

Strahlungsquellen für die EUV-Lithographie

Lithographie mit extrem ultravioletter Strahlung wird voraussichtlich 2007 die optische Lithographie fortsetzen.

Uwe Stamm, Heinrich Schwoerer und Rainer Lebert

Lithographie mit extrem ultravioletter (EUV) Strahlung bei einer Wellenlänge von 13 nm ist nach der „Roadmap“ der Halbleiterhersteller die Technologie der Wahl für die Chipfertigung ab 2007. Dieser Technologiesprung erfordert nicht nur Optiken und Masken mit einer Genauigkeit im Sub-Nanometer-Bereich, sondern auch äußerst leistungsfähige EUV-Strahlungsquellen. Laser- und entladungserzeugte Plasmen sind dafür die aussichtsreichen Kandidaten.

Seit 1959 setzt die Halbleiterindustrie auf Miniaturisierung und Geschwindigkeit. Das Ergebnis: Ein gängiger PC bewältigt heute die Rechenleistung einer raumfüllenden Großrechenanlage von 1980. In der Vergangenheit hat sich alle ein bis anderthalb Jahre die Zahl der Transistoren pro Chip verdoppelt – ein Trend, den der spätere INTEL-Mitbegründer Gordon Moore bereits 1965 erkannt hat und der noch immer als Mooresches Gesetz die Halbleiterindustrie beherrscht. Und die Chiphersteller planen auch für die nächsten 10–15 Jahre diesem Gesetz zu folgen.

Heute definieren nur noch wenige Tausend Elektronen den Schaltzustand eines Bits und ebenso wenig Atome liegen innerhalb der Sperrschicht eines Transistors. In führenden Labors der Welt werden bereits Transistoren mit Strukturen von nur noch 10 Nanometern Größe betrieben, die wie ihre „großen Brüder“ funktionieren.

Zur Erzeugung ultrafeiner Strukturen werden heute in der Massenfertigung photolithographische Verfahren angewendet. Damit lassen sich Auflösungen erzielen, die jenseits derjenigen von klassischen Mikroskopen liegen. Die physikalischen Grenzen der Miniaturisierung sind somit bereits zu erahnen, aber definitiv noch nicht erreicht. Da die Photolithographie ein optisches Verfahren ist, hängt die erreichbare laterale Auflösung Δx nach der Abbéschen Formel von der Lichtwellenlänge λ und der Numerischen Apertur NA ab:

$$\Delta x = k \cdot \lambda / NA,$$

In der Halbleiterlithographie werden alle drei Wege, um immer kleinere Strukturen photolithographisch zu erzeugen, parallel beschritten:

- ▶ den so genannten k -Faktor verringern,
- ▶ die Wellenlänge des zur Abbildung verwendeten Lichtes verkleinern,
- ▶ die Numerische Apertur erhöhen.



Das Licht der Zukunft? Chipstrukturen, die kleiner als 50 Nanometer sind, werden künftig voraussichtlich mit extrem ultravioletter Strahlung hergestellt. Erzeugen lässt sie sich z. B. in einem Strahl flüssigen Xenons, das durch einen starken Laser in den Plasmazustand übergeht. (Foto: XTREME technologies)

Das klassische Auflösungskriterium ist durch $k \cong 1$ gegeben, d. h. die Intensität muss zwischen zwei aufzulösenden Objekten praktisch auf null abfallen. Seit den späten 80er Jahren wurden aber Photolacke (Resists) entwickelt, deren Kennlinie so steil ist, dass eine Abbildung als „scharf“ gilt, wenn die Intensität zwischen zwei aufzulösenden Objekten nur um wenige 10 % abfällt. Damit lassen sich heute k -Faktoren von unter 0,4 erreichen, und künftig werden voraussichtlich sogar Werte von ca. 0,3 möglich sein.

Als Lichtquelle für die Lithographie setzte man bis in die neunziger Jahre Quecksilberdampflampen (Hg i-Linie bei 365 nm) ein. Seit Mitte der 90er Jahre werden UV-Laser bei 248 nm eingesetzt, und gegenwärtig wird die 193-nm-Excimerlaserlithographie in die Chipproduktion bei Strukturbreiten von 100 nm eingeführt. Die excimerlaserbasierte Technologie hat heute einen Anteil am Lithographiemarkt von ca. 80 %. 2005 soll die 157-nm-Technologie folgen.

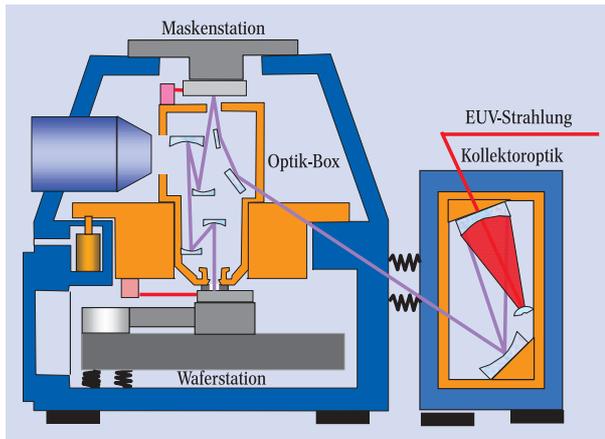
Schließlich erreichen neueste Lithographieobjektive mit komplexen asphärischen Optiken höchster Präzision NA -Werte von bis zu 0,85.

Heute deutet alles darauf hin, dass bei numerischen Aperturen von 0,9, k -Faktoren von 0,35 und Wellenlängen von 157 nm und den damit erzeugbaren minimalen Strukturbreiten von 70–50 nm die Grenze excimerlaserbasierter, lichteoptischer Konzepte erreicht ist. Um noch kleinere Strukturen zu erzeugen, müssen vollständig neue Lithographietechniken entwickelt werden, die mit deutlich kürzerer Wellenlänge arbeiten. Deshalb wurden in der Vergangenheit weltweit verschiedene Techniken wie Röntgen-, Elektronenstrahl- und Ionenstrahl-Lithographie untersucht, die sich aber allesamt wohl nicht für die Massenfertigung von Schaltkreisen eignen. Bei der Röntgenlithographie besteht das unlösbare Problem in der Herstellung der

Dr. Uwe Stamm, XTREME technologies GmbH, Hans Böckler-Str. 27, 37079 Göttingen; Dr. Heinrich Schwoerer, Institut für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena; Dr. Rainer Lebert, AIXUV GmbH, Steinbachstraße 15, 52074 Aachen

Masken. Ionen- und Elektronenstrahlen haben aufgrund ihrer Ladung starke Coulomb-Wechselwirkung bei hohen Strömen und sind deshalb in der erreichbaren Kombination aus Auflösung und Produktivität limitiert. Gegenwärtig wird allein die Elektronenstrahl-Lithographie für die Schaltkreisherstellung ab 2007 – bei geringer Produktivität – entwickelt. Ionenstrahl- und Röntgen-Lithographie sind aus den Roadmaps der Halbleiterindustrie verschwunden.

Abb. 2: Schema eines EUV-Belichters. Die EUV-Strahlung wird über eine Kollektoroptik in den eigentlichen Scanner eingekoppelt. Dort bildet sie die reflektive Maske über ebenfalls reflektive optische Elemente auf den Wafer ab.



Anforderungen an EUV-Lithographie

Zur künftigen Herstellung von Schaltkreisen mit kritischen Dimensionen („Knoten“) von 50 nm und darunter ist aus Sicht der internationalen Experten die Extrem-Ultraviolett-Lithographie (EUVL) der vielversprechendste Ansatz [1]. Die zur Belichtung der Wafer vorgesehene EUV-Strahlung (manchmal auch mit XUV bezeichnet) liegt im Spektralbereich zwischen Ultraviolett- und weicher Röntgenstrahlung (etwa 1 nm bis 100 nm Wellenlänge). Für die Lithographie konzentrieren sich die Arbeiten auf das Gebiet um 13,5 nm, weil sich nur hier effiziente Optiken für die erforderlichen Belichtungssysteme herstellen lassen.

Die technischen Herausforderungen für die EUVL sind enorm: Zum einen stellen die angepeilten Dimensionen von 50 nm oder weniger immense Anforderun-

gen an die mechanisch-optische Auslegung und Stabilität des EUV-Belichters (Scanners) (Abb. 2). Im EUV-Scanner müssen Maske und Wafer bei Verfahrensgeschwindigkeiten von Masken- und Waferaufnahme im Bereich von 0,5 bis 2,0 m/s auf Nanometer genau positioniert werden. Man stelle sich vor: Ein ICE solle bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h auf 0,2 mm exakt seiner vorgegebenen Fahrstrecke folgen!

Zum anderen wird EUV-Strahlung – im Unterschied zur UV-Strahlung – in nahezu allen Materialien sehr stark absorbiert. So liegt die Absorptionslänge in Luft bei Normaldruck dabei weit unter einem Millimeter. Damit kann sich EUV-Strahlung nur im Vakuum über die für die EUVL notwendigen Entfernungen nahezu verlustfrei ausbreiten (in den damit verbundenen experimentellen Schwierigkeiten gründet sich letztlich die etwas stiefmütterliche Behandlung der EUV-Spektroskopie in den letzten fünfzig Jahren). Für EUVL folgt aus der hohen Absorption eine folgenreiche Umstellung der Lithographietechnologie: Der gesamte Strahlengang (d. h. die Optiken, Masken, Wafer und Scanning Stages im EUV-Belichter) müssen sich im UHV befinden.

Doch damit nicht genug: Wegen der starken Absorption stehen auch keine optischen Elemente mehr zu Verfügung, die auf Transmission beruhen, um die Masken zu belichten bzw. auf den Wafer abzubilden. Dafür müssen nun reflektive Optiken, also Spiegel, eingesetzt werden. Ebenso ist die Maske selbst im Unterschied zur heutigen Lithographie reflektiv und nicht mehr transmittiv. Die Anforderungen an die Oberflächen-einheit und Formtreue erhöhen sich damit enorm. Ein Vergleich: EUV-Spiegel im Belichter haben einen Durchmesser von einigen 10 cm. Nimmt man die Nord-Süd-Ausdehnung der Bundesrepublik Deutschland von ca. 1000 km, dürfte bei gleicher Ebenheitsanforderung der höchste Berg nicht Zugspitzenhöhe haben, sondern weniger als 0,5 cm hoch sein.

Der notwendige Einsatz reflektiver Optiken legt die nutzbare Wellenlänge für die EUV-Lithographie mehr oder weniger fest: Hohe Reflektivitäten von Spiegeln unter nahezu senkrechtem Einfall sind im EUV derzeit

Anforderungen an die EUV-Lithographie-Quellen

Strahlungsleistung

Bei den wahrscheinlich erreichbaren Empfindlichkeiten der EUV-Resists sowie den erheblichen Verlusten im Beleuchtungssystem der Maske und im Abbildungssystem von der Maske auf den Wafer wird am Eingang des EUV-Scanners eine mittlere EUV-Leistung von 80–120 W im Zwischenfokus benötigt [4]. Eine Kollektoroptik zwischen Plasma und Scanner wird das strahlende Plasma in diesen Fokus abbilden. Berücksichtigt man die Reflektivitäten und geometrisch-optischen Transmissionskoeffizienten der Kollektoroptik-Elemente ergibt sich – für eine Leistung von 80 W im Zwischenfokus – eine direkt vom Plasma in einen Raumwinkel von 2π emittierte Leistung

von 1111 W! Dies liegt fast zwei Größenordnungen über den in der Excimerlasers-Lithographie verwendeten Laserleistungen.

Emittierende Quellengröße

Aus den optischen Eigenschaften des EUV-Belichtungssystems ergeben sich direkt die Anforderungen an Quellengröße und Divergenz der Strahlung. Die bestimmende Größe ist die so genannte *Étendue*, das Produkt aus der Fläche des Beleuchtungsflecks und dem Quadrat der numerischen Apertur

$$E = A_{\text{eff}} \pi (NA)^2,$$

die für das optische System konstant ist. Aus der konzipierten Größe des Beleuchtungsflecks von 2×20 mm und der numerischen Aper-

tur des Abbildungsobjektivs von 0,25 kann nur Licht der Quelle genutzt werden, das einer *Étendue* von $1\text{--}2 \text{ mm}^2 \text{ sr}$ entspricht. Bei den in Rede stehenden Öffnungswinkeln der Kollektoroptik für die Quelle von ca. 2 sr kann das optische System des EUV-Scanners Strahlung nur aus einem Quellenvolumen mit einem Durchmesser von ca. 1 mm übertragen. In diesem winzigen Volumen muss die gesamte Leistung von mehr als 1000 W in 2π sr erzeugt werden!

Räumliche und zeitliche Stabilität der Emission

Um reproduzierbar Strukturen im Bereich von 50 nm und darunter erzeugen zu können, muss die Dosis der EUV-Belichtung auf etwa

0,1 % konstant gehalten werden. Damit ergibt sich die geforderte Energiestabilität der gepulsten Emission in den erfassten Raumwinkel zu ca. 1 % Standardabweichung. Die räumliche Lage des emittierenden Plasmas muss auf etwa 0,1 mm stabil sein.

Optiklebensdauer

Als Lebensdauer der EUV-Belichteroptiken werden heute 1 Jahr (3000 Betriebsstunden) für die erste Kollektoroptik (siehe Abb. 2) bzw. 10 Jahre (30000 Betriebsstunden) für die weiteren Scanneroptiken gefordert. Vor allem aufgrund von Debris ist man von einer Lebensdauer von einem Jahr heute noch mehr als drei Größenordnungen entfernt.

nur mit dielektrischen Spiegeln aus Vielschichten (Multilayer-Spiegel) zu erreichen, und auch nur für Wellenlängen um 11 nm und um 13,5 nm. Spiegel für den Spektralbereich um 11 nm lassen sich aus abwechselnden Beryllium- und Silizium-Schichten herstellen. Allerdings wird sich Beryllium aufgrund der Gesundheitsgefährdung voraussichtlich nicht durchsetzen. Damit bleiben als zweiter technischer Ansatz Schichtsysteme aus Molybdän und Silizium mit einem Reflexionsmaximum um 13,5 nm. Für die Massenproduktion geht man von einer Reflektivität des einzelnen Spiegels von „nur“ 65 % aus – auch wenn sich bei Rekordversuchen etwas über 70 % erreichen lässt. Da die Optiken im EUV-Scanner aus 12 oder mehr solcher Spiegel bestehen werden, kommt in der Waferebene allein aufgrund der Reflektivität nur noch ca. $5,6 \cdot 10^{-3}$ der EUV-Leistung an, die in die Beleuchtungsoptik eintritt.

Für die EUV-Lithographie sind deshalb leistungsstarke Strahlungsquellen gefragt, die die Verluste in der Optik kompensieren. Welche Quellen kommen dafür in Frage? Naheliegender wäre ein Laser im weichen Röntgengebiet. Ein effizienter, verlässlicher Röntgenlaser ist jedoch trotz vielfältiger Versuche nicht in Sicht.

Ebenfalls naheliegend scheint, die Emission relativistischer Elektronenstrahlen an Beschleunigern zu nutzen (z.B. Speicherring BESSY II). Allerdings ist die Strahlungsleistung klassischer Systeme zu gering, sodass nur Freie-Elektronen-Laser für 13 nm die Anforderungen erfüllen könnten [2]. Diese wären aber zu unhandlich und unflexibel, um insbesondere bei den angesprochenen Leistungsanforderungen in die Fabrikationsphilosophie der Halbleiterindustrie eingeflochten zu werden.

Die dritte und heute favorisierte Möglichkeit für EUV-Strahlungsquellen ist seit vielen Jahren aus dem Labor bekannt: die Erzeugung von heißen Plasmen, die Strahlung bis in den Röntgenbereich emittieren. Dabei kann man die Plasmen entweder durch eine elektrische Entladung oder durch intensive Laserstrahlung anregen. Die Emission heißer Plasmen lässt sich über die Schwarzkörper-Strahlung abschätzen. Soll das Strahlungsmaximum bei ca. 13 nm liegen, muss das Plasma etwa 220 000 K (20 eV) heiß sein. Diese Plasmatemperatur lässt sich durch sowohl elektrische als auch Laseranregung von Materie erreichen.

Die nötige Produktivität des EUV-Lithographiebelichters wird bestimmt von den bei der Chipfertigung vertretbaren Kosten für die Belichtung eines Wafers, die wiederum von den Anschaffungs- und Betriebskosten einer kompletten Belichteranlage, den Kosten für die Maske sowie den erforderlichen Prozessschritten abhängen. Nach Analysen von SEMATECH International betragen die erwarteten Anschaffungskosten eines EUV-Lithographiescanners zur Herstellung von 50 nm-Strukturen 34 Millionen US-Dollar [3]. Damit wird ein Durchsatz im Belichter von mindestens 100 Wafers pro Stunde erforderlich.

Die sich daraus ergebenden Anforderungen an plasmabasierte Strahlungsquellen lassen sich verkürzt wie folgt zusammenfassen (vgl. Kasten „Anforderungen ...“): Die EUV-Quelle soll möglichst viel Strahlung in den von der Optik nutzbaren Spektralbereich und Raumwinkel emittieren. Dabei soll möglichst wenig elektromagnetische Strahlung anderer Wellenlänge und sog. Debris emittiert werden. Unter Debris versteht man jede Form von Teilchen aus dem Quellvolumen, die zu einer Degradation der Spiegelschichten beitra-

gen – entweder durch Belegung mit dünnen, absorbierenden Schichten oder durch Prozesse ähnlich dem Ionenstrahlätzen. Beispiele für Debris sind Target- oder Elektrodenbruchstücke, verdampftes Material oder vom Plasma emittierte Elektronen, Ionen und Atome. Um möglichst wenig Debris zu erzeugen, wird in plasmabasierten EUV-Quellen häufig Xenon als effizienter und kontaminationsarmer Emittier bei 13,5 nm eingesetzt. Schließlich soll die Lebensdauer von Verschleißteilen mindestens vergleichbar sein mit denen der Excimerlaser-Lithographiequellen.

Jede der Anforderungen für sich genommen stellt bereits eine immense technische Herausforderung für die Entwicklung der EUV-Quellen dar. Alle Anforderungen zu erfüllen und die Parameter in großindustriell nutzbaren Maschinen umzusetzen scheint fast unmöglich. Und dennoch machen erste Erfolge bei der Entwicklung von EUV-Quellen Mut, dass sich das Ziel mit EUV-emittierenden Plasmen erreichen lässt, die sich sowohl elektrisch durch eine Gasentladung als auch durch intensive Laserstrahlung anregen lassen. Beide Wege werden bei der Entwicklung von EUV-Quellen verfolgt und werden im Folgenden diskutiert.

Gasentladungsangeregte Plasmen

Die bekannteste Form der Plasmaerzeugung ist die elektrische Gasentladung z. B. als Funken oder Blitz. Diese direkteste Form der Umwandlung von elektrischer in Strahlungsenergie ist auch oft die effektivste – ein Beleg dafür sind die hohen Wirkungsgrade von Entladungslampen, bei denen ein Plasma in einem kompakten, aber kalten Gefäß strahlt. Zur Emission von EUV-Strahlung reichen allerdings die Dichten und Temperaturen herkömmlicher Gasentladungsplasmen nicht aus. Ein kaltes und dünnes Entladungsplasma lässt sich jedoch mit Magnetfeldern zu einem heißen und dichten Plasma komprimieren, dessen Emissionsmaximum um 13,5 nm liegt. Hierzu kann man die Selbstkompression eines nahezu zylindrischen Plasmas durch das azimuthale Eigenmagnetfeld des axialen Entladungsstromes selbst ausnutzen (Abb. 3). Dieser Prozess wird als „Pinch-Effekt“ und das entstehende komprimierte Plasma als Pinch-Plasma bezeichnet.

Aus der Bennett-Relation (siehe Infokasten „Der Pinch-Effekt“) lässt sich für die angestrebten Plasmatemperaturen von $kT = 30$ eV, einer mittleren Ionisation von $\langle Z \rangle = 3$ für Lithium bis $\langle Z \rangle = 10$ für Xenon sowie einer Plasmadichte von $4 \cdot 10^8$ cm⁻³ der benötigte Strom zu 18 bis 30 kA abschätzen. Dessen Eigenmagnetfeld von 14–24 T komprimiert den Plasmazylinder auf einen Druck von 2000 bar. Die gesamte Energie in Magnetfeld, Plasma und Zuleitung beträgt dann ungefähr 5 J, sodass elektrische Anschlussleistungen von ca. 50 kW erforderlich wären. Ein stabiler Plasmazylinder der geforderten Eigenschaften würde einen Widerstand von etwa 50 mΩ haben, sodass das Plasma mit einigen 10^7 W ohmsch geheizt würde. Dadurch fiel der Strom nach rund 100 ns bereits deutlich ab, sodass das Schema nur in einer gepulsten Entladung anwendbar ist.

Die so abgeleiteten Größen wurden im Prinzip bereits realisiert. Im Rahmen der Fusionsforschung wer-

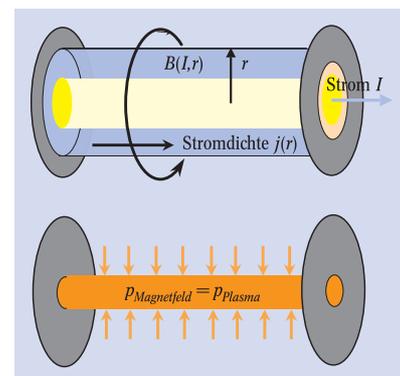


Abb. 3: Auf einen stromdurchflossenen Leiter übt das Eigenmagnetfeld eine radiale Kraft $j \times B$ aus, die einen Plasmafaden radial komprimiert und aufheizt (Pinch-Effekt).

den Pinchplasmen im Einzelpuls sogar mit Strömen von mehreren MA betrieben und so Magnetfelder von über 1000 T und Plasmadrucke von bis zu 10^7 bar erzeugt. Das technische Problem der EUVL-Quellentwicklung besteht jedoch darin, dass das Emissionsvolumen nur etwa 1 mm^3 groß sein darf (vgl. Kasten „Anforderungen ...“). Die grundlegende physikalische Aufgabenstellung ist, den einzelnen Entladungspuls so zu gestalten, dass die Konversion von Entladungsenergie in EUV-Strahlung möglichst effizient wird. Dabei sollte das Emissionsspektrum des gegenwärtig verwendeten Xenon ebenfalls noch Möglichkeiten zur Optimierung bieten (Abb. 4). Gleiches gilt für andere Targetmaterialien: So versprechen z. B. theoretische und experimentelle Voruntersuchungen für Zinn Konversionseffizienzen bis zu $4 \text{ } \%/2\pi \text{ sr}$. Leider würde Zinn als Emittierendes ohnehin kritische Debrisprobleme noch deutlich verschärfen.

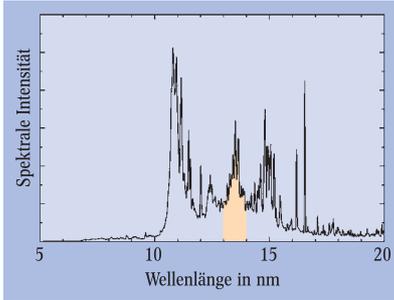


Abb. 4: Nur ein geringer Bruchteil (orange) der von Xenon im EUV emittierten Leistung kann von der EUV-Optik genutzt werden.

1) Wie es letztlich bei den erforderlichen Strahlungsleistungen von über 10 kW um die Erosion und Heizung der Targetzuführung bestellt ist, bleibt noch zu klären.

2) Mit table-top-Lasersystemen (bei Intensitäten von einigen $I_L = 10^{19} \text{ W/cm}^2$) lassen sich heute Elektronentemperaturen von über 1 MeV erzeugen.

Ob es möglich ist, die nötigen EUV-Leistungen von rund 1000 W mit gasentladungsangeregten Plasmen zu realisieren, hängt auch wesentlich von der erreichbaren Effizienz der Kühlung des Entladungssystems ab. Gute Konversionseffizienzen liegen heute bei 1 %, sodass annähernd die gesamte Anregungsleistung weggekühlt werden muss. Die technischen Lösungsansätze scheinen dies möglich zu machen. Allerdings weisen Pinchplasma-basierte EUV-Quellen ein weiteres Problem auf: Die starke Spitzenstrombelastung führt unweigerlich zur Erosion der Elektroden und begrenzt die Lebensdauer des Entladungssystems. Damit scheint eine Verschmutzung der Optik fast unvermeidlich. Es ist noch nicht absehbar, ob sich diese Probleme durch geeignete Entladungs- und Anregungsgeometrien bzw. Kontaminationsfilter beheben lassen können.

Laserangeregte Plasmen

Um das Risiko der Leistungsbegrenzung und insbesondere das Problem der Lebensdauer von Quelle und Optik bei Gasentladungsplasmen zu umgehen, werden heute alternativ laserproduzierte Plasmen als EUV-Quellen für die Lithographie untersucht und entwickelt. Hier lässt sich zumindest die Wärme ver-

gleichsweise einfach abführen. Ebenso können keine Elektroden erodieren, da keine vorhanden sind.¹⁾

Bei der Erzeugung von EUV-Strahlung durch eine Laseranregung von Plasmen wird ein vorzugsweise gepulster Laserstrahl auf ein Target fokussiert (Abb. 5). Liegen die erreichten Lichtintensitäten I oberhalb von 10^{10} – 10^{11} W/cm^2 , wird die Materie ionisiert. Das Feld eines kurzen, intensiven Laserpulses beschleunigt die freien Elektronen des Plasmas auf hohe Energien. Die mittlere kinetische Energie U_{osz} der im Lichtfeld oszillierenden Elektronen ist

$$U_{osz} = e^2 E_0^2 / (m_e \omega^2),$$

wobei $E_0 = (2I/c\epsilon_0)^{1/2}$ die elektrische Feldstärke, e die Elementarladung, ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante, m_e die Elektronenmasse und ω die Lichtfrequenz ist.

Das von der Vorderfront des Laserpulses oder von kleinen Vorpulsen gebildete Plasma expandiert und bildet einen Dichtegradienten vor der Materie, sodass der Hauptteil des Laserpulses mit Plasma und nicht mit dem ursprünglichen Festkörper in Wechselwirkung tritt. Insbesondere kann Licht nur bis zur so genannten kritischen Plasmadichte $n_{krit} = \omega^2 m_e \epsilon_0 / e^2$ – bei der die Lichtfrequenz gleich der Plasmafrequenz ist – in dieses eindringen; bei höheren Dichten wird die Brechzahl imaginär und das Licht reflektiert.

Durch Stöße mit den Plasmaionen heizen die Elektronen das Plasma auf eine Gleichgewichtstemperatur T_L . Für eine Laserwellenlänge von $\lambda = 800 \text{ nm}$ und einem Target mit kleinem bis mittlerem Z beträgt $T_L = 10^4$ – 10^5 K (1–10 eV) bei $I_L = 10^{15} \text{ W/cm}^2$ bzw. etwa 10^7 K (1 keV) bei $I_L = 10^{16} \text{ W/cm}^2$. Wie bei Gasentladungsplasmen bestimmt die Temperatur des Plasmas nun den Ursprung und damit auch die Wellenlänge der dominierenden Strahlung: Bei Temperaturen von einigen eV bis einigen 100 eV emittieren die Plasmaionen Linienstrahlung.²⁾ Dies ist die Quelle des für die EUV-Lithographie einzusetzenden Lichts.

Also: Problem gelöst? Leider nicht. Die physikalisch-technische Schwierigkeit der laserproduzierten Plasmen als EUV-Strahlungsquelle für die Lithographie liegt im Laser selbst begründet. Die Konversionseffizienz von Laserlicht in EUV-Strahlung ist vergleichbar mit der von Gasentladungs-basierten Quellen. Allerdings sind nach heutigem Kenntnisstand für die EUVL

Der Pinch-Effekt

Der eigentliche Entdecker, Willard H. Bennett (1903–1987), beschrieb den Pinch-Effekt als magnetische Selbstfokussierung in einem stromtragenden Plasma [5] und schätzte die erreichbare Plasmatemperatur durch eine Gleichgewichtsbedingung zwischen Magnetfelddruck und thermischen Plasmadruck ab:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} = (\langle Z \rangle + 1) \cdot n_i \cdot kT$$

wobei $\langle Z \rangle = n_e/n_i$ die mittlere Ionisation (Ionisierungsgrad), n_i die Ionen-dichte und kT die Plasmatemperatur ist. Mit dem Eigenmagnetfeld $B = \mu_0 I / (2\pi r)$ des Entladungsstroms I und

der Liniendichte $N_i = n_i \pi r^2$ ergibt sich

$$kT = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{8 \cdot \pi \cdot (\langle Z \rangle + 1) \cdot N_i}$$

Plasmen mit ähnlichen Temperaturen werden erzeugt, wenn man Entladungsstrom und Liniendichte aufeinander anpasst (Ähnlichkeitsparameter: I^2/N_i). Die Länge und der Durchmesser des emittierenden Plasmas sowie die Liniendichte selbst bestimmen die Größe der Anlage (Pulsenergie) und die Plasmadichte. Die Entladungsgeometrie wird durch den Ähnlichkeitsparameter der Entladungsphysik $U/(2\pi n_0)$ bestimmt, wobei n_0 die Neutralgasdichte vor der Entladung ist.

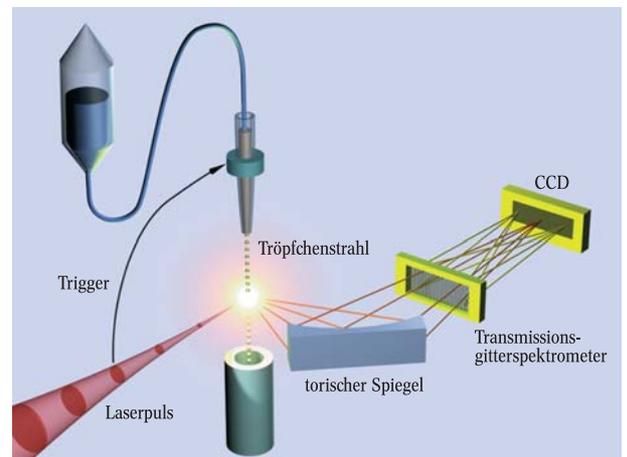


Abb. 5: Experimenteller Aufbau zur Messung der Konversionseffizienz von Laserstrahlung in EUV-Strahlung. Ein intensiver Laserpuls erzeugt ein heißes Plasma auf der Oberfläche des Wassertröpfchen. Ein kalibriertes, abbildendes Spektrometer detektiert die emittierte EUV-Strahlung.

mittlere Leistungen gepulster Laser bis zu einigen 10 kW erforderlich. Solche Laser existieren nicht – der leistungsstärkste gepulste Laser, der momentan als Prototyp entwickelt ist und für EUVL in Frage kommt, weist eine mittlere Leistung von 2,7 kW auf. Allerdings scheint die Entwicklung der erforderlichen Hochleistungslaser möglich – mit einem für die Chipfertigung entscheidenden Nachteil: Sie werden teuer, groß und sehr kompliziert. Ginge es nach der Halbleiterindustrie, würden deshalb auch gasentladungsbasierte EUV-Quellen zum Einsatz kommen – doch die technischen Risiken sind noch nicht ausgeräumt.

Um anschaulich zu machen, wie weit die Entwicklung fünf Jahre vor der Produktionseinführung ist, wird im Folgenden der experimentell erreichte Stand von gasentladungs- und lasererzeugten Plasma-EUV-Quellen beschrieben.

Gasentladungsplasmen – State of the Art

Alle zur Zeit untersuchten Entladungsquellen nutzen den Pinch-Effekt, unterscheiden sich aber erheblich in der Zündung der Entladung, die die Stabilität der EUV-Emission beeinflusst, in der Geometrie der Entladungskammer und damit in der Plasmadynamik sowie hinsichtlich des verwendeten Pulsstromgenerators. Wir beschränken uns hier auf zwei Geometrien: den Z-Pinch (Abb. 6a) [6] und den Hohlkathodentriggerterten Pinch (HCT, Abb. 6b) [7], mit denen deut-

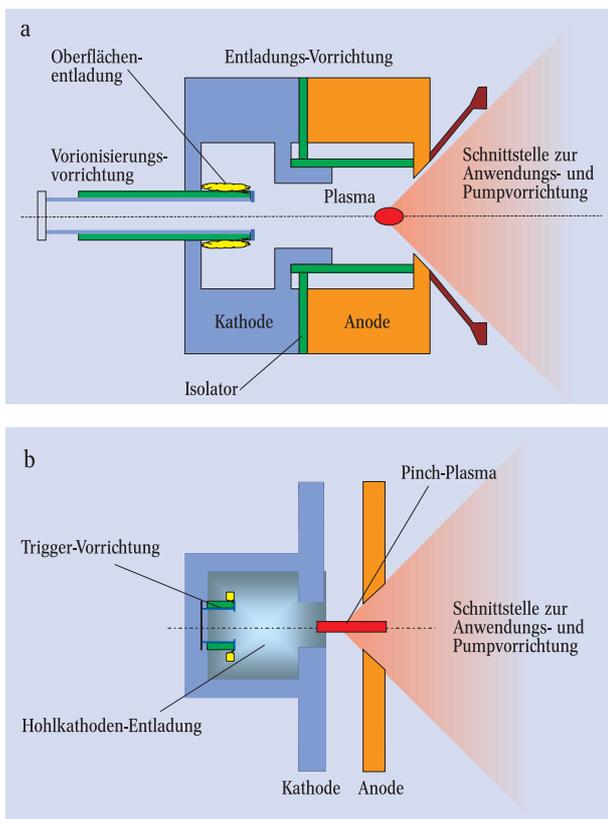


Abb. 6:
 ▶ a) Bei der Z-Pinch-Anordnung wird die Gasentladung durch einen pulsformenden Spannungsgenerator angetrieben. Die eigentliche Entladung bildet sich zwischen Kathode und Anode, zum Teil entlang des Isolators zwischen beiden Elektroden, wobei die Effizienz, Homogenität und Reproduzierbarkeit durch die UV-Strahlung aus einer hocheffizienten Oberflächen-Vorionisierungsentladung erreicht wird.
 ▶ b) Auch beim HCT-Pinch findet die eigentliche Entladung zwischen Kathode und Anode statt. Die Entladung zündet jedoch nicht auf der Oberfläche des Isolators, sondern zwischen der Hohlkathode und der Hohl-anode.

sche Firmen (XTREME technologies, PHILIPS Extreme UV und AIXUV) die Entwicklung anführen.

Wie oben abgeschätzt, werden die Anlagen mit typischen Entladungsenergien von 2 bis 30 J pro Puls betrieben, sodass Maximalströme von ca. 20 bis 50 kA erreicht werden. Beide Konzepte erlauben es prinzipiell, große Raumwinkel von bis über 2 sr der Quellenemission zu nutzen und kleine Plasmavolumina anzuregen.

Was ist erreicht? Mit Z-Pinch gelang es, eine maximal emittierte Leistung von ca. 40 W zu erreichen (Abb. 7), das entspricht einer Leistung von 5 W im Zwischenfokus [8]. Das liegt nur noch etwas mehr als eine Größenordnung unter der für die EUVL-Produktion geforderten Leistung. Die Größe des Emissionsgebietes liegt dabei bei ca. 1 mm Durchmesser, d. h. die gesamte emittierte Leistung kann auch tatsächlich durch das optische System des EUV-Belichters übertragen werden.

Die signifikanteste Kenngröße zum Erreichen der erforderlichen Leistung ist die Konversionseffizienz. Die höchsten Effizienzen wurden bisher mit bis zu 0,09 % in 1 sr Raumwinkel und 2 % Bandbreite erreicht, das entspricht ca. 0,55 % Konversion in 2π sr [8].³⁾ Ermutigend ist, dass die erreichten Werte nahe bei den grob abgeschätzten liegen, es jedoch noch Faktoren gibt, die eine weitere Steigerung versprechen.

Der Weg zu hoher Ausgangsleistung führt bei vorgegebener Konversionseffizienz natürlich über die Folgefrequenz. In kurzen Pulszügen gelang es, Entladungsplasmen bisher mit Repetitionsraten von bis zu 6 kHz zu betreiben. Über einen längeren Zeitraum sind sowohl beim HCT- als auch beim Z-Pinch Repetitionsraten von einigen kHz möglich. Neben der zeitlichen Stabilität ist dabei insbesondere die räumliche Stabilität des EUV-Emissionsgebietes von Bedeutung. (Die Abweichungen beim über 200 Impulse gemittelten EUV-Emissionsgebiet eines Z-Pinch-Plasmas liegen heute bei ungefähr 5 % – schon ausreichend für die EUVL-Produktion.)

Bis zur produktionsreifen Lithographie mit gasentladungsbasierten EUV-Quellen müssen die erreichbare Ausgangsleistung sowie die durch Debris verursachte endliche Optiklebensdauer weiter erhöht werden. Beides kann noch zum „Showstopper“ werden!

Laserproduzierte Plasmen – State of the Art

Aufgrund der geringer eingeschätzten Probleme bei der Kühlung und der vermeintlich geringeren Debris-erzeugung wurden laserinduzierte Plasmen als EUV-Quellen für die Lithographie über mehrere Jahre favorisiert und im Rahmen eines amerikanischen Konsortiums entwickelt. Eine bei den Sandia National Laboratories entwickelte Quelle lieferte eine nutzbare EUV-Ausgangsleistung bei 13,5 nm von etwa 2 W im Zwischenfokus [9].

In den meisten Untersuchungen lasererzeugter EUV-Strahlung werden gütegeschaltete Nd:YAG-Laser eingesetzt, mit Pulsenergien von einigen 10 mJ bis einigen 100 mJ und Impulsdauern zwischen 1 und 15 ns. Die Konversionseffizienzen liegen bei Verwendung von Xenon-Targets ebenfalls bei 0,5–1 % [10]. Ein Laser bei XTREME technologies mit 230 W mittlerer Leistung liefert 0,7 W EUV-Strahlung.

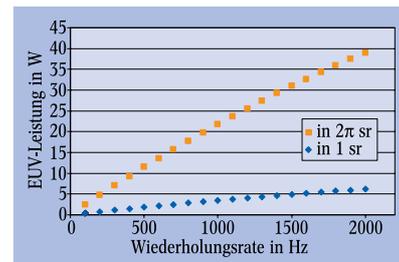


Abb. 7: Erreichte mittlere Ausgangsleistung für eine Z-Pinch EUV-Quelle in den Labors von XTREME technologies (Göttingen), emittiert in 2π sr Raumwinkel (orange Kästchen) bzw. 1 sr (blaue Kästchen)

3) Diese Konversionseffizienz ergibt sich aus dem Verhältnis von emittierter EUV-Leistung zu Eingangsleistung im elektrischen Anregungsschaltkreis.

Bei laserinduzierten Plasmen lässt sich die Debris-erzeugung minimieren, wenn alle Materie in ein Plasma verwandelt wird, also ein kleines, der Laserpulsenergie angepasstes Volumen vom Laser beschossen wird. Solche massenlimitierten Targets können entweder Flüssigkeitsstrahlen, kleine Tröpfchen oder atomare Cluster sein. Bisher liegen die erreichten Konversionseffizienzen noch deutlich unter den Werten der Festkörpertargets.

Um die derzeit höchsten Effizienzen aus massenlimitierten Targets wie im Fall von Xenon bis fast 1 % in 2π sr zu erzielen, muss die Laseranregung sorgfältig auf die Art und Größe des Targets abgestimmt werden. Die Energie des Laserpulses soll möglichst alle Materie in die gewünschte Ionisationsstufe anregen und das erzeugte Plasma auf eine Temperatur von 20–30 eV

heizen. In diesem Fall ist analog zu den Gasentladungsplasmen die Schwarzkörperstrahlung bei 13,5 nm maximal. Höhere Laserpulsenergien würden die Materie unnötig aufheizen und die Effizienz reduzieren, geringere würden nicht alle Atome in die gewünschte Ionisationsstufe und damit zur Emission anregen.

Um möglichst noch effizienter EUV-Strahlung zu erzeugen – und damit die Größe der nötigen Lasertreiber zu reduzieren – verfolgt man verschiedene Ansätze. Zum einen wird versucht, die Anregungsdauer optimal an die Dynamik des Plasmas anzupassen. Denn die Anregungsdauer hängt von der Expansionsdynamik des Plasmas ab und dessen Absorption wird stark von seiner Dichte beeinflusst: Bei Festkörperdichte wird ein Großteil der

Strahlung an der Oberfläche reflektiert. Das meiste Licht wird in Bereichen mit der für die Laserwellenlänge kritischen Dichte absorbiert, bei noch geringeren Dichten sinkt die Absorption rasch wieder ab, der Laserpuls durchstrahlt die dünne Materie, ohne sie zu heizen. Experimente mit kleinen Wassertröpfchen zeigen, dass Laserpulsdauern um 1 ns die höchsten Konversionseffizienzen erzielen [11].

Zum anderen verspricht der Einsatz zweier kurz hintereinander applizierter Laserpulse eine Erhöhung der Konversionseffizienz. Die Aufgabe des ersten, typischerweise schwächeren Pulses ist es, ein Plasma der Dichte mit der maximalen Absorption zu erzeugen, das sich dann vom zeitlich verzögerten, starken Puls optimal heizen lässt. Auf diese Weise konnten an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena Konversionseffizienzen nahe 0,5 % in 2π sr in 0,1 % Bandbreite erreicht werden. Allerdings waren dazu Laserpulsdauern von wenigen ps aus einem Ti:Saphir-Laser nötig, die sich mit den derzeit industriell bevorzugten Nd:YAG-Lasern nicht erzeugen lassen (Abb. 8).

Viele der bisherigen systematischen Experimente zu lasererzeugter EUV-Strahlung wurden an Wassertröpfchen durchgeführt, mit denen einerseits eine hohe Konversionseffizienz innerhalb einer sehr schmalbandigen Linie erreicht wird und die andererseits einfach, billig und kontinuierlich bereitzustellen sind. Für industrielle Zwecke wird allerdings gegenwärtig aus

verschiedenen Gründen Xenon favorisiert. Xenon lässt sich unter UHV-Bedingungen aufgrund seiner Oberflächenspannung nicht zu reproduzierbaren Tröpfchen formen. Darum werden entweder Sprays, atomare Cluster oder Flüssigstrahlen eingesetzt. Aus solchen Xenonclustern und -jets werden, wie Arbeiten am Max-Born-Institut in Berlin und bei XTREME technologies in Jena zeigen, ebenfalls Effizienzen um 0,5 % erzielt. Um möglichst hohe Plasmadichten zu erzielen, sind flüssige oder gefrorene Xenon-Strahlen neben alternativen Materialien der wahrscheinlich erfolgversprechendste Ansatz.

Bezüglich der erzielten EUV-Ausgangsleistung bleiben laserinduzierte Plasmen heute bereits deutlich hinter Gasentladungsplasmen zurück. Ein Grund dafür ist vor allem die Komplexität des Laser. Es ist eben doch viel einfacher, ein gepulstes 10-kW-Hochspannungsnetzteil anstelle eines 10-kW-Lasers zu bauen! Und auch die vermeintlich geringe Debris und damit die erhöhte Optiklebensdauer existiert bislang nur auf dem Papier. Allerdings bleiben die prinzipiellen Vorteile des Laserplasmas hinsichtlich einer effizienten Kühlung. Die weiteren Fortschritte werden mit Spannung erwartet. Denn in 2004 muss für die EUV-Lithographiequelle die Frage entschieden sein: Laserplasma oder Gasentladungsplasma?

EUVL für den industriellen Einsatz

Wenn alles so läuft, wie es sich die Experten der Halbleiterindustrie vorstellen, wird die EUV-Lithographie ab 2007 in der Fertigung von Computerchips in größerem Umfang eingesetzt. Die Anzahl der benötigten EUV-Quellen für die Belichter wird bereits 2007 etwa 100 Stück weltweit erreichen mit einem geschätzten Umsatzpotential von 200–700 Millionen Euro, je nach Quellentechnologie. Der gesamte Umsatz an weltweit

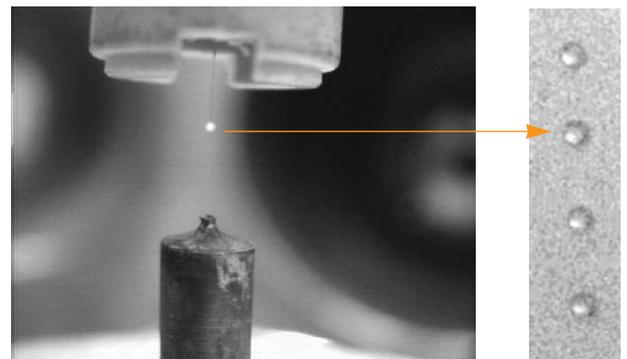


Abb. 8: Ein Laserpuls paart trifft genau ein Tröpfchen einer mit 1 MHz repetitierende Wassertröpfchenkette und verwandelt es in ein strahlendes Plasma. Die von einem einzelnen Tröpfchen ausgestrahlte EUV-Energie beträgt in diesen Experimenten nur einige hundert Mikrojoule. Um die für den industriellen Einsatz notwendige Durchschnittsleistung von annähernd 1 kW zu erreichen, muss also das Volumen des Wassertröpfchens und damit die Zahl der Emitter pro Laserschuss vergrößert werden, und die Repetitionsrate des Lasers sollte mehr als 10 kHz betragen.

neu installierten EUV-Belichtern wird 2007 voraussichtlich 3,5 Milliarden Euro betragen – mit steigender Tendenz.

Um in Europa gerüstet zu sein für den 13,5 nm-Wettbewerb, werden umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf europäischer und nationaler Ebene durchgeführt. Während in den 90er Jahren Machbarkeitsstudien zur EUVL vor allem in den USA

BMBF-Projekt zur EUV-Lithographie

Deutsche Firmen und Institute (ohne Auftragnehmer):

- ▶ XTREME technologies GmbH
- ▶ Philips Extreme UV GmbH
- ▶ Jenoptik Mikrotechnik GmbH
- ▶ SCHOTT Glas
- ▶ Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing Technologies AG
- ▶ Schott Lithotec AG
- ▶ Roth & Rau Oberflächentechnik AG
- ▶ AIS Automation Dresden GmbH
- ▶ Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Leipzig
- ▶ Infineon Technologies AG
- ▶ Institut für Mikroelektronik Stuttgart
- ▶ Leica Microsystems Semiconductor GmbH
- ▶ Clariant GmbH

(mit Beteiligung europäischer Anwender aus der Halbleiterindustrie und Maschinenhersteller) und Japan erstellt wurden, wurden Ende der 90er Jahre in Europa verstärkte Anstrengungen unternommen, eigenständige Forschungs- und Entwicklungsprogramme ins Leben zu rufen.

In Vorbereitung umfangreicherer EUV-Forschungsaktivitäten hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2000 mit hoher Priorität eine nationale Initiative gefördert, in der nach Zielvorgaben aus der deutschen Wirtschaft an verschiedenen Forschungseinrichtungen grundlegende Fragen zu Konzepten und Grenzen der Erzeugung von EUV-Strahlung untersucht wurden. Seit 2001 fördert das BMBF mit rund 50 Millionen Euro das Verbundprojekt „Extreme Ultraviolet-Lithographie“ (siehe Kasten). Dabei kooperieren Unternehmen aus den Niederlanden, Belgien, Frankreich, Schweden und Deutschland im Rahmen einer EUREKA-Initiative, die Förderung ist auf fünf Jahre angelegt. Durch das grenzüberschreitende Projekt soll die Position der europäischen Zulieferer der Halbleiterindustrie gestärkt werden.

Eingebunden sind die deutschen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in ein gesamteuropäisches Entwicklungsprojekt zu EUV-Quellen im Rahmen des Programms MEDEA+ (Micro-Electronic Development for European Applications), das sich mit einer Kapazität von etwa 2400 Mannjahren mit der Entwicklung der EUV Lithographie befasst. Das gegenwärtige EUV-Programm in MEDEA+ hat die Entwicklung einer Komplettlösung für die erste Generation von EUV-Belichtern zum Ziel. Das Projekt zur EUV-Quellentwicklung wird von XTREME technologies geleitet.

Da nach internationaler Einschätzung bei der Umsetzung der EUVL die Strahlungsquellen vor den Masken das größte Risiko darstellen, gilt es, umfangreiche Anstrengungen zu unternehmen, um dieses Risiko zu begrenzen und zu beseitigen – was sich auch in der besonderen Beachtung dieser Fragestellung durch das BMBF erkennen lässt. In Japan wurde im April 2002 ein Programm mit einem Budget von 10 Millionen US Dollar pro Jahr für die Quellenentwicklung (Laufzeit 4 Jahre) unter dem Namen EUVA gestartet.

Mittlerweile hat Deutschland eine technologisch herausragende Position bei der Entwicklung von EUV-Quellen eingenommen. In den Jahren 2000/01 wurden drei neue Unternehmen gegründet, die sich mit der Entwicklung und Fertigung von EUV Quellen beschäftigen: die AIXUV GmbH, eine Ausgründung aus dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) und der RWTH in Aachen, die Philips Extreme UV GmbH, ein Joint Venture zwischen Philips und dem ILT, und der XTREME technologies GmbH, einem Joint Venture zwischen der Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH, Jena und der Lambda Physik AG, Göttingen.

Und die Fortschritte können sich sehen lassen: AIXUV kommerzialisiert Quellen niedriger Leistung für die Forschung an EUVL-Komponenten und hat im Oktober 2002 den weltweit ersten EUV-Belichter an Infineon ausgeliefert, bei XTREME technologies gelang es Mitte 2002, Z-Pinch-Plasma-EUV-Quellen mit der bisher weltweit höchsten verfügbaren EUV-Leistung von über 40 W zu realisieren (in etwa 2π sr bei 2 kHz). Dies ist ca. fünfmal soviel wie die von laserinduzierten Plasma-EUV-Quellen beim amerikanischen EUV LLC (Sandia National Laboratories) erzeugte Leistung. Darüber hinaus forscht und entwickelt XTREME technolo-

gies weiterhin auch auf dem Gebiet der laserinduzierten Plasmen. Philips Extreme UV kann heute aus einem HCT-Pinch-Plasma bei Repetitionsraten von mehr als 3 kHz EUV-Leistungen von 5 W mit einem Kollektor auf sammeln und die Anlage über viele Minuten betreiben. Die deutschen EUV-Quellen führen das Rennen an. Beim Zwischenstopp.

Noch ist ein weiter Weg zu gehen von den 40 W EUV Leistung heute bis zu den 1000 W Leistung für die Chipproduktion. Aber die ersten Hürden sind genommen.

Literatur

- [1] Proc. CD of SEMATECH International 5th NGL Workshop, Pasadena, USA (2001)
- [2] G. Dattoli et al., Nucl. Instr. Meth. **A474/3**, 259 (2001)
- [3] P. Seidel et al., Proceedings CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [4] V. Banine et al., Proc. CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [5] W. H. Bennett, Phys. Rev. **45**, 890 (1934)
- [6] G. Schriever et al., Microelec. Eng. **61-62**, 83 (2002)
- [7] R. Lebert et al., Microelec. Eng. **46**, 465 (1999)
- [8] U. Stamm et al., Proc. CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [9] D. A. Tichenor et al., Proceedings of the SPIE **4688**, 72 (2002)
- [10] U. Stamm et al., Proc. of the SPIE **4688**, 122 (2002)
- [11] S. Düsterer et al., Appl. Opt. B Vol. **73**, 693 (2001)

Die Autoren

Uwe Stamm studierte Physik in Jena und promovierte 1986 an der Friedrich-Schiller-Universität. Dort arbeitete er dann – unterbrochen von Forschungsaufenthalten in Moskau und Tokyo – als wissenschaftlicher Assistent. Von 1991 bis 2000 war er bei der Lambda Physik AG tätig. Mit Gründung der XTREME technologies GmbH übernahm Stamm 2001 deren Geschäftsführung. Er engagiert sich in



verschiedenen Gremien und Arbeitskreisen u. a. von MEDEA+, VDI und BMBF. **Rainer Lebert** erwarb 1984 sein Physikdiplom an der TH Darmstadt. Er promovierte 1990 an der RWTH Aachen und trug dabei wesentlich zur Realisierung von Strahlungsquellen für die Röntgenmikroskopie und Lithographie bei. Von 1994 bis 2000 leitete er die AG „Plasmatechnologie“ am Lehrstuhl für Lasertechnik. 2000 gründete Lebert mit Kollegen des Fraunhofer ILT die AIXUV



GmbH, die er seitdem als Geschäftsführer leitet. **Heinrich Schwoerer** studierte Physik in Heidelberg. Er promovierte 1994 an der ETH Zürich. Danach arbeitete er am Institut für Physikalischen Chemie der Universität Würzburg. Seit 1999 leitet er das Hochintensitätslaserslabor am Institut für Optik und Quantenelektronik der Universität Jena. Er beschäftigt sich mit der Erzeugung und Anwendung laserproduzierter Plasmen und hat dazu einen der weltweit intensivsten Laser aufgebaut.

