

ATHANASSIOS KALIUDIS

Quadratur des Kreises

Der Laser als Lichtblick für eine noch smartere Zukunft: Ohne Licht, würde die boomende Elektronikbranche ins Stocken geraten.

Wann ist eigentlich die Grenze erreicht? Ab wann ist „klein" so klein, dass es einfach nicht mehr kleiner geht? Das Smartphone heute: ist eine nie versiegende Informationsquelle, vergleicht Preise in Echtzeit, vernetzt uns mit Freunden, navigiert uns in der Fremde und ersetzt problemlos die Digitalkamera.

Das Smartphone von morgen? Findet sich am Handgelenk, auf der Nase, vielleicht im Ohr oder gar auf der Netzhaut – auf jeden Fall vernetzt am und mit dem Körper, gesteuert per Gesten und Sprache. Klingt ein bisschen nach Science Fiction, ist aber nahende Realität.

Um diese nicht mehr allzu ferne Zukunftsvision tatsächlich auf die Straße zu bringen, muss das Herzstück des Smartphones – sein Chip – noch leistungsstärker werden. Und das gelingt nur, wenn seine Schaltkreissysteme noch kleiner werden. Gern und oft zitiert in diesem Zusammenhang: Gordon Moore.

Der Mitbegründer von einem der weltweit führenden Hersteller von Halbleitern Intel wusste bereits 1965, dass sich alle 18 Monate die Zahl der Transistoren auf der gleichen Chipfläche verdoppeln werden. Diese als Moore's Law bekannt gewordene Prognose treibt die Branche seither um. Sie ficht einen Milliarden Dollar schweren Kampf um jeden Quadratnanometer auf dem Chip. Doch damit immer mehr Transistoren auf den Halbleitern im Inneren der Chipsätze Platz finden, brauchen wir schlicht und ergreifend: mehr Licht!

Zehn Milliarden Transistoren auf einem Chip

Das Leben eines Mikrochips beginnt im Licht einer Lithografieanlage. Sie projiziert das verkleinerte Bild eines Schaltkreissystems auf einen Siliziumwafer und belichtet dort eine zuvor aufgetragene Fotolackschicht. Aus der sogenannten Abbe'sche Auflösungsgrenze folgt, dass eine Lichtquelle keine Strukturen abbilden kann, die kleiner sind als ihre Wellenlänge. Das bedeutet aber nicht, dass diese Grenze unüberwindbar ist.

Aktuell arbeiten Lithografieanlagen mit einer Wellenlänge von 193 Nanometern, erzeugen aber Strukturen von rund 20 Nanometern Größe und unterschreiten somit die Abbe'sche Auflösungsgrenze deutlich. Dies gelingt mit Hilfe verschiedener

Tricks und Kniffe.

Damit immer mehr Transistoren auf den Halbleitern im Inneren der Chipsätze Platz finden, brauchen wir schlicht und ergreifend: mehr Licht!

Doch mit den aktuell eingesetzten Lichtquellen stoßen wir langsam aber sicher an die Grenzen des technisch Möglichen. Vor mehr als 20 Jahren rief deshalb die Halbleiterbranche für die Belichtung der winzigsten Strukturen auf den verschiedenen Mikrochipebenen das EUV-Lithografie-Projekt ins Leben.

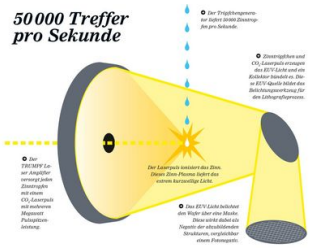
Ziel des Projektes war es, eine stabile Quelle für extrem ultraviolettes (EUV) Licht mit einer Wellenlänge von 13,5 Nanometern zu entwickeln. Denn mithilfe dieser Technologie lassen sich Strukturgrößen von weniger als zehn Nanometern herstellen, was wiederum bedeutet: Mehr als zehn Milliarden Transistoren finden auf einem einzigen Mikrochip Platz.

Lichtblitze im Vakuum

Doch ganz so einfach ist das nicht. Eine wesentliche Herausforderung bei der EUV-Lithografie ist es, Licht mit eben dieser Wellenlänge von 13,5 Nanometern zu erzeugen. Die EUV-Quelle muss dabei einige hundert Watt Lichtleistung erreichen und diese zur Weiterverarbeitung im optischen System bereitstellen. Plasmaquellen haben sich hierbei als bisher einzige Lösung erwiesen.

Das Plasma wird entweder durch Fokussierung hochintensiver Laserstrahlung oder durch hochenergetische Entladungen erzeugt, wobei insbesondere Zinn und Xenon als Quellmaterial geeignet sind. Etabliert hat sich letztlich das durch Laserstrahlung erzeugte Plasma (LLP – Laser Produced Plasma). Die Idee hinter diesem Verfahren klingt zunächst ganz einfach: Ein Zinngenerator schießt Zinntropfen in eine Vakuumkammer, ein Laserpuls trifft die mit 50 Kilohertz vorbeirauschenden Zinntropfen.

Der Laser trifft also 50.000 Zinntropfen pro Sekunde. Dabei ionisieren die Zinnatome und es entsteht ein intensives Plasma. Ein Kollektor fängt dann durch Mehrfachreflektion das vom Plasma emittierte EUV-Licht ein, bündelt und übergibt es schließlich an das Lithografiesystem zur Belichtung des Wafers.



Funktionsprinzip der EUV-Lithografie.

Den Laserpuls hierfür liefert ein von TRUMPF entwickeltes, pulsfähiges CO2-Lasersystem – der TRUMPF Laser Amplifier. Dieses System basiert auf der Technologie der CO2-Dauerstrichlaser im Leistungsbereich von über zehn Kilowatt. Es verstärkt einen CO2-Laserpuls mit wenigen Watt mittlerer Leistung in fünf Verstärkerstufen um mehr als das 10.000-fache auf über 30 Kilowatt mittlere Pulsleistung, wobei die Pulsspitzenleistung mehrere Megawatt beträgt.

Für ein optimales Ergebnis muss der Laserpuls den Zinntropfen möglichst breitflächig treffen. Der Zinntropfen ist allerdings kleiner als der Laserfokus. Der Laser kann seine 30 Kilowatt Leistung daher nicht vollständig auf den Zinntropfen übertragen. Deswegen bedient sich der Laser Amplifier eines cleveren Tricks: Er sendet direkt nacheinander einen Vor- und einen Hauptpuls aus, bekannt als Pre-Pulse und Main-Pulse.

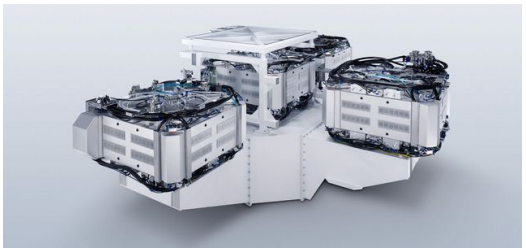
Der Pre-Pulse trifft den Zinntropfen mit einer geringen Pulsleistung, die Zinnatome ionisieren. Das dabei entstehende Plasma

expandiert. Der hinterher eilende Main-Pulse trifft nun die angewachsene Plasmawolke mit voller Pulsleistung – ein Volltreffer.

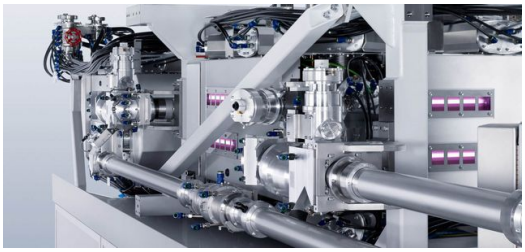
Die Wellenlänge ist mit Bedacht gewählt

Aber wieso eigentlich diese scheinbar willkürlich festgelegte Wellenlänge von 13,5 Nanometer? Aus zwei Gründen, erstens: Bei dieser Wellenlänge weist die Quellstrahlung intensive Linien auf, das bedeutet, dass die Strahlungsausbeute besonders hoch ist. Denn in diesem Wellenlängenbereich gibt es sehr starke Zinn-Plasma-Linien. Wichtig zu wissen: Ein Plasma strahlt einzelne Linien aus.

Und zweitens: Bei 13,5 Nanometern ist es möglich, die für die optische Abbildung notwendigen Schichtsysteme mit ausreichend hoher Reflektivität überhaupt herzustellen. Refraktive Optiken, wie zum Beispiel Linsen, absorbieren diese Wellenlänge. Deswegen arbeiten EUV-Systeme ausschließlich mit Spiegeloptiken. Die sehr kurze Wellenlänge ist auch der Grund, weshalb der ganze Prozess im Vakuum stattfinden muss – Luft würde die EUV-Strahlung ebenfalls absorbieren.



TRUMPF liefert seit Anfang 2014 die dritte Generation seiner Lasersysteme an ASML in den Niederlanden, den einzigen Hersteller von EUV-Lithografieanlagen weltweit.



Der TRUMPF Laser Amplifier basiert auf der Technologie der CO2-Dauerstrichlaser im Leistungsbereich von über zehn Kilowatt. Es verstärkt einen CO2-Laserpuls mit wenigen Watt mittlerer Leistung in fünf Verstärkerstufen um mehr als das 10.000-fache auf über 30 Kilowatt mittlere Pulsleistung, wobei die Pulsspitzenleistung mehrere Megawatt beträgt.

Wer eine Alternative zur technisch sehr anspruchsvollen EUV-Lithografie sucht, stellt fest, dass es quasi keine gibt. Durch Optimierung der bisherigen Technologie basierend auf einer Laserstrahlung mit 193 Nanometern Wellenlänge lassen sich bei der Beleuchtung zwar durchaus noch kleinere Strukturen erzeugen. Das geschieht beispielsweise durch Mehrfachbelichtung, also dem doppelten und vierfachen Ausführen jedes Beleuchtungsschritts (Multiple Patterning) und durch Immersion, der Nutzung des höheren Brechungsindex von Wasser. Der Aufwand für die vielen Schritte ist aber hoch und deswegen zunehmend unwirtschaftlich

Inzwischen lassen sich mit dem konventionellen Verfahren sogar Strukturgrößen von rund 20 Nanometer erzeugen – die Grenze der Wirtschaftlichkeit ist damit aber erreicht. Heißt im Klartext: Für die Halbleiterindustrie ist die lasergestützte EUV-Lithografie der einzige Weg, um in Zukunft noch kleinere Strukturen und somit noch leistungsstärkere Chips herzustellen.

Das Ziel in greifbarer Nähe

Die Weichen für diese Zukunft sind gestellt: TRUMPF liefert seit Anfang 2014 die dritte Generation seiner Lasersysteme an ASML in den Niederlanden, den einzigen Hersteller von EUV-Lithografieanlagen weltweit. Mit diesen Anlagen können mittlerweile mehr als 100 Wafer pro Stunde bearbeitet werden, ausreichend für den Einsatz in der Serienproduktion, die mehrere Chiphersteller weltweit vorbereiten. Schließlich muss EUV Lithographie nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich ein Erfolg für den Kunden sein.

Strukturen im einstelligen Nanobereich rücken also immer näher. Und damit sind wir noch lange nicht am Ende der Miniaturisierung angelangt. Wir verschieben daher die Antwort auf die Frage, wann „klein“ so klein ist, dass es nicht mehr

kleiner geht – und wir kommen der Quadratur des Kreises immer näher.



ATHANASSIOS KALIUDIS
PRESSESPRECHER TRUMPF LASERTECHNIK

TRUMPF MEDIA RELATIONS, CORPORATE COMMUNICATIONS

https://www.trumpf.com/de_INT/newsroom/stories/quadratur-des-kreises/