



## AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

---

(21)	WP C 23 C / 286 302 0	(22)	20.01.86	(45)	22.06.88
------	-----------------------	------	----------	------	----------

---

(71) Forschungsinstitut Manfred von Ardenne, Zeppelinstraße 7, Dresden, 8051, DD  
 (72) Heisig, Ullrich, Dr. rer. nat. Dipl.-Phys.; Goedcke, Klaus, Dipl.-Phys.; Hartung, Johannes, Dipl.-Phys.; Schiller, Siegfried, Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Phys.; Hempel, Wolfgang, Dipl.-Phys.; Döhler, Heinz; Landgraf, Günther, Dipl.-Ing.; Graf, Bernd, DD

---

(54) Verfahren zum Beschichten durch Plasmatronputtern

---

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Beschichten durch Plasmatronputtern von Substraten, vorzugsweise als Schüttgut, die periodisch an Plasmatronquellen vorbeibewegt werden. Das Ziel ist das Erreichen homogener Schichten. Die Aufgabe besteht darin, periodisch bewegte Substrate reaktiv zu beschichten. Erfindungsgemäß sind mehrere Plasmatronquellen quer zur Bewegungsrichtung angeordnet und die Sputterrate für jede einzelne Plasmatronquelle wird auf den n-fachen Wert der mittleren Sputterrate der gesamten Einrichtung eingestellt. Die einzelnen Plasmatronquellen werden zeitlich nacheinander mit einer bestimmten Frequenz eingeschaltet und wieder ausgeschaltet. Die Länge der Einschaltzeit beträgt max 5 % der Gesamtbeschichtungszeit.

## Patentansprüche:

1. Verfahren zum Beschichten durch Plasmatronputtern unter Einwirkung reaktiver Restgase oder in Arbeitsgas-/Reaktivgasgemischen, indem sich die Substrate periodisch innerhalb einer Fläche bewegen und quer zur Bewegungsrichtung  $n$ , mindestens 5, Plasmatronquellen in einer oder mehreren Reihen angeordnet sind, die untereinander gleiche Abstände haben und an eine einzige Stromversorgungseinrichtung mit geregelten elektrischen Parametern, vorzugsweise mit Leistungsregelung, angeschlossen sind, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Sputterraten für jede einzelne Plasmatronquelle auf das  $n$ -fache der mittleren Sputterraten der gesamten Sputtereinrichtung eingestellt wird, wobei  $n$  die Anzahl der einzelnen Plasmatronquellen bedeutet, daß die einzelnen Plasmatronquellen zeitlich nacheinander mit einer Frequenz, die der Kehrwert der Summe aller Einschaltzeiten  $t_i$  der  $n$  Plasmatronquellen ist, eingeschaltet und nach der Zeit  $t_i$  wieder ausgeschaltet werden, daß die Länge der Einschaltzeit  $t_i$  der einzelnen Plasmatronquelle max. 5% der Gesamtbeschichtungszeit beträgt, und daß, ausgehend von der Mitte der Anordnung der einzelnen Plasmatronquellen, in Richtung zu den Rändern bei konstanter Leistung die Einschaltzeit  $t_i$  der Plasmatronquellen um Beiträge  $\Delta t_i$  verlängert wird, wobei für den maximalen Betrag  $\Delta t_i$  max. gilt

$$\Delta t_i \text{ max} < \frac{\sum t_i}{n}$$

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei einer ungeraden Anzahl von Plasmatronquellen mit konstanter Leistung, die in der Zeit  $t_1$  ein- und ausgeschaltet werden, zuerst die Plasmatronquellen mit ungerader Nummer und danach die mit gerader Nummer betrieben werden, wobei die Plasmatronquellen in geordneter Reihenfolge numeriert worden sind.

## Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung dient zum Beschichten von Substraten, die periodisch an Plasmatronquellen vorbeibewegt werden. Es können flächenhafte Einzelsubstrate oder kleinere Substrate in Paletten sein oder auch Körper als Schüttgut, wie z. B. Rundwiderstände, die in Drehkorbanlagen beschichtet werden.

## Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Halten sich die Substrate oder Körper periodisch in einer Fläche innerhalb der Beschichtungsanordnung auf, so wird beim Beschichten mit einer Plasmatronquelle die erforderliche Schichtdickenverteilung oder Parameterverteilung quer zur Bewegungsrichtung der Substrate oder Körper z. B. dadurch erreicht, daß die Ausdehnung des Targets der Plasmatronquelle größer ist als die zu beschichtende Breite, d. h. die Richtung quer zur Bewegungsrichtung. Zusätzlich können zur Schichtdicken- und Parameterverteilung Korrekturblendens mit variabler Apertur für den Teilchenstrom angeordnet sein.

Es ist auch bekannt, mehrere Plasmatronquellen in einer oder mehreren Reihen quer zur Bewegungsrichtung anzuordnen, wobei die äußeren Targets so angeordnet sind, daß sie über die Beschichtungsbreite hinausragen.

Schließt man jedoch eine Anzahl von Plasmatronquellen an eine einzige Stromversorgungseinrichtung mit geregelter Leistung an, so wird keine gleichmäßige Beschichtung quer zur Substratbewegungsrichtung erzielt. Selbst wenn man zur Korrektur der Leistung die Plasmatronquellen mit unterschiedlichen Vorwiderständen an die Stromversorgungseinrichtung anschließt, so wird in der Regel die geforderte Korrektur der Schichtdickenverteilung nicht erzielt. Ursache dafür ist, daß auf Grund der unterschiedlichen inneren Widerstände der Gasionladungsstrecken der Plasmatronquellen und der gegenseitigen Beeinflussung der Plasmen benachbarter Einzelplasmatronquellen den einzelnen Plasmatronquellen nicht die geforderten Teilleistungen aufgeprägt werden können.

Auch eine Messung von Strom und Spannung für jede Plasmatronquelle und die Einstellung der Vorwiderstände entsprechend dem Meßergebnis führt nicht zu einer Lösung, um die vorgegebene Schichtdicken- bzw. Parameterverteilung zu erreichen, da sich mit fortschreitender Targeterosion die inneren Widerstände der einzelnen Plasmatronquellen und die Beeinflussung der Plasmen zeitlich verändern. Die Lösung des genannten Problems führt zu aufwendigen elektrischen Schaltungen.

Zur Beseitigung dieser Nachteile wurde es versucht, die einzelnen Plasmatronquellen mit getrennten Stromversorgungseinrichtungen mit zur Korrektur der Schichtdicken- bzw. Parameterverteilung für die einzelnen Plasmatronquellen unterschiedlich eingestellten Leistungen zu betreiben. Diese Lösung ist technisch noch aufwendiger und beseitigt nicht die Probleme, die sich aus der Kopplung der Plasmen ergeben. Aber auch wenn das Problem der Korrektur der Sputterratenverteilung quer zur Bewegungsrichtung auf einem der beschriebenen Wege gelöst würde, ergeben sich bei der Beschichtung Schwierigkeiten, wenn die Beschichtung bei einem in technischen Anlagen an sich unvermeidlichen Partialdruck reaktiven Restgases erfolgen muß oder wenn die Schichtabscheidung überhaupt in einem Gasgemisch mit Reaktivgas erfolgt. In solchen Fällen wirkt sich das reaktive Restgas oder das Reaktivgas auf das Target in Form einer sputterratenabhängigen

Targetbedeckung aus. Bei gegebenen Reaktivgasdruck sind diese Rückwirkungen auf das Target umso größer, je kleiner die Leistungsdichte auf dem Target ist. Folge von Leistungsänderungen für eine Anzahl von einzelnen Plasmatronquellen zum Zwecke der Schichtdickenkorrektur sind aus dem angeführten Grund Parameterschwankungen quer zur Bewegungsrichtung. Eine solche Parameterschwankung ist zum Beispiel der Reflexionsgrad einer metallischen Schicht, der in den Randzonen geringer ist, oder die Änderung des Flächenwiderstandes einer unter Einwirkung von Reaktivgas abgeschiedenen Widerstandsschicht. Derartige Parameterschwankungen sind umso größer, je kleiner die Leistungsdichte bei der Beschichtung mit einer Plasmatronquelle bzw. die Teilleistung bei der Beschichtung mit einzelnen Plasmatronquellen ist.

#### Ziel der Erfindung

Das Ziel der Erfindung besteht darin, Mängel am Stand der Technik bei der Vakuumbeschichtung von periodisch bewegten Substraten oder Körpern hinsichtlich der Schichtdickenverteilung und Parameterverteilung zu beseitigen und dabei den technischen Aufwand zu reduzieren.

#### Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Beschichtung von Substraten oder Körpern durch Plasmatronputtern unter Einwirkung reaktiver Restgase eines Gasgemisches mit Reaktivgas anzugeben, bei dem sich die Substrate oder Körper periodisch durch eine Fläche quer zur Bewegungsrichtung der Substrate oder Körper bewegen. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe unter Verwendung einer Anzahl von mindestens 5 einzelnen Plasmatronquellen, die in einer oder mehreren Reihen quer zur Bewegungsrichtung der Substrate mit gleichen Abständen untereinander angeordnet sind und an eine einzige Stromversorgungseinrichtung mit geregelten elektrischen Parametern, vorzugsweise mit Leistungsregelung, angeschlossen sind, wobei sich die Substrate periodisch innerhalb einer Fläche bewegen, dadurch gelöst, daß die Sputterraten für jede einzelne Plasmatronquelle auf das  $n$ -fache der mittleren Sputterraten der gesamten Sputtereinrichtung eingestellt wird, wobei  $n$  die Anzahl der einzelnen Plasmatronquellen bedeutet. Die einzelnen Plasmatronquellen werden zeitlich nacheinander mit einer Frequenz eingeschaltet, die der Kehrwert der Summe aller Einschaltzeiten  $t$  der  $n$  Einzelquellen ist, und nach der Zeit  $t_i$  wieder ausgeschaltet. Während der Zeit  $t_i$  werden die Plasmatronquellen mit geregelten elektrischen Parametern durch die Stromversorgungseinrichtung betrieben. Vorzugsweise erfolgt eine Leistungsregelung, die in sehr guter Näherung gleiche Sputterraten bei unterschiedlichen Innenwiderständen der Gasentladungen der einzelnen Plasmatronquellen gewährleistet. Unter  $t_i$  wird dabei die Einschaltzeit der Plasmatronquelle  $i$  einschließlich einer evtl. vorhandenen Anstiegs- und/oder Umschaltzeit bis zum Erreichen der Plasmatronleistung verstanden. Solche Anstiegs- und Umschaltzeiten können, wenn technisch erforderlich, stets klein gegen die Einschaltzeit  $t_i$  sein.

Die Länge der Einschaltzeit jeder Plasmatronquelle beträgt maximal 5% der Gesamtbeschichtungszeit für die Substrate oder Körper. Ausgehend von der Mitte der Anordnung der einzelnen Plasmatronquellen wird in Richtung zu den Rändern bei konstanter Sputterleistung die Einschaltzeit  $t_i$  der Plasmatronquellen um Beträge  $\Delta t_i$  verlängert, wobei das Maximum der Verlängerung kleiner als der  $n$ -te Teil der Summe aller Einschaltzeiten  $t_i$  ist. Die Größe der Beträge  $\Delta t_i$  selbst hängt von den geometrischen Gegebenheiten der Plasmatroneinrichtung ab.

In Anwendungsfällen mit hohen Anforderungen an eine geringe Streuung von Schichtparametern, z.B. der elektrische Widerstand, quer zur Bewegungsrichtung der Substrate ist es vorteilhaft, eine ungerade Anzahl von einzelnen Plasmatronquellen zu verwenden und diese für die Zeit  $t_i$  in der Weise ein- und wieder auszuschalten, daß erst die Plasmatronquellen mit ungeraden Nummern und dann die Plasmatronquellen mit geraden Nummern betrieben werden, wobei die Numerierung in der Reihenfolge ihrer Anordnung quer zur Bewegungsrichtung der Substrate erfolgt.

Ein anderes Verfahren, nämlich bei konstanter Einschaltzeit  $t_i$  der Plasmatronquellen die jeweilige Sputterleistung zur Korrektur um einen Betrag zu erhöhen, deren Größe von der Beschichtungsgeometrie abhängt, ist unzweckmäßig, da die Reproduzierbarkeit der Prozeßführung im reaktiven Restgas bei ständig wechselnder Sputterleistung geringer ist.

Durch die Anordnung der einzelnen Plasmatronquellen in Querrichtung zur Substratbewegung wird erreicht, daß die Plasmatroneinrichtung innerhalb der Transporteinrichtungen für die Paletten bzw. insgesamt innerhalb der Randbegrenzungen der Drehkörper untergebracht werden können. Diese geometrisch-konstruktive Randbedingung für die Anordnung der Plasmatronquellen erschwert an sich die Realisierung der verfahrenstechnischen Forderung nach hoher Schichtdicken- bzw. Parameterkonstanz quer zur Transportrichtung gegenüber bekannten technischen Lösungen.

Durch das Verfahren wird für jede Plasmatronquelle während der Beschichtung eines Teiles der Substrate die Sputterraten um ein Mehrfaches der notwendigen mittleren Rate erhöht. Aus diesem Grund wird die Targetbedeckung reduziert. Reaktive Restgasschwankungen wirken sich entsprechend geringer in unerwünschten Änderungen der Targetbedeckung und damit geringer in Rateschwankungen und letztlich Schwankungen der Schichtparameter aus. Hinsichtlich der Kondensation auf den Substraten ergeben sich infolge der um ein Mehrfaches erhöhten Kondensationsrate gegenüber der mittleren Kondensationsrate grundsätzlich andere Kondensationsbedingungen. Eine Folge der hohen Kondensationsrate ist die Änderung des Stoßzahlverhältnisses von reaktiven Restgasteilchen und kondensierenden Teilchen des Targetmaterials. Auf diese Weise lassen sich negative Auswirkungen des reaktiven Restgases drastisch reduzieren. Ein Beispiel einer mit der Reduzierung des reaktiven Restgaseinflusses verbundenen Verbesserung der Schichteigenschaften ist die Abnahme des elektrischen Widerstandes oder die Zunahme der Reflexion von Metallschichten.

Erfolgt eine reaktive Beschichtung, so wird durch die Erhöhung der Kondensationsrate während der Beschichtung eines Teiles der Substrate eine entscheidende Verbesserung der Prozeßführung erreicht, da bei der Kondensation zur Erzielung eines bestimmten Reaktionsgrades in der Schicht, z.B. eines Oxydationsgrades einer Widerstandsschicht, der Partialdruck des Reaktionsgases um den gleichen Faktor wie die momentane Kondensationsrate gesputterter Targetteilchen erhöht werden kann. Infolgedessen reduziert sich der Einfluß des reaktiven Restgases etwa um den gleichen Faktor. In die Schicht werden weniger unerwünschte Reaktionsprodukte des reaktiven Restgases relativ zu dem Reaktionsprodukt zwischen gesputtertem Metalldampfstrom und Reaktivgas eingelagert. Es werden bessere Schichteigenschaften erzielt bzw. es werden sich infolge

weitere Auswirkung beim reaktiven Sputtern mit einer gegenüber der mittleren Rate um ein Mehrfaches erhöhten Rate ist, daß der Druck des Reaktivgases höher eingestellt werden kann, was sich in einer Vereinfachung der Kontrolle für den Einlaß des Reaktivgases auswirkt.

Die gesamte Substratfläche bzw. alle Körper eines zu beschichtenden Volumens werden bei der impulsförmigen Beaufschlagung erst nach Ablauf einer großen Anzahl von Leistungsimpulsen mit einer gleichmäßigen Schicht bedeckt bzw. ein bestimmter Schichtparameter, z.B. ein bestimmter Flächenwiderstand, erzielt. Die Beaufschlagung der einzelnen Plasmatronquellen nacheinander und mit bestimmter Frequenz mit konstanten Leistungsimpulsen sichert bei gleichabständigen Plasmatronquellen (zunächst unter Vernachlässigung der Randeffekte) die gleichmäßige Beschichtung, wenn die Zahl der Leistungsimpulse je Plasmatronquelle in der Gesamtbeschichtungszeit genügend groß ist.

Da gegenüber der Beschichtung mit einer Plasmatronquelle bzw. mit mehreren Plasmatronquellen die Targetflächenbereiche nicht über die Beschichtungsbreite der Substrate bzw. Körper hinausreichen, kommt der verfahrenstechnischen Lösung zur Kompensation des Randabfalls der Kondensationsrate infolge der Begrenzung zur Anordnung der Plasmatronquellen für die Sputterrate besondere Bedeutung zu. Sie wird in besagter Weise bei konstanter Leistung der einzelnen Plasmatronquellen durch Verlängerung der Impulslängen erzielt. Da die Leistungen aller Plasmatronquellen während der Leistungsimpulse gleich sind, werden unkontrollierbare Sputterrateänderungen, wie sie sich durch Änderungen der Leistung von einer Plasmatronquelle zur anderen als Folge der Rückwirkung von reaktivem Restgas oder Reaktivgas auf die Targetbedeckung einstellen würden, vermieden.

#### Ausführungsbeispiel

In einer Drehkorb-Sputteranlage sollen axiale Schichtwiderstände in Form von Schüttgut durch statistische Beschichtung mit einer NiCr-Widerstandsschicht hergestellt werden. Die Beschichtung erfolgt in einem Drehkorb mit den Abmessungen 600 mm Durchmesser und 600 mm Länge mit einer Plasmatroneinrichtung, die im Inneren des Drehkorbes angesiedelt ist. Ihre Länge beträgt 570 mm. Die Plasmatroneinrichtung besteht aus einer linearen Anordnung von fünf einzelnen Plasmatronquellen mit einem Targetdurchmesser von 90 mm in Richtung der Drehkorbachse. Die Abstände zwischen den einzelnen Plasmatronquellen untereinander sind gleich. Die Plasmatronquellen sind an eine einzige Stromversorgungseinrichtung mit Leistungsregelung und einer Nennleistung von 5 kW angeschlossen. Die Targets bestehen aus dem Widerstandsmaterial NiCr und sind auf den Plasmatronquellen aufgelötet.

Während üblicherweise die  $n$  einzelnen Plasmatronquellen mit einer Dauerleistung und 1 kW betrieben werden, erfolgt der Betrieb erfindungsgemäß mit der Leistung  $P_i$  je Plasmatronquelle von 5 kW in der Zeit  $t_i$  und 5 s und mit einer Frequenz von

$$f = \left( \sum_{i=1}^5 t_i \right)^{-1} = \frac{1}{25s} = 0,04 \text{ s}^{-1} .$$

Die Gesamtbeschichtungszeit für eine Charge von Widerstandskörpern beträgt  $t_B = 60 \text{ min}$ . Die Einschaltzeit  $t_i = 5 \text{ s}$  beträgt damit 1,4% der Gesamtbeschichtungszeit. Um den durch die Anordnung der einzelnen Plasmatronquellen innerhalb des als Substratträger dienenden Drehkorbes bedingten Beschichtungsrateabfall an den Rändern des Drehkorbes zu kompensieren, wird die Einschaltzeit der beiden äußeren Plasmatronquellen um 1,5 sec auf 6,5 sec verlängert. Die Verlängerung von 1,5 sec ist kleiner als der 5-te Teil der Summe der Einschaltzeiten  $t_i$  der 5 Plasmatronquellen der im gewählten Beispiel 5 sec beträgt. Durch das angegebene Verfahren können Widerstände mit einer geringen Streuung des Flächenwiderstandes über die Gesamtcharge und von Charge zu Charge hergestellt werden.