insbesondere der Spitze der Elektronenquelle. Hierdurch kann es zu einer Ausdehnung der metallischen Struktur und/oder der Spitze kommen, was die stabile Platzierung einer Probe in einem vorgegebenen Abstand zu der Elektronenquelle erheblich erschwert. Insbesondere bei einer gepulsten Beleuchtung und damit kurzfristigen Ausdehnungen der Elektronenquelle und/oder einer Spitze der Elektronenquelle auf einer Zeitskala, die schneller ist als eine Abstandsregelung, kann eine stabile Positionierung der Probe hinsichtlich eines konstanten Abstandes zwischen der Probe und der Elektronenquelle sogar unmöglich sein.

[0012] Es ist die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe, eine Elektronenquelle und ein Verfahren zum Erzeugen eines Elektronenstrahls der eingangs genannten Art derart weiterzuentwickeln, dass eine höhere zeitliche Auflösung und/oder ein geringerer Abstand zwischen der Elektronenquelle und einer Probe ermöglicht ist. Des Weiteren ist es eine der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe, ein Verfahren zum Herstellen einer solchen Elektronenquelle anzugeben.

[0013] Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird mittels einer Elektronenquelle der eingangs genannten Art gelöst, wobei die Kathode eine sich verjüngende metallische Struktur aufweist und die metallische Struktur eine Nanospitze zum Fokussieren von mindestens einem Plasmon und zum Abgeben von Elektronen hat, wobei die metallische Struktur beabstandet von der Nanospitze ein Koppellement zum Anregen des Plasmon mittels einer elektromagnetischen Welle hat. Bei dem Verfahren zum Erzeugen eines Elektronenstrahls mit einer solchen Elektronenquelle werden Elektronen durch Plasmon-induzierte Elektronenemission erzeugt. Bei dem Verfahren zum Herstellen einer erfindungsgemäßen Elektronenquelle ist vorgesehen, dass eine sich verjüngende metallische Struktur als eine Kathode bereitgestellt wird, eine Nanospitze an der metallischen Struktur zum Fokussieren von Plasmonen und Abgeben von Elektronen hergestellt wird, und ein Koppellement zum Anregen der Plasmonen mittels einer elektromagnetischen Welle in einen Oberflächenbereich der metallischen Struktur eingebracht wird.

[0014] Hierbei ist von Vorteil, dass das aufgrund der elektromagnetischen Welle erzeugte Plasmon und/oder mehrere erzeugte Plasmonen in eine nanometergroße Spitze und/oder ein Volumen im Nanometerbereich, nämlich die vorstehend genannte Nanospitze, hineinläuft und fokussiert wird. Insbesondere wird ein Plasmon oder werden mehrere Plasmonen beim Fokussieren in Richtung der Nanospitze

räumlich zusammen gezogen. Aufgrund der Fokussierung des mindestens einen Plasmons im Bereich der Nanospitze kann ein elektrisches Feld im Bereich der Nanospitze verstärkt werden, wodurch Elektronen aus der Nanospitze ausgelöst und/oder abgelöst werden können. Aufgrund einer Verbindung der metallischen Struktur als Kathode mit einer Spannungsquelle können Elektronen nachgeliefert werden. Insbesondere ist eine Anode vorgesehen, die ebenfalls mit der Spannungsquelle verbunden sein kann.

[0015] Von besonderem Vorteil ist, dass das Koppellement zum Anregen des mindestens einen Plasmons von der Nanospitze beabstandet ist. Hierdurch ist eine direkte Beleuchtung der Elektronenquelle, insbesondere der Nanospitze, vermeidbar. Somit kann eine seitlich beliebig weit ausgedehnte Probe beliebig dicht an die Elektronenquelle, insbesondere die Nanospitze, herangebracht werden. Linsensysteme, insbesondere elektrostatische Linsensysteme, können kompakter um die Elektronenquelle, insbesondere die Nanospitze, herumgebaut werden. Hierdurch sind besonders kurze Impulsdauern der Elektronenimpulse auf eine Probe realisierbar. Eine Erwärmung der Elektronenquelle, insbesondere der Nanospitze, ist erheblich reduzierbar. Insbesondere ergibt sich eine Erwärmung der Elektronenquelle und/oder der Nanospitze lediglich aufgrund einer Absorption des Plasmons und/oder mehrerer Plasmonen. Somit kann sich allenfalls ein lediglich geringer Energieeintrag bzw. eine lediglich geringe Erwärmung ergeben.

[0016] Die Verwendung eines von der Nanospitze beabstandeten Koppellementes ermöglicht eine stärkere Fokussierung der elektromagnetischen Welle. Hierdurch kann eine geringere Leistung bei einer Lichtquelle für die elektromagnetische Welle gewählt werden als bei einer direkten Beleuchtung der Elektronenquelle, insbesondere der Nanospitze. Insbesondere wird aufgrund des von der Nanospitze beabstandeten Koppellementes und der Fokussierung des mindestens einen Plasmons ein Missverhältnis zwischen der Größe der Beleuchtung des Koppellementes und der Größe des Emissionspunktes für die Elektronen erheblich reduziert oder aufgehoben. Vorzugsweise ermöglicht die erfindungsgemäße Elektronenquelle die Erzeugung ultrakurzer Elektronenimpulse, insbesondere mit einer Zeitdauer von weniger als 50 fs, weniger als 20 fs, weniger als 15 fs oder weniger als 10 fs. Im Rahmen der vorliegenden Anmeldung steht die Abkürzung fs für Femtosekunden, nm für Nanometer und μm für Mikrometer.

[0017] Bei dem mindestens einen Plasmon kann es sich um ein Oberflächenplasmon handeln. Insbesondere wird Energie aus der elektromagnetischen Welle in mindestens ein an die metallische Struktur gebundenes Oberflächenplasmon-Polariton übertragen. Es können, insbesondere mittels eines Lichtim-

pulses, mehrere Plasmonen, Oberflächenplasmonen und/oder Oberflächenplasmon-Polaritonen an dem Koppelement angeregt werden und/oder im Bereich der Nanospitze fokussiert werden.

[0018] Gemäß einer Weiterbildung der erfindungsgemäßen Elektronenquelle ist die metallische Struktur und/oder die Nanospitze konusartig und/oder kegelförmig ausgebildet. Insbesondere ist die metallische Struktur und/oder die Nanospitze konusförmig und/oder kegelförmig. Die metallische Struktur kann aus Gold oder Silber gebildet sein. Beispielsweise kann ein polykristalliner Golddraht, insbesondere mit einer feinen Kornstruktur, als Ausgangsmaterial eingesetzt werden. Die metallische Struktur und/oder die Nanospitze kann einen Öffnungswinkel im Bereich von 10° bis 40°, insbesondere im Bereich von 20° bis 30°, aufweisen. Beispielsweise beträgt der Öffnungswinkel der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze 22°. Aufgrund der konusartigen und/oder kegelförmigen Gestalt der metallischen Struktur werden das mindestens eine Plasmon zum Zusammenlaufen und/oder Fokussieren in der Nanospitze veranlasst.

[0019] Vorzugsweise ist die metallische Struktur, die Nanospitze und/oder mindestens ein Bereich der metallischen Struktur vom Koppelement bis zur Nanospitze frei von Verunreinigungen und/oder frei von Korngrenzen. Insbesondere ist der Bereich des Koppelementes und/oder der Bereich einschließlich des Koppelementes bis einschließlich der Nanospitze frei von Materialverunreinigungen und/oder frei von Korngrenzen. Hierdurch sind unerwünschte Störeffekte bei der Fokussierung der Plasmonen in Richtung der Nanospitze vermeidbar. Insbesondere ist ein unerwünschtes Ablösen von Elektronen in einem Bereich außerhalb der Nanospitze, insbesondere im Bereich des Koppelementes und/oder in einem Bereich zwischen dem Koppelement und der Nanospitze vermeidbar.

[0020] Vorzugsweise hat die Nanospitze ein Volumen im Nanometerbereich, insbesondere von etwa $(10\text{ nm})^3$. Die Nanospitze kann alternativ als Apex bezeichnet werden. Die Nanospitze kann einen Spitzenradius kleiner als 20 nm, insbesondere kleiner als 15 nm oder kleiner als 12 nm aufweisen. Insbesondere liegt der Spitzenradius der Nanospitze in einem Bereich von 5 nm bis 12 nm.

[0021] Gemäß einer Weiterbildung ist das Koppelement als ein Gitterkoppler ausgebildet. Mittels des Koppelementes ist aufgrund einer eintreffenden elektromagnetischen Welle mindestens ein Plasmon auf der Oberfläche der metallischen Struktur anregbar. Der Gitterkoppler kann bis zu 15 Gitterlinien oder mehr aufweisen. Vorzugsweise ist die Anzahl der Gitterlinien nicht beschränkt und kann beliebig gewählt werden. Insbesondere hat der Gitterkoppler sieben Gitterlinien. Die Gitterlinien können eine Brei-

te im Bereich von 600 nm bis 1.000 nm und/oder eine Tiefe im Bereich von 200 nm bis 600 nm aufweisen. Insbesondere sind die Gitterlinien 800 nm breit und 400 nm tief. Vorzugsweise hat der Gitterkoppler eine Gitterkonstante im Bereich von 1.200 nm bis 3.000 nm, insbesondere im Bereich von 1.500 nm bis 2.500 nm. Besonders bevorzugt hat der Gitterkoppler eine Gitterkonstante von 1.600 nm oder 2.000 nm. Die Gitterkonstante kann der Wellenlänge der auf das Koppelement eingestrahlten elektromagnetischen Welle entsprechen. Vorzugsweise wird die elektromagnetische Welle schräg zur Oberfläche der metallischen Struktur und/oder des Koppelementes auf das Koppelement eingestrahlt. Insbesondere ergibt sich die Gitterkonstante in Abhängigkeit von dem Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle zur Oberfläche der metallischen Struktur und/oder des Koppelementes. Vorzugsweise wird die elektromagnetische Welle mit einem Einfallswinkel zur Oberfläche der metallischen Struktur und/oder des Koppelementes auf das Koppelement ausgerichtet, der dem halben Öffnungswinkel der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze entspricht.

[0022] Nach einer weiteren Ausführungsform ist der Abstand des Koppelementes von der Nanospitze größer als ein Fokusdurchmesser einer Lichtquelle zum Bestrahlen des Koppelementes. Insbesondere dient die Lichtquelle zum Abgeben und/oder Bereitstellen der elektromagnetischen Welle. Vorzugsweise ist die Lichtquelle als ein Laser ausgebildet. Der Abstand zwischen dem Koppelement und der Nanospitze kann größer als 10 µm oder größer als 20 µm sein. Vorzugsweise liegt der Abstand zwischen dem Koppelement und der Nanospitze im Bereich von 10 µm bis 200 µm. Besonders bevorzugt beträgt der Abstand zwischen dem Koppelement und der Nanospitze 50 µm. Insbesondere ist der Abstand zwischen dem Koppelement und der Nanospitze derart gewählt, dass bei einer Beleuchtung des Koppelementes eine gleichzeitige Beleuchtung der Nanospitze vermieden ist. Insbesondere ist der Abstand des Koppelementes von der Nanospitze derart gewählt, dass dieser Abstand geringer ist als eine mittlere Propagationslänge der mittels der elektromagnetischen Welle erzeugten Plasmonen. Bei einer Wellenlänge von beispielsweise 1.600 nm der am Koppelement eintreffenden elektromagnetischen Welle beträgt die mittlere Propagationslänge der hierdurch erzeugten Plasmonen etwa 100 µm. Somit ist beispielsweise bei einem Abstand des Koppelementes von der Nanospitze von etwa 50 µm gewährleistet, dass die Plasmonen die Nanospitze erreichen.

[0023] Vorzugsweise ist die metallische Struktur innerhalb einer Vakuumkammer angeordnet. Hierdurch kann eine Beschädigung und/oder Zerstörung der Elektronenquelle, insbesondere aufgrund einer Ionisation der ansonsten vorhandenen Gase, vermieden werden. Eine Lichtquelle, insbesondere ein La-

ser, zum Bestrahlen des Koppelementes kann innerhalb oder außerhalb der Vakuumkammer angeordnet sein. Vorzugsweise ist die Lichtquelle außerhalb der Vakuumkammer angeordnet. Das Licht und/oder die elektromagnetische Welle der Lichtquelle kann dem Koppelement durch ein Fensterelement, das der Vakuumkammer zugeordnet ist, zugeführt werden. Das Fensterelement kann in einer Wand der Vakuumkammer angeordnet sein. Des Weiteren kann eine Linse, ein Linsensystem und/oder eine Reflexionsoptik vorgesehen sein. Die Linse, das Linsensystem und/oder die Reflexionsoptik kann innerhalb oder außerhalb der Vakuumkammer angeordnet sein. Die Linse, das Linsensystem und/oder die Reflexionsoptik ist zwischen der Lichtquelle und dem Koppelement positioniert. Insbesondere dient die Linse, das Linsensystem und/oder die Reflexionsoptik zum Fokussieren des Lichtes und/oder der elektromagnetischen Welle der Lichtquelle auf die Fläche des Koppelementes. Vorzugsweise erfolgt die Fokussierung des Lichtes und/oder der elektromagnetischen Welle der Lichtquelle derart, dass das Licht und/oder die elektromagnetische Welle im Wesentlichen vollständig auf das Koppelement trifft.

[0024] Gemäß einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Erzeugen eines Elektronenstrahls und/oder eines Elektronenimpulses wird eine Spannung einer Spannungsquelle an die Kathode angelegt. Insbesondere wird eine Spannung der Spannungsquelle an die Kathode und eine Anode zum Erzeugen eines elektrischen Feldes zwischen Kathode und Anode angelegt. Hierdurch kann die mittels des mindestens einen Plasmons induzierte Elektronenemission erleichtert und/oder unterstützt werden. Nach der Auslösung und/oder Ablösung der Elektronen von der Nanospitze aufgrund der Fokussierung des mindestens einen Plasmons und/oder der mehreren Plasmonen werden die abgelösten Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Die somit freien und durch die angelegte Spannung von der Nanospitze weg beschleunigten Elektronen können für Untersuchungen einer Probe verwendet werden. Mittels der angelegten Spannung werden der Kathode, der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze hinreichend Elektronen für weitere Auslöse und/oder Ablöseprozesse von der Nanospitze zugeführt.

[0025] Vorzugsweise wird ein Lichtimpuls und/oder eine elektromagnetische Welle auf das Koppelement zum Erzeugen des mindestens einen Plasmons, insbesondere Oberflächenplasmon und/oder Oberflächenplasmon-Polariton, fokussiert. Der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle wird von einer Lichtquelle, insbesondere einem Laser, bereitgestellt. Das erzeugte und/oder angeregte Plasmon wird in Richtung der Nanospitze fokussiert. Insbesondere aufgrund der Asymmetrie der metallischen Struktur, vorzugsweise in Bezug auf den Ein-

fallswinkel des Lichtimpulses und/oder der elektromagnetischen Welle auf die Oberfläche der metallischen Struktur und/oder des Koppelementes, laufen die erzeugten und/oder angeregten Plasmonen in Richtung der Nanospitze. Hierbei wird das mindestens eine Plasmon und/oder werden mehrere Plasmonen in einem nanometergroßen Volumen der Nanospitze fokussiert. Vorzugsweise wird ein elektrisches Feld im Bereich der Nanospitze aufgrund der Fokussierung des Plasmons und/oder der Plasmonen verstärkt. Aufgrund der Fokussierung des Plasmons und/oder der Plasmonen, insbesondere aufgrund der Verstärkung des elektrischen Feldes im Bereich der Nanospitze, können Elektronen von der Nanospitze ausgelöst und/oder abgelöst werden.

[0026] Vorzugsweise wird ein Lichtimpuls und/oder eine elektromagnetische Welle einer Lichtquelle auf einen Fokusbereich, insbesondere mittels einer Linse, einem Linsensystem und/oder einer Reflexionsoptik, fokussiert, der zumindest im Wesentlichen den Ausmaßen und/oder der Fläche des Koppelementes entspricht. Hierdurch sind Energieverluste bei der Umwandlung der elektromagnetischen Welle in ein Plasmon reduzierbar. Dies ermöglicht den Einsatz einer Lichtquelle mit einer geringeren Leistung. Vorzugsweise erfolgt die Fokussierung und/oder Justierung des Lichtimpulses, der elektromagnetischen Welle, des Fokusbereichs und/oder der Lichtquelle im Bezug zu einer Mittelachse der metallischen Struktur. Insbesondere erfolgt die Einstrahlung des Lichtimpulses und/oder der elektromagnetischen Welle auf das Koppelement schräg zur Oberfläche der metallischen Struktur und/oder des Koppelementes. Vorzugsweise erfolgt die Einstrahlung des Lichtimpulses und/oder der elektromagnetischen Welle mit einem Einfallswinkel zur Oberfläche, der dem halben Öffnungswinkel der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze entspricht. Insbesondere wird ein Lichtimpuls und/oder eine elektromagnetische Welle mit einer Zeitauflösung und/oder Zeitdauer von weniger als 100 fs, weniger als 50 fs oder weniger als 20 fs verwendet. Besonders bevorzugt liegt die Zeitauflösung und/oder die Zeitdauer im Bereich von 15 fs, 10 fs oder weniger. Vorzugsweise ist eine Zeitauflösung und/oder Zeitdauer des Lichtimpulses und/oder des Elektronenimpulses von weniger als 15 fs oder weniger als 10 fs realisierbar. Somit ermöglicht die erfindungsgemäße Elektronenquelle eine sehr hohe zeitliche Auflösung.

[0027] Vorzugsweise hat der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle zum Anregen des mindestens einen Plasmons und/oder von mehreren Plasmonen eine, insbesondere mittlere, Wellenlänge im Bereich von 0,3 μm bis 20 μm , vorzugsweise im Bereich von 1.200 nm bis 2.000 nm. Insbesondere hat der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle eine, vorzugsweise mittlere, Wellenlänge von 1.600 Nanometern. Bei einer Nanospitze aus Gold

kann die Wellenlänge im Bereich von 0,6 μm bis 20 μm liegen. Bei Materialien, die im ultravioletten Spektralbereich reflektieren, insbesondere bei Silber, kann die Wellenlänge im Bereich von 0,3 μm bis 20 μm liegen. Der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle kann eine Energie von weniger als 50 Picojoule aufweisen.

[0028] Ein Elektron kann an der Nanospitze aufgrund einer Mehr-Photonen-Anregung abgelöst und/oder ausgelöst werden. Insbesondere ist ein unerwünschtes Ablösen und/oder Auslösen von Elektronen aufgrund einer beispielsweise Ein-Photonen-Anregung im Bereich der metallischen Struktur und außerhalb der Nanospitze vermieden. Besonders bevorzugt wird ein Elektron an der Nanospitze aufgrund einer, insbesondere im Mittel, 7-Photonen-Anregung abgelöst und/oder ausgelöst. Insbesondere ist die Wellenlänge der Lichtquelle derart gewählt, dass eine Ein-Photonen-Anregung vermieden ist. Vorzugsweise wird eine Wellenlänge von 1.600 nm für die Lichtquelle, den Lichtimpuls und/oder die elektromagnetischen Wellen verwendet, bei der im Mittel 7 Photonen zur Überwindung der Austrittsarbeit für ein Elektron notwendig sind.

[0029] Gemäß einer Weiterbildung des Verfahrens zum Herstellen einer erfindungsgemäßen Elektronenquelle wird eine Anode zum Zusammenwirken mit der Kathode bereit gestellt. Insbesondere wird die metallische Struktur aus einem polykristallinen Material und/oder einem Draht, insbesondere einem Golddraht, hergestellt.

[0030] Vorzugsweise wird das Material der metallischen Struktur in einer vorgegebenen Zeitdauer zum Auflösen von Korngrenzen erhitzt. Insbesondere wird das Material der metallischen Struktur auf eine Temperatur von mindestens 500° Celsius oder 800° Celsius erhitzt. Das Material der metallischen Struktur kann in einer vorgegebenen Zeitdauer in einem erhitzten Zustand gehalten und/oder in einer vorgegebenen Zeitdauer auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Die vorgegebene Zeitdauer kann mindestens 6 Stunden oder genau 8 Stunden betragen.

[0031] Somit kann das Material der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze zunächst innerhalb von beispielsweise 8 Stunden auf eine Temperatur von 800° Celsius erhitzt werden. Anschließend kann das erhitzte Material für eine Dauer von weiteren 8 Stunden auf einer Temperatur von 800° Celsius gehalten werden. Daran anschließend kann das Material der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze über eine Zeitdauer von 8 Stunden auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Durch dieses Verfahren wird das Material entspannt. Insbesondere werden größere Kornstrukturen gebildet. Vorzugsweise ist die metallische Struktur und/oder die Nanospitze annähernd einkristallin ausbildbar. Insbesondere

wird das Material der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze zum Auflösen von Korngrenzen im Bereich der sich verjüngenden metallischen Struktur und/oder der Nanospitze, insbesondere in einem Bereich zwischen dem Koppelement und der Nanospitze, erhitzt.

[0032] Gemäß einer Weiterbildung wird die sich verjüngende, insbesondere konische und/oder kegelförmige, Gestalt der metallischen Struktur und/oder die Nanospitze mittels Ätzen in einer Säure hergestellt. Hierbei kann das Ätzen elektrochemisch erfolgen. Als Säure kann eine Salzsäure, insbesondere eine 37-prozentige Lösung, verwendet werden. Insbesondere wird zum Ausbilden der sich verjüngenden metallischen Struktur und/oder der Nanospitze ein Draht, vorzugsweise ein Golddraht, zentriert in einer Öffnung eines Platinrings und/oder in einer vorgegebenen Tiefe in die Säure eingetaucht. Hierbei kann der Draht 20 μm bis 100 μm , vorzugsweise 50 μm , tief in die Säure eingetaucht werden. Der Platinring kann als Gegenelektrode für den Draht dienen. Zum Durchführen des elektrochemischen Ätzprozesses kann eine Spannung an den Draht und den Platinring angelegt werden. Insbesondere wird die sich verjüngende metallische Struktur und/oder die Nanospitze an einem freien Ende eines Drahtes hergestellt. Aufgrund des Eintauchens des freien Endes des Drahtes kriecht die Säure aufgrund von Kapillarkräften ein Stück weit an dem Draht hoch, wobei die Säure nach einem hinreichenden Materialabtrag von der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze abreißt. Aufgrund des Materialabtrages ist die sich verjüngende, konische und/oder kegelförmige Gestalt der metallischen Struktur und/oder der Nanospitze herstellbar.

[0033] Vorzugsweise wird das Koppelement beabstandet von der Nanospitze auf der Oberfläche der sich verjüngenden metallischen Struktur aufgebracht. Hierbei kann das Koppelement, insbesondere in der Gestalt eines Gitterkopplers, mittels Ionenstrahlolithografie und/oder FIB (engl.: Focussed Ion Beam milling) aufgebracht werden.

[0034] Von besonderem Vorteil ist eine Verwendung einer erfindungsgemäßen Elektronenquelle in einem Elektronenmikroskop, insbesondere in einem ultraschnellen Elektronenmikroskop, in einem Punktprojektionsmikroskop, in einem Rastertunnelmikroskop, in einem Transmissionselektronenmikroskop, in einem Raster-Photostrom-Mikroskop und/oder zu zeitaufgelösten Abbildung von Strömen und/oder elektromagnetischen Feldern in Materialien.

[0035] Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Figuren näher erläutert. Es zeigen:

[0036] Fig. 1 eine schematische Seitenansicht einer erfindungsgemäßen Elektronenquelle.

[0037] Fig. 2 ein schematisches Ablaufdiagramm für ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Erzeugen eines Elektronenstrahls mit einer Elektronenquelle gemäß Fig. 1, und

[0038] Fig. 3 ein schematisches Ablaufdiagramm für ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Herstellen einer Elektronenquelle gemäß Fig. 1.

[0039] Fig. 1 zeigt eine schematische Seitenansicht einer erfindungsgemäßen Elektronenquelle 10. Die Elektronenquelle 10 weist eine Kathode 11 und eine Anode 12 auf. Die Kathode 11 und die Anode 12 sind mit einer Spannungsquelle 13 verbunden. Die Kathode 11 und die Anode 12 sind voneinander beabstandet, wobei aufgrund der angelegten Spannungsquelle 13 zwischen der Kathode 11 und der Anode 12 ein hier nicht näher dargestelltes elektrisches Feld erzeugbar ist.

[0040] Die Kathode 11 weist eine sich verjüngende metallische Struktur 14 auf. Die sich verjüngende metallische Struktur 14 hat eine kegelförmige Gestalt mit einer Nanospitze 15. Die Nanospitze 15 weist ein nanometergroßes Volumen auf und ist der Anode 12 zugewandt. Bei diesem Ausführungsbeispiel hat die Nanospitze 15 einen Öffnungswinkel von 30° und die Nanospitze hat einen Spitzenradius von 12 nm. Zwischen der Kathode 11 und der Anode 12 kann unmittelbar vor der Nanospitze 15 eine hier nicht näher dargestellte Probe angeordnet sein.

[0041] Beabstandet von der Nanospitze 15 weist die sich verjüngende metallische Struktur 14 ein Koppelement 16 auf. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist das Koppelement 16 etwa 50 µm von der Nanospitze 15 beabstandet. Das Koppelement 16 ist als ein Gitterkoppler ausgebildet und auf eine Oberfläche 21 der sich verjüngenden metallischen Struktur 14 aufgebracht. Bei diesem Ausführungsbeispiel weist der schematisch dargestellte Gitterkoppler 16 vier Gitterlinien 17 auf. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind nicht alle Gitterlinien 17 mit einem Bezugszeichen versehen. Alternativ können auch mehr Gitterlinien 17, insbesondere sieben Gitterlinien 17, vorgesehen sein. Das Koppelement 16 dient zum Anregen von Oberflächenplasmonen an der Oberfläche 21 der sich verjüngenden metallischen Struktur 14 aufgrund eines auf das Koppelement 16 eingestrahlten Lichtimpulses und/oder einer elektromagnetischen Welle 19.

[0042] Die Elektronenquelle 10 hat eine Lichtquelle 18, wobei die Lichtquelle 18 bei diesem Ausführungsbeispiel als ein Laser ausgebildet ist. Die Lichtquelle 18 ist derart angeordnet, dass ein Lichtimpuls und/oder eine elektromagnetische Welle 19 auf das Koppelement 16 ausgerichtet ist. Eine Achse des Lichtimpulses und/oder der elektromagnetischen Welle 19 ist bei diesem Ausführungsbeispiel in Bezug auf eine

Mittelachse 20 der metallischen Struktur 14 ausgerichtet. Hier ist die Mittelachse 20 schematisch als eine gestrichelte Linie angedeutet. Des Weiteren ist der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle bei diesem Ausführungsbeispiel schräg zu der Oberfläche 21 der metallischen Struktur 14 bzw. des Koppelementes 16 ausgerichtet.

[0043] Zum Fokussieren des Lichtimpulses und/oder der elektromagnetischen Welle 19 ist eine Linse 22 zwischen der Lichtquelle 18 und dem Koppelement 16 angeordnet. An Stelle einer einzelnen Linse 22 kann ein Linsensystem oder eine Reflexionsoptik vorgesehen sein. Die Linse 22 ist in einem Strahlengang für den Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle 19 der Lichtquelle 18 positioniert.

[0044] Bei diesem Ausführungsbeispiel ist die metallische Struktur 14 innerhalb einer Vakuumkammer 23 angeordnet. Auch die Anode 12 ist bei diesem Beispiel innerhalb der Vakuumkammer 23 positioniert. In einer Wand der Vakuumkammer 23 ist ein Fensterelement 24 angeordnet. Außerhalb der Vakuumkammer 23 ist die Lichtquelle 18, wobei der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle 19 durch das Fensterelement 24 in das Innere der Vakuumkammer 23 und zum Koppelement 16 gelangen kann. Die Linse 22 ist innerhalb der Vakuumkammer 23 angeordnet. Alternativ kann die Linse 22 außerhalb der Vakuumkammer 23 sein. In einer weiteren Alternative kann die Lichtquelle 18 innerhalb der Vakuumkammer 23 positioniert sein, wobei dann das Fensterelement 24 verzichtbar ist.

[0045] Fig. 2 zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm für ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Erzeugen eines Elektronenstrahls mit einer Elektronenquelle 10 gemäß Fig. 1. Nach dem Start gemäß Schritt S10 wird entsprechend Schritt S11 eine Spannung mittels der Spannungsquelle 13 an die Kathode 11 und die Anode 12 angelegt. Aufgrund der angelegten Spannung wird ein elektrisches Feld zwischen der metallischen Struktur 14 und der Anode 12 gebildet.

[0046] Gemäß Schritt S12 wird das Koppelement 16 mit einem Lichtimpuls 19 beleuchtet. Mindestens ein Teil der auf das Koppelement 16 auftreffenden Energie wird in ein Oberflächenplasmon-Polariton gekoppelt. Sodann erfolgt gemäß Schritt S13 eine Nanofokussierung des mindestens einen erzeugten Plasmons. Das erzeugte Plasmon läuft entlang der Oberfläche 21 von dem Koppelement 16 in Richtung der Nanospitze 15. Hierbei zieht sich das Plasmon bei der Annäherung an die Nanospitze 15 räumlich zusammen und verlangsamt sich, bis es in einem nanometergroßen Volumen der Nanospitze 15 konzentriert ist. Hierbei wird eine Feldstärke im Bereich der Nanospitze 15 von einigen V/nm erreicht. Bei diesem Ausführungsbeispiel werden im Bereich

der Nanospitze **15** etwa 7 V/nm erreicht. Des Weiteren ergibt sich an der Nanospitze **15** aufgrund der Nanofokussierung des mindestens einen Plasmons eine Verstärkung des elektrischen Feldes. Aufgrund dieser Plasmon induzierten Verstärkung des elektrischen Feldes an der Nanospitze **15** werden Elektronen von der Nanospitze **15** abgelöst, wodurch gemäß Schritt S14 ein Elektronenimpuls erzeugt wird. Die somit freien Elektronen werden durch die angelegte Spannung von der Nanospitze **15** in Richtung der Anode **12** weg beschleunigt. Das Verfahren zum Erzeugen des Elektronenstrahls und/oder Elektronenimpulses endet gemäß Schritt S15.

[0047] Fig. 3 zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm für ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Herstellen einer Elektronenquelle **10** gemäß Fig. 1. Das Herstellungsverfahren startet gemäß Schritt S20, wobei gemäß diesem Ausführungsbeispiel entsprechend Schritt S21 ein Golddraht bereitgestellt wird. Hier weist der Golddraht beispielhaft einen Durchmesser von 125 µm und eine Länge von 10 mm auf. Der Golddraht wird gemäß Schritt S22 erhitzt. Hierzu wird der Golddraht zunächst über einen Zeitraum von 8 Stunden auf eine Temperatur von 800° Celsius erhitzt, anschließend für eine Zeitraum von 8 Stunden auf einer Temperatur von 800° Celsius gehalten und ausgeglüht, um sodann über einen Zeitraum von erneut 8 Stunden auf Umgebungstemperatur abgekühlt zu werden. Aufgrund der Erhitzung gemäß Schritt S22 wird das Material entspannt und Korngrenzen aufgelöst.

[0048] Anschließend erfolgt gemäß Schritt S23 ein Ätzen einer kegelförmigen Struktur inklusive einer Nanospitze **15**. Bei diesem Ausführungsbeispiel erfolgt ein elektrochemisches Ätzen in einer 37-prozentigen Salzsäurelösung mit einem Platinring als Gegenelektrode zu dem Golddraht. Ein freies Ende des Golddrahtes wird zentriert in eine Öffnung des Platinringes etwas 50 µm tief in die Salzsäure eingetaucht. Aufgrund der wirkenden Kapillarkräfte kriecht die Säure ein Stück weit den Draht hoch. Aufgrund der angelegten Spannung zwischen dem Draht und dem Platinring wird ein Materialabtrag an dem Draht realisiert. Der Materialabtrag endet in dem Moment, in dem der Säurefilm von der durch den Materialabtrag erzeugten und sich verjüngenden metallischen Struktur **14** mit der Nanospitze **15** abreißt.

[0049] Anschließend wird gemäß Schritt S24 ein Koppelement **16** auf der Oberfläche **21** der metallischen Struktur **14** aufgebracht. Hierbei wird das Koppelement **16** beabstandet von der Nanospitze **15** an der metallischen Struktur **14** hergestellt. Die Herstellung des Koppelementes erfolgt bei diesem Ausführungsbeispiel mittels einer Ionenstrahlolithografie.

[0050] Sodann wird eine Kathoden-Anoden-Anordnung gemäß Schritt S25 bereitgestellt. Hierzu wird

die metallische Struktur **14** als Kathode und eine separate Anode **12** an eine Spannungsquelle **13** angeschlossen.

[0051] Schließlich wird eine Lichtquelle **18** zum Abgeben eines Lichtimpulses und/oder einer elektromagnetischen Welle **19** bereitgestellt und/oder justiert. Hierbei wird der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle **19** beispielsweise mittels der Linse **22** derart fokussiert, dass der Fokusedurchmesser im Wesentlichen die Fläche des Koppelementes **16** abdeckt. Sodann ist das Herstellungsverfahren gemäß dem Schritt S27 beendet.

Bezugszeichenliste

10	Elektronenquelle
11	Kathode
12	Anode
13	Spannungsquelle
14	Metallische Struktur
15	Nanospitze
16	Koppelement
17	Gitterlinie
18	Lichtquelle
19	Elektromagnetische Welle
20	Mittelachse
21	Oberfläche
22	Linse
23	Vakuumkammer
24	Fensterelement

Patentansprüche

1. Elektronenquelle zum Erzeugen eines Elektronenstrahls, mit einer Kathode (**11**), **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kathode (**11**) eine sich verjüngende metallische Struktur (**14**) aufweist und die metallische Struktur (**14**) eine Nanospitze (**15**) zum Fokussieren von mindestens einem Plasmon und zum Abgeben von Elektronen hat, wobei die metallische Struktur (**14**) beabstandet von der Nanospitze (**15**) ein Koppelement (**16**) zum Anregen des Plasmon mittels einer elektromagnetischen Welle (**19**) hat.

2. Elektronenquelle nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die metallische Struktur (**14**) und/oder die Nanospitze (**15**) konusartig und/oder kegelförmig ausgebildet ist, insbesondere ist die metallische Struktur (**14**) aus Gold oder Silber gebildet, vorzugsweise hat die metallische Struktur (**14**) und/oder die Nanospitze (**15**) einen Öffnungswinkel im Bereich von 10° bis 40°, insbesondere im Bereich von 20° bis 30°.

3. Elektronenquelle nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Nanospitze (**15**) und/oder mindestens ein Bereich der metallischen Struktur (**14**) vom Koppelement (**16**) bis zur Nanospitze (**15**) frei von Verunreinigungen und/oder frei

von Korngrenzen ist, vorzugsweise hat die Nanospitze (15) einen Spitzenradius kleiner als 20 nm, insbesondere kleiner als 15 nm oder kleiner als 12 nm, vorzugsweise im Bereich von 5 nm bis 12 nm.

4. Elektronenquellen nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Koppelement (16) als ein Gitterkoppler ausgebildet ist, insbesondere hat der Gitterkoppler bis zu 15 oder genau 7 Gitterlinien, vorzugsweise weisen die Gitterlinien eine Breite im Bereich von 600 nm bis 1.000 nm und/oder eine Tiefe im Bereich von 200 nm bis 600 nm auf, vorzugsweise hat der Gitterkoppler eine Gitterkonstante im Bereich von 1.200 nm bis 3.000 nm, insbesondere im Bereich von 1.500 nm bis 2.500 nm, besonders bevorzugt von 1.600 nm oder 2.000 nm.

5. Elektronenquellen nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Abstand des Koppelementes (16) von der Nanospitze (15) größer ist als ein Fokusdurchmesser einer Lichtquelle (18) zum Bestrahlen des Koppelementes (16), insbesondere ist der Abstand zwischen dem Koppelement (16) und der Nanospitze (15) größer als 10 µm oder 20 µm, vorzugsweise im Bereich von 10 µm bis 200 µm, besonders bevorzugt beträgt der Abstand zwischen dem Koppelement (16) und der Nanospitze (15) 50 µm.

6. Elektronenquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die metallische Struktur (14) innerhalb einer Vakuumkammer (23) angeordnet ist, vorzugsweise ist eine Lichtquelle (18), insbesondere ein Laser, zum Bestrahlen des Koppelementes (16) außerhalb der Vakuumkammer (23) angeordnet, wobei die elektromagnetische Welle (19) der Lichtquelle (18) dem Koppelement (16) durch ein Fensterelement (24) der Vakuumkammer (23) zuführbar ist.

7. Verfahren zum Erzeugen eines Elektronenstrahls mit einer Elektronenquelle (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem Elektronen durch Plasmon-induzierte Elektronenemission erzeugt werden.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Spannung einer Spannungsquelle (13) an die Kathode (11) angelegt wird, insbesondere wird die Spannung an die Kathode (11) und an eine Anode (12) zum Erzeugen eines elektrischen Feldes zwischen Kathode (11) und Anode (12) angelegt, vorzugsweise wird ein Lichtimpuls und/oder eine elektromagnetische Welle (19) auf das Koppelement (16) zum Erzeugen von mindestens einem Plasmon, insbesondere Oberflächenplasmon und/oder Oberflächenplasmon-Polariton, fokussiert, insbesondere wird das Plasmon in Richtung der Nanospitze (15) fokussiert, vorzugsweise wird ein elektrisches Feld im Bereich der Nanospitze (15) auf-

grund der Fokussierung des Plasmon verstärkt und/oder Elektronen werden von der Nanospitze (15) abgelöst.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Lichtimpuls und/oder eine elektromagnetische Welle (19) einer Lichtquelle (23) auf einen Fokusdurchmesser fokussiert wird, der im Wesentlichen den Ausmaßen des Koppelementes (16) entspricht, vorzugsweise erfolgt die Fokussierung und/oder Justierung des Lichtimpulses, der elektromagnetischen Welle (19) und/oder der Lichtquelle (23) in Bezug zu einer Mittelachse (20) der metallischen Struktur (14), insbesondere wird ein Lichtimpuls und/oder eine elektromagnetische Welle (19) mit einer Zeitauflösung von weniger als 100 fs, weniger als 50 fs oder weniger als 20 fs verwendet, besonders bevorzugt liegt die Zeitauflösung im Bereich von 15 fs, 10 fs oder weniger.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Lichtimpuls und/oder die elektromagnetische Welle (19) zum Anregen des mindestens einen Plasmon eine, insbesondere mittlere, Wellenlänge im Bereich 0,3 µm bis 20 µm, vorzugsweise von 1.200 nm bis 2.000 nm, insbesondere von 1.600 nm, und/oder eine Energie von weniger als 500 pJ hat, vorzugsweise wird an der Nanospitze (15) ein Elektron aufgrund einer Mehr-Photonen-Anregung abgelöst, besonders bevorzugt wird ein Elektron an der Nanospitze (15) aufgrund einer, insbesondere im Mittel, 7-Photonen-Anregung abgelöst.

11. Verfahren zum Herstellen einer Elektronenquelle (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem eine sich verjüngende metallische Struktur (14) als eine Kathode (11) bereit gestellt wird, bei dem eine Nanospitze (15) an der metallischen Struktur (14) zum Fokussieren von Plasmonen und Abgeben von Elektronen hergestellt wird, und bei dem ein Koppelement (16) zum Anregen der Plasmonen mittels einer elektromagnetischen Welle (19) in einen Oberflächenbereich der metallischen Struktur (14) eingebracht wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die metallische Struktur (14) aus einem polykristallinen Material und/oder Draht, insbesondere einem Golddraht, hergestellt wird, vorzugsweise wird das Material der metallischen Struktur (14) zum Auflösen von Korngrenzen und/oder in einer vorgegebenen Zeitdauer auf eine Temperatur von mindestens 500°C oder 800°C erhitzt, in einer vorgegebenen Zeitdauer in einem erhitzten Zustand gehalten und/oder in einer vorgegebenen Zeitdauer auf Umgebungstemperatur abgekühlt, insbesondere beträgt die vorgegebene Zeitdauer mindestens 6 Stunden oder genau 8 Stunden.

13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die sich verjüngende, insbesondere konische oder kegelförmige, Gestalt der metallischen Struktur (**14**) und/oder die Nanospitze (**15**) mittels Ätzen in einer Säure hergestellt wird, insbesondere wird ein Draht zentriert in einem Platinring 20 µm bis 100 µm, vorzugsweise 50 µm, tief in die Säure eingetaucht und eine Spannung an den Draht und den Platinring angelegt, insbesondere kriecht die Säure aufgrund von Kapillarkräften an dem Draht hoch und die Säure reißt nach einem hinreichenden Materialabtrag von der metallischen Struktur (**14**) und/oder der Nanospitze (**15**) ab.

14. Verwendung einer Elektronenquelle (**10**) nach einem der Ansprüche 1 bis 6 und/oder eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 7 bis 10 in einem Elektronenmikroskop, in einem ultraschnellen Elektronenmikroskop, in einem Punktprojektionsmikroskop, in einem Rastertunnelmikroskop, in einem Raster-Photostrom-Mikroskop und/oder zu zeitaufgelösten Abbildung von Strömen und/oder elektromagnetischen Feldern in Materialien.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

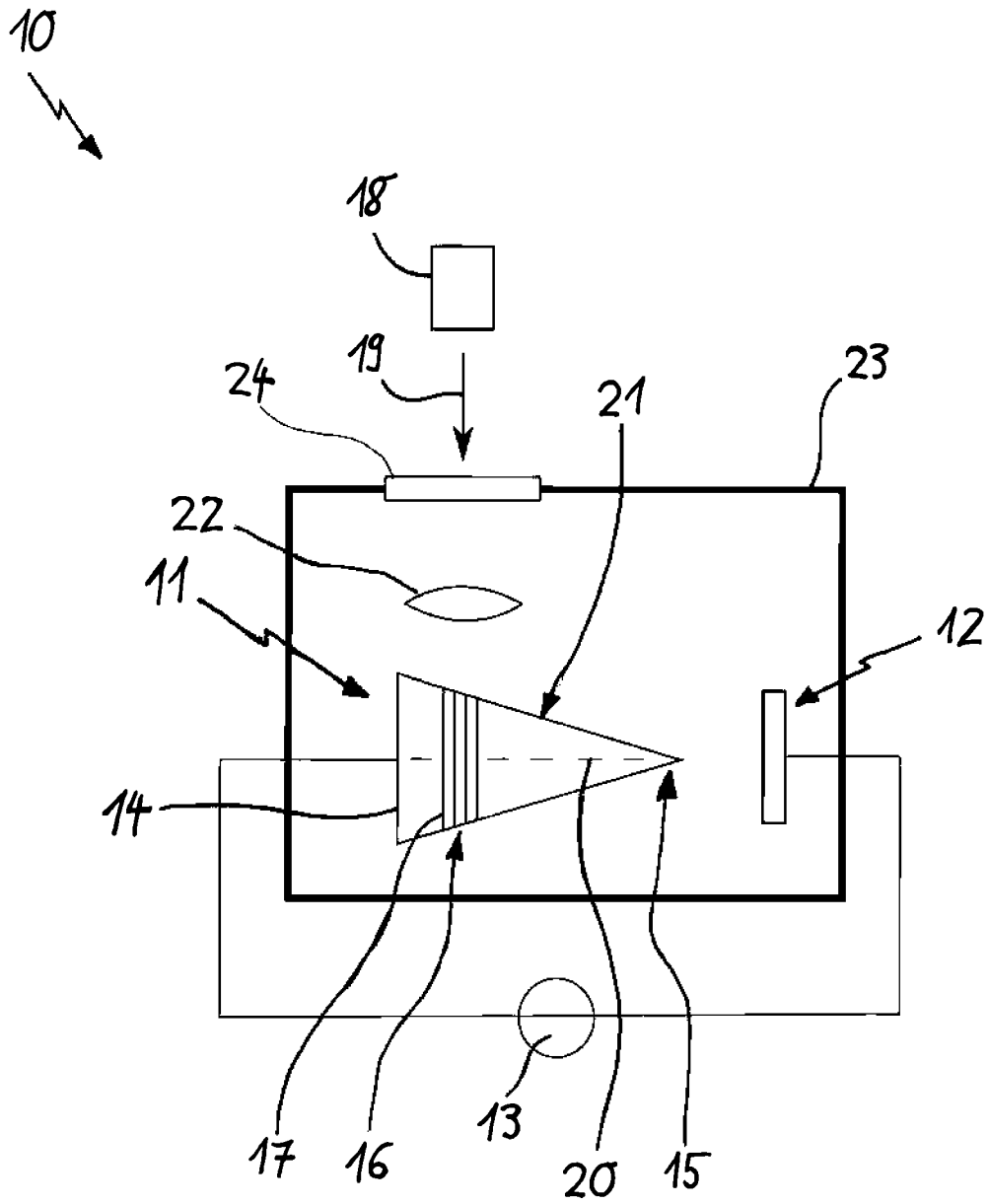


Fig. 1

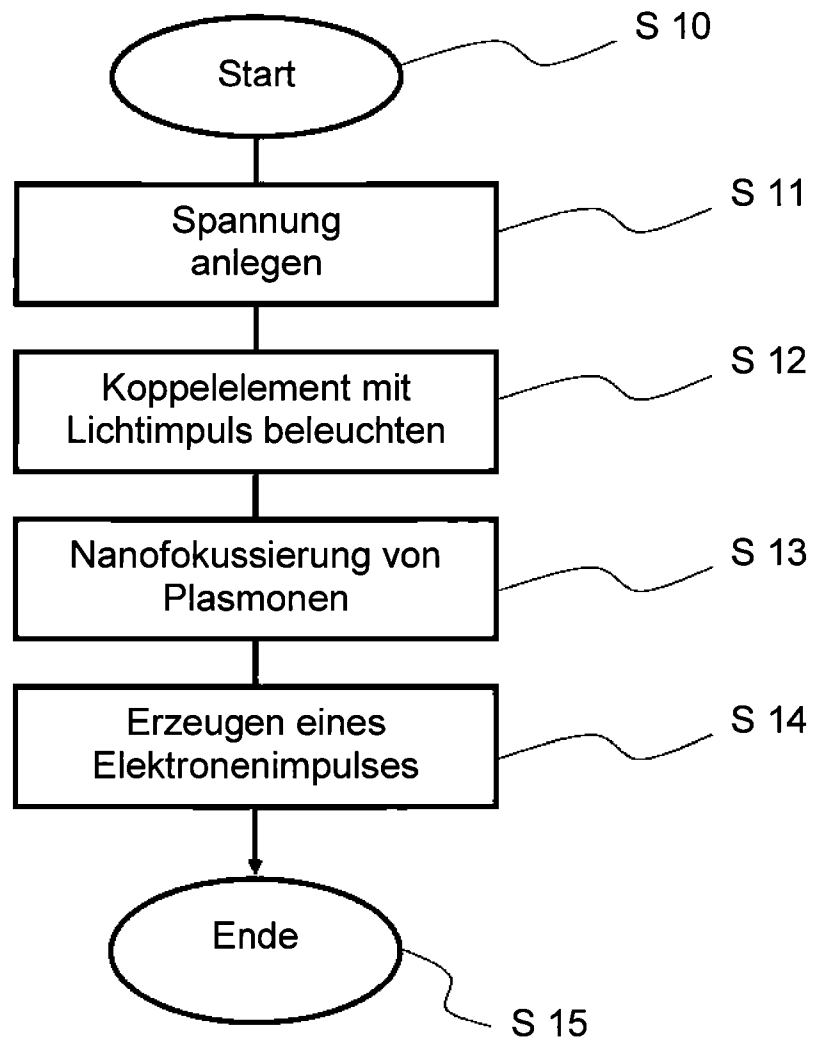


Fig. 2

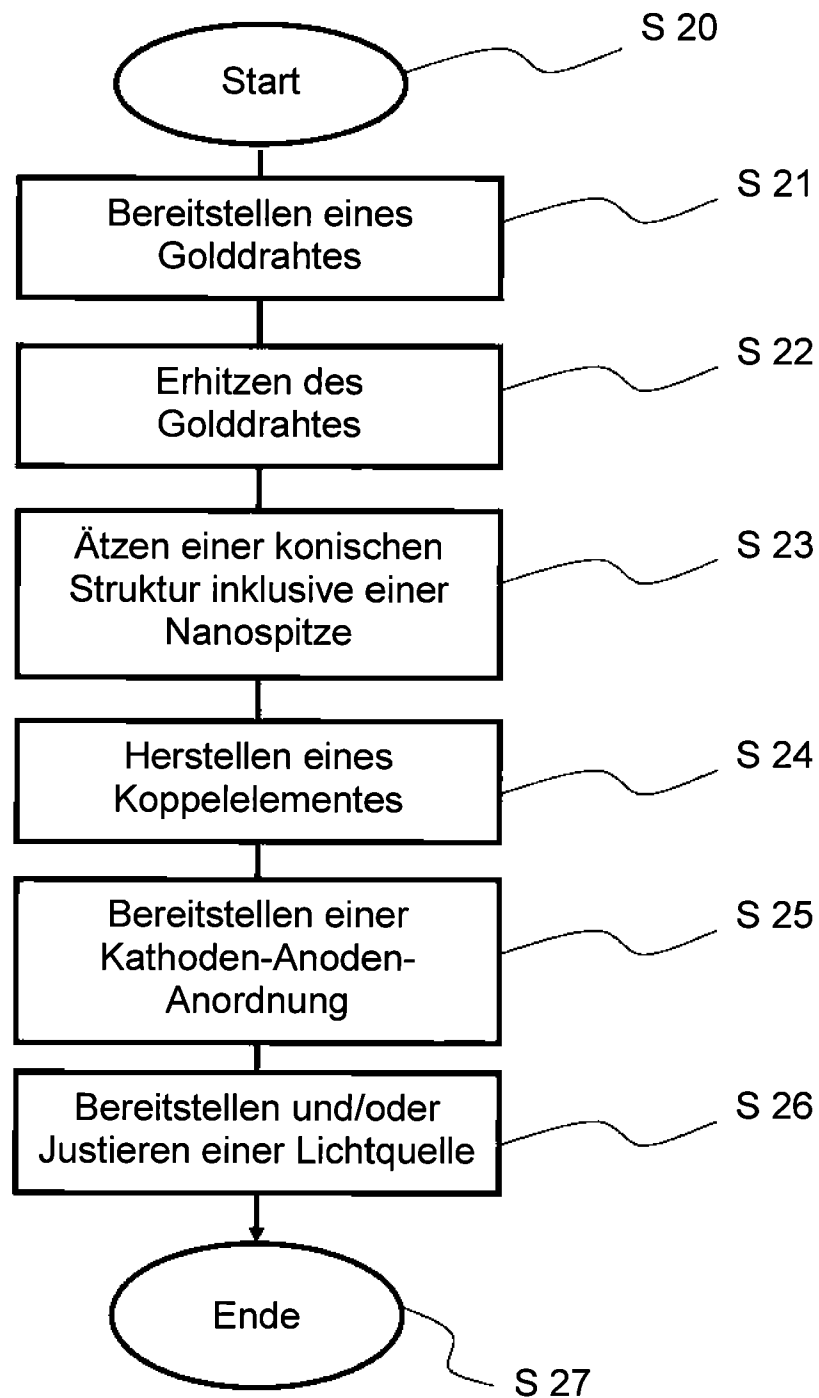


Fig. 3