

# Debris emission and mitigation of droplet-based laser-produced plasma sources

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Brandstätter, Markus

**Publication date:**

2020

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000450198>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 27001

**DEBRIS EMISSION AND MITIGATION OF  
DROPLET-BASED LASER-PRODUCED PLASMA  
SOURCES**

A thesis submitted to attain the degree of  
**DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH**  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented  
by

**Markus Brandstätter**  
MSc ETH ME  
born on August 14<sup>th</sup>, 1987  
citizen of Austria

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Reza S. Abhari  
Prof. Dr. Pádraig Dunne

2020

# Abstract

The work presented in this thesis is related to droplet-based laser-produced plasma light sources. The laser intensity on the target is optimized for light emission in the extreme-ultraviolet (EUV) spectral emission regime. EUV light is used in the semiconductor industry in state-of-the-art EUV lithography, metrology and inspection tools used to manufacture and inspect 7 nm technology nodes and smaller. A by-product of EUV light emission from plasma-based sources is expanding matter (debris) from the plasma region, including ion, neutral and micrometre-sized fragments. Debris emitted from the plasma region expands and interacts with sensitive functional surfaces, in particular with the EUV collection surfaces, to detrimental effect. Therefore, to optimize source run- and lifetime, which determine cost-of-ownership, it is fundamental to understand debris emission and provide means for its mitigation.

Debris emission in the lateral expansion direction from droplet-based Nd:YAG irradiated plasmas was studied in an angular range of  $50^\circ$  to  $130^\circ$  from the laser axis with radial probe distances  $r_p$  from 15 to 70 mm to the plasma ignition point at an ambient argon gas pressure of  $2 \times 10^{-2}$  mbar. The collected ion charge and expansion velocities were derived from the ion profiles. It was found that the collected ion charge  $Q$  around the droplet scales with  $Q \sim r_p^{-2}$  indicating that the main driving mechanism relates to the three-dimensional plasma expansion and not recombination processes. An anisotropic ion bulk expansion in the laser forward and backward propagation direction was deduced ranging from 29 km/s to 21 km/s, respectively. The gradients of the ion bulk expansion velocities along  $r_p$  were found to be constant within the error margin across the measurement range. The leading edge of the ion profiles showed an anisotropic behaviour around the droplet. The overall particle load in terms of sample particle-area-coverage was evaluated as a function of lateral angle in range of  $45^\circ$  to  $130^\circ$ . The particle load in lateral direction showed an exponential increase in surface coverage within increasing lateral angle relative to the laser axis.

The ion and EUV emission of droplet targets and their sensitivity with respect to lateral misalignments was studied experimentally using electrostatic probes and EUV energy monitors. Ions were studied with the electrostatic probes as a function of ion density  $n_i$  and ion kinetic energies  $E_{kin}$ . It was shown that when the EUV emission in lateral expansion at a lateral angle of  $60^\circ$  from the laser axis was optimized, the ion density and kinetic energy also increased. When maximising the EUV emission at  $\gamma = 60^\circ$  through a shift of the droplet by around 18% of the droplet diameter, the ion bulk kinetic energies at  $31^\circ$  and  $75^\circ$  also increased by 9% and 15%, respectively, with a small increase in ion density of around 3%. Intentional offset of the droplet target can result in higher EUV output for non-axisymmetric mirror configurations, at the expense of a higher ion load but a decreased load of droplet fragments. The ion kinetic energy showed a strongly anisotropic expansion behaviour by offsetting the droplet to the laser focus, where kinetic energies increased up to 60% in the lateral direction by offsetting the droplet by more than 0.5 droplet diameters for a lateral range of  $31^\circ$  to  $90^\circ$ . The ion density showed a more isotropic change with droplet offset, while maintaining a forward-peaked distribution.

The influence of different background gases on the ionic emission of Nd:YAG-irradiated droplet targets was studied experimentally with a spherical electrostatic analyser. A parametric variation of the static pressure in the range of  $p_s = 2 \times 10^{-2}$  mbar to  $p_s = 8 \times 10^{-2}$  mbar was performed at a mirror representative radial distance of 180 mm. The gases used for this study included the noble gases helium, neon, argon, krypton, and xenon, as well as the diatomic gas nitrogen. An inverse proportionality of the negative total ion number gradient with measured tin ion charge state was measured with increasing static pressure for helium, neon, argon and krypton, for which the singly charged tin ions  $\text{Sn}^{1+}$  experienced a stronger decrease in ion number than the higher-charge states. In particular, neon showed a strong decrease in singly-charged tin ions. This could imply an electronic stopping mechanism in ion reduction with increasing pressure. The reduction in measured ion charge states for the different ambient conditions were addressed qualitatively by calculating the collision mean free-path in the Landau-Zener framework. Qualitatively, a good agreement between the detected tin ion charge states and the predicted LZ trends were found. The different gases were evaluated on their suitability for LPP EUV light sources based on total tin ion kinetic energy and EUV transmission. Three of the considered gases, including argon, krypton, and nitrogen, appear to be interesting for the tested pressure regime. Nitrogen in particular showed an efficient reduction of tin ions.

A novel debris management concept, called a liner system, utilising a confined protective gas flow used to redirect, decelerate and entrain LPP generated debris, was developed. The system combines local high-momentum gas flow injections, flow guiding, and confinement surfaces, and was developed, characterized and tested under application-relevant conditions. The efficiency of its debris-mitigation capability was demonstrated in two experimental studies. First, a relative comparison between baseline operation and liner-integrated source operation was performed, in which samples were exposed at different critical locations. The surface coverage of the samples at a mirror representative position showed a reduction in particle-area coverage by a factor of 23. The non-line-of-sight optics in the laser-backward direction could be protected mainly through a trivial shadowing effect, and reduced the particle-area-coverage by a factor of 50. In a second study, a lifetime assessment of two mirror representative samples was performed in grazing incidence configuration at the two radial distances of 200 and 400 mm. After 14 hours of plasma exposure, the mirror samples at 200 and 400 mm distance showed a particle-area coverage of 1.5 and 0.1%, respectively. EUV reflectometry measurements showed no significant change in EUV after sample exposure. Considering particle coverage as the mode of failure, a reflectivity reduction of 10% is expected based on SEM measurements after 2.5 – 4.5 Gp for a GI mirror placed at 200 mm and 38 – 100 Gp for a GI mirror placed at 400 mm for the given experimental setup.



# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit tropfenbasierten laserproduzierte Plasma-Lichtquellen. Die Laserintensität auf dem Target ist für die Lichtemission im extrem ultravioletten (EUV) spektralen Emissionsbereich optimiert. EUV-Licht wird in der Halbleiterindustrie in hochmodernen EUV-Lithographie-, Mess- und Inspektionsanlagen verwendet, um «Node sizes» der 7 nm Technologie und darunter herzustellen und zu inspizieren. Ein Nebenprodukt der EUV-Lichtemission von Quellen auf Plasmabasis ist expandierendes Material (Debris) aus dem Plasmabereich, einschließlich Ionen, neutralen Teilchen und mikrometergrossen Fragmenten. Debris, die aus dem Plasmabereich emittiert werden, dehnen sich aus und interagieren mit empfindlichen Funktionsoberflächen, insbesondere den EUV-Spiegeloberflächen, mit schädlichen Auswirkungen. Um den Betrieb und die Lebensdauer der Quelle zu optimieren, ist es daher von grundlegender Bedeutung, die Belastung an Teilchenemission zu verstehen und Mittel zur Schadensminderung bereitzustellen.

Die Debrisemission in der lateralen Ausdehnungsrichtung von tropfenbasierten Nd:YAG-bestrahlten Plasmen wurde in einem Winkelbereich von  $50^\circ$  bis  $130^\circ$  von der Laserachse mit radialen Sondenabständen  $r_p$  von 15 bis 70 mm zum Plasmazündpunkt bei einem Umgebungsdruck des Argongases von  $2 \times 10^{-2}$  mbar untersucht. Die gesammelte Ionenladung und die Expansionsgeschwindigkeiten wurden aus den Ionenprofilen abgeleitet. Dabei wurde festgestellt, dass die gesammelte Ionenladung  $Q$  um den Tropfen mit  $Q \sim r_p^{-2}$  skaliert was darauf hinweist, dass der Hauptreduktionsmechanismus mit der dreidimensionalen Plasmaexpansion und nicht mit Rekombinationsprozessen zusammenhängt. Es wurde eine anisotrope Ionenmassenausdehnung in der Vorwärts- und Rückwärtsausbreitungsrichtung des Lasers im Bereich von 29 km/s bis 21 km/s abgeleitet. Die Gradienten der Ionenmassenausdehnungsgeschwindigkeiten entlang  $r_p$  erwiesen sich innerhalb der Fehlergrenze über den Messbereich als konstant. Die steigende Flanke des Ionenprofils zeigte ein anisotropes Verhalten um den Tropfen herum. Die Gesamtpartikelbelastung in Bezug auf die Partikelbelastung wurde als Funktion des lateralen Winkels im Bereich von  $45^\circ$  bis  $130^\circ$  ausgewertet. Die Partikelladung in lateraler Richtung zeigte eine exponentielle

Zunahme der Oberflächenbedeckung innerhalb eines zunehmenden lateralen Winkels, relativ zur Laserachse.

Die Ionen- und EUV-Emission von Tropfentargets und ihre Empfindlichkeit gegenüber lateralen Fehlrichtungen wurde experimentell mit elektrostatischen Sonden und EUV-Energiesensoren untersucht. Die Ionen wurden mit den elektrostatischen Sonden als Funktion der Ionendichte  $n_i$  und der kinetischen Ionenenergien  $E_{kin}$  untersucht. Es zeigte sich, dass durch die Optimierung der EUV-Emission bei lateraler Ausdehnung in einem lateralen Winkel von  $60^\circ$  zur Laserachse auch die Ionendichte und die kinetische Energie zunahm. Durch die Maximierung der EUV-Emission bei  $\gamma = 60^\circ$  und eine Verschiebung des Tropfens um etwa 18% des Tropfendurchmessers, erhöhten sich auch die kinetischen Energien des Ionenvolumens bei  $31^\circ$  und  $75^\circ$  um 9% bzw. 15%, bei einer geringen Zunahme der Ionendichte um etwa 3%. Ein absichtlicher Versatz des Zinntropfens kann zu einer höheren EUV-Leistung bei nicht achsensymmetrischen Spiegelkonfigurationen führen, was zwar zu einer höheren Ionenbelastung, aber eine geringere Belastung von Tropfenfragmenten führt. Die kinetische Energie der Ionen zeigte ein stark anisotropes Ausdehnungsverhalten durch Versetzung des Tropfens zum Laserfokus, wobei die kinetischen Energien durch Versetzung des Tropfens um mehr als 0.5 Tropfendurchmesser für einen lateralen Bereich von  $31^\circ$  bis  $90^\circ$  um bis zu 60% in lateraler Richtung zunahm. Die Ionendichte zeigte eine isotropere Änderung mit Tröpfchenversatz, wobei eine Verteilung mit Maximum in Laser-Vorwärtsrichtung beibehalten wurde.

Der Einfluss verschiedener Hintergrundgase auf die Ionenemission von Nd:YAG-bestrahlten Tropfentargets wurde experimentell mit einem halb-sphärischen elektrostatischen Detektor untersucht. Eine parametrische Variation des statischen Drucks im Bereich von  $p_s = 2 \times 10^{-2}$  mbar bis  $p_s = 8 \times 10^{-2}$  mbar wurde bei einem spiegelrepräsentativen radialen Abstand von 180 mm durchgeführt. Zu den für diese Studie verwendeten Gasen gehörten die Edelgase Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon sowie das zweiatomige Gas Stickstoff. Bei Helium, Neon, Argon und Krypton wurde mit steigendem statischen Druck eine inverse Proportionalität des negativen Gesamtionenzahlgradienten mit dem gemessenen Zinn-Ionen-Ladungszustand für Helium, Neon, Argon und Krypton gemessen, wobei die einfach geladenen Zinnionen  $\text{Sn}^{1+}$  eine stärkere Abnahme der Ionenzahl erfuhren als die höheren Ladungszustände. Insbesondere Neon zeigte eine starke Abnahme der einfach geladenen Zinnionen. Dies könnte auf einen elektronischen Brems-Mechanismus bei der Ionenreduktion mit steigendem Druck hindeuten. Die Verminderung der gemessenen Ionenladungszustände für die verschiedenen Umgebungsbedingungen wurde qualitativ durch die



Berechnung der mittleren freien Weglänge mit dem Landau-Zener-Modell untersucht. Qualitativ wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den detektierten Zinn-Ionen-Ladungszuständen und den vorhergesagten LZ-Trends gefunden. Die verschiedenen Gase wurden hinsichtlich ihrer Eignung für LPP-EUV-Lichtquellen auf der Grundlage der kinetischen Gesamtzinnionenenergie und der EUV-Transmission bewertet. Drei der betrachteten Gase, darunter Argon, Krypton und Stickstoff, scheinen für das getestete Druckregime interessant zu sein. Insbesondere Stickstoff zeigte eine effiziente Reduktion von Zinn Ionen.

Es wurde ein neuartiges Debrismanagementkonzept entwickelt, das als Liner-System bezeichnet wird um ein Schutzgas zur Umlenkung, Verlangsamung und zum Mitreißen von durch LPP erzeugten Debris verwendet wird. Das System kombiniert lokale Gasströmungsinjektionen mit hohem Impuls, Strömungsleit- und Begrenzungsflächen und wurde unter anwendungsrelevanten Bedingungen entwickelt, charakterisiert und getestet. Die Wirksamkeit der Debrisminderungsfähigkeit wurde in zwei experimentellen Studien nachgewiesen. Zuerst wurde ein relativer Vergleich zwischen dem Betrieb im Ausgangszustand und dem Betrieb mit integriertem Liner-System durchgeführt, bei dem Proben an verschiedenen kritischen Stellen exponiert wurden. Die Oberflächenbedeckung der Proben an einer spiegelrepräsentativen Position zeigte eine mittlere Verringerung der Partikel-Flächenbedeckung um den Faktor 23. Die Nicht-Liniensichtoptik in der Laser-Rückwärtsrichtung konnte hauptsächlich durch einen trivialen Abschattungseffekt geschützt werden und reduzierte die Partikel-Flächenabdeckung um den Faktor 50. In einer zweiten Studie wurde eine Lebensdauerbewertung von zwei spiegelrepräsentativen Proben in streifendem Einfall in den beiden radialen Abständen von 200 mm und 400 mm durchgeführt. Nach 14 Stunden Plasma-Exposition zeigten die Spiegelproben in 200 mm und 400 mm Abstand eine Partikel-Flächenbedeckung von 1.5 bzw. 0.1%. EUV-Reflektometrie-Messungen zeigten keine signifikante Veränderung der EUV nach der Proben-Exposition. Unter Berücksichtigung der Partikelbedeckung als Versagensart wird auf der Grundlage von REM-Messungen nach 2.5 – 4.5 Gp für einen GI-Spiegel in 200 mm Entfernung und 38 - 100 Gp für einen Spiegel im streifenden Einfall in 400 mm Entfernung für den gegebenen Versuchsaufbau eine Verringerung des Reflexionsvermögens um 10% erwartet.