

Ministry of Higher Education

and Scientific Research

University of Baghdad

Institute of Laser for Postgraduate Studies



INVESTIGATION OF A LASER ASSISTED VACUUM ARC RADIATION SOURCE OF LIQUID TIN IN THE EUV SPECTRAL RANGE

A thesis

**Submitted to the Institute of Laser for Postgraduate Studies /
University of Baghdad in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy in Laser Physics**

By

Wissam Hasan Mahdi Al-Agele

Supervised by

Prof. Dr. Khalil Ibrahim Hajim

Muharram - 1435 AH

Nov. - 2013 AD

Abstract

An investigation was undertaken of the dependence of extreme ultraviolet emission (EUV), at 13.5 nm -from Laser Assisted Vacuum Arc (LAVA) source based on Z-pinch plasma formed from laser ablation of liquid tin, on the incident laser pulse energy at different discharge energies. In this source the laser ablates a thin liquid metal film that covers cathode to trigger high-current discharge between two rotating electrodes. For these experiments the focused spot size and pulse width remained constant at 300 μm and 15 ns respectively, while the energy of the incident laser pulse was varied.

The EUV emission energy into 2% bandwidth around 13.5 nm (in-band region) into ($2\pi\text{sr}$) was recorded. It was found that for fixed discharge energy (E_d), the laser pulse energy (E_{laser}) had a strong effect on the discharge dynamics and pinching stability. At fixed E_d , an optimum value of E_{laser} was found for which maximum EUV emission energy is obtained. The EUV energy increases with increasing E_d for a given value of E_{laser} . The highest in-band energy recorded was 8.3 mJ at E_{laser} of 50 mJ and capacitor voltage V_C of 6 kV, while the maximum conversion efficiency (CE) recorded was 0.114 % that was obtained at $E_{\text{laser}}=25$ mJ for $E_d=3.2$ J ($V_C=4\text{kV}$).

The time evolution of the discharge current has been studied and recorded. The current pulse duration was observed to be on the order of ~ 350 ns. It is worth mentioning that the EUV signal commencement was after the maximum current. The lifetime of the pinch is on the order of $\sim 20\text{ns}$ and the EUV photodiode signal has a full width of roughly 200 ns. The time delay between the onset of the discharge and pinch phase increases from about ~ 140 ns at $E_{\text{laser}}=25$ mJ to ~ 180 ns at $E_{\text{laser}}=85$ mJ. The efficient EUV production was occurred when the pinch phase time matches to the maximum discharge current and was sensitive to the trigger E_{laser} . So, the optimal laser pulse energy was $E_{\text{laser}}=25$ mJ.

The Out-Of-Band (OOB) radiation in the region (150-1100) nm that causes side effect on optics components and wafer was measured using two spectrographs. The OOB emission larger than 300 nm increases at a higher rate as a function of discharge energy, as compared to in-band emission. By excluding the lowest E_d , the minimum relative intensity of OOB emission

was obtained at $E_d = 3.2$ J ($V_c = 4$ kV). For OOB lower than 300 nm, the relative intensity decrease exponentially with increasing E_{laser} .

The theoretical calculations of electronic transitions probabilities in Sn are achieved with Cowan suite of codes. A spectrum of Sn in the region around 13.5 nm arises from transitions in Sn ions with the 4d electrons. The stages that contribute most at 13.5 nm are Sn^{8+} through Sn^{12+} . The most intense lines in array shift to shorter wavelengths with increasing ionization stage.

The spatial and temporal plasma hydrodynamics within laser produced plasma are modeled using MED103 code to determine the optimum parameters of ignition plasma. At the laser power density 2.2×10^9 W/cm², the velocity and the electron density are about 0.35×10^6 cm/sec and 2.4×10^{18} cm⁻³ respectively at ~ 0.5 mm near cathode (pinch region).



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بغداد

معهد الليزر للدراسات العليا

دراسة مصدر اشعاع قوس التفريغ الكهربائي المعزز بالليزر من القصدير الساكن في المدى الطيفي للأشعة فوق البنفسجية القصوى

رسالة مقدمة الى

معهد الليزر للدراسات العليا / جامعة بغداد وهي جزء من متطلبات نيل درجة
الدكتوراه في فيزياء الليزر

من قبل

وسام حسن مهدي العجيلي

اشراف

أ.د. خليل ابراهيم حاجم

نشرين الثاني - 2013 م

محرم - 1435 هـ

الخلاصة

تم اجراء دراسة في اعتماد انبعاث الأشعة فوق البنفسجية القصوى (EUV) ، عند الطول الموجي 13.5 نانومتر - من قوس التفريغ الكهربائي المدعم بالليزر (LAVA) المعتمد على بلازما القرص المحوري (Z-pinch) التي شكلت من التذرية الليزرية لسائل القصدير- ، على طاقة نبضة الليزر الساقطة عند طاقات تفريغ كهربائي مختلفة. في هذا المصدر يذري الليزر طبقة رقيقة للمعدن السائل الذي يغطي القطب السالب لفتح تفريغ التيار العالي بين قطبين دوارين . لهذه التجارب ظل حجم بقعة التبور و عرض النبضة ثابتا عند 300 مايكرون و 15 نانوثانية على التوالي ، في حين تم تغيير طاقة نبضة الليزر الساقطة .

سجلت طاقة انبعاث ال (EUV) ضمن 2% من عرض الحزمة حول الطول الموجي 13.5 نانومتر (منطقة داخل الحزمة) ضمن 2π sr). وقد وجد أن لطاقة تفريغ كهربائي ثابتة (E_d)، فان طاقة نبضة الليزر (E_{laser}) لها تأثير قوي على ديناميكية التفريغ و استقرارية القرص. عند (E_d) ثابتة، يمكن ايجاد قيمة مثلى ل E_{laser} التي لها اقصى انتاج للأشعة فوق البنفسجية الشديدة يتم الحصول عليها. تزداد طاقة انبعاث ال (EUV) مع زيادة ال (E_d) لقيمة معينة من ال (E_{laser}). وكانت أعلى طاقة مسجلة للأشعة في منطقة داخل الحزمة هي 8.3 ملي جول التي تم الحصول عليها في $E_{laser} = 50$ ملي جول و $V_c = 6$ كيلو فولت، في حين أن كفاءة التحويل القصوى (CE) المسجلة هي 0.114% والتي تم الحصول عليها في $E_{laser} = 25$ ملي جول ل $E_d = 3.2$ جول ($V_c = 4kV$).

وقد تمت دراسة و تسجيل التطور الزمني لتيار التفريغ الكهربائي. ولوحظ ان نبضة التيار كانت حوالي 350 نانوثانية . ومن الجدير بالذكر أن بدء إشارة ال (EUV) كان بعد القيمة العظمى لنبضة للتيار. ان عمر القرص كان حوالي 20 نانوثانية وان العرض الكامل لإشارة كاشف الصمام الثنائي للأشعة فوق البنفسجية القصوى كان تقريبا 200 نانوثانية. ان التأخير الزمني بين بداية التفريغ و مرحلة القرص يزداد من نحو ~ 140 نانوثانية في $E_{laser} = 25$ ملي جول إلى ~ 180 نانوثانية في $E_{laser} = 85$ ملي جول. ان الإنتاج الكفوء للأشعة فوق البنفسجية القصوى يتم حدوثه عندما يتطابق وقت طور القرص مع أقصى تيار تفريغ و كان حساسا لطاقة ليزر الفتح. كانت امثل طاقة لنبضة الليزر $E_{laser} = 25$ ملي جول.

تم قياس (OOB) الإشعاع خارج النطاق في المنطقة (150-1100) نانومتر التي تسبب الآثار الجانبية على العناصر البصرية والرقاقة باستخدام جهاز مطياف. يزداد انبعاث OOB الأكبر من 300 نانومتر بمعدل أعلى كدالة لطاقة التفريغ الكهربائي، بالمقارنة مع الانبعاثات داخل نطاق الحزمة. من خلال استبعاد القيمة الدنيا ل (E_d)، فان الحد الأدنى من الشدة النسبية لل OOB كان ل $E_d = 3.2$ جول ($V_c = 4kV$). ان الشدة النسبية لأشعة OOB أقل من 300 نانومتر تنخفض بشكل اسي مع زيادة E_{laser} .

انجزت الحسابات النظرية لاحتماليات الانتقالات الالكترونية في القصدير مع مجموعة برامج كوان. ان طيف القصدير في المنطقة المحيطة للطول الموجي 13.5 نانومتر تنشأ من الانتقالات في أيونات القصدير للإلكترونات المستوي 4d. مراحل التآين التي تسهم أكثر من غيرها في 13.5 نانومتر هي ^{8+}Sn مروراً إلى ^{12+}Sn . ان الخطوط الأكثر شدة في الحزمة ترحف نحو الاطوال الموجية الأقصر مع زيادة مرحلة التآين.

تمت نمذجة معلمات البلازما الهيدروديناميكية مكانيا وزمانيا خلال البلازما المنتجة بالليزر مستخدما برنامج MED103 لتحديد المعلمات الأمثل لبلازما القذح. عند كثافة قدرة الليزر 2.2×10^9 واط/سم²، فإن سرعة وكثافة الإلكترون هي حوالي 0.35×10^6 سم / ثانية و 2.4×10^{18} سم³ على التوالي عند حوالي 0.5 ملم بالقرب من القطب السالب (منطقة القرص).