

Gefilterte Bogenbeschichtung – alte Probleme und neue Lösungen

Filtred cathodic arc deposition – long standing problems, new solution

O. Zimmer, P. Siemroth, J. Berthold, H. Hilgers, W. Hentsch

Zusammenfassung

Der Vakuumbogen stellt eine einfache und effektive Plasmaquelle dar. Beschichtungen mit ihr haben sich weitgehend als Standard-Verfahren für die Herstellung von Hartstoff- und Verschleißschutzschichten auf Werkzeugen etabliert.

Nachteilig ist dabei die Emission von schmelzflüssigen Tröpfchen des Kathodenmaterials, den sog. Droplets, die unvermeidlich mit der Erzeugung des hochangeregten Plasmas verbunden ist. Deshalb wurden verschiedenste Techniken entwickelt, diesen Nachteil der Bogentechnologie zu beheben oder zumindest zu lindern. Der einzige Weg, dropletfreie Schichten abzuscheiden, besteht bis jetzt darin, diese Tröpfchen auf dem Weg des Plasmas zum Substrat herauszufiltern. Die meisten der bislang realisierten Filtertypen beruhen auf der magnetischen Ablenkung des Plasmas. Dabei wird das Plasma mittels magnetischer Felder durch Öffnungen des Filters hindurchgeleitet, während die elektrisch ungeladenen Tröpfchen von den Magnetfeldern nicht beeinflusst werden und im Filter hängen bleiben.

Während in Laboranlagen gegenüber der herkömmlichen Bogenbeschichtung ausgezeichnete Schichtqualitäten demonstriert werden konnte, scheiterte bisher eine industrielle Anwendung an den relativ hohen Plasmaverlusten im Filter. Aktuelle

Anforderungen haben dazu geführt, dass in den letzten Jahren im Fraunhofer IWS Dresden zwei neue Wege beschritten wurden, um industrietaugliche Quellen zu entwickeln.

Zum einen wurde ein Filter herkömmlicher Bauform (axial gekrümmtes Magnetfeld) mit einer neuartigen Hochratequelle, dem Hochstrombogen, kombiniert. Die gepulste Arbeitsweise dieser Quelle gestattet Bogenströme von einigen kA und überschreitet damit die Stromstärken konventioneller Gleichstrombogenquellen um ein Vielfaches. Somit können am Filterausgang relevante Raten bei bester Schichtqualität angeboten werden. Eine wichtige Anwendung dieser gefilterten Quelle besteht in der Erzeugung von Leiterbahnen in der Mikroelektronik. Nachdem die Leistungsfähigkeit der im IWS entwickelten gefilterten Pulsbogenquellen für Anwendungen in der Mikroelektronik demonstriert wurde, laufen jetzt Entwicklungsarbeiten zur Technologieentwicklung und insbesondere zur strukturkonformen Abscheidung superdünner Barrierschichten und anschließender Abscheidung der Leiterbahnen. Eine weitere Anwendung besteht in der Abscheidung von Schutzschichten auf Festplatten. Es konnte gezeigt werden, dass schon Kohlenstoffschichten von nur 1,3 nm Dicke ausreichend dicht sind, um die empfindlichen Magnet-schichten einer Festplatte gegen Korrosion

und mechanische Beschädigung zu schützen. Mit herkömmlicher Sputtertechnik benötigt man für die gleiche Schutzwirkung eine Mindestdicke von ca. 4 nm. Die weitere Steigerung der Speicherdichte erfordert aber unbedingt dünnere Schutzschichten, wie sie bisher nur mit der Technologie der gefilterten Hochstrombogenquelle erzeugt werden können.

Während für Mikroelektronik und Festplattenbeschichtung absolute Dropletfreiheit gefordert ist, gibt es viele Anwendungen, bei denen es ausreichen würde, die Dropletzahl deutlich zu reduzieren. Hier wäre es wünschenswert, über eine Filterbogenquelle zu verfügen, die mit geringem Aufwand an existierende Beschichtungsanlagen nachgerüstet werden kann. Dazu wurde im IWS das Filterkonzept des Lamellenfilters weiterentwickelt. Dabei wird das Magnetfeld nicht von platzaufwendigen Spulen sondern von kompakten Lamellen erzeugt. Die Anzahl der Droplets wird drastisch reduziert und es kann eine Plasmatransmission von ca. 20% erreicht werden. Dieser Filter kann ohne weitere Umbauten oder sonstige Anlagenmodifikation vor einem oder mehreren herkömmlichen Verdampfern eingebaut werden. Das nutzbare Beschichtungsvolumen bleibt dabei vollständig erhalten. Ein entsprechendes Filtermodul wurde am IWS aufgebaut und befindet sich im Beschichtungseinsatz.

Summary

Currently, the vacuum arc deposition (VAD) technique is well established in industry, primarily to deposit wear protective hard coatings such as metal nitrides and carbides onto tools and components.

From the beginning of the industrial development of the vacuum arc deposition, it was obvious that the emission of macroparticles or droplets is a fundamental drawback of this coating technology. The emission is caused by the highly dynamic process of plasma generation and limits the fields of application significantly. Different methods have been proposed to minimize the macroparticle flux to the substrate surface. But the only way to hinder droplets from reaching the substrate reliably is to separate the plasma from particles by using curved magnetic fields. This filtered arc technique has proven its superiority of depositing high quality films compared to conventional arc applications in numerous laboratory tests. Current demands have stimulated new developments at the Fraunhofer IWS of more compact and higher productive filtered arc sources.

One important application of ultra thin protective films is the topcoat on hard disks. In order to increase the storage density, the head-to-media spacing as well as the thickness of the overcoat has been reduced continuously. Until now, the thickness of the sputtered films was reduced to about 4 nm. The limit for this technology seems to be achieved. Filtered arc deposition is one of the most promising candidates for the deposition of thinner films – down to 1.3 nm with an even improved mechanical and chemical resistance.

Another application area is the manufacturing of metallic lines and interconnections with high aspect ratios in the deep sub-micron region in microelectronics. The excellent properties of this new filtered source for the deposition of conducting lines in microelectronics were been demonstrated. Actually, the technology for the subsequent deposition of barrier films and conducting wires is under development.

Besides the micro technologies, there are a lot of applications requiring higher quality but not (yet) such a perfect film surface. Therefore, using a quite simple filter design – the so-called Venetian blind filter – a filter unit was developed which can be used at

the common industrial vacuum arc deposition machines. The filter does not reduce the deposition area, so the standard deposition processes can be used furthermore. With this filter, the number of droplets can be reduced dramatically. A plasma transmission through the filter of approximately 20% could be measured. Such filter module was realized and is in use now.

1 Einführung – Stand der Technik

Der Vakuumbogen stellt eine einfache und effektive Plasmaquelle dar, die sich insbesondere durch einen gegenüber allen anderen PVD-Verfahren außergewöhnlich hohen Ionisierungsgrad des produzierten Plasmas auszeichnet. Diese Eigenschaft macht ihn zum idealen Instrument zur Abscheidung dichter, haftfester dünner Schichten, denn die strukturellen Eigenschaften der aufwachsenden Schicht wird im entscheidenden Maße von der Energie und dem Ionisierungsgrad der schichtbildenden Teilchen bestimmt. Aus diesem Grund hat sich die Vakuumbogenverdampfung in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr als Standard-Beschichtungsverfahren für die Herstellung von Hartstoff- und Verschleißschutzschichten auf Werkzeugen etabliert.

Neben diesen einzigartigen Vorteilen besitzt der Vakuumbogen auch eine kritische Eigenart: die Erzeugung des hochangeregten Plasmas ist unvermeidlich mit der Emission von schmelzflüssigen Tröpfchen des Kathodenmaterials, den sog. Droplets, verbunden. Die gemeinsame Quelle von Plasma und Droplets sind die mikroskopischen Ansatzpunkte der Entladung auf der Kathode, die sog. Brennflecke, in denen

sich der gesamte Bogenstrom auf einen Bereich von wenigen Mikrometer Durchmesser bündelt. Die dabei auftretenden extremen Stromdichten heizen und verdampfen das Kathodenmaterial in kürzester Zeit und wandeln es in ein vollionisiertes Plasma um. Daneben werden aus dem Schmelzkrater aber auch Tröpfchen emittiert, die, in die Schichten eingebaut, eine in vielen Fällen nicht erwünschte zusätzliche Rauheit zur Folge haben (siehe Bild 1). Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass dropletbelastete Schichten auf Grund der zahlreichen Grenzflächen zwischen dichter Schicht und Droplet nicht korrosionsschützend wirken können.

Aus diesem Grund blieben wichtige Anwendungsgebiete, wie Mikroelektronik, Optik oder Korrosionsschutz in der Vergangenheit anderen Beschichtungsverfahren vorbehalten.

Seit vielen Jahrzehnten bemüht man sich deshalb, diesen Nachteil der Bogentechnologie zu beheben oder zumindest zu lindern. So gelingt es mittlerweile, durch hohe Bogenströme oder starke Magnetfelder, die Dropletanzahl deutlich zu reduzieren sowie deren Größenverteilung positiv zu beeinflussen, ohne jedoch die Dropletmission vollständig unterdrücken zu können. Der einzige Weg, dropletfreie Schichten abzuscheiden, besteht bis jetzt darin, diese Tröpfchen auf ihrem Weg zum Substrat aus dem Plasma herauszufiltern. Dabei nutzt man, dass das vollionisierte Plasma magnetisch gelenkt werden kann, während die meist schmelzflüssigen Tröpfchen elektrisch nahezu neutral sind und auch von starken Feldern nicht beeinflusst werden. Das heute am häufigsten verwendete Filterprinzip basiert auf dem von Aksenov schon in den siebziger Jahren entwickelten „plasmaoptischen System“,

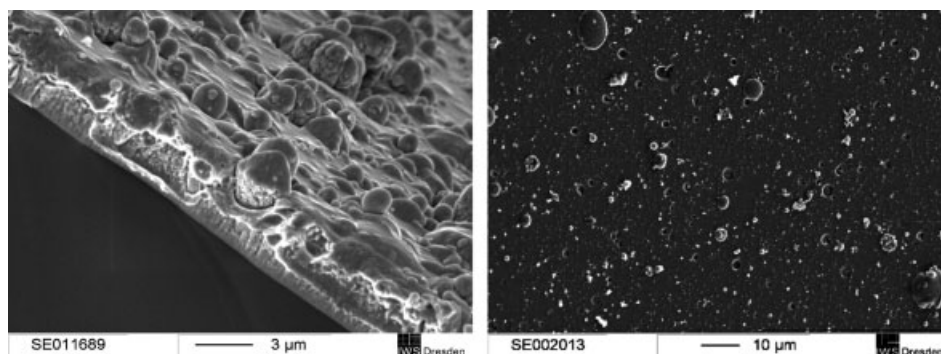


Bild 1: Oberfläche einer Titan- bzw. Titanitridschicht, abgeschieden mit dc-Bogentechnologie

dessen Prinzip in Bild 2 veranschaulicht wird [1].

Eine Plasmaquelle bestehend aus Bogenkathode und Anode ist dabei am Eingang eines gekrümmten Rohres angebracht. Das an der Kathode erzeugte Bogenplasma expandiert durch eine Öffnung in der Anode in das Rohr hinein und wird von einem magnetischen Feld durch dieses geführt. Aus dem Rohr tritt das Plasma in den eigentlichen Beschichtungsrezipienten ein und erreicht so das Substrat. Das parallel zur Rohrachse verlaufende Magnetfeld wird durch Magnetspulen erzeugt, die sich meist außerhalb des Vakuums befinden. Der von der Bogenkathode ausgehende Strom von Makropartikeln expandiert dagegen geradlinig in das Rohr hinein und trifft auf die Rohrwand, wo die Partikel sich niederschlagen. Dieser Filtertyp dominiert bis zum heutigen Tag und wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Während Laborquellen weltweit im Einsatz sind, scheiterte bisher die industrielle Anwendung an den relativ hohen Plasmaverlusten im Rohr. Selbst in den besten Versuchsanlagen erreichen nicht mehr als 20% des erzeugten Plasmas das Substrat. Daraus ergeben sich Abscheideraten, die für viele industrielle Anwendungen unwirtschaftlich sind, insbesondere weil eine solche Plasmaquelle aufwändig und kostenintensiv sowie ihre Konstruktion nicht kompatibel zu den industriell eingeführten Beschichtungsanlagen ist.

Um die aussichtsreiche gefilterte Bogenbeschichtung dennoch großtechnisch nutzbar zu machen, wurden in den letzten Jahren im Fraunhofer IWS Dresden zwei neue Wege beschritten:

Zum Einen wurde ein Filter herkömmlicher Bauform (plasmaoptisches System) mit einer neuartigen Hochratequelle, dem gepulsten Hochstrombogen (HCA- High Current Pulsed Arc) [2] ausgestattet, um am Filterausgang relevante Raten bei bester Schichtqualität anbieten zu können [3] (siehe Abschnitt 2). In einer Cluster-Tool-Anlage (siehe Bild 3), die in Zusammenarbeit mit der Firma FHR Anlagenbau Ottendorf-Okrilla entwickelt wurde, konnte die Leistungsfähigkeit dieser gefilterten HCA- (Φ -HCA) Quellen für die Abscheidung von Leiterbahnen in der Mikroelektronik demonstriert werden [4] (siehe Bild 4).

Gegenwärtig laufen Entwicklungsarbeiten zur Technologieentwicklung und insbesondere zur strukturkonformen Abscheidung superdünner Barrierschichten

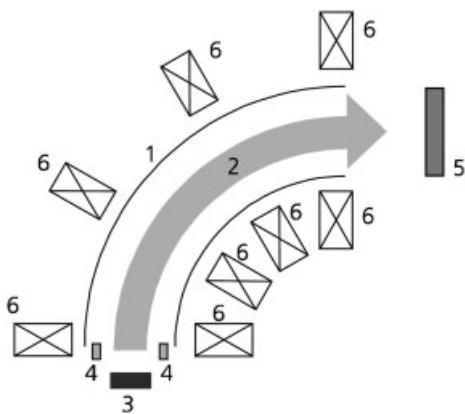


Bild 2: „plasmaoptisches System“ nach Aksenov [1], 1: Rohr, 2: Weg des Plasmas, 3: Bogenkathode, 4: Bogenanode, 5: Substrat, 6: Magnetspulen



Bild 3: Clustertool zur Beschichtung von 200-mm-Wafern

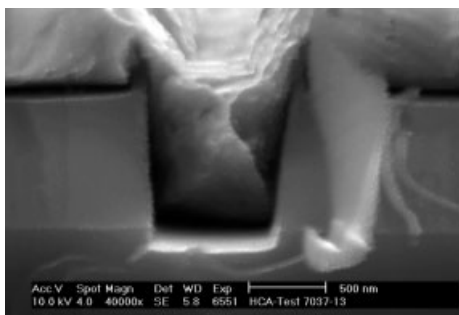


Bild 4: Füllen mikroelektronischer Grabenstrukturen: Kupferabscheidung mittels gefiltertem Hochstrombogen

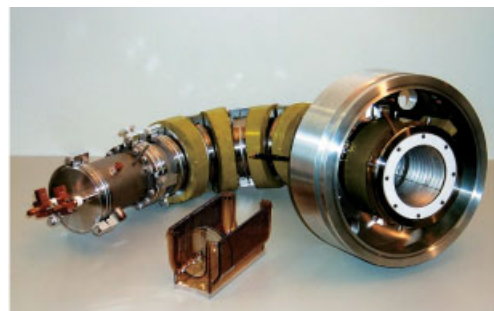


Bild 5: Filter-HCA-Modul für die Festplattenbeschichtung – Design und einsatzbereites Modul

und anschließender Abscheidung der Leiterbahnen.

Eine sehr kompakte Quelle (Bild 5) wurde in Zusammenarbeit mit der Firma IBM Deutschland für die Beschichtung von Festplatten entwickelt und technologisch optimiert [5]. Es konnte gezeigt werden, dass schon Schichten von nur 1,3 nm Dicke ausreichend dicht sind, um die empfindlichen Magnetschichten einer Festplatte gegen Korrosion und mechanische Beschädigung zu schützen. Mit herkömmlicher Sputtertechnik benötigt man für die gleiche Schutzwirkung eine Mindestdicke von ca. 4 nm. Die weitere Steigerung der Speicherdichte erfordert aber unbedingt dünnere Schutzschichten, wie sie bisher nur mittels gefilterter Bogenbeschichtung erzeugt werden können.

Während für Mikroelektronik und Festplattenbeschichtung absolute Dropletfreiheit gefordert ist, gibt es viele Anwendungen, bei denen es ausreichen würde, die Dropletzahl deutlich zu reduzieren. Hier wäre es wünschenswert, über eine Filterbogenquelle zu verfügen, die mit geringem Aufwand an existierende Beschichtungsanlagen nachgerüstet werden kann. Dazu wurde im IWS ein ganz anderer Weg beschritten. Ausgehend von einer aus einem russischen Forschungsinstitut stammenden Idee [6] wurde ein Filter entwickelt, das praktisch an jede Bogenbeschichtungsanlage nachgerüstet werden kann (siehe Abschnitt 3). Dabei wird das Magnetfeld nicht von platzaufwendigen Spulen sondern von kompakten Lamellen erzeugt. Dieser Filter kann ohne weitere Umbauten oder sonstige Anlagenmodifikation vor einem oder mehreren herkömmlichen Verdampfern eingebaut werden. Das nutzbare Beschichtungsvolumen bleibt dabei vollständig erhalten.



2 Filter-HCA für Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik

Mit der zunehmenden Integrationsdichte mikroelektronischer Schaltkreise werden die leitfähigen Verbindungen zu einer Schlüsselaufgabe. Realisiert werden diese durch die Abscheidung gut leitender Metalle (Aluminium oder Kupfer) in zuvor geätzte feinste Gräben und Kontaktierungen. Während mit herkömmlichen PVD-Techniken eine vollständige Füllung insbesondere tiefer Gräben nur mit beträchtlichem Zusatzaufwand gelingt, zeigten bereits erste Vorversuche [4], dass sie mit der Bogenverdampfung leicht erreicht werden kann.

In einer ersten Arbeitsetappe wurde der gefilterte Pulsbogenverdampfer gemeinsam mit der Fa. FHR Anlagenbau und der TU Dresden zu einer industriell einsetzbaren Beschichtungsquelle weiterentwickelt und in eine clusterfähige, für Scheibendurchmesser bis 200 mm geeignete Demonstrationsanlage integriert. Die wichtigsten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- homogene Schichtabscheidung ($\pm 5\%$) über 200 mm,
- den technischen Anforderungen entsprechend spezifischer Widerstand der abgeschiedenen Kupferschichten von $2,2 \mu\Omega\text{cm}$ (nach Tempern $2,0 \mu\Omega\text{cm}$),
- Grabenfüllung für Strukturbreiten von 400 nm und Aspektverhältnis von 2,
- hohe Gleichmäßigkeit der strukturkonformen Abscheidungen (Verhältnis der Boden- zur Wandschichtdicke unter zwei).

Damit konnte das große Potential der Vakuumbogenbeschichtung für die Mikroelektronik demonstriert werden. Die industrielle Einführung dieser Technologie erfordert noch weitergehende Entwicklungsarbeiten, um insbesondere die Dauerbetriebsfähigkeit in industriellen Prozessen gewährleisten zu können.

Ein weiterer wichtiger Prozessschritt ist die Abscheidung einer Barrierschicht vor dem Aufbringen der eigentlichen Leitbahn. Diese Barriere ist notwendig, um die Diffusion des Leitbahnmaterials in den Wafer zu verhindern. Die optimale Barrierschicht ist strukturkonform und von minimaler Dicke, um den Querschnitt der Leitbahn nicht unnötig zu verkleinern. Außerdem sollte die Schicht amorph bis nanokristallin sein, da Korngrenzen einen

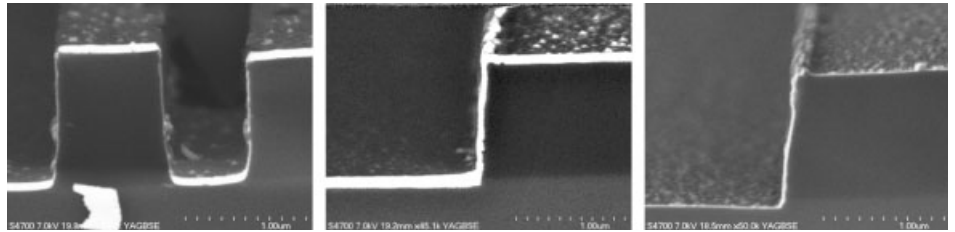


Bild 6: Rastermikroskopische Aufnahmen der Variation der Tantal-Abscheidung: Bodenbeschichtung (links), strukturkonforme Abscheidung (mitte), Seitenwandbeschichtung (rechts)

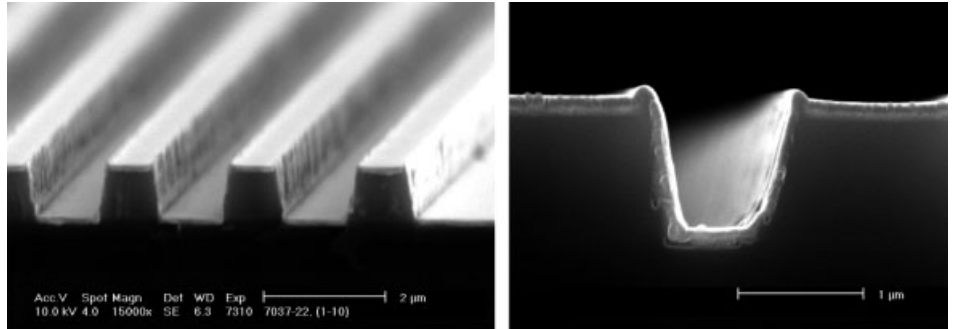


Bild 7: Rastermikroskopische Aufnahmen der Variation der Cu-Abscheidung: Bodenbeschichtung (links), strukturkonforme Abscheidung (rechts)

Diffusionskanal darstellen. Auch hierfür bietet sich der gefilterte Hochstrombogen als adäquate Quelle an, da mit ihm nanokristalline und extrem dichte Schichten abgeschieden werden.

Gegenwärtig wird das Cluster-Tool für die strukturkonformen Abscheidung von Tantal und Tantalnitrid weiterentwickelt. Die rastermikroskopischen Aufnahmen in Bild 6 belegen eindrucksvoll die Möglichkeiten des Φ -HCA. Ausgehend von einer reinen Beschichtung des Bodens über eine fast strukturkonforme Abscheidung kann bis zur fast ausschließlichen Seitenwandbedeckung variiert werden. Für Kupfer konnten vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. In Bild 7 wird die reine Bodenbedeckung und die strukturkonforme Variante demonstriert. Auch der folgende, bereits erprobte Teilschritt des Füllens der Sub-Mikrometer-Gräben (wie in Bild 4 dargestellt), kann in der Cluster-Tool-Anlage mit einer zweiten Φ -HCA-Quelle durchgeführt werden.

Filter-HCA für die Festplattenbeschichtung

Die großen Fortschritte in der modernen Datentechnik, die weltweite Vernetzung sowie die zunehmend komplexeren Informations- und Kommunikationssysteme ha-

ben einen ständig wachsenden Speicherbedarf zur Folge. Bis heute dominieren dabei magnetische Festplattenspeicher. In der Vergangenheit gelang es, die Speicherdichte alle 1,5 Jahre zu verdoppeln. Eine Voraussetzung dafür ist die ständige Verringerung des Abstandes zwischen den magnetischen Schichten und der Festplatte dem Schreib-Lese-Kopf, der gegenwärtig bei 20 bis 30 nm liegt. Um die für 2010 anvisierte Speicherdichte von 100 Gbit/in² zu erreichen, muss dieser ‚magnetische Abstand‘ auf 5-10 nm verringert werden.

Dies bedeutet, dass die Deckschicht, die die magnetische Schicht vor Verschleiß und Korrosion schützt, nicht dicker als 2-3 nm sein darf. Untersuchungen zeigten, dass die Schutzwirkung durch die gegenwärtig verwendeten magnetrongesputterten Kohlenstoffnitridfilme in diesem Schichtdickenbereich nicht mehr gewährleistet ist. Aus diesem Grund müssen neue Beschichtungstechniken gefunden werden, die die geforderten anwendungsspezifischen Eigenschaften schon bei solcher geringer Schichtdicke sicherstellen. Als aussichtsreiche Alternative wird das Verfahren der Vakuumbogenbeschichtung angesehen.

Der Vorteil des Vakuumbogens liegt in einem gegenüber den herkömmlichen Sputterverfahren grundsätzlich anderen

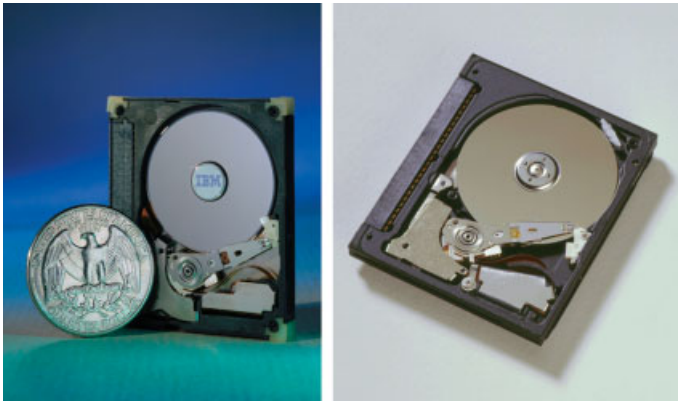


Bild 8: IBM Micro-drive, das kleinste derzeit im Handel befindliche Laufwerk, hat eine Kapazität von 1 GB, wiegt nur 16 Gramm und ist nur 42,8 x 36,4 x 5 mm³ groß. Seine Speicherdichte beträgt 15.2 Gbit/in².

Mechanismus des Schichtwachstums. Es dominiert nicht das bekannte inselartige Schichtwachstum. Die bogenerzeugten hochenergetischen Teilchen dringen vielmehr in die obersten Atomlagen ein und bilden auf diese Weise eine eng mit der Unterlage verzahnte, dichte und glatte Schicht. Laborversuche zeigten, dass mit der am IWS entwickelten gefilterten Pulsbogenquelle amorphe Kohlenstoffschichten abgeschieden werden können, die noch bei einer Dicke von 1,3 nm ausreichend dicht, hart und korrosionsstabil sind. Daneben zeigen diese Schichten auch eine extreme Glattheit, einen geringen Reibungskoeffizienten und gute chemische Beständigkeit.

Gemeinsam mit der Fa. IBM, Mainz wurde die im IWS entwickelte Versuchsquelle zu einer modularen Plasmaquelle weiterentwickelt und mit der Erprobung an industriellen Festplatten-Beschichtungsanlagen vom Typ Circulus begonnen (siehe Bild 9). Die bisherigen Ergebnisse zeigten, dass eine harte Kohlenstoffschicht von 2,0 nm in weniger als einer Sekunde auf einer Festplatte abgeschieden wird. Sie ordnet sich damit in die Taktzeit der Circulus-Anlage ein. Die Erprobung zeigte weiterhin, dass die magnetischen Eigenschaften der unterliegenden Speicherschicht nicht beeinträchtigt werden. Die Schichten sind nicht nur frei von Partikeln, sondern auch extrem glatt. Die RMS-Rauheit liegt im Bereich von 0,1 nm (siehe Bild 10). Durch die amorphe und zugleich dichte Struktur sind auch dünnste Kohlenstoffschichten korrosionsbeständig und können die magnetischen Schichten vor dem Angriff reaktiver Medien schützen. Im Vergleich zu den magnetrongesputterten Referenzschichten sind auch der Reibwert und der Verschleiß (Bild 11) deutlich geringer. Hauptaufgabe der weiteren Entwicklung wird es sein, die

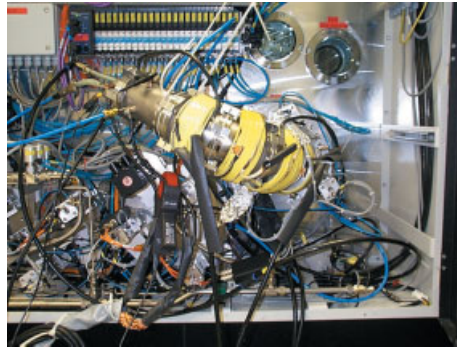


Bild 9: Filter-HCA-Modul installiert an einer Festplattenbeschichtungsanlage der Firma IBM vom Typ Circulus M12

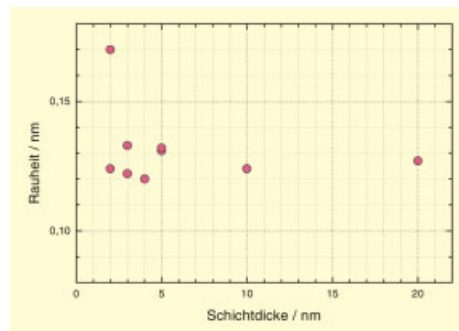


Bild 10: RMS-Rauheiten für unterschiedliche Schichtdicken

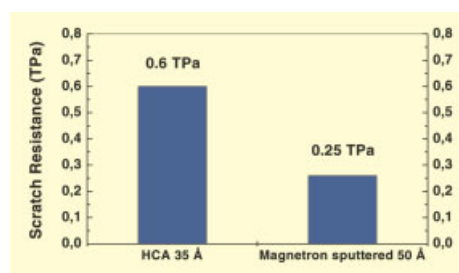


Bild 11: Kratzhärte von HCA-Schichten im Vergleich zu magnetrongesputterten Referenzschichten

Quelle für den industriellen Dauerbetrieb zu qualifizieren.

3 Lamellenfilter für die Beschichtung von Präzisionswerkzeugen

In der industriellen Praxis werden Schichten, die den Anforderungen der Mikroelektronik entsprechen, nur selten verlangt. Oft ist schon eine spiegelnd glatte Oberfläche ohne Fehlstellen völlig ausreichend. Die herkömmliche Bogentechnologie kann aber solche Qualitäten nicht liefern. Bereits Metallschichten von nur einem Mikrometer Dicke, abgeschieden mit üblicher dc-Bogentechnologie, haben eine raue, z. B. für Präzisionsumformwerkzeuge ungeeignete Oberfläche. Gerade bei derartigen Anwendungen können aber Beschichtungen sehr zur Qualitäts- und Effektivitätssteigerung beitragen.

Daraus entsteht die Forderung nach einer Filtertechnologie, mit der durch Integration in etablierte Anlagentechnik hinreichend dropletarme Schichten hergestellt werden können.

Die industriellen Anforderungen an einen Plasmafilter, können wie folgt umrissen werden: Er soll

- eine akzeptable Transmission des Plasmas ermöglichen (>15%),
- ein möglichst dropletfreies bzw. dropletarmes Plasma liefern,
- die Beschichtungsfläche der Bogenquelle nicht einengen,
- für möglichst viele Schichtmaterialien geeignet sein,
- einfach und preiswert aufgebaut sein,
- mit vorhandener Anlagentechnik kompatibel und nachrüstbar sein,
- für den industriellen Dauerbetrieb geeignet sein und
- einfache Wartung (sprich Reinigung) ermöglichen.

Derartige Filtereinheiten sind momentan nicht verfügbar. Es galt also, ein diese Anforderungen erfüllendes Filterkonzept zu entwickeln und in einem entsprechenden Filtermodul umzusetzen.

Ein Filterkonzept, das einen relativ einfachen Aufbau hat und dennoch eine gute Effektivität verspricht, ist der sogenannte Lamellenfilter [6]. Bild 12 zeigt das Prinzip.

Die Lamellen sind vor der Kathode des Bogenverdampfers angebracht, so dass der Filter wie eine Jalousie den Verdampfer gegenüber dem Substrat abschirmt. Die Stellung der Lamellen muss so gewählt

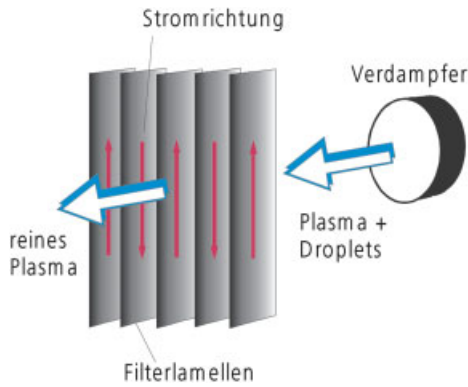


Bild 12: Magnetischer Plasmafilter (Lamellenfilter), Prinzipskizze

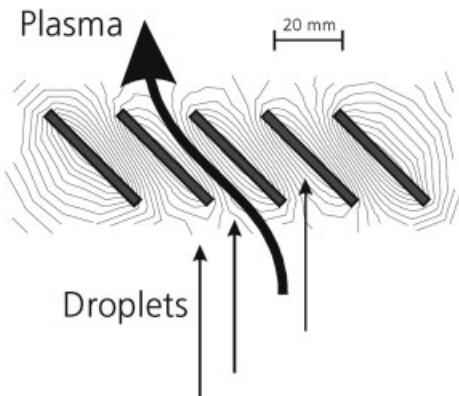


Bild 13: Schnitt durch die Lamellenebene des Filters. Die Simulation zeigt, dass in den Bereichen zwischen den Lamellen die Magnetfeldlinien nahezu parallel zu den Lamellen verlaufen. Mit dem dickeren Pfeil ist der Weg des Plasmas angedeutet, das durch das Magnetfeld abgelenkt wird. Die Droplets bewegen sich nahezu geradlinig und lagern sich auf den Lamellen ab.



Bild 14: Filtermodul für industrielle Vakuumbogen-Beschichtungsanlagen. Der Filter kann an verschiedene Typen von Bogenverdampfern angepasst werden.

werden, dass keine Sichtlinie zwischen Verdampferkathode und Substrat existiert, die Jalousie also optisch dicht ist. So werden die von der Kathode emittierten Droplets vom Filter aufgefangen und bleiben an

Bild 15: Kupferschicht, abgeschieden mit dc-Bogenverdampfung ohne bzw. mit Plasmafilterung (Schichtdicke 50 nm)

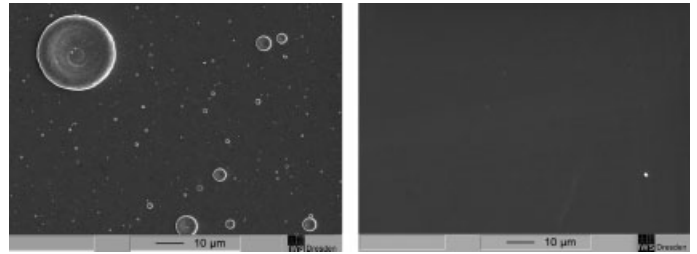


Bild 16: PtAu5-Schicht, abgeschieden mit dc-Bogenverdampfung ohne bzw. mit Plasmafilterung (Schichtdicke 50 nm)

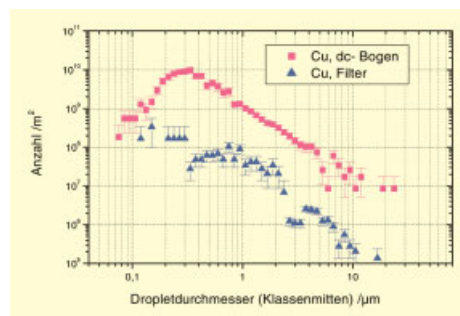
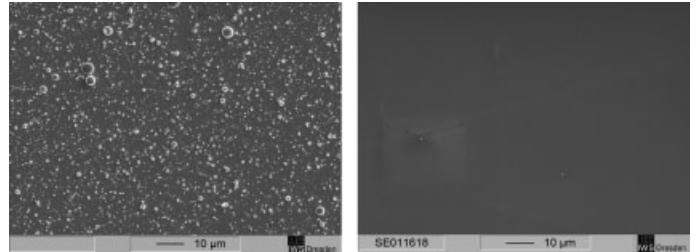


Bild 17: Dropletanzahl- und Größenverteilung auf Kupferschichten, abgeschieden mit und ohne Plasmafilter

ihm haften. Werden die Lamellen vom Strom durchflossen (siehe Bild 12) baut sich zwischen den Lamellen, parallel zur Lamellenoberfläche und rechtwinklig zur Stromrichtung ein magnetisches Feld auf, dessen Feldstärke proportional zur Stromstärke in den Lamellen ist. Bei dieser Konfiguration reichen bereits Magnetfelder von wenigen mT aus, das Bogenplasma derart zu führen, dass es durch die Zwischenräume der Lamellen hindurchtreten und zur Beschichtung genutzt werden kann.

Die Form des magnetischen Feldes zwischen den Lamellen ist abhängig von der Lamellengeometrie. Bild 13 zeigt eine qualitative Simulation des Magnetfeldes, wie es entsteht, wenn jeweils benachbarte Lamellen mit entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen werden.

Auf der Grundlage dieses Wirkprinzips wurde ein Lamellen-Filtermodul entwickelt, optimiert und erprobt, das an industrielle Bogenbeschichtungsanlagen nachgerüstet werden kann [7].

Bild 14 zeigt ein Filtermodul für eine industrielle Vakuumbogen-Beschichtungsanlage. Mit diesem Filter konnte eine erhebliche Reduzierung der Dropletbelastung der Schichten erreicht werden. Die Bilder 15 und 16 zeigen Kupfer- und PtAu5-Schichten, die mit bzw. ohne Plasmafilter hergestellt wurden. Quantitative Auswertungen von Dropletanzahl- und Größenverteilungen dieser Schichten (siehe Bild 17) zeigten eine Reduktion auf etwa 1 bis 2%, wobei Droplets mit großen Durchmessern sogar bevorzugt herausgefiltert werden.

Mit dieser Filteranordnung konnte eine Plasmatransmission von ca. 20% erreicht werden. Dies ist im Vergleich zur Transmission, die mit anderen Filterkonzepten erreicht werden, ein akzeptabler Wert.

Mit dem vorgestellten Filter konnten ausgezeichnete Ergebnisse für Metallisierungen erreicht werden. Momentan wird an der Realisierung von Prozessen zur reaktiven Schichtabscheidung auf der Basis dieses Filterkonzeptes gearbeitet. Damit wird in Zukunft auch die Herstellung dropletarmer Hartstoffschichten möglich sein. Damit ergeben sich neue Perspektiven beispielsweise bei der Beschichtung hochpräziser Umformwerkzeuge.

4 Ausblick

Obwohl seit mehr als drei Jahrzehnten weltweit intensiv an der Weiterentwicklung der gefilterten Bogenbeschichtung gearbeitet wurde, blieb sie weitgehend auf Laboranlagen beschränkt. Die neuen Quellenentwicklungen machen diese Technik jetzt für den industriellen Einsatz

tauglich. Es sind sowohl einfache, leicht in vorhandene Anlagen integrierbare Filter mit relativ guter Plasmatransmission und sub-Mikrometer-Rauheiten der Schichten verfügbar, als auch Quellen für Schichten, die höchsten Ansprüchen genügen müssen. Für verschiedene Einsatzfälle wurden bereits geeignete Technologien entwickelt, womit jedoch das Potential dieser neuen Beschichtungstechnik noch bei weitem nicht ausgeschöpft ist. Insbesondere im Bereich der Mikrosystemtechnik gibt es neben der Festplatte noch sehr viele sinnvolle Einsatzfelder, desgleichen überall dort, wo Werkzeuge und Bauteile gefordert sind, die mit der herkömmliche Bogen-technologie nicht in ausreichender Qualität beschichtet werden können.

Literatur

- [1] Aksenov, I.I., Belous, V.A., Padalka, V.G., Khoshikh, V.M. „*Transportirovka plazmenykh potokov v kryvolinejnoj plasmooptičeskoj sisteme*“ *Fiz. Plazmy*, 4, 1978, 6, Seite 758-763
- [2] B. Schultrich, P. Siemroth, H.-J. Scheibe, „*Aktiviert Hochratebeschichtung*“, *Metall-oberfläche* 51, Band 12, (1997), 936-941
- [3] T. Witke, T. Schülke, B. Schultrich, P. Siemroth, J. Vetter, „*Comparison of Filtered High-current Pulsed Arc Deposition (Φ -HCA) with Conventional Vacuum Arc Methods*“, *Surface and Coatings Technology* 126 (2000), p. 81 - 88
- [4] P. Siemroth, T. Schülke, „*Copper Metallization in Microelectronics Using Filtered Vacuum Arc Deposition - Principles and Technological Development*“, *Surface and Coatings Technology*, Bd. 133-134 (2000), Heft 1-3, S. 106-113
- [5] M. Neuhäuser, H. Hilgers, T. Witke, P. Siemroth, „*Superbarter Kohlenstoff abgeschieden mit gepulstem Hochstrombogen als Nanoschutzschicht für Magnetspeicherplatten*“, *Vakuum in Forschung und Praxis*, Bd. 13 (2001), Heft 4, S. 215 - 220
- [6] Ryabchikov, A.I., Stepanov, I.B. „*Investigation of forming metal-plasma flows filtered from microparticle fraction in vacuum arc evaporators*“, *Rev. Sci. Instr.*, 69, Nr.2, 1998, Seite 810- 812
- [7] Zimmer, O. „*Elektrische und magnetische Steuerung der Vakuumbogenbeschichtung*“, Dissertation, Ruhr- Universität Bochum 2002

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (**bmb+f**) und dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Arbeit (SMWA) für die finanzielle Unterstützung (Förder-Nr.: 13N7758 - bmb+f und 4949/756 - SMWA)

Autoren

Dr. *Otmar Zimmer*, geb. 1967, studierte Elektrotechnik an der TU Dresden. Er promovierte 2002 über Probleme der Steuerung von Vakuumbogen- Beschichtungsprozessen. Gegenwärtig arbeitet er als Gruppenleiter der Arbeitsgruppe PVD-Beschichtung im Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden (IWS).

Dr. *Peter Siemroth*, geb. 1948, studierte Physik an der Lomonossow-Universität in Moskau und promovierte 1983 über die Kathodenerosion durch Hochstromvakuumbögen am Zentralinstitut für Elektronenphysik der AdW der DDR. Gegenwärtig arbeitet er als Gruppenleiter im Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden (IWS) an Problemen der angewandten Bogentechnologie.

Dipl.-Phys. *Jan Berthold*, geb. 1969, studierte Physik an der Technischen Universität Dresden. Gegenwärtig arbeitet er als Projektleiter im

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden (IWS) an der Entwicklung von Vakuumbogen-Plasmaquellen für die Mikroelektronik.

Dr. *Heinz Hilgers*, geb. 1954, studierte Chemie an der rheinisch-westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH-Aachen). Er promovierte auf dem Gebiet der makromolekularen Chemie über Supercritical Fluid Chromatografie (SFC) und die Synthese von Oligomeren. Seit 1985 ist er im Labor der IBM Deutschland Speichersysteme GmbH beschäftigt und dort verantwortlich für Zukunftstechnologien sowie für die Initiierung und Federführung von multilateralen Forschungs- und Entwicklungsprojekten und ist Mitglied des Technical Expert Council (TEC). Er erfüllt einen Lehrauftrag für Polymeranalytik an der Berufsakademie in Baden-Württemberg, ist Mitglied des Koordinierungsausschusses des Arbeitskreises Plasma und zweiter Vorsitzender des Fachausschusses „Plasma & Polymere“. Weiterhin ist er Mitglied im Strategiebeirat des „Nanotechnologie-Kompetenzzentrums für ultradünne Schichten“ und arbeitet im Kuratorium für mehrere Fraunhofer-Institute. Er ist Gutachter und strategischer Berater des Bundesforschungsministeriums im Bereich Materialforschung.

Dipl.-Phys. *Wolfgang Hentsch*, geb. 1953, studierte Physik an der Technischen Universität Dresden und arbeitete auf dem Gebiet der UHV Technik und Oberflächenanalytik. In einer 10-jährigen Tätigkeit bei der Firma ELEKTROMAT Dresden arbeitete er schwerpunktmäßig auf dem Gebiet von Vakuum-Prozesssteuersystemen und der Entwicklung von In-Line-Sputteranlagen. Seit 1991 ist er Geschäftsführer und Mitgesellschafter der Firma FHR Anlagenbau in Ottendorf-Okrilla bei Dresden und verantwortlich für die Entwicklung und Fertigung von Vakuumbeschichtungssystemen.