



DEUTSCHES PATENTAMT

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Aufrechterhaltung kann Einspruch eingelegt werden

(21) Aktenzeichen:	(22) Anmeldetag:	(44) Veröff.-tag der DD-Patentschrift:	(45) Veröff.-tag der Aufrechterhaltung:
DD C 23 C / 322 370 6	30. 11. 88	04. 04. 90	25. 01. 96

(30) Unionspriorität:
—

(72) Erfinder: Siemroth, Peter, Dr. rer. nat., 10117 Berlin, DE; Bücken, Bernd, Dipl.-Phys., 01277 Dresden, DE; Scheibe, Hans-Joachim, Dr. rer. nat., 01279 Dresden, DE; Schulze, Dietmar, Dipl.-Phys., 01099 Dresden, DE; Fleischer, Werner, Dr.-Ing., 01237 Dresden, DE

(73) Patentinhaber: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Leonrodstr. 68, 80636 München, DE

(54) Verfahren zum Betreiben eines Vakuum-Bogenentladungsverdampfers

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 3 413 891 C 2
Ertürk, Ergin: Verschleißschutz durch TiN-Beschichtung, nach dem Ion-Bond-Verfahren.
In: VDI-Zeitung, Bd. 129 (1987) Nr. 1, Seite 89

Patentanspruch:

1. Verfahren zum Betreiben eines Vakuum-Bogenentladungsverdampfers mit gesteuerter, lasergezündeter Anodenverdampfung, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Bogenentladung an der Katode gezündet wird, durch geeignete Mittel die Ausbreitung des Katodenplasmas so gesteuert wird, daß sich ein Anodenfall ausbildet, daß ein gesteuerter, auf die Anode gerichteter Laserimpuls zur Ausbildung eines Anodenbrennflecks an der Auftreffstelle des Laserstrahles führt und daß vor Ausbildung einer großflächigen Schmelze die Bogen Spannung abgeschaltet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß als Mittel zur Steuerung der Ausbreitung des Katodenplasmas eine Blende in das Plasma eingeführt wird.

Hierzu 1 Seite Zeichnung

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Vakuum-Bogenentladungsverdampfers mit gesteuerter, lasergezündeter Anodenverdampfung. Derartige Verdampfer eignen sich insbesondere für die Herstellung homogener und dropletfreier Schichten, z. B. für optische Zwecke.

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

Aufbau und Wirkungsweise von Verdampfern, die auf dem Prinzip der Vakuumbogenentladung beruhen, sind vielfach beschrieben und weitgehend bekannt (z. B. VDI-Zeitung 129, 1987, 1, 89).

Das Verfahren der Verdampfung von Material mit Hilfe einer Vakuumbogenentladung weist gegenüber anderen Verdampferprinzipien (thermische Verdampfung, Plasmasputtern u. a.) einige wichtige Vorteile auf. Diese bestehen vor allem im relativ einfachen technischen Aufbau, einem hohen energetischen Wirkungsgrad sowie darin, daß das abgetragene Material nahezu vollständig ionisiert ist. Weiterhin zeichnet sich das Vakuumbogenverfahren dadurch aus, daß der Verdampfer in beliebiger Lage betrieben werden kann. Dies hat dazu geführt, daß dieses Verfahren bereits in erheblichem Umfang technisch genutzt wird. Es hat sich insbesondere für solche Beschichtungsaufgaben bewährt, bei denen relativ große Materialdurchsätze gefordert sind, wie z. B. Hartstoff- und andere Schutzschichten auf Werkstücken mit komplizierter Oberflächengeometrie. Es weist jedoch noch eine Reihe von Nachteilen auf, die zur Folge haben, daß insbesondere Beschichtungsaufgaben, bei denen hohe Anforderungen an die Homogenität und Reproduzierbarkeit der erzeugten Schichten gestellt werden, nicht mit Vakuumbogenverdampfern gelöst werden können. Hierzu zählen z. B. Aufgaben aus der Mikroelektronik und die Herstellung spezieller optisch aktiver Schichten.

Eines dieser Probleme besteht darin, daß bei der explosionsartigen Verdampfung neben dem ionisierten Dampf praktisch auch immer makroskopische Spritzer (Droplets) vom Brennfleck ausgeworfen werden.

In der DE-OS 3 413 891 wird eine Anordnung vorgeschlagen, bei der der unter bestimmten Bedingungen freigesetzte Anodendampf zur Beschichtung genutzt werden soll. Dazu wird zwischen einer relativ großflächigen Katode und einer Anode ein Vakuumbogen gezündet, wobei der anodische Ansatz des Bogens als Anodenfleck auf der Anode bzw. dem derart befestigten Verdampfungsmaterial erfolgt, so daß aufgrund der hohen Leistungsdichte eine intensive Verdampfung einsetzt. Voraussetzung für die Freisetzung von nutzbarem Anodendampf in den Anodenflecken ist das Auftreten eines Anodenfalls, der bei Vakuumbogenentladungen infolge eines Ionendefizits an der Anode entsteht. Im vorliegenden Falle (DE-OS 3 413 891) erzeugt man das notwendige Ionendefizit an der Anode dadurch, daß diese möglichst klein gestaltet wird. Vorteilhaft ist bei dieser Anordnung, daß keine makroskopische Partikelemission auftritt. Die Verdampfungsrate wird mit etwa 0,5 g/min bei $I = 40$ A angegeben, d. h. sie beträgt mit ca. 200 $\mu\text{m}/\text{min}$ etwa das Doppelte der des Katodenflecks.

Neben diesen offensichtlichen Vorteilen haften diesem Verfahren aber noch eine Reihe prinzipieller Mängel an. In erster Linie ist hier zu nennen, daß wegen der hohen Energiekonzentration die gesamte Anode geschmolzen wird. Damit entsteht das zusätzliche Problem der Halterung des zu verdampfenden Materials.

Ein anderer Nachteil der gewählten Anordnung besteht darin, daß sie nur für relativ geringe Verdampferleistungen geeignet ist. Eine Erhöhung des Stromes hätte zur Folge, daß auch der Halter zum Schmelzen gebracht würde. Dadurch ist die mit einer Verdampfereinheit zu erreichende Aufdampfleistung kaum höher, als die von Kaltkathodenverdampfern.

Das Aufschmelzen größerer Anodenbereiche stellt ein prinzipielles Problem bei der Ausnutzung der Anodenflecke dar, denn im Gegensatz zu den Katodenflecken sind Anodenflecke von Natur aus stationär, d. h. sie bewegen sich nicht oder nur langsam über die Elektrodenoberfläche. Daher kommt es insbesondere bei hohen Strömen schnell zu makroskopischen Aufschmelzungen, die Abtropfen von Anodenmaterial bzw. sogar die Zerstörung der Anode zur Folge haben können. Zur Umgehung dieser Nachteile wurde bereits vorgeschlagen, zwischen einer Hohl- bzw. Glühkatode und einer großflächigen zu verdampfenden Anode eine Entladung zu zünden, die nicht zum Aufschmelzen der Anode ausreicht und mittels Laserstrahlimpulse auf der Anode Brennflecke initiiert werden, aus denen das Material explosionsartig verdampft.

Jedoch hat man bei dieser Variante die Nachteile des Auftretens von heißen Elektroden, die infolge begrenzter Standzeit die Effektivität des Verfahrens beschränken sowie die Notwendigkeit Inertgase als Plasmaträger einsetzen zu müssen, wodurch sich die Schichtqualität durch Gaseinbau verschlechtern kann. Außerdem kommt es bei reaktiv geführten Beschichtungsprozessen zu schädlichen Reaktionen des Reaktivgases mit den heißen Kathoden, wodurch deren Standzeit weiter gesenkt wird.

Darüber hinaus sind bei diesem vorgeschlagenen Verfahren zusätzliche Mittel zur Steuerung der Impulsentladung zwischen der zu verdampfenden Anode und einer weiteren Katode synchron zum Laserstrahlimpuls notwendig.

Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist es, ein Verfahren zur plasmagestützten Abscheidung von Schichten im Vakuum mit hoher Abscheiderate und großer Schichtgleichmäßigkeit anzugeben.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betreiben eines Vakuumbogenentladungsverdampfers anzugeben, mit dem eine gesteuerte Verdampfung der Anode realisiert werden kann.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß die Vakuum-Bogenentladung an der Katode mit bekannten Mitteln gezündet wird, in geeigneter Weise die Ausbreitung des Katodenplasmas so gesteuert wird, daß sich ein Anodenfall ausbildet, daß ein gesteuert auf die Anode gerichteter Laserimpuls zur Ausbildung eines Anodenbrennflecks an der Auftreffstelle des Laserstrahles führt und daß zur Vermeidung einer großflächigen Schmelze die Bogenspannung abgeschaltet wird.

Nach der Zündung der Vakuumbogenentladung an der Katode, die in üblicher Weise mittels Trigger Elektrode, HF-Entladung oder auch durch einen Laserimpuls, der auf die Katode gerichtet ist, und eine Energiedichte von mindestens 10^8 W/cm² besitzt, erfolgen kann, kommt es zur Emission eines intensiven Plasmas aus dem Katodenspot (Katodenbrennfleck).

Man kann davon ausgehen, daß die von der Katode emittierten Ionen sich im wesentlichen geradlinig ausbreiten. Die Dichteverteilung des Ionenstromes kann dabei gut mit einer Kosinusverteilung beschrieben werden, d. h. die meisten Ionen werden senkrecht zur Katodenoberfläche emittiert. Durch diese Ionen wird die Raumladung des Elektronenstromes vollständig neutralisiert, so daß dieser wegen der hohen Leitfähigkeit kaum Begrenzungen unterworfen ist. Dagegen bedarf der Eintritt des Stromes in die Anode einer bestimmten Mindestplasmadichte. Die ohne zusätzliche Felder mögliche maximale Stromdichte an der Anode ergibt sich aus dem Produkt von Ladungsträgerdichte, die durch die Ionen bestimmt wird, und der thermischen Geschwindigkeit der Elektronen.

Wird nun durch geeignete Mittel verhindert, daß mehr als 30–50 % des Katodenplasmas die Anode erreichen, kommt es zur Herausbildung eines Anodenfalles. Dies ist dadurch erreichbar, daß die geometrische Anordnung von Katode zur Anode ungünstig durchgeführt wird, oder daß Plasmablenden zwischen diese Elektroden eingeführt werden.

Im Anodenfall werden die Elektronen beschleunigt, und mit der erhöhten Geschwindigkeit der Elektronen steigt auch die Stromdichte an. Im weiteren hat dieser Anodenfall aber andere Konsequenzen. Zum einen führt er dazu, daß zumindest ein Teil der Ionen abgestoßen werden, womit sich die Ionendichte unmittelbar vor der Anode weiter verringert und der Anodenfall in der Folge ansteigt. Zum anderen heizt der Beschuß der Anode mit beschleunigten Elektronen diese thermisch auf. Es kommt zur Verdampfung von Anodenmaterial, welches schnell ionisiert wird, so daß sich die Plasmadichte wieder erhöht. Die Aufheizung erfolgt dabei inhomogen. Insbesondere Bereiche mit schlechter Wärmeableitung, wie z. B. Spitzen, Schichten, Einschlüsse heizen sich schnell auf. Da die lokal erhöhte Plasmadichte auch zu einer Erhöhung der Stromdichte und damit zu weiterer Aufheizung führt, bilden sich schnell sogenannte Anodenflecken d. h. Gebiete mit sehr hoher Verdampfung und hoher Stromdichte heraus. Dabei werden Leistungsdichten erreicht, die denen der Katodenflecke nahekommen.

Erfindungsgemäß erfolgt vor einer zufälligen und unkontrollierten Herausbildung von Anodenflecken die Einleitung eines Energieimpulses auf die Anode in Form eines stark fokussierten Laserstrahles mit einer Energiedichte von mindestens 10^8 W/cm². Dadurch wird erreicht, daß sich der Anodenfleck genau an der Auftreffstelle des Laserstrahles herausbildet und Anodenmaterial verdampft wird. Da auch der Anodendampf relativ hoch ionisiert ist, können mit diesem Verfahren Schichten ähnlicher Qualität erzeugt werden, wie mit den herkömmlichen Vakuumbogenverdampfern mit Verdampfung der Katode. Hinzu kommt, daß aus dem Anodenfleck, infolge des fehlenden Ionendruckes, keine Spritzer (Droplets) austreten, die die Schichtqualität ungünstig beeinträchtigen. Ebenfalls tritt die stochastische Bewegung des Brennflecks, die vom Katodenfleck bekannt ist, beim Anodenfleck nicht auf. Erfindungsgemäß wird deshalb die Brennzeit des Vakuumbogens zur Vermeidung einer großflächigen Aufschmelzung der Anode zeitlich begrenzt. Die kontinuierliche Verdampfung wird durch eine Folge vieler solcher impulsartiger Verdampfungen erzielt. Durch die gezielte Verschiebung des Laserauftreffortes, damit des Zündortes von Entladung zu Entladung, wird ein gleichmäßiger Abtrag der Anode erzielt.

Neben der beschriebenen und gewünschten Verdampfung der Anode bleibt auch die Verdampfung der Katode von sich stochastisch bewegenden Katodenfleck erhalten. Deshalb sollte in der Regel die Katode aus dem gleichen Material wie die Anode bestehen. Anderenfalls wird zwangsläufig eine Mischschicht erzeugt, wobei auch die Anode vom Katodenmaterial und umgekehrt beschichtet wird. Dieser Effekt kann gezielt zur Abscheidung von Misch- und/oder Legierungsschichten ausgenutzt werden.

Da mit der Katoden-Verdampfung auch die Droplet-Bildung verbunden ist, muß zwischen Katode und Substrat eine geeignete Blende zur Abschirmung der Droplets angeordnet werden.

Wenn die Droplets nicht unbedingt störend sind, dann kann mit dem verfahrensgemäßen Betreiben des Verdampfers durch Anoden- und Katoden-Verdampfung eine Hochleistungsverdampfung realisiert werden.

Ausführungsbeispiel

Nachfolgend soll die Erfindung an einem Ausführungsbeispiel näher erläutert werden. Die zugehörige Zeichnung zeigt eine schematische Darstellung einer geeigneten Beschichtungseinrichtung.

Unter Nutzung der erfindungsgemäßen Verfahrensführung soll auf einem Kochsalz-Substrat eine infrarot-transparente Kohlenstoffschicht von 1 µm-Dichte mit hoher Homogenität hergestellt werden.

Die Zeichnung zeigt eine Beschichtungskammer 1 mit der Substrataufnahme 2 für die zu beschichtenden Substrate 3. Der Vakuum-Bogenentladungsverdampfer besteht aus den zwei Hauptkomponenten Katode 4 und Anode 5. Der Katode 4 ist eine Zündelektrode 6 zugeordnet. Zur Realisierung des Verfahrens ist weiterhin eine in der Höhe **verstellbare** Zylinderblende 7 konzentrisch um diese Anode 5 und zwischen dieser und der Katode 4 angeordnet, eine Ringblende 8 zwischen Katode 4 und den Substraten 3 sowie eine nicht näher dargestellte **Lasereinrichtung**, die einen Laserstrahlimpuls 9, der variabel ausrichtbar ist, auf die Anode richtet. Zur Stromversorgung der Anode 5 und Katode 4 sind die Stromquellen 10 und 11 vorgesehen. Nachfolgend soll das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben der Einrichtung erläutert werden.

In bekannter Weise wird zwischen Katode 4 und Anode 5 mittels der Stromquelle 10 eine Spannung von 500 V angelegt. Der Vakuumbogen kann jedoch erst mittels eines Hochspannungsimpulses von der Zündelektrode 6 gezündet und zwischen Anode 5 und Katode 4 aufrechterhalten werden. Die Stromquelle 11 liefert einem Entladungsstrom, der zwischen 500 und 1 000 A liegen kann. Damit wäre die bekannte Kaltkathoden-Verdampfung zu realisieren. Erfindungsgemäß wird jedoch zwischen der Katode 4 und der Anode 5 die freie Ausbreitung des Katodenplasmas durch die Zylinderblende 7 behindert, was zum Aufbau eines Anodenfalls an der Anode führt. Ein ausreichender Anodenfall wird im Beispiel erreicht, wenn max. 20 % des Katodenplasmas die Anodenoberfläche erreicht. Zur Einstellung dieses Wertes, die in der Regel experimentell erfolgt, ist die Zylinderblende 7 höhenverstellbar ausgebildet. Die Zylinderblende 7 kann auch aus einem Lochblech bestehen und die Anode 5 von der Katode 4 fast völlig abschirmen. Nach Aufbau des Anodenfalls wird ein Laserstrahlimpuls 9 mit einer Energiedichte größer als 10^8 W/cm^2 auf einem variablen Punkt der Anode gerichtet. Dadurch bildet sich an dieser Stelle ein Anodenbrennfleck heraus, der durch lokale Aufschmelzung und intensive Verdampfung gekennzeichnet ist. Nach etwa 10 ms wird die Spannungsquelle 11 zugeschaltet, die einen kurzen Stromimpuls auslöst, der dem Bogenstrom **entgegengerichtet** ist. Dadurch wird für einige $100 \mu\text{s}$ die Stromrichtung des Vakuumbogens umgekehrt, wodurch der oder die Brennflecke auf der Katode 4 verlöschen und diese zeitweilig zur Anode wird. Nach Beendigung des Stromimpulses aus der Stromquelle 11 liegt wieder negative Polarität an der Katode 4 an, es können sich jedoch keine neuen Brennflecke ausbilden und die Entladung verlischt.

Während die Stromquellen 10 und 11 nachgeladen werden, kann der Laser auf ein neues noch kaltes Gebiet der Anode ausgerichtet werden und der beschriebene Ablauf wiederholt sich.

Zwischen der Zündung der Bogenentladung mittels Zündelektrode 6 und Auftreffen des Laserstrahlimpulses 9 liegt etwa eine Zeit von 1 ms.

Zur Realisierung des konkreten Beispiels der Herstellung einer infrarot-transparenten C-Schicht besteht die Katode 4 aus einem Wolframdraht und die Anode 5 weist ein Kohlenstofftarget auf. Zur weitgehenden Ausschaltung der Abscheidung von Katodenmaterial auf dem Substrat 3 ist die **Ringblende** 8 vorgesehen. Die Wirksamkeit der Ausblendung des Katodenmaterials durch die Ringblende 8 wie auch der Zylinderblende 7 ist sehr hoch. Die derartig hergestellten C-Schichten sind fast völlig dropletfrei, homogen und können mit hoher Abscheiderate hergestellt werden.

