



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 015 230 B4** 2007.07.05

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 015 230.6**
 (22) Anmeldetag: **29.03.2004**
 (43) Offenlegungstag: **20.10.2005**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **05.07.2007**

(51) Int Cl.⁸: **C23C 14/35** (2006.01)
C23C 14/54 (2006.01)

Innerhalb von drei 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. 2 Patentkostengesetz).

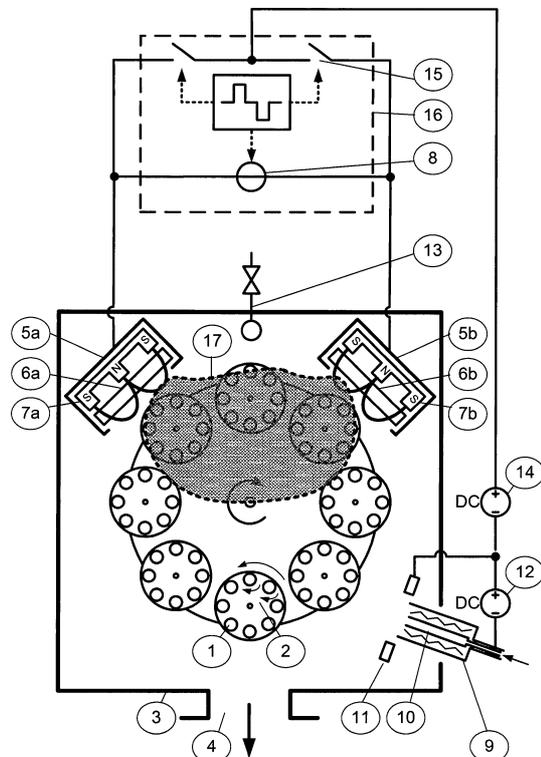
(73) Patentinhaber:
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
 angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
DE 196 51 615 C1
US 45 88 490 A

(72) Erfinder:
Fietzke, Fred, Dr., 01728 Hänichen, DE;
Klostermann, Heidrun, Dr., 01326 Dresden, DE;
Goedicke, Klaus, 01307 Dresden, DE; Kirchhoff,
Volker, Prof., Dr., 01324 Dresden, DE; Wünsche,
Tilo, Dr., 01127 Dresden, DE; Böcher,
Bernd-Georg, 01445 Radebeul, DE

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Intensivieren einer gepulsten Magnetronentladung**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Intensivieren einer mittelfrequenz gepulsten Magnetron-Entladung in einer Vakuumkammer (3), in welcher mindestens eine erste Elektrode (5a) und mindestens eine zweite Elektrode (5b) angeordnet werden, wobei die erste Elektrode (5a) in einem Magnetron-Magnetfeld angeordnet und zeitweise als Katode geschaltet wird, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest für einen Teil jedes Zeitabschnittes, in dem die erste Elektrode (5a) nicht katodisch betrieben wird, ein zusätzlicher Elektronenstrom aus mindestens einer zusätzlichen Elektronenquelle (9) auf die erste Elektrode (5a) gelenkt wird, so dass in der Umgebung der ersten Elektrode (5a) Ionen gebildet werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine spezielle Form von Gasentladungen, Magnetron-Entladungen mit Einspeisung mittelfrequent gepulster elektrischer Energie oder verkürzt Puls-Magnetron-Entladungen (PME) genannt. Derartige Entladungen werden mit Vorteil zum Abscheiden dünner Schichten durch Zerstäuben (auch Sputtern genannt) verwendet. Weitere Einsatzfelder sind das Vorbehandeln von Substraten oder Modifizieren von dünnen Schichten durch Plasmen oder das Anwenden solcher Entladungen bei plasma-unterstützten chemischen Dampfphasenabscheidungen. Dünne, durch die genannten Verfahren der Plasmabeschichtungstechnik mittels PME hergestellte Schichten finden in Branchen wie Optik, Elektronik, Werkzeug- und Bauteilveredelung und bei dekorativen Beschichtungen Anwendung.

[0002] Den Magnetron-Entladungen ist gemein, dass eine Beaufschlagung einer Festkörperoberfläche mit Ionen aus einer Gasentladung stattfindet. Diese kann mit Gleichstrom, Hochfrequenzströmen (RF, typisch 13,56 MHz) oder mittelfrequent gepulsten Strömen (MF, typisch 10...200 kHz) gespeist werden. Als Arbeitsgas wird ein Edelgas, meist Argon, oder ein reaktives Gasgemisch, z.B. Argon-Sauerstoff, verwendet. Sollen beispielsweise elektrisch nichtleitende Oxidschichten wie solche aus Siliziumdioxid auf vergleichsweise großen Substratflächen mit hoher Abscheiderate hergestellt werden, so hat sich das reaktive Puls-Magnetron-Sputtern mit mittelfrequent gepulster Energiezufuhr als hervorragend geeignetes Abscheideverfahren etabliert. Dieses basiert auf dem Zerstäuben eines elektrisch leitfähigen Materials, eines so genannten Targets, in einem reaktiven Gasgemisch. Wird beispielsweise ein Silizium-Target in einem Argon-Sauerstoff-Gasgemisch zerstäubt, kann auf einem Substrat eine Siliziumoxidschicht abgeschieden werden. Dabei brennt eine PME beispielsweise stabil, wenn die Energie mit einer Pulsfrequenz von 50 kHz eingespeist wird. Bei vielen Anwendungen, z.B. wenn auf großen Substraten eine gute Homogenität der abzuscheidenden Schichten erforderlich ist, sind alternative Verfahren nicht bekannt.

[0003] In der Dünnschichttechnologie ist allgemein anerkannt [vgl. z.B. G. Kienel, K. Röhl (Hrsg.) Vakuumbeschichtung Bd. 2, VDI Verlag Düsseldorf 1995, S. 107-125 und S. 193-237], dass die Struktur und zahlreiche Eigenschaften von abgeschiedenen Schichten durch Ionen- und/oder Plasmaaktivierung des Kondensationsprozesses auf den Substraten verbessert werden können. Durch eine partielle Ionisierung des für die Schichtabscheidung erzeugten Dampfes und/oder des Reaktivgases kann die Reaktionskinetik bei der Bildung einer gewünschten chemischen Verbindung verbessert werden. Vor allem aber können die ionisierten Partikel in einem elektri-

schen Feld energetisch aktiviert werden. Auf diese Weise können dichte, haffteste, einer idealen Festkörperstruktur nahe kommende Schichtstrukturen erzeugt werden. Voraussetzung dafür ist ein ausreichend intensives Plasma bzw. ein hoher Ionisierungsgrad.

[0004] Das Gleichstrom-Sputtern in einer Magnetron-Entladung erfolgt in einem selbst erzeugten Plasma und ist damit dem Wesen nach ein plasma-aktiviertes Vakuumbeschichtungsverfahren. Der Ionisierungsgrad in einem derartigen Plasma ist jedoch oft gering. Nur in dem Bereich, in dem die Zerstäubung des Targets stattfindet, kann der Ionisierungsgrad Werte von wenigen Prozent erreichen. Im Bereich der Schichtbildung auf einem Substrat liegt der Ionisierungsgrad typischerweise unter einem Prozent. Eine moderate Erhöhung des Ionisierungsgrades und der Energie der Spezies im Plasma erfolgt selbsttätig, wenn die bereits genannte mittelfrequent gepulste Energieeinspeisung in eine Magnetron-Entladung erfolgt. Die dadurch erzielten Verbesserungen der Schichteigenschaften (vgl. DE 196 44 752 A1 und DE 196 51 615 C1) sind in bestimmten Anwendungsfeldern, z.B. der Hartstoffbeschichtung, bei weitem nicht ausreichend.

[0005] Eine Magnetron-Entladung selbst bietet verschiedene Möglichkeiten, durch Wahl der Entladungsbedingungen die Plasmadichte zu erhöhen und damit die Impedanz zu reduzieren und den Ionisierungsgrad zu erhöhen. Das kann durch Erhöhen des Gasdruckes, durch Steigern der Feldstärke eines Magnetron-Magnetfeldes, durch Wahl eines Arbeitsgases mit möglichst niedriger spezifischer Ionisierungsenergie oder durch andere Maßnahmen erfolgen. Ohne diese Parameterfelder im Einzelnen zu diskutieren, sei festgestellt, dass diese Möglichkeiten in ihren physikalisch-technischen Wirkungen begrenzt sind und auch bei Ausnutzung aller Möglichkeiten keinen generellen Weg darstellen, um hohe Ionisierungsgrade zu erreichen, wie diese beispielsweise in der Umgebung einer Katode von Vakuum-Bogenentladungen erzielt werden können.

[0006] Durch Modifizieren der Form eines Magnetfeldes, das an der Katode von Magnetron-Entladungen wirksam ist, wurde deshalb versucht, die räumliche Plasmadichteverteilung zu verändern. Verfahren und Einrichtungen dafür wurden zuerst in B. Window, N. Savvides: Unbalanced DC magnetrons as sources of high ion fluxes, J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 4, No. 3, p. 453-456 vorgeschlagen und sind seitdem als „unbalanced magnetron sputtering (UBM)“ vielfach verwendet worden. Durch weit in den Raum und damit zu einem Substrat reichende Teile des Magnetfeldes wird eine lokale Erhöhung der Plasmadichte im Bereich des Substrats erreicht.

[0007] Das gleiche Ziel wird verfolgt, wenn bei-

spielsweise bei Beschichtungen mit mehreren Magnetronkatoden geschlossene Magnetfeldkonfigurationen (closed field arrangements) realisiert werden (GB 2 258 343/EP 0 521 045 B1). Trotz deutlicher Verbesserung bestimmter Eigenschaften der so erzeugten dünnen Schichten ist auch bei den entsprechend modifizierten Magnetron-Entladungen der Ionisierungsgrad sehr niedrig. Das Beschleunigen der zu geringen Zahl von Ionen in einem starken elektrischen Feld, z.B. durch Anlegen einer hohen Vorspannung an zu beschichtende Substrate, stellt keine allgemein anwendbare Lösung der Aufgabe dar, denn dadurch kann nur die Energie, nicht aber die Rate der auf die Substrate auftreffenden Ionen erhöht werden. Abgesehen von den technischen Schwierigkeiten im Falle elektrisch isolierender Substrate oder Schichten entstehen bei zu hoher Teilchenenergie Strahlenschäden der unterschiedlichsten Art, und es laufen andere als die angestrebten Elementarprozesse während der Bildung und des Wachstums der Schichten ab.

[0008] Dem Fachmann könnte es nahe liegend erscheinen, auch beim Magnetron-Sputtern eine Verfahrensweise zu wählen, wie sie beim Zweistrahl-Ionenstrahl-Sputtern angewendet wird [s. z.B. J. M. E. Harper et al.: Quantitative ion beam process for the deposition of compound thin films, Appl. Phys. Lett. 43 (1983) p. 547]. Dort wird eine durch Zerstäuben eines Targets mittels eines ersten Ionenstrahls entstehende und auf dem Substrat kondensierende Schicht durch direkten Beschuss mit dem Strahl aus einer zweiten Ionenquelle aktiviert. Die Leistungsfähigkeit verfügbarer Ionen-Strahlquellen entspricht jedoch bei weitem nicht den Anforderungen bezüglich Ionenstromdichte und Großflächigkeit, die zu den Raten und Flächen beim Magnetronsputtern kompatibel sind.

[0009] Schließlich sind dem Fachmann zahlreiche Verfahren des Ionen- oder plasmagestützten Bedampfens geläufig, bei denen ein in einer Dampfquelle erzeugter Dampfstrom von einem Ionen- oder Plasmastrahl durchdrungen wird und die Plasmaspezies durch Wechselwirkung mit dem Dampf zu einer partiellen Anregung und Ionisierung führen. Alle bekannten Entladungsformen sowie Ionen- oder Plasmastrahlquellen wurden schon für den Einsatz bei derartigen Verfahren vorgeschlagen, so dass eine nur schwer überschaubare Vielfalt von Verfahren und Anordnungen, meist unter spezifischen Bezeichnungen, für das Ionen- oder plasmagestützte Bedampfen bekannt ist (s. z.B. DE 28 23 876 C2, DE 43 36 680 C2 und DE 196 12 344 C1). Das sinngemäße Übertragen derartiger Hybridverfahren auf Magnetronentladungsverfahren, insbesondere auf Magnetronsputterverfahren mit gegenüber dem Stand der Technik deutlich erhöhter Anregung und Ionisierung der schichtbildenden Spezies in unmittelbarer Oberflächennähe eines Substrates, ist dagegen fast nicht

bekannt. Gründe dafür werden in dem geringen Wechselwirkungsquerschnitt der Ionen mit den vergleichsweise hochenergetischen gesputterten Spezies, der Inhomogenität der meisten Ionen- oder Plasmaquellen, einer zu hohen thermischen Belastung der Substrate und der schnellen Abnahme der Plasmadichte vom Bereich hoher Teilchendichte bis zu dem Bereich, in welchem die Schichtbildung stattfindet, vermutet.

[0010] Eine Ausnahme zu dieser pauschalen Aussage bildet US 4,588,490. Gemäß diesem Vorschlag wird die Impedanz einer Gleichstrom-Magnetron-Entladung reduziert, wenn eine Hohlkatodenbogenentladung in geometrischer Nähe zur Magnetron-Katode angeordnet und die mit dem Gas aus der Hohlkatode austretenden Elektronen zur Verstärkung des katodenseitigen Plasmas der Magnetron-Entladung verwendet werden. Dieses Verfahren erhöht offensichtlich die Plasma-Intensität nur in begrenztem Umfang und lässt sich wegen der geforderten geometrischen Zuordnung von Magnetronkatode und Hohlkatode nicht allgemein einsetzen. Weitere Nachteile können sich aus der Belastung der Magnetronkatode durch den Gasstrom, die hohe thermische Substratbelastung durch die glühende Hohlkatode und die Kontamination mit dem Material der Hohlkatode, meist Wolfram, ergeben.

[0011] Eine weitere Anordnung zum Betreiben einer Magnetron-Entladung in einem extern erzeugten Plasma wird in EP 0 583 736 B1 angegeben. Ein derartiges Plasma wird beispielsweise durch eine Glühwendel erzeugt und durch zahlreiche Permanentmagnete auf der Wand einer Vakuumkammer geführt. Infolge der Bedeckung der Elektronenquelle und der als Anode wirkenden Kammerwand oder speziellen Elektroden ist diese Anordnung für reaktive Prozesse nur eingeschränkt, im Falle der Abscheidung isolierender Schichten überhaupt nicht geeignet.

[0012] Beide Lösungsvorschläge beziehen sich auf Gleichstrom-Magnetron-Entladungen. Vorschläge zur Intensivierung gepulster Magnetron-Entladungen sind bisher nicht bekannt geworden und lassen sich wegen der völlig unterschiedlichen Mechanismen der Ladungsträgererzeugung und des Ladungsträgertransportes auch nicht aus dem Gleichstromfall ableiten.

[0013] Der Erfindung liegt daher das technische Problem zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zu schaffen, mittels derer eine mittelfrequent gepulste Magnetron-Entladung intensiviert werden kann, welche der Erzeugung gesputterter Teilchen oder der Beaufschlagung einer Schicht oder Festkörperoberfläche mit Ladungsträgern dient. Eine derartige Intensivierung soll sich durch eine Erhöhung der spezifischen Plasmadichte, bezogen auf eine Entladungsleistung, eine Erhöhung der Stromanstiegsge-

schwindigkeit in jedem Puls und in einem höheren Grad von Anregung und Ionisierung in einem Bereich auszeichnen, in dem die plasmatechnologische Behandlung von Substraten angestrebt ist, also in Oberflächennähe der Substrate. Verfahren und Einrichtung sollen sich vorzugsweise an die Nutzung von Baugruppen und Stromversorgungseinrichtungen anlehnen, die für die Puls-Magnetron-Sputtertechnik entwickelt worden und damit kommerziell verfügbar sind. Das gesuchte Verfahren soll eine Begrenzung der Energie der ionisierten Spezies erlauben und die Art und Form der zu behandelnden Substrate nicht einschränken. Insbesondere sollen auch räumlich angeordnete Gruppen von bewegten dreidimensionalen Substraten behandelbar, z.B. beschichtbar sein.

[0014] Die Lösung des technischen Problems ergibt sich durch die Gegenstände mit den Merkmalen der Ansprüche 1 und 12. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0015] Erfindungsgemäß wird eine mittelfrequenz gepulste Magnetron-Entladung in einer Vakuumkammer, umfassend mindestens eine erste Elektrode und mindestens eine zweite Elektrode, zum Behandeln mindestens eines Substrats betrieben, wobei die erste Elektrode in einem Magnetfeld angeordnet ist und mittels einer ersten Umschalteneinrichtung zeitweise als Katode der Magnetron-Entladung schaltbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass mittels einer zweiten Umschalteneinrichtung die erste Elektrode in den Phasen, in denen die erste Elektrode nicht als Katode der Magnetron-Entladung geschaltet ist, zumindest zeitweise als Anode in den Stromkreis einer zusätzlichen Elektronenquelle schaltbar ist.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren ist eng mit Erkenntnissen über das dynamische Verhalten der Plasmakenngrößen bei mittelfrequenz gepulsten Magnetron-Entladungen verknüpft. Während bekannte Lösungen stets darauf zielen, die Entladungsimpedanz durch zusätzliche Ladungsträger in der Umgebung der Katode zu verringern oder die Plasmadichte im quasi feldfreien Raum zwischen Elektroden der Magnetron-Entladung durch eine Zusatz-Ionen- oder -Plasmaquelle zu erhöhen, wird entsprechend der Erfindung eine Zusatz-Elektronenquelle benutzt, die die Elektronendichte in den nicht katodisch wirksamen Phasen oder zumindest für einen Zeitabschnitt dieser Phasen erhöht. Elektronen, die während einer nicht katodischen Phase in den Bereich einer in einem Magnetron-Magnetfeld befindlichen Elektrode geschossen werden, sind unter der Wirkung des Magnetfeldes und des elektrischen Feldes (Anodenfall) in der Lage, durch Stoßionisation zusätzliche Ladungsträger zu bilden. Diese Ladungsträger können, abhängig vom Potential zu bearbeitender Substrate, diese in großer Zahl erreichen und zur Verbesserung

aufwachsender Schichten auf den Substraten zur Wirkung gebracht werden. Bei mittelfrequenz Energieeinspeisung in die Magnetron-Entladung, die die Polarität der Elektrode periodisch verändert, führen die Ladungsträger in der anschließenden katodischen Phase der Elektrode im sich nun ausbildenden Katodenfall zu einem lawinenhaften Ansteigen der Ladungsträgerzahl und damit des Entladungsstromes. Dabei können Stromanstiegsgeschwindigkeit und Spitzenwert des Entladungsstromes ein Mehrfaches der Werte ohne Nutzung der zusätzlichen Elektronenquelle erreichen.

[0017] Das Verfahren ist gleichermaßen für mittelfrequenz gepulste, so genannte unipolare Magnetron-Entladungen wie auch für bipolare PME geeignet. Erstere werden zwischen mindestens einer singulären Magnetron-Elektrode und einer meist gegen Beschichtung geschützten magnetfeldfreien Anode betrieben. Erfindungsgemäß wird der zusätzliche Elektronenstrom mindestens während eines Teils des Zeitabschnittes auf die Magnetron-Elektrode gelenkt, während dessen diese nicht als Katode der Magnetron-Entladung wirkt.

[0018] Bipolare PME brennen zwischen zwei Elektroden oder zwei Gruppen von Elektroden, die jeweils von einem Magnetron-Magnetfeld durchdrungen werden. Jede der Magnetron-Elektroden ist nach einem bestimmten Zeitschema phasenweise als Katode und phasenweise als Anode geschaltet, im einfachsten Fall abwechselnd und im Takt der pulsartigen Energieeinspeisung. Entsprechend der Erfindung wird der zusätzliche Elektronenstrom mindestens für einen Teil des Zeitabschnittes auf eine jeweilige Magnetron-Elektrode gelenkt, während dessen diese nicht katodisch geschaltet ist. Nicht-katodische Phasen können sich dabei im allgemeinen Fall aus anodischen Teilabschnitten, solchen mit kurzgeschlossenen Elektroden oder solchen mit floatenden Elektroden zusammensetzen.

[0019] Im Grundsatz sind zahlreiche Typen von Elektronenemissionseinrichtungen als Quelle für den zusätzlichen Elektronenstrom geeignet. Um eine ausgeprägte Intensivierung der gepulsten Magnetron-Entladung bzw. eine größenordnungsmäßige Erhöhung des Ionisierungsgrades zu erreichen, muss der mittlere Elektronenstrom von der gleichen Größenordnung wie der mittlere Strom der Magnetron-Entladung sein oder diesen noch übersteigen. Technisch gut beherrschbare Elektronenquellen dieser Ergiebigkeit sind z.B. Hohlkatoden mit heißer Katode, die bei geringer Baugröße Ströme von mehreren hundert Ampere liefern. Auch direkt durch Elektronenstoß geheizte Draht- oder Bolzenkatoden aus Wolfram bzw. Lanthanhexaborid/Wolfram, sogenannte Glühkatoden, können hohe Elektronenströme liefern.

[0020] Es ist zweckmäßig, die zu behandelnden Festkörperoberflächen bzw. Substrate gegenüber besagter Magnetron-Elektrode auf ein wählbares elektrisches Potential (Bias) vorzuspannen. Damit wird die mittlere Energie der Ladungsträger bei ihrem Auftreffen auf Substrate vorgegeben. Entsprechend der Art und Energie der Ladungsträger werden sehr unterschiedliche Wirkungen auf der Festkörperoberfläche erzielt. Bei Substraten mit elektrisch isolierenden Eigenschaften oder aufwachsenden elektrisch isolierenden Schichten aus chemischen Verbindungen ist es vorteilhaft, eine hochfrequente oder mittelfrequent gepulste Vorspannung dafür zu verwenden. Zusammenhänge zwischen den Parametern dieser Biasspannung und den dynamischen Ladungsträgerströmen sind im Grundsatz bekannt, im Einzelnen aber noch Gegenstand von Untersuchungen [vgl. P. J. Kelly et al.: Studies of midfrequency pulsed dc biasing, J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 19, No 6 (2001) p. 2856].

[0021] Besonders einfach, auch für Substrate bzw. Schichten mit elektrisch isolierenden Eigenschaften, gestaltet sich das Verfahren, wenn die erforderliche mittlere Energie der Ladungsträger, die auf die Substrate treffen, durch die Selbstbiasspannung bestimmt wird, die sich in Abhängigkeit von der Ladungsträgerdichte selbsttätig ausbildet.

[0022] Eine Ausführungsform zum Betreiben einer mittelfrequent gepulsten Magnetron-Entladung umfasst erfindungsgemäß mindestens eine Elektrode, welche sich in einem Magnetron-Magnetfeld befindet und zeitweise als Katode und zeitweise als Anode einer Magnetron-Entladung geschaltet werden kann, eine erste Umschaltvorrichtung zum Durchführen dieser Schaltvorgänge, eine zusätzliche Elektronenquelle, die vorzugsweise durch eine Hohlkatode gebildet wird, eine zweite Umschaltvorrichtung, welche die mindestens eine schaltbare Elektrode in den anodischen Phasen der Magnetron-Entladung als Anode in den Stromkreis der Elektronenquelle einbindet, sowie eine zweite Elektrode zum Betreiben der Magnetron-Entladung.

[0023] Eine alternative Ausführungsform unterscheidet sich dahingehend von obiger Vorrichtung, dass die mindestens eine Elektrode periodisch als Katode der Magnetron-Entladung ein- und ausgeschaltet werden kann und dass die zweite Umschaltvorrichtung besagte Magnetron-Elektrode in den Ausschaltphasen als Anode in den Stromkreis der Elektronenquelle einbindet.

[0024] Erfindungsgemäß lassen sich die erste und die zweite Umschaltvorrichtung vorteilhafterweise zu einer Bau- und Funktionseinheit verbinden.

[0025] Besonders vorteilhaft ist eine Vorrichtung der genannten Art, welche mindestens zwei Magnet-

ron-Elektroden enthält, die wechselweise als Katode und Anode einer PME geschaltet werden können, ferner eine zusätzliche Elektronenquelle und eine Umschaltvorrichtung, welche sowohl den periodischen Polaritätswechsel der Magnetron-Elektroden bewirkt als auch gleichzeitig die jeweils als Anode geschaltete Magnetron-Elektrode als Anode in den Stromkreis der zusätzlichen Elektronenquelle einbindet. Insbesondere Puls-Spannungs-Generatoren in H-Brücken-Bauweise mit einem so genannten Zwischenkreis (s. z.B. EP 0 534 068 B1) lassen sich so beschalten, dass sie ohne technische Veränderungen alle erforderlichen Umschaltvorgänge bewerkstelligen können.

[0026] Die erfindungsgemäße Gestaltung des Verfahrens und die Nutzung der erfindungsgemäßen Vorrichtungen haben tief greifende positive Auswirkungen auf die physikalischen Kenngrößen von PME. Bei vorgegebener mittlerer Entladungsleistung kann der Mittelwert der Entladungsimpedanz je nach Ergiebigkeit der Elektronenquelle um den Faktor 5 und mehr gesenkt werden. Entsprechend erhöht sich der Strom von Ladungsträgern zu Substraten. Der Ionisierungsgrad in einer Entladung erhöht sich bis in den Bereich von einigen zehn Prozent. Damit wird der Hauptnachteil von Magnetron-Entladungen, insbesondere im Fall reaktiver Betriebsweise, nämlich der niedrige Ionisierungsgrad und dadurch die gegenüber Bogenplasmen schlechtere Reaktionskinetik überwunden, ohne dass die Vorteile gepulster Magnetron-Entladungen aufgegeben werden müssen. Die Kombination des höheren Ionisierungsgrades einer erfindungsgemäß intensivierten Puls-Magnetron-Entladung mit den für die Nutzung der PME wichtigen anderen Eigenschaften, vor allem Flexibilität des Elektrodenmaterials, Homogenität und Großvolumigkeit des Entladungsplasmas, gute und exakte Steuerbarkeit, Vermeidbarkeit von Dropletbildung, Langzeitstabilität, Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche geometrische Gegebenheiten, qualifiziert diesen neuen Entladungstyp zu einem leistungsfähigen neuen Werkzeug der Puls-Plasma-Technologie. Die Reduzierung und exakte Steuerbarkeit der mittleren Energie der Ladungsträger prädestiniert diesen Entladungstyp für das Abscheiden von Schichten, die sensibel gegen Strahlenschäden sind, z.B. transparente leitfähige Oxidschichten wie Indium-Zinn-Oxid. Der hohe Ionisierungsgrad erleichtert in drastischer Weise das Abscheiden stöchiometrischer Verbindungen bei reduziertem Reaktivgas-Partialdruck und dadurch das Steuern des Prozesses bei wesentlich verbesserten Schichteigenschaften.

[0027] Wegen dieser Auswirkungen wird erfindungsgemäß die Anwendung einer intensivierten Puls-Magnetron-Entladung für das Magnetron-Sputtern zum Erzeugen dünner Schichten vorgeschlagen.

[0028] Eine weitere erfindungsgemäße Anwendung

bezieht sich auf das Ionenplattieren, d.h. das Puls-Magnetron-Sputtern unter Verwendung einer Vorspannung am Substrat. Diese Vorspannung wird entweder extern erzeugt oder durch Selbst-Bias-Effekte an floatenden Substraten hervorgerufen.

[0029] Eine weitere erfindungsgemäße Anwendung bezieht sich auf die Nutzung von Verfahren und Einrichtungen zur Behandlung von Substraten in einem dichten Plasma, wie beispielsweise das Ätzen oder Aktivieren von Substratoberflächen.

[0030] Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels näher erläutert. Die Fig. zeigen:

[0031] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Intensivieren einer gepulsten Magnetron-Entladung,

[0032] [Fig. 2a](#) und [Fig. 2b](#) eine schematische Darstellung einer vorteilhaften Schalteinrichtung zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0033] [Fig. 3](#) als graphische Darstellung den zeitlichen Verlauf von elektrischen Strömen durch eine Magnetron-Elektrode in Abhängigkeit von der Ergiebigkeit einer zusätzlichen Elektronenquelle.

[0034] In [Fig. 1](#) ist schematisch eine Vorrichtung dargestellt, mit welcher eine Magnetron-Entladung betrieben wird, um durch reaktives Puls-Magnetron-Sputtern von Aluminiumtargets in einem Argon-Sauerstoff-Gemisch stöchiometrische Aluminiumoxidschichten mit einer Dicke von 2 µm auf Substraten abzuscheiden.

[0035] Dabei sind stabförmige Substrate **1** zum Zweck des Beschichtens isoliert auf einer planetenartig angetriebenen mehrachsigen rotierenden Halterung **2** fixiert. Das Beschichten erfolgt in einer Vakuumkammer **3** mit einem Anschluss **4** zu einem nicht dargestellten Vakuumerzeugungssystem. Zwei Magnetron-Elektroden **5a** und **5b** enthalten das zu zerstäubende Material Aluminium in Form rechteckiger, längsgestreckter Targets **6a** und **6b**. Diese sind wassergekühlt und im Feld permanenter Magnetron-Magnetsysteme **7a** und **7b** positioniert. Die Magnetron-Elektroden **5a**; **5b** sind elektrisch mit den Ausgängen einer bipolaren Pulsspannungs-Versorgungseinrichtung **8** verbunden. Diese erzeugt eine Entladungsspannung für eine Magnetron-Entladung in Form von Rechteckpulsen wechselnder Polarität und wirkt damit als erste Umschaltvorrichtung im Sinne der Erfindung. Zum Intensivieren der Magnetron-Entladung dient eine Elektronenquelle in Form einer Hohlkatode **9**, welche eine rohrförmige heiße Katode **10** und eine Hilfsanode **11** umfasst, die das Zünden und Stabilisieren der Entladung unterstützt, und wird von Argon-Gas durchströmt. Eine Gleich-

stromversorgungseinrichtung **12** erzeugt das notwendige Potential für die Hilfsanode **11**.

[0036] Mittels eines Gaseinlass- und -verteilungssystems **13** wird als Reaktivgas Sauerstoff in die Vakuumkammer **3** eingelassen und bildet mit dem durch die Hohlkatode **9** strömenden Argon ein reaktives Gasgemisch. Eine Gleichstromversorgungseinrichtung **14** dient zum Treiben des Hohlkatodenstromes, der das Intensivieren der Magnetron-Entladung bewirkt. Eine im Sinne der Erfindung zweite Umschaltvorrichtung **15** ist mit der Gleichstromversorgungseinrichtung **14** und den Magnetron-Elektroden **5a**; **5b** elektrisch verbunden. Umschaltvorrichtung **15** bewirkt, dass der Elektronenstrom aus der Hohlkatode **9** jeweils abwechselnd auf diejenige der Magnetron-Elektroden **5a** oder **5b** gelenkt wird, die durch die erste Umschalteinrichtung **8** jeweils als Anode der Magnetron-Entladung geschaltet ist. Schaltungstechnisch ist eine Vereinigung der ersten Umschalteinrichtung **8** und zweiten Umschalteinrichtung **15** zu einer Einheit **16** vorgenommen worden. Diese basiert auf einer so genannten Vollbrückenschaltung aus Halbleiter-Schaltelementen und ist kommerziell verfügbar. In [Fig. 2a](#) und [Fig. 2b](#) ist eine derartige Umschalteinrichtung schematisch dargestellt. Dabei zeigt [Fig. 2a](#) einen Schaltzustand, in welchem die Magnetron-Elektrode **5b** als Sputterkatode fungiert und Elektronen von der Hohlkatode **9** zur Magnetron-Elektrode **5a** gelenkt werden. [Fig. 2b](#) zeigt analog zu [Fig. 2a](#) den Komplementärzustand, in welchem die Magnetron-Elektrode **5a** als Sputterkatode wirkt und Elektronen zur Magnetron-Elektrode **5b** gelenkt werden.

[0037] Visuell ist im Raum vor beiden Magnetron-Elektroden **5a**; **5b** eine einheitliche intensiv leuchtende Plasmaregion **17** beobachtbar. Das Leuchten ist die Begleiterscheinung eines hoch ionisierten Plasmas im Bereich derjenigen Substrate **1**, die sich zum jeweiligen Zeitpunkt in der Nähe der Magnetron-Elektroden befinden und beschichtet werden. Insgesamt wird durch die beschriebene Intensivierung der Magnetron-Entladung erreicht, dass sich stöchiometrische Aluminiumoxidschichten (Al_2O_3) bei einem Sauerstoffpartialdruck in der Vakuumkammer **3** von maximal $2 \cdot 10^{-2}$ Pa bilden. Bei diesem Sauerstoffpartialdruck bilden sich ohne besagte Intensivierung stark unterstöchiometrische, noch metallisch absorbierende Schichten. Außerdem erhöht sich durch die Intensivierung der Magnetron-Entladung die Abscheiderate auf den Substraten **1** bei gleich bleibender Entladungsspannung um den Faktor **4**.

[0038] Dieser Gewinn an Abscheiderate wird aus dem in [Fig. 3](#) graphisch dargestellten Sachverhalt erklärbar. Hier ist der an einer Magnetron-Elektrode gemessene Stromverlauf als Zeitfunktion dargestellt. Positive Werte geben den Elektronenstrom, negative Werte den Ionenstrom an. Während der Ionenstrom

allein durch die Magnetron-Entladung geliefert wird, stellt der Elektronenstrom die Summe aus den von einer Magnetron-Entladung und einer erfindungsgemäß zusätzlichen Elektronenquelle gelieferten Anteilen dar. Ohne zusätzlichen Elektronenstrom aus der Elektronenquelle (Kurve a) werden Spitzenstromwerte von etwa 8 Ampere gemessen. Moderate Werte des Zusatzelektronenstromes (Kurven b und c) erhöhen die Ladungsträgerdichte, aber nicht die Abscheiderate, was am konstant gebliebenen Ionenstrom ablesbar ist. Oberhalb eines Schwellwertes des zusätzlichen Elektronenstromes erhöht sich sprunghaft auch der Ionenstrom zur Magnetron-Elektrode und zeigt, dass ein Lawinenprozess zum Generieren zusätzlicher Ladungsträger auch in den katodischen Phasen der Magnetron-Elektrode und somit zum Erhöhen der Abscheiderate geführt hat (Kurve d).

Patentansprüche

1. Verfahren zum Intensivieren einer mittelfrequenz gepulsten Magnetron-Entladung in einer Vakuumkammer (3), in welcher mindestens eine erste Elektrode (5a) und mindestens eine zweite Elektrode (5b) angeordnet werden, wobei die erste Elektrode (5a) in einem Magnetron-Magnetfeld angeordnet und zeitweise als Katode geschaltet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest für einen Teil jedes Zeitabschnittes, in dem die erste Elektrode (5a) nicht katodisch betrieben wird, ein zusätzlicher Elektronenstrom aus mindestens einer zusätzlichen Elektronenquelle (9) auf die erste Elektrode (5a) gelenkt wird, so dass in der Umgebung der ersten Elektrode (5a) Ionen gebildet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Elektrode (5a) abwechselnd als Katode oder Anode geschaltet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass eine Elektrode als erste Elektrode verwendet wird, die Teil eines Paares oder einer Gruppe von Magnetron-Elektroden (5a; 5b) ist, welche wechselweise als Anode und Katode betrieben werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Elektronenstrom aus der zusätzlichen Elektronenquelle (9) jeweils auf die Elektrode (5a; 5b) gelenkt wird, welche als Anode der Magnetron-Entladung fungiert.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass als zusätzliche Elektronenquelle (9) eine Hohlkatode verwendet wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass als zusätzliche Elektronenquelle (9) eine Glühkatode verwendet wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein in der Vakuumkammer zu behandelndes Substrat und/oder dessen Halterung mit einer Spannung gegenüber dem Potential der Vakuumkammer oder einer anderen Bezugselektrode beaufschlagt werden/wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein in der Vakuumkammer zu behandelndes Substrat innerhalb der Vakuumkammer derart isoliert angeordnet wird, dass zwischen dem Substrat und einem in der Vakuumkammer entstehenden Plasma eine Selbst-Bias-Spannung ausgebildet wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine dünne Schicht mittels Magnetron-Sputtern auf mindestens einem Substrat erzeugt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine dünne Schicht mittels ionengestütztem Magnetron-Sputtern unter Verwendung einer Substrat-Vorspannung auf mindestens einem Substrat erzeugt wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche mindestens eines Substrates vorbehandelt wird.
12. Vorrichtung zum Betreiben einer mittelfrequenz gepulsten Magnetron-Entladung in einer Vakuumkammer (3), umfassend mindestens eine erste Elektrode (5a) und mindestens eine zweite Elektrode (5b), wobei die erste Elektrode (5a) in einem Magnetfeld angeordnet ist und mittels einer ersten Umschalt-einrichtung (8) zeitweise als Katode der Magnetron-Entladung schaltbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass mittels einer zweiten Umschalt-einrichtung (16) die erste Elektrode (5a) in den Phasen, in denen die erste Elektrode (5a) nicht als Katode der Magnetron-Entladung geschaltet ist, zumindest zeitweise als Anode in den Stromkreis einer zusätzlichen Elektronenquelle (9) schaltbar ist.
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Elektrode (5a) und die zweite Elektrode (5b) mittels der ersten Umschalt-einrichtung (8) wechselweise als Katode und Anode der Magnetron-Entladung schaltbar sind.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der zweiten Umschalt-einrichtung (16) jeweils diejenige Elektrode (5a; 5b) als Anode in den Stromkreis der zusätzlichen Elektronenquelle schaltbar ist, welche als Anode der Magnetron-Entladung fungiert.
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass beide Umschalt-

einrichtungen (8; 16) als eine Einheit ausgebildet sind.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektronenquelle (9) eine Hohlkatode umfasst.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Hohlkatode eine Katodenheizung umfasst.

18. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Hohlkatode eine Gehäusekühlung umfasst

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektronenquelle (9) eine Glühkatode umfasst.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

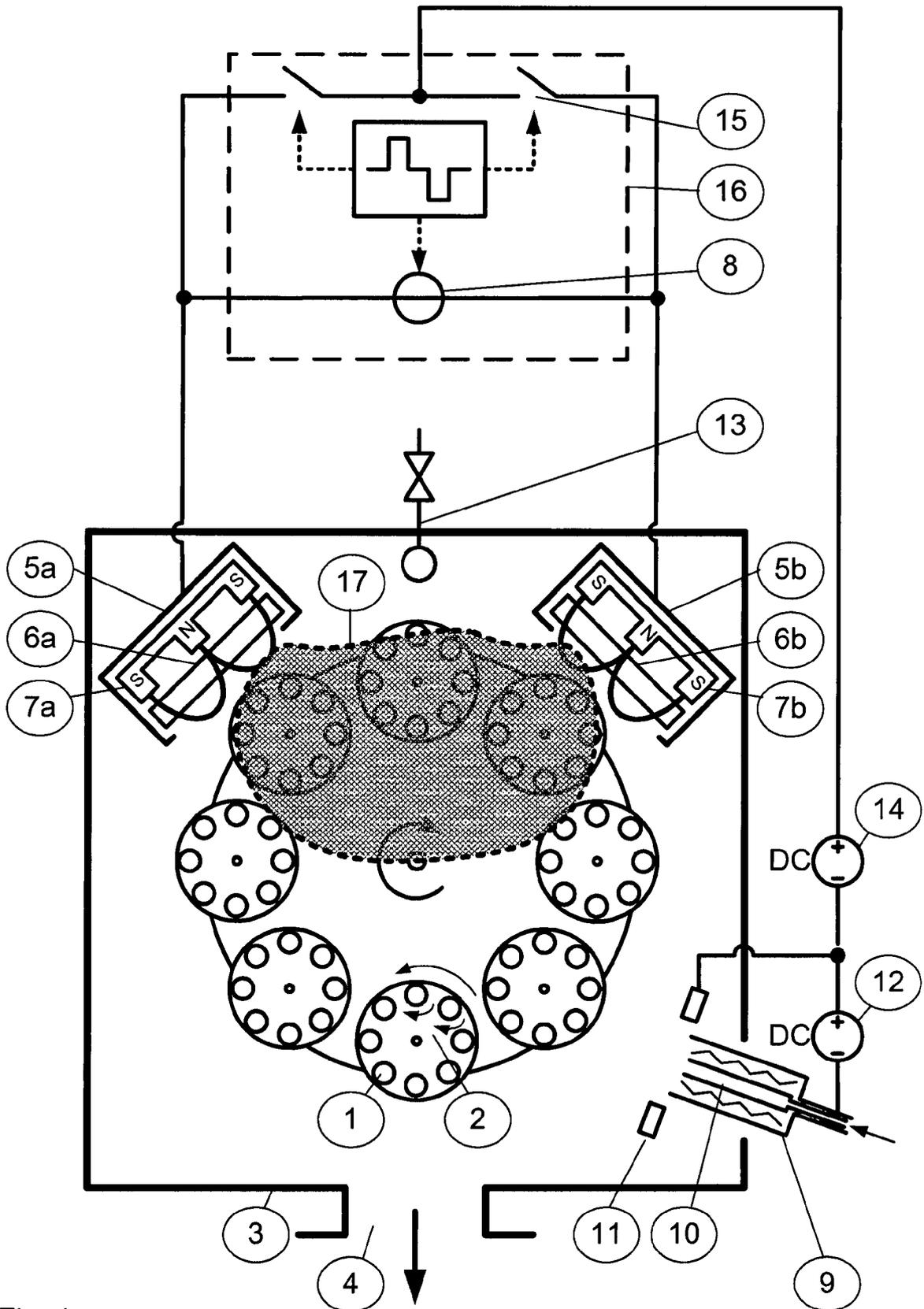


Fig. 1

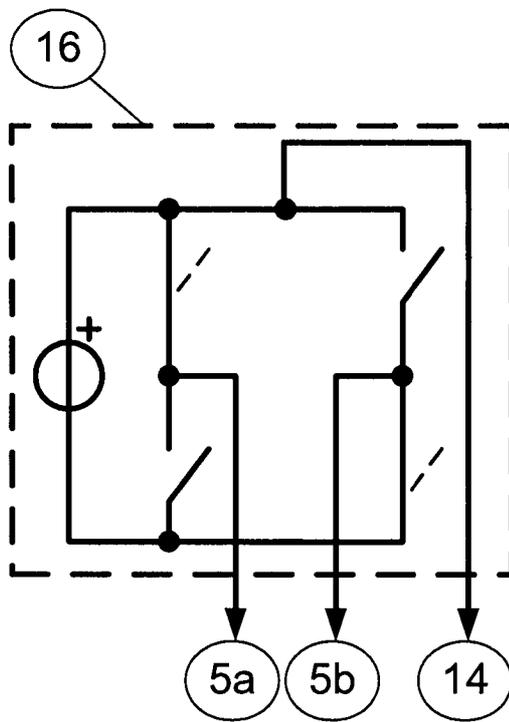


Fig. 2a

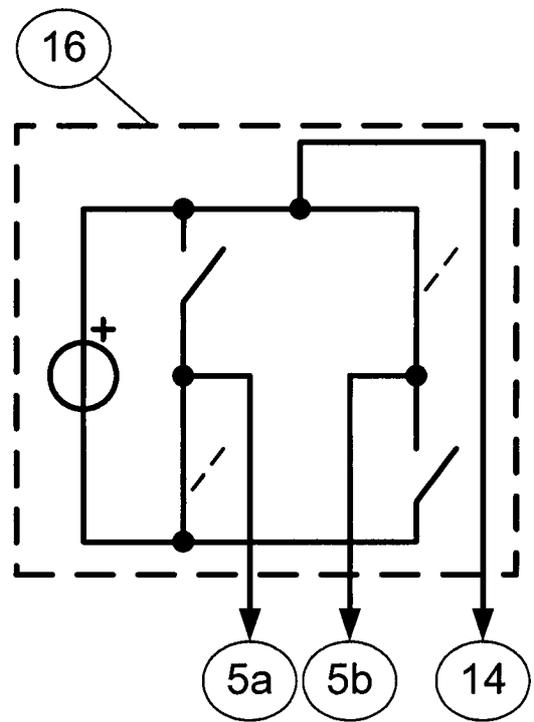


Fig. 2b

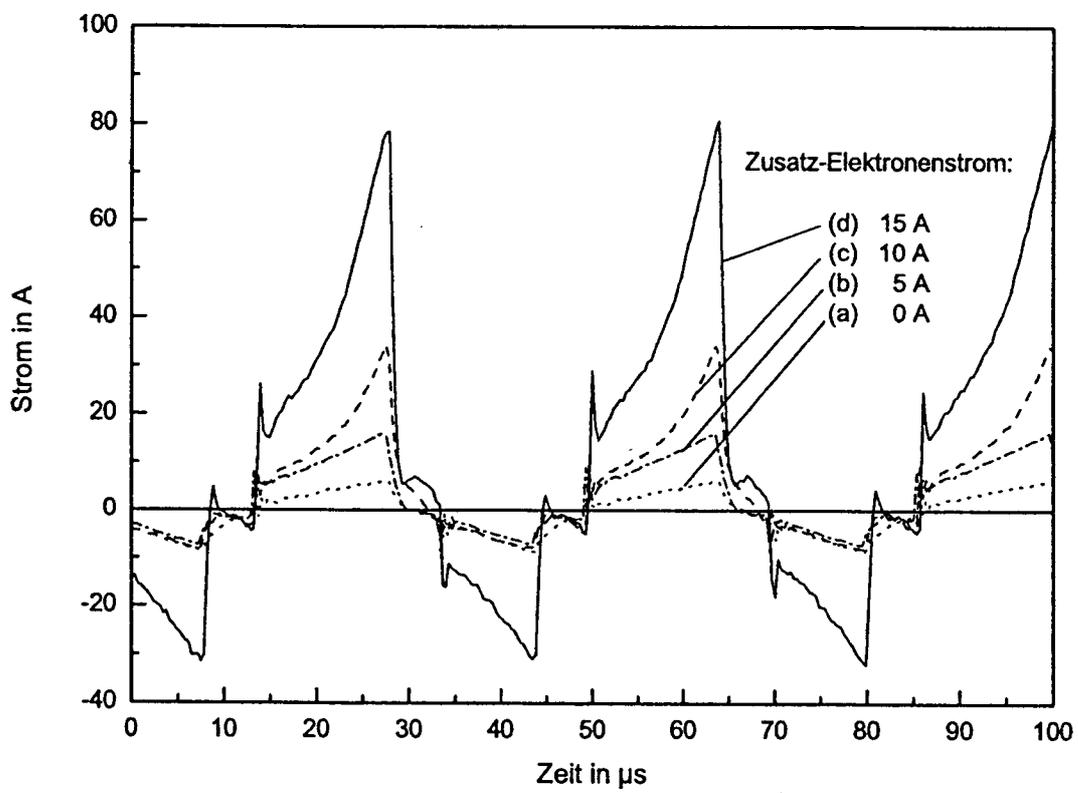


Fig. 3