

Mikrotechnik, Monitore und Motoren

Excimerlaser als Innovationstreiber in der Industrie

Ralph Delmdahl

Moderne Excimerlaser zeichnen sich durch hohes Innovationspotenzial und wirtschaftlichen Einsatz in den unterschiedlichsten industriellen Anwendungsfeldern aus. Automatisierte Fertigungsanlagen mit gepulsten Excimerlasern im Leistungsbereich von einigen Watt bis einigen hundert Watt haben sich in zahlreichen Industriezweigen etabliert und sind aus der Chipherstellung, dem Flugzeugbau und der Nachrichtentechnik nicht mehr wegzudenken.

Excimerlaser sind gepulste Gaslaser, welche die kürzesten kommerziell erhältlichen Wellenlängen für die industrielle Materialbearbeitung zur Verfügung stellen – je nach Füllgas bei 157, 193, 248, 308 oder 351 nm [1]. Kurzwelliges, ultraviolettes bis tiefultraviolettes Licht eignet sich in einzigartiger Weise für die Mikrobearbeitung von Polymer- und Verbundwerkstoffen, Keramiken und Metallen. Die extrem hohe Photonenenergie des Excimerlasers bei 157 nm erlaubt es zudem, optisch transparente Substrate, wie Quarz und Gläser, hochpräzise zu bearbeiten. Diese sind aufgrund ihrer optischen, elektrischen, thermischen und chemischen Eigenschaften besonders interessant als mikrooptische oder dielektrische Komponenten für die Mikrotechnik oder als Mikroreaktoren für die biochemische Analyse.

Damit stehen mit dem Excimerlaser für nahezu alle Materialien einschließlich biologischer Gewebe [2] geeignete Wellenlängen für diverse Bearbeitungszwecke zur Verfügung. Hierbei kann es sich um Oberflächenmodifikationen handeln, wie zum Beispiel bei der permanenten Beschriftung von Kabelisolationen und elektronischen Bauelementen oder um gezielte Veränderungen der Materialstruktur, wie etwa beim Einschreiben periodischer Brechungsindexänderungen in Glasfasern für Telekommunikation und Sensorik.

Die Auflösung eines optischen Systems zur Lasermaterialbearbeitung ist letztlich durch die Wellen-

länge des verwendeten Laserlichts begrenzt. Deshalb lassen sich mit kurzwelligen Excimerlasern Strukturgrößen erreichen, die mit CO₂- und Festkörper-Lasersystemen, welche im Infraroten bzw. sichtbaren Spektralbereich emittieren, nicht zugänglich sind. Im Gegensatz zu solchen langwelligen, thermisch wirkenden Lasern bewirken die sehr hohen Photonenenergien der kurzwelligen Excimerlaser von 3,6 bis 7,9 eV ein explosionsartiges Verdampfen des zu ablatierenden Materials – ohne dass sich qualitätsmindernde Schmelzzonen und Mikrorisse im Bearbeitungsbereich bilden. Man spricht bei der Ablation mit dem Excimerlaser deshalb auch von kalter Ablation. Unterstützt wird dieser Prozess durch die kurze Pulsdauer der Excimerlaser, welche zwischen 5 und 30 ns liegt und bei der Bearbeitung Pulsspitzenleistungen von bis zu 50 MW ermöglicht. Robuste und leistungsfähige Excimerlasersysteme für höchste industrielle Anforderungen sind derzeit bei mittleren Leistungen von bis zu 300 W und Repetitionsraten von bis zu 4 kHz rund um die Uhr im Produktionseinsatz.

Zur Materialbearbeitung mit dem Excimerlaser, dessen Strahlquerschnitt typischerweise einem Rechteck von 5–10 mm × 10–30 mm Kantlänge entspricht, kommen in erster Linie Maskenverfahren zum Einsatz. Diese ermöglichen es im Unterschied zu direkt schreibenden Verfahren, das Material parallel zu bearbeiten. In vielen Fällen geht es darum, diverse geometrische Strukturen (Bohrbilder, Schriftzüge etc.) zu erzeugen. Dazu wird eine Maske, die die abzubildende Struktur vergrößert enthält, beleuchtet und mit einem Objektiv in verkleinerter Form auf das Werkstück abgebildet. Indem man den Excimerlaserstrahl, der die Maske passiert, auf eine weitaus kleinere Fläche abbildet, erhält man eine wesentlich höhere Energiedichte auf dem Werkstück. Auch harte und transparente Materialien, wie Quarz und Glas, können so mit hoher Ablationsrate schnell bearbeitet werden. Um eine



Abb. 1: Die Energieverteilung eines homogenisierten Excimer-Lasers zeigt eindrucksvoll, wie scharf sich das Strahlprofil begrenzen lässt – hier auf eine Fläche von 10 mm × 50 mm –. (Quelle: MicroLas Lasersystem GmbH)

homogene Energieverteilung über den Strahlquerschnitt zu erhalten und dessen Form den speziellen Erfordernissen (Bearbeitungsfläche, Energiedichte auf dem Werkstück) anzupassen, enthält die Beleuchtungsoptik Homogenisierungs- und Strahlformungskomponenten. Damit lassen sich räumlich scharf begrenzte, je nach zu bearbeitender Fläche quadratische bis linienförmige Strahlprofile mit äußerst homogener Energieverteilung erzeugen (Abb. 1).

Moderne Maskenabbildungssysteme für die Excimerlaserbearbeitung erreichen Strukturgrößen im Mikrometer- und sogar Submikrometerbereich mit hervorragender Fertigungsqualität. High-End-Bearbeitungssysteme für die Computerchip-Produktion mittels optischer Mikrolithographie auf Basis von kurzwelligen Excimerlasern der Wellenlänge 157 nm erreichen derzeit minimale Strukturgrößen von bis zu 90 nm und bieten mit fortschreitender Entwicklung das Potenzial für Strukturgrößen von bis zu 45 nm. Durch die Einführung noch kurzwelliger, extrem-ultravioletter Strahlungsquellen (EUV) der Wellenlänge 13,5 nm werden in Zukunft noch deutlich kleinere Strukturgrößen erreichbar sein.

Präzise Strukturierung

Eine der ersten industriellen, Excimerlaser-gestützten Produktionslinien wurde bereits Ende der 80er Jahre von Siemens zur Fertigung von Mehrlagenleiterplatten einge-

Dr. Ralph Delmdahl,
Lambda Physik AG,
Hans-Böckler-Str.
12, 37079 Göttingen

richtet. Leiterplatten bestehen aus mehreren Kupferschichten, die durch dielektrische Polyimidschichten einer Dicke von 10 bis 50 μm voneinander isoliert sind. Für leitende Verbindungen werden Löcher mit 10 μm Durchmesser durch selektive Ablation der Polyimidschicht bei einer Wellenlänge von 248 nm und einer Energiedichte von 0,7 J/cm² exakt gebohrt. Die Tiefenauflösung beträgt ca. 0,3 μm .

Die hohe Kantenqualität, die heute mit dem Excimerlaser in wirtschaftlicher Weise und ohne Nach-

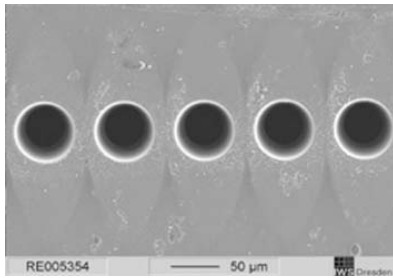


Abb. 2: Durch Maskenabbildung bei 248 nm lassen sich perforierte Polyimid-Folie für Tintenstrahl-druckköpfe auf Bruchteile von μm genau herstellen. (Quelle: Fraunhofer Institut für Werkstofforschung)

bearbeitungsschritte erreichbar ist, hat dazu geführt, dass solchen Produktionssystemen vor dem Hintergrund steigender Packungsdichte und sinkender Abmessungen heute mehr denn je im Fertigungsprozess mikroelektronischer Bauelemente eine Schlüsselrolle zukommt.

Für die Prozessökonomie von entscheidender Bedeutung ist dabei der Geschwindigkeitsvorteil durch das parallele Bearbeiten einer Fläche mittels Maskentechnologie. So lässt sich Kaptonfolie für Tintenstrahldüsen gleichzeitig mit mehreren hundert Löchern bei einer Wellenlänge von 248 nm (Durchmesser von $20 \pm 0,25 \mu\text{m}$) perforieren (Abb. 2).

Kommerzielle Systeme zur Markierung von Flugzeugkabeln, deren Isolierungen aus pigmentierten Polymeren bestehen, arbeiten ebenfalls mit Excimerlasern bei einer Wellenlänge von 248 nm. Kabeldurchlaufzeiten einer Größenordnung von mehreren 100 m/s und die daraus resultierende Wirtschaftlichkeit dieser Technologie werden dadurch ermöglicht, dass ein einziger Laserpuls zum Anbringen einer vollständigen Codierung pro Längenintervall über eine Maske ausreichend ist. Die nicht-thermische und daher materialschonende sowie langzeitstabile UV-Markierung ist

bei Flugzeugkabeln aus sicherheitstechnischen Gründen derzeit als einziges Verfahren zugelassen.

Ein weiteres industrielles Verfahren auf Basis von Excimerlasern der Wellenlänge 308 nm ist das präzise Absolieren von feinsten Drähten (Abb. 3), sowie der selektive Abtrag von Isolationsmaterialien an Kontakt- und Verbindungsstellen für die Mikrosensorik. Aufgrund seiner unübertroffenen Ablationscharakteristik und Auflösung hat sich der kurzwellige Excimerlaser in der industriellen Fein- und Mikrobe-

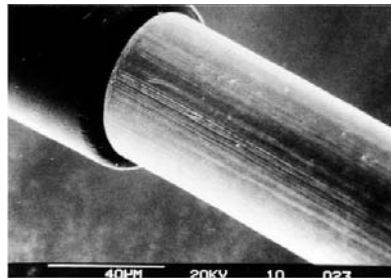


Abb. 3: Mit Hilfe eines Excimerlasers (Wellenlänge 308 nm) lässt sich ein Kupferlackdraht exakt absolieren. (Quelle: IBM)

arbeitung gegen den ursprünglich verwendeten, thermisch wirkenden CO₂-Laser durchgesetzt [3].

Die erreichbare laterale Auflösung bzw. Strukturbreite Δx bei der Erzeugung ultrafeiner Strukturen ergibt sich aus der Formel

$$\Delta x = k \times \lambda / NA$$

Sie ist also durch den k -Faktor und die Numerische Apertur NA des mikrolithografischen Produktionssystems, die es mit fortschreitender Prozessentwicklung zu optimieren gilt, und durch die Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle bestimmt. Dem unaufhaltsam wachsenden Trend zur Miniaturisierung folgt demgemäß der Ruf nach immer kürzeren Wellenlängen. Am deutlichsten wird dies bei der Excimerlaser gestützten, optisch-mikrolithografischen Chip-Produktion, die sich derzeit im Übergang von 248 nm zu 193 nm befindet, während bereits die Entwicklungen für den Einsatz von Excimerlasern bei ihrer kürzest möglichen Wellenlänge von 157 nm auf Hochtouren laufen. Damit werden minimale Strukturgrößen von bis zu 45 nm erreichbar sein. Als aussichtsreichster Nachfolger für Produktionssysteme bei 157 nm gilt die Mikrolithographie bei einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUVL),

die Strukturgrößen von 32 nm und darunter realisieren wird. In der Entwicklung von EUV-Strahlquellen und -systemen für den Einsatz in der Chipindustrie sind europäische Firmen wie XTREME technologies, Philips Extreme UV sowie AIXUV führend beteiligt [4].

Außerhalb des Halbleitermarktes gewinnt die kürzest mögliche Excimerlaserwellenlänge von 157 nm besonders im expandierenden Anwendungsfeld der Life Sciences an Bedeutung. Der Vorteil besteht dabei in der ausnahmslos hohen Photonenenergie von 7,9 eV [5]. Im Fall von hochtransparenten, selbst im UV-Spektralbereich nicht oder nur sehr gering absorbierenden Materialien, wie Polymere, Gläser und hochreiner Quarz, die für „lab-on-chip“-Technologien, chemisch inerte Mikroreaktoren und Anwendungen der Mikrooptik benötigt werden, ist die Absorption selbst der kurzwelligen Excimerlaserstrahlung von 193 nm häufig noch zu gering. So erfordert das Bearbeiten harter, transparenter Materialien wie Glas und Quarz bei einer Wellenlänge von 193 nm im Vergleich zur Bearbeitung bei 157 nm eine um eine Größenordnung höhere Energiedichte auf dem Werkstück und führt dadurch zu unkontrollierter Ablation und häufig sogar zu so genannten Muschelausbrüchen [6]. Die effiziente Bearbeitung innovativer, hochtransparenter Materialien mit einer Tiefenauflösung und einer lateralen Auflösung bis in den Submikrometerbereich lässt sich dagegen mit kommerziell erhältlichen, 157 nm-Lasermikrobearbeitungssystemen bewerkstelligen [7].

Der Bedarf nach immer kleineren und schnelleren Mikrosystemen für Synthese und Analyse Zwecke hat seine Ursache unter anderem in steigendem Kostendruck und erhöhten Umweltauflagen für die Pharmaindustrie. So lassen sich mit mikrostrukturierten „lab-on-chip“-Systemen im Kreditkartenformat durch automatisierte Parallelanalyse-Techniken sowohl hoher Durchsatz als auch äußerst kleine Substanzmengen im Nano- und Pikoliterbereich für das so genannte High-Throughput Screening (HTS) in der Wirkstoffforschung verwirklichen [8].

Die Qualität und Zuverlässigkeit solcher inerter, auf Glas und Polymeren basierten Mikrosysteme zur Erfüllung mikrofluidischer oder mikrooptischer Funktionen ist ganz

wesentlich durch die Toleranzen bei der Herstellung darin enthaltener Volumina und Kanäle bestimmt. Das Maskenbasierte oder auch direkt schreibende Prototyping zwei- und dreidimensionaler „zero-defect“-Master für die industrielle Massenproduktion von Biochips mittels Abformungstechniken gelingt bei einer Wellenlänge von 157 nm mit der erforderlichen Präzision und ohne zusätzliche Nachbearbeitungsschritte sowohl für Quarz als auch für Kunststoffe (Abb. 4).

Im insgesamt stark wachsenden Markt für mikrosystemtechnische Produkte, ist Deutschland, das innerhalb Europas in einer Spitzenposition gesehen wird, führend im Bereich der Kraftfahrzeugsensorik sowie auf dem Gebiet der medizintechnischen Anwendungen.

Japan hat seine Stärken vor allem in der Mikrorobotik und bei Mikrosystemen für die Konsum- und Unterhaltungsbranche, während die USA ihren Wettbewerbern wesentlich auf den Teilmärkten Bio- und Gentechnik sowie bei mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) voraus sind. Gemäß einer vom europäischen Netzwerk für Mikrosystemtechnik NEXUS durchgeführten Marktstudie beträgt das aktuelle Marktvolumen für das gesamte Anwendungsfeld der Mikrosystemtechnik etwa 35 Milliarden US-Dollar. Bis zum Jahr 2005 soll es auf über 60 Milliarden US-Dollar zunehmen.

Scharfer Strahl für flache Displays

Hochleistungsexcimerlaser einer Wellenlänge von 308 nm spielen derzeit die dominierende Rolle bei der Herstellung schneller und leistungsfähiger Flüssigkristall-Flachbildschirme (LCD-Displays).

Zu Beginn der Flachbildschirm-Ära wurde vor allem bei großen Bildschirmen, beispielsweise bei PCs, Laptops oder Fernsehern, besonderer Wert auf hohe Leistung gelegt. Bildschirme mit kleineren Abmessungen, beispielsweise für Palmtops und Mobiltelefone, waren solche mit geringer oder mittlerer Leistung, d. h. in der Regel monochrom, mit geringer Auflösung und geringen Bildwiederholraten. Heutzutage wird auch von kleineren Displays zunehmende Leistung verlangt. Deshalb setzt sich die Aktiv-Matrix- oder Dünnschichttransistor-Technologie (TFT) auch im Be-

reich kleiner Bildschirmmanwendungen immer mehr gegenüber anderen Flachbildschirm-Technologien durch. Hierbei wird die Orientierung der Flüssigkristalle und damit die Lichtdurchlässigkeit jedes individuellen Pixels durch eine Matrix von Dünnschichttransistoren kontrolliert.

Zur Herstellung der Transistor-schicht wird dabei zunächst eine Schicht amorphen Siliziums (a-Si) aus der Gasphase auf ein Glassubstrat abgeschieden. Anschließend wird das a-Si mit gepulstem (20–30 ns) Excimerlaserlicht der Wellenlänge 308 nm bei niedrigen Temperaturen zu polykristallinem Silizium (poly-Si) rekristallisiert, das die für

emittierender organischer Polymere (OLEDs) geeignet.

Excimerlaser-Annealing mit Linienstrahloptiken

Die industrielle Herstellung reproduzierbarer Polysiliziumschichten für TFT-Bildschirme erfordert das sichere Beherrschen aller Parameter beim Annealing-Prozess, d. h. exzellente Energiestabilität sowie hochpräzise, optische Strahlführung, um optimale Kristallqualität zu erhalten. Die hohen, industriellen Anforderungen an die derzeit im Produktionseinsatz befindlichen so genannten Linienstrahlssysteme erfüllen in einzigartiger Weise Hochleistungs-Excimer-

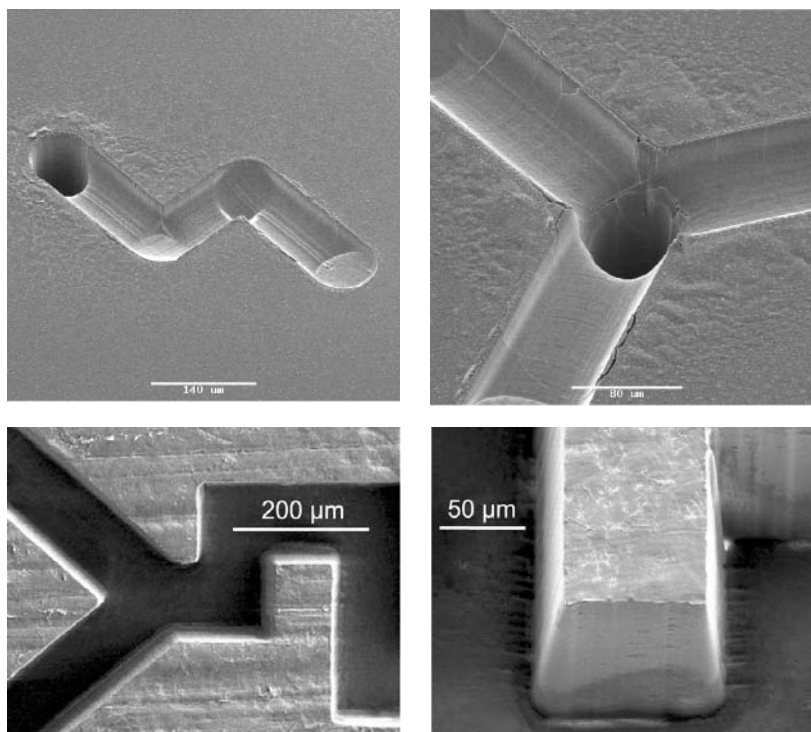


Abb. 4: Bei der mikrofluidischen Strukturierung haben sich Excimerlaser durch ihre enorme Präzision bewährt. Die Bilder zeigen Strukturen in Quarz (oben) durch Direktschreiben bei einer Wellenlänge von 157 nm und Mikroreaktorstrukturen

in Teflon, die durch Maskenabbildung ebenfalls bei einer Wellenlänge von 157 nm erzeugt wurden (unten). (Quelle: Laserzentrum Hannover / Fraunhofer Institut für Lasertechnik)

die Transistorarchitektur geforderte Elektronenbeweglichkeit aufweist. Das kalte Licht des Excimerlasers schmilzt dabei die einige 10 nm dicke Lage amorphen Siliziums auf, ohne das darunter liegende Substrat thermisch zu schädigen. Daher können preisgünstige Glassubstrate zur kosteneffizienten Produktion verwendet werden.

Wegen der niedrigen Prozesstemperaturen ist das Niedrigtemperatur-Excimerlaser-Annealing auch für derzeit aufkommende Displaytechnologien auf Basis licht-

laser der Lambda Physik AG, deren Rohstrahl mittels Homogenisierungs- und Abbildungsoptiken der Firma MicroLas Lasersystem GmbH in eine räumlich homogene Linie der Abmessungen 370 mm × 0,4 mm geformt wird. Die hohe, mittlere Leistung des Excimerlasers von 300 W bei einer stabilisierten Pulsenergie von 1 J und einer Puls-wiederholfrequenz von 300 Hz ermöglicht sowohl eine ausreichende Energiedichte von etwa 300 mJ/cm² als auch eine ausreichende Vorschubgeschwindigkeit zur technolo-

gisch und ökonomisch effizienten Niedrigtemperatur-Rekristallisation des amorphen Siliziums. Bei dieser Linienstrahltechnik wird der Kristallisationsprozess durch tiefliegendes, nicht geschmolzenes amorphes Silizium in der Nähe der Substrat-

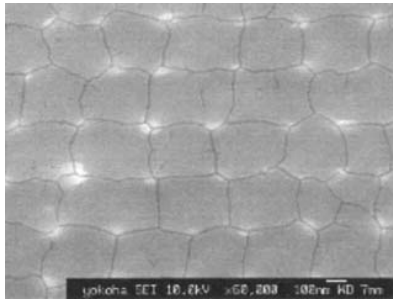


Abb. 5: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer mit der Linienstrahltechnik kristallisierten Polysiliziumschicht (Quelle: The Japan Steel Works LTD)

Excimerlaser-Annealing mittels Maskenabbildung

Beim Linienstrahl basierten Excimerlaser-Annealing ist die Korngröße durch das kontrollierte Schmelzen der Oberfläche des belichteten Substrats begrenzt. Das Kristallwachstum beginnt an der Phasengrenze der fest bleibenden unteren Siliziumschicht und der oberen, durch den Excimerlaser geschmolzenen Siliziumschicht. Dies führt zu vielerorts spontan induziertem, schwer zu steuerndem Kristallwachstum, das die Korngröße und damit die Feldeffektbeweglichkeit auf etwa $150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ limitiert. Polykristalline Silizium-

der amorphen Siliziumschicht mit einem Muster paralleler Linien beleuchtet. Der Abstand zwischen den einzelnen Linien entspricht dabei der Breite einer Linie. Entscheidend ist, dass beim SLS die amorphe Siliziumschicht beim Belichten bis zum Substrat hin vollständig aufgeschmolzen wird. Dadurch findet die Kristallisation jeweils nur in kontrollierter Weise von den beiden seitlichen Phasengrenzen entlang einer Linie in Richtung zu ihrem Inneren statt (Abb. 7).

In einem zweiten Schritt werden anschließend durch Verfahren des Substrathalters um eine Linienbreite und erneute Belichtung die Zwischenräume und in einem Step & Repeat-Prozess schließlich die gesamte a-Si-Fläche kristallisiert. Die Kristallisation beginnt dabei kontrolliert ausschließlich an der seitlichen Phasengrenze des festen und des geschmolzenen Siliziums. Ein im Inneren der geschmolzenen Phase räumlich spontan ausgelöster Kristallisationsprozess, wie beim Linienstrahl-Annealing, wird so vermieden. Ebenso reduziert sich die Beeinträchtigung der elektronischen Leistungscharakteristik durch die Kristallbegrenzungen.

Die mittlere Kristallgröße ist beim SLS somit deutlich größer, so dass Kristallbegrenzungen die elektronische Leistungsfähigkeit weniger beeinträchtigen. Somit entsteht eine Polysiliziumschicht mit wesentlich höherer Feldeffektbeweglichkeit von bis zu $460 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [9].

Damit sind die Voraussetzungen für eine weitere Leistungssteigerung von TFT-Bildschirmen sowie die Integration von CMOS-Komponenten in naher Zukunft erfüllt.

Ein im Hinblick auf die Prozessökonomie entscheidender Vorteil des SLS gegenüber dem Linienstrahl-Excimerlaser-Annealing besteht in der äußerst variablen Step & Repeat-Prozessführung des SLS, die bei gleich bleibendem Beleuchtungsfeld bzw. gleich bleibender Laserenergiedichte prinzipiell das Kristallisieren beliebig großer Substratabmessungen durch einfaches Verfahren des Substratisches ermöglicht.



Abb. 6: Industrielle Excimerlaser-Annealing-Anlage mit Laser, Strahlführung und Werkstückkontrolle (Quelle: The Japan Steel Works LTD)

schicht spontan induziert. Das Resultat ist eine Polysiliziumschicht einer Korngröße von ca. $0,5 \mu\text{m}$ mit einer Feldeffektbeweglichkeit von etwa $150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. (Abb. 5)

Solche Lasersysteme werden seit Jahren erfolgreich in vollautomatischen Kristallisierungssystemen zur industriellen Produktion eingesetzt. Diese bestehen aus einer Substratbehandlungs- und Kristallisationskammer, Kassettenbe- und -entladungskammern, vollautomatischen Steppern, Handhabungsrobotern und einer Hauptsystemsteuerung. Das industrielle Gesamtsystem von The Japan Steel Works LTD (Abb. 6) wurde in die Produktionshallen der größten LCD-Hersteller integriert und stellt dort seine besonderen Fähigkeiten und seine außerordentliche Zuverlässigkeit bei der TFT-Display-Herstellung unter Beweis. Japan dominiert mit 60 % Weltmarktanteil die weltweite Flachbildschirmproduktion, gefolgt von anderen ostasiatischen Ländern wie Südkorea und Taiwan, während die USA und Europa zusammen nur auf einen Anteil von 3 % kommen. Die Lambda Physik AG besitzt mit einem Weltmarktanteil von 95 % eine weitgehende Alleinstellung bei der Produktion von Excimerlasern für die Flachbildschirmindustrie.

schichten lassen sich deswegen derzeit nicht mit CMOS-Architektur kompatiblen, physikalischen Eigenschaften herstellen.

Zur notwendigen weiteren Erhöhung der Feldeffektbeweglichkeit und damit der Geschwindigkeit des Bildschirms steht ein auf Excimerlaser-Maskenabbildung beruhender Niedrigtemperatur-Annealingprozess, das sogenannte Sequential Lateral Solidification (SLS) vor der Einführung in die Industrie. Im Gegensatz zum konventionellen Linienstrahl-Prozess wird beim SLS durch geeignete Maskenabbildung ein jeweils rechteckiger Ausschnitt

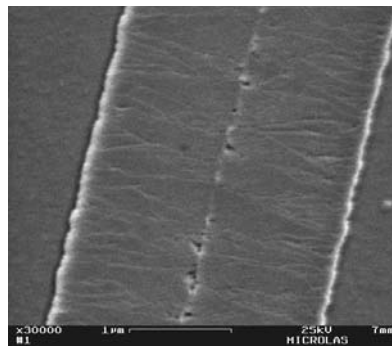


Abb. 7: Mit der SLS-Technik kristallisierte Polysiliziumschichten - hier ein Beispiel in einer elektronenmikroskopischen Aufnahme - bieten die Voraussetzung für leistungsfähigere TFT-Displays. (Quelle: MicroLas Lasersystem GmbH)

Mikrokammern für bessere Motoren

Die Entwicklung sparsamer und leistungsfähiger Verbrennungsmotoren ist für den Erfolg auf dem Automobilmarkt von entscheidender Bedeutung. Der Wunsch nach hoher Motorleistung bei gleichzeitig reduziertem Kraftstoffverbrauch und verringertem Schadstoffausstoß sind der Grund für ständig wachsende technologische Anforderungen an die Automobilindustrie. Vorrangiges Entwicklungsziel im Motorenbau ist es, den Kraftstoff- und Schmierstoffverbrauch sowie den Verschleiß zu reduzieren.

Eine Kraftstoffreduzierung oder auch Leistungssteigerung ist bei Otto- und Dieselmotoren mit höheren Verbrennungsdrücken verbunden. Bei höherem Arbeitsdruck wirken jedoch höhere Anpresskräfte der Kolbenringe gegen die Zylinderwände und damit verbunden eine höhere tribologische Belastung mit entsprechend größerem Verschleiß. Dies verkürzt die Lebensdauer und mindert auch die Öl- und Gasdichtigkeit des Zylinderraums. Dadurch steigt der Ölverbrauch und der Fluss der Verbrennungsgase vom Brennraum in den Kurbelarm. Mit zunehmendem Verschleiß verschlechtern sich so das Abgasverhalten und der Wirkungsgrad des Motors beständig. Für den Kunden sind diese Auswirkungen außerdem mit zusätzlichen Kosten verbunden. Vor diesem Hintergrund wird neben der Verringerung des Kraftstoff- und Ölverbrauchs auch die Bedeutung der Verschleißreduzierung deutlich.

Um Gleit- und Schmiereigenschaften der Zylinderlaufbahn zu verbessern, wird konventionell das mechanische Honen¹⁾ mit einem zylindrischen mit Honleisten besetzten Werkzeug eingesetzt. Auf diesen Honleisten befinden sich Schleifkörner aus Diamant oder Keramik, die in der Zylinderlaufbahn eine Kreuzriefenstruktur erzeugen. Diese Riefenstruktur hat die Aufgabe der Ölhaltung. Beim Übergleiten der Kolbenringe hat diese Struktur allerdings die Eigenschaft eines kommunizierenden Kanalsystems, d. h. der Schmierstoff kann über das Röhrensystem ausweichen und eine Berührung der Kanten ist möglich. Dies begrenzt die hydrodynamische Wirkung des Schmierstoffes und die Ölverbrauchsreduzierung.

Um zu vermeiden, dass Schmieröl entweicht, hat die Audi AG bereits Anfang der 80er Jahre eine

so genannte Mikrokammer-Oberflächenstrukturierung der Zylinderlaufbahn mit Hilfe eines mehrstufigen, elektrochemisch-mechanischen Verfahrens realisiert [10]. Durch die hydrodynamische Wirkung der Mikrokammern „schwimmen“ die Kolbenringe auf, was die Reibungsverluste deutlich reduziert, die Ölhaltung verbessert und die Motorleistung optimiert.

Während sich diese aufwändige Oberflächenbehandlung aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchsetzen konnte, hat sich der Excimerlaser für diese Art der verschleißmindernden Oberflächen-

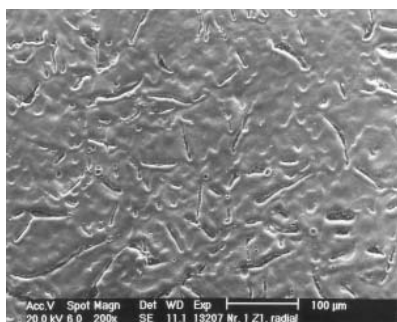


Abb. 8: Mikrokammerstrukturen, die durch Belichtung einer Zylinderlaufbahn mit einem Excimerlaser (Wellenlänge 308 nm) erzeugt werden, mindern Verschleißerscheinungen im Automotor. (Quelle: Audi AG)

vergütung als industriell geeignetes Werkzeug erwiesen [11].

Durch gezielte Bestrahlung der Zylinderoberflächen mit einer leistungsstarken Excimerlaserbelichtungsanlage der Wellenlänge von 308 nm wird das Oberflächenmaterial der Grauguss-Zylinderlaufbahnoberfläche abgetragen (Ablation). Dadurch öffnen sich die Graphitlamellen, sodass eine verschleißminimierende sowie öl- und kraftstoffreduzierende Mikrokammerstruktur auf der Zylinderoberfläche in wirtschaftlicher Weise und mit hoher Prozessgenauigkeit entsteht (Abb. 8).

Zum anderen schmilzt die Oberfläche aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit bis zu einer geringen Tiefe von ca. 2 µm auf. Das entstehende Metaldampfplasma enthält atomaren Stickstoff, der in verstärktem Maße in der Schmelzschicht in Lösung gebracht wird. Der hohe Stickstoffanteil in der erstarrten Oberfläche verbessert dadurch auch die Oberflächenhärte und Korrosionsbeständigkeit der Zylinderlaufbahn nachhaltig.

Die Vorteile dieser Oberflächen-

vergütung zeigen sich sowohl auf dem Prüfstand als auch auf der Straße. So verringert sich der Ölverbrauch um 70–75 % und der Verschleiß um 80–90 % gegenüber konventionell gehonten Zylinderoberflächen.

Ausblick

Kurzweilige Excimerlaser ermöglichen berührungsloses, hochpräzises Bearbeiten unterschiedlichster Materialien und Werkstoffe für eine nahezu unbegrenzte Anzahl industrieller Anwendungen. Das kurzweilige Licht des Excimerlasers bietet vor allem vor dem Hintergrund zunehmender Miniaturisierung einzigartige Perspektiven in Bezug auf erreichbare Strukturgröße und Bearbeitungsqualität. Geeignete Systeme zur Strahlformung und -führung gewährleisten eine hohe Flexibilität der Anpassung an den jeweiligen Produktionsprozess und erlauben dadurch, technologische und wirtschaftliche Potenziale bei der industriellen Fertigung auf Excimerlaser-Basis optimal zu nutzen.

Literatur

- [1] D. Basting et al., Zeitschrift für Physikalische Chemie **215**, 1575 (2001)
- [2] R. Srinivasan, Science **234**, 559 (1986)
- [3] G. Spiecker et al., Laser Magazin **6/02**, 10 (2002)
- [4] U. Stamm et al., Physik Journal, Dezember 2002, S. 33
- [5] R. Delmdahl, Laser Focus World **7/02**, S3 (2002)
- [6] P. R. Herman et al., Appl. Surf. Sci. **577**, 154 (2000)
- [7] P. R. Herman et al., Conf. on Lasers and Electro-Optics, Tech. Digest, OSA TOPS **56**, 574 (2001), OSA, Wash DC, USA
- [8] T. Pfohl et al., Physik Journal, Januar 2003, S. 35
- [9] R. Sposili et al., Appl. Phys. A **67**, 273 (1998)
- [10] Patentschrift: ECRP-Verfahren DE 31 49 120 A1 (1983)
- [11] L. Herbst et al., VDMA Nachrichten **12**, 56 (2002)

1) Dabei handelt es sich um einen sehr feinen Schleifprozess.