

DISS. ETH N°. 20804

Droplet Target for Laser- produced Plasma Light Sources

DISSERTATION

submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Bob Rollinger

MSc ETH ME

born March 26, 1981

citizen of Luxembourg

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Reza S. Abhari, examiner
Prof. Dr. Dimos Poulikakos, co-examiner

2012

Abstract

The present work is related to the field of droplet-based laser-produced plasmas (LPP) in soft X-ray and, more specifically, extreme ultraviolet (EUV) sources. EUV sources generate light at 13.5 nm and are employed in EUV lithography, which is the leading candidate to become the semiconductor manufacturing technology for post-193nm immersion lithography. One of the key factors, which limits the operating time of EUV sources, is the generation of tin droplets within the required specifications, such as large droplet spacing, micrometer droplet size and high stability. This work is conducted in the context of the development of a fully functional tin droplet-based high power LPP light source at the Laboratory for Energy Conversion, ETH Zurich.

The first objective of this work is to develop, manufacture and assess the performance of a tin droplet dispenser, which is required to generate a monodisperse stream of droplets with frequencies above 10 kHz in the harsh vacuum and plasma environment of an EUV source. Preliminary droplet requirements demand droplet sizes in the range of tens of micrometers, maximized droplet spacings and high temporal and spatial stability with respect to the laser focus. Droplet generation is based on the Rayleigh breakup of the tin jet. The modular design relies on replaceable cartridges, which consist of the high pressure rated (>50 bar) source material reservoir and the micrometer-sized nozzle. The forced excitation of the tin jet is ensured via an oscillating piston inside the tin reservoir. Acoustic pressure fluctuations form at the tip of the piston and propagate to the nozzle. Active cooling of the piezoelectric actuator ensures long operating times and permits large temperatures (>300°C) in the rest of the system.

The experimental methods, which are required for the performance assessment of the newly developed dispenser, rely on the imaging of the droplet train with a fast CCD and LED flash, as well as droplet tracking with a laser-photodiode light barrier. It is observed that for a fixed nozzle size, small droplet diameters are obtained at high frequencies and low backpressures, while large droplet spacings are generated for the inverse conditions. The lateral displacement is split up into high and low frequency contributions. Although low frequency lateral displacements are in the range of ten droplet diameters (3σ), they can be compensated for by position control of the dispenser. High frequency fluctuations of the lateral position yield three standard deviations of one droplet diameter. Lateral displacements are correlated with the level of flow impurities in the nozzle, which can be mitigated by efficient contamination control. The drop-to-drop timing jitter equals

5% of the mean droplet interval at typical operating conditions. A strong sensitivity of the droplet jitter with respect to the excitation frequency is observed.

A high temperature (255 °C) fast response (< 100 kHz) pressure sensor for use in liquid tin is developed and employed to measure the frequency dependent pressure at the nozzle inlet. Real-time monitoring of the nozzle inlet pressure is possible. A reference measurement, at representative conditions for source operation, reveals a complex pressure response, with a maximum pressure amplitude of 440 mbar. The dispenser is investigated by laser Doppler vibrometry. A validated finite element analysis shows that the structural resonances at the piston tip result from the coupling of axial eigenmodes of the piston and the axial eigenmodes of the piezoelectric actuator. Good agreement is found between the structural and the pressure response. This implies that the fluid-structure interactions and the fluid do not significantly add or shift resonance peaks.

The correlation between the measured nozzle inlet pressure and the droplet timing jitter is determined by a frequency sweep of the excitation frequency with simultaneous measurements of droplet timing. The corresponding pressure signal is used as an input for a droplet formation model, which predicts the corresponding timing jitter. Experimental and numerical results follow the same trend. A noise level (RMS) of 0.3% of the peak pressure amplitude is determined. With the help of computational fluid dynamics, the largest possible droplet spacing is estimated to be seven droplet diameters, which is comparable to the experimental results. With decreasing perturbation wave number, the growth rate of the main excitation decreases, while noise contributions with wave numbers with higher growth rates dominate and lead to a non-deterministic structure of the droplet train. The requirements for operation in a laser plasma source are best fulfilled when the dispenser excitation system is tuned to generate high acoustic pressures at the desired operating frequency and when the noise level on the jet is limited. The jet velocity is then adjusted by varying the reservoir pressure to find the optimum droplet stream wave number, according to the trade-off between lowest wave number and acceptable timing jitter.

Multi-scale computational tools are employed to predict the emission and debris characteristics of the previously generated tin droplets. For this purpose, an existing hydrodynamic code is extended with a radiation transport model, which is based on the flux-limited multigroup diffusion approximation. The emissivity and opacity terms in the electron energy and radiation energy density equations are derived from an atomic physics code. The validated radiation hydrodynamic (RHD) code is applied to a baseline case, which is representative of the experiments conducted at ETH Zurich. The expanding plume develops a significant anisotropy in terms of electron temperature and density. The radiation transport from the high temperature plasma core to the vacuum environment is strongly influenced by the non-uniformities in the plasma plume. From the laser axis (0°) to the direction perpendicular to the laser axis (90°), the full-band and EUV fluxes decrease by 34% and 61%, respectively. A source size of 100 µm is determined. A particle code, which is based on the Particle-In-Cell and Direct Simulation Monte Carlo approach for rarefied flows, is fully coupled to the RHD code. This hybrid particle-hydrodynamic code simulates the

plasma expansion up to the collector. The velocity and particle density distributions at the EUV collector are not uniform. The particle and kinetic energy distributions, together with the sputtering yields of molybdenum and silicon, are used to predict the collector life-time. On the outer border of the collector, a reflectivity loss of 10% is obtained after only two hours of source operation. The overall life-time is expected to be 3 hours in the absence of a debris mitigation system at an operating frequency of 6 kHz. The tin deposition, for the baseline case, is on the order 10^{-3} nm per pulse. As a conclusion, a highly efficient debris mitigation subsystem is required in order to meet the source requirements.

The selection of the droplet size results from a trade-off between the amount of acceptable debris and the required EUV energy per pulse. The tin droplet is fully vaporized for a droplet diameter of 10 μm . However, the EUV energy per pulse, generated using a 10 μm droplet, is almost 30 times smaller than for the 50 μm droplet. Therefore, very high (> 200 kHz) repetition rates would be required to meet the EUV source criteria. The interaction of the plasma with the subsequent droplet is very critical and estimated to lead to droplet fragmentation for the typical droplet spacings obtained from Rayleigh breakup. The largest experimental droplet spacings of 7.5 droplet diameters are estimated to be at the limit of fragmentation. The influence of the laser-droplet misalignment on EUV emission is quantified. At typical conditions, 80% overlap between the droplet and the laser yields a drop in EUV emission of 6 to 8%. The measured lateral stability is used to derive the corresponding dose stability. The EUV source requirements are fulfilled for a lateral instability (3σ) below 23 % of the droplet diameter (at a laser irradiance of 100 GW/cm^2). Larger laser irradiances increase this threshold. The same findings are valid for laser-droplet misalignments due to the timing jitter. Under typical operating conditions, the high frequency (> 0.5 Hz) part of the lateral droplet instability has three standard deviations of one droplet diameter. For a laser spot size of 80 μm and droplet diameter of 50 μm , the corresponding dose stabilities equal 0.8% and 0.3% for laser irradiances of 100 GW/cm^2 and 400 GW/cm^2 , respectively.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit tropfenbasierten laserproduzierten Plasmas, welche im Wellenlängenbereich der weichen Röntgenstrahlen emittieren. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf Lichtquellen im extremen Ultravioletten (EUV). Solche EUV-Quellen produzieren Licht mit einer Wellenlänge von 13.5 nm und werden in der EUV Halbleiterlithographie benützt. Diese Technologie zur Herstellung von Computerchips wird voraussichtlich in der nächsten Lithographie-Generation zum Einsatz kommen, welche der heutigen 193nm-basierten Immersionslithographie folgen wird. Einer der Hauptfaktoren, welcher die Laufzeit von EUV-Quellen einschränkt, ist die Herstellung von Zinntropfen mit den erforderlichen Eigenschaften wie ausreichendem Tropfenabstand, Grösse im Mikrometerbereich und hoher zeitlicher und räumlicher Stabilität. Diese Arbeit wurde im Rahmen der Entwicklung einer voll funktionsfähigen laserproduzierten Plasma EUV-Quelle am Laboratory for Energy Conversion der ETH Zurich durchgeführt.

Ein erstes Arbeitsziel besteht in der Entwicklung, Herstellung und Leistungsbewertung eines Tropfengenerators, welcher den geforderten monodispersen Tropfenstrahl mit Frequenzen über 10 kHz in der Hochvakuumumgebung der EUV-Quelle liefert. Die vorläufigen Anforderungen beschränken sich auf einen Tropfendurchmesser im Mikrometerbereich, einen maximalen Tropfenabstand, sowie hohe zeitliche und räumliche Stabilität gegenüber dem Laserfokus. Der zugrundeliegende Tropfenbildungsprozess ist der Rayleigh'sche Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Die modulare Auslegung des Tropfengenerators basiert auf austauschbaren Kartuschen, welche aus einem Hochdruckbehälter (> 50 bar) und der Düse mit einer Öffnung im Mikrometerbereich bestehen. Die externe Anregung des Flüssigkeitsstrahles erfolgt über einen schwingenden Kolben, welcher im Behälter installiert ist. An der Spitze des Kolbens bilden sich akustische Druckschwellen aus, welche sich zur Düse hin ausbreiten. Eine aktive Kühlung des piezoelektrischen Aktuators erlaubt lange Laufzeiten und hohe Temperaturen (> 300 °C) des Gesamtsystems.

Die experimentellen Methoden, welche für die Leistungsbewertung des Tropfengenerators erforderlich sind, basieren auf der Visualisierung des Tropfenstrahls mit Hilfe eines schnellen Bildsensors (CCD) und eines LED Blitzes. Zusätzlich wird für die zeitliche Auflösung des Tropfenstrahls eine laserbasierte Lichtschranke benützt. Es kann gezeigt werden, dass, für eine gegebene Düsengrösse, kleine Tropfendurchmesser bei hohen Frequenzen und bei tiefem Behälterdruck erzeugt werden. Die lateralen Verschiebungen des Tropfenstrahls wird in einen tief- und hochfrequenten Teil aufgespaltet. Im tieffrequenten Anteil treten Verschiebungen bis zu 10

Tropfendurchmesser (3σ) auf, wobei diese Verschiebungen über ein Positionierungssystem kompensiert werden können. Die dreifache Standardabweichung der hochfrequenten lateralen Verschiebungen liegt im Bereich von einem Tropfendurchmesser. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass die auftretenden lateralen Verschiebungen mit dem Grad der Verunreinigungen in der Düse korrelieren. Dieser negative Einfluss kann über ein effizientes Filtersystem reduziert werden. Die gemessenen zeitlichen Schwankungen des Tropfenabstandes entsprechen 5% des mittleren Abstandes unter typischen Betriebsbedingungen. Es wird eine starke Abhängigkeit der Schwankungen des Tropfenabstandes bezüglich Anregungsfrequenz festgestellt.

Um die frequenzabhängige Druckantwort am Düseneintritt zu bestimmen wurde eine schnell ansprechende (< 100 kHz) Hochtemperatur-Drucksonde (255 °C) entwickelt, welche die Druckwellen im flüssigen Zinn erfassen kann. Eine Überwachung in Echtzeit der Druckantwort am Düseneintritt wird somit ermöglicht. Eine Referenzmessung, welche bei typischen Betriebsbedingungen durchgeführt wurde, zeigt eine komplexe Druckantwort mit einer maximalen Amplitude von 440 mbar. Zusätzlich wurde der Tropfengenerator noch schwingungstechnisch mit einem Laser Doppler Vibrometer (LDV) analysiert. Eine experimentell validierte strukturmechanische Finiten-Elemente Simulation zeigt, dass die resonanten Auslenkungen an der Kolbenspitze durch die Kopplung von axialen Eigenmoden des Kolbens und des piezoelektrischen Aktuators bestimmt werden. Allgemein wird eine gute Übereinstimmung zwischen der Druckantwort und der Strukturantwort festgestellt. Dies heisst auch, dass die zusätzliche Interaktion zwischen der Struktur und dem Fluid die Druckantwort nicht signifikant verändert.

Der Zusammenhang zwischen der Druckantwort am Düseneintritt und den Schwankungen des Tropfenabstandes wird mit Hilfe eines Frequenzhubes des piezoelektrischen Aktuators mit gleichzeitigem Messen des zeitlich aufgelösten Tropfenabstandes bestimmt. Das entsprechende Drucksignal wird als Eingabe für ein Modell zur Tropfenbildung benützt, das helfen soll die entsprechende Schwankung des Tropfenabstandes vorauszusagen. Experimentelle und numerische Resultate stimmen weitgehend überein. Ein Rauschniveau (RMS) von 0.3% der maximalen Druckamplitude kann zusätzlich bestimmt werden. Mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen wird der maximal erreichbare Tropfenabstand von 7 Tropfendurchmessern bestimmt. Dieses Resultat deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Experimenten. Eine Verminderung der Anregungswellenzahl führt zu einer Verminderung der Wachstumsrate der Hauptstörung, so dass Rauschanteile mit günstigeren Wellenzahlen dominieren und es somit zu einem nichtdeterministischen Zerfall des Strahles kommt. Die Anforderungen für den Betrieb des Tropfengenerators innerhalb einer laserproduzierten Plasmaquelle sind am besten erfüllt wenn das Anregungssystem auf hohe akustische Drücke bei der Betriebsfrequenz ausgelegt ist und wenn das Rauschniveau im Strahl minimiert wird. Die Strahlgeschwindigkeit wird anschliessend über den Behälterdruck so angepasst, dass die optimale Anregungswellenzahl erreicht wird, entsprechend dem Kompromiss zwischen tiefer Wellenzahl, sprich hohem Tropfenabstand und der annehmbaren Schwankung des Tropfenabstandes.

Im zweiten Teil der Arbeit werden numerische Werkzeuge entwickelt und eingesetzt um die Strahlungs- und Debris-Eigenschaften des tropfenbasierten Plasmas zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird ein bestehender hydrodynamischer Simulationscode mit einem Strahlungstransportmodell erweitert, welches auf der Multigruppen-Diffusionsnäherung mit Flussbeschränkung basiert. Die Opazitäten und Emissivitäten, welche für die Lösung der Energiegleichungen der Elektronen und der Strahlungsenergiedichte erforderlich sind, werden mit Hilfe eines detaillierten numerischen Atommodells bestimmt. Das validierte strahlungshydrodynamische Programm (radiation hydrodynamic code, RHD) wird auf einen Referenzfall angewendet, welcher repräsentativ für die Betriebsbedingungen der EUV-Quelle der ETH Zürich ist. Das expandierende Plasma entwickelt eine ausgeprägte Anisotropie der räumlichen Verteilungen der Elektronendichte und Elektronentemperatur. Der Strahlungstransport vom Hochtemperaturkern des Plasmas zur Vakuumumgebung wird stark durch diese Anisotropie des Plasmas beeinflusst. Der Fluss der Ausserband- und der EUV-Strahlung nehmen von der Laserachse (0°) bis zur Richtung senkrecht zum Laserachse (90°) um 34%, beziehungsweise 61% ab. Die Quellengrösse wurde auf $100\ \mu\text{m}$ bestimmt. Ein Partikelcode, welcher auf den Particle-In-Cell und Direct Simulation Monte Carlo Methoden basiert, erweitert die Fähigkeiten des RHD Codes. Dieser hybride Simulationscode ermöglicht dann die Berechnung der Plasmaexpansion vom Tropfen bis zum EUV Kollektor der Lichtquelle. Die Partikel- und Geschwindigkeitsverteilungen am EUV Kollektor sind nicht homogen. Die Partikelverteilungen, sowie die Verteilungen der kinetischen Energie der Ionen können, zusammen mit den Abtragungsraten für Molybdän und Silizium benützt werden um die erwartete Lebensdauer des Kollektors abzuschätzen. Am äusseren Rand des Kollektors wird ein Verlust der Reflektivität von 10% nach zwei Stunden Betriebszeit vorausgesagt. Dies gesamte Lebensdauer liegt im Bereich von drei Stunden bei einer Betriebsfrequenz von 6 kHz und ohne Debrisschutz. Die Zinnablagerungen im Referenzfall liegen in der Grössenordnung von $10^{-3}\ \text{nm}$ pro Puls. Daraus wird der Schluss gezogen, dass ein hocheffizienter Debrisschutz benötigt wird um die Betriebsanforderungen der Quelle zu erfüllen.

Die Wahl des Tropfendurchmessers ergibt sich aus dem Kompromiss zwischen der annehmbaren Menge an Debris und der emittierten EUV Strahlung pro Puls. Der Zinntropfen wird bei einem Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ vollständig verdampft. Andererseits, ist die EUV Energie, welche pro Puls mit einem $10\ \mu\text{m}$ Tropfen erzeugt wird, rund 30 mal kleiner als bei einem $50\ \mu\text{m}$ Tropfen. Somit wären sehr hohe Betriebsfrequenzen notwendig um die erforderliche Leistung der EUV-Quelle zu erreichen. Die Interaktion zwischen dem expandierenden Plasma und dem nachfolgenden Tropfen wird als kritisches Problem eingestuft, da diese Interaktion zu einer Aufspaltung des nachfolgenden Tropfens führen kann. Die Tropfenabstände, welche typischerweise über den Rayleigh'schen Zerfall erzeugt werden liegen in diesem kritischen Bereich. Der grösste gemessene Abstand von 7.5 Tropfendurchmessern liegt an der Grenze der Fragmentierung des nachfolgenden Tropfens. Des Weiteren wird der Einfluss einer Falschrichtung des Lasersfokusses und des Tropfen auf die EUV Stabilität untersucht. Unter typischen Betriebsbedingungen führt eine Überlappung vom Laserfokus und Tropfen von 80% zu einem Abfall von 6%, beziehungsweise 8% der EUV Energie

pro Puls bei einer Laserleistungsdichte von 100 GW/cm^2 und 400 GW/cm^2 . In einem nächsten Schritt, werden die gemessenen lateralen Auslenkungen benützt um die Stabilität der EUV Dosis abzuschätzen. Die allgemeinen Anforderungen der EUV-Quellen sind erfüllt wenn die laterale Stabilität des Tropfenstrahles kleiner als 23% (3σ) des Tropfendurchmessers (bei einer Leistungsdichte des Lasers von 100 GW/cm^2) ist. Höhere Leistungsdichten erhöhen diese Grenze. Die gleichen Erkenntnisse sind gültig im Fall der Instabilitäten, welche durch Schwankungen des Tropfenabstandes hervorgerufen werden. Bei typischen Betriebsbedingungen beträgt der hochfrequente Anteil der lateralen Instabilität ein Tropfendurchmesser (3σ). Daraus ergibt sich bei einer Grösse des Laserbrennfleckes von $80 \mu\text{m}$ und einem Tropfendurchmesser von $50 \mu\text{m}$ eine Stabilität der EUV Dosis von 0.8%, beziehungsweise 0.3% für Leistungsdichten des Lasers von 100 GW/cm^2 und 400 GW/cm^2 .