



EUV/Soft X-rays: le sorgenti da plasma EGERIA & DPP

S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Torre^(*)

ENEA, FSN-FUSPHY-SAD, Frascati (RM)

() ENEA, FSN-FUSPHY-TSM, Frascati (RM)*



Radiazione per l'Innovazione 2015 - 12-13 Ottobre 2015, LNF-INFN e CR-ENEA Frascati

EUV e Soft X-Rays



- EUV = Estremo UltraVioletto

$$\lambda \sim \in [4.4, 62] \text{ nm} \leftrightarrow h\nu \sim \in [20, 280] \text{ eV},$$

di particolare interesse l'intervallo intorno a $\lambda=13.5$ nm ($h\nu \sim 92$ eV) per applicazioni in microlitografia

- Soft X-Rays

$$\lambda \sim \in [0.2, 4.4] \text{ nm} \leftrightarrow h\nu \sim \in [0.28, 6.2] \text{ keV},$$

di particolare interesse l'intervallo, detto *water window*, tra la soglia K dell'ossigeno a 2.34 nm (530 eV) e quella del carbonio a 4.4 nm (280 eV) per la microscopia in vivo ad alta risoluzione spaziale.



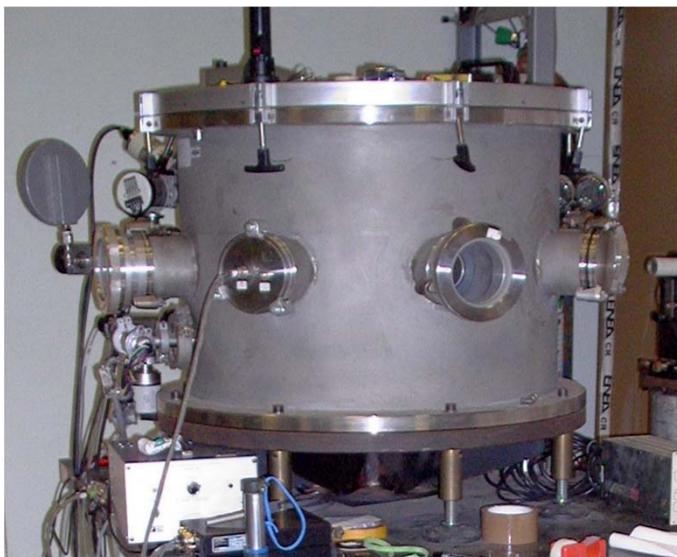
EUV e Soft X-Rays



- In questi intervalli spettrali i fotoni interagiscono a livello atomico e, soprattutto nel caso dell'EUV, sono fortemente assorbiti da quasi tutti gli elementi → necessità di operare in vuoto.
- L'interesse è suscitato dall'esistenza di specchi *multilayer* ad alta riflettività ad incidenza normale per gli intervalli intorno a 13.5 nm ($R_{\text{Mo/Si}} \sim 70\%$), tra 6 e 7 nm (BEUV, $R_{\text{LaN/B}} \sim 50\%$) e nella *water window* ($R_{\text{Sc/Cr}} \sim 10-20\%$)
- Parametri di plasma: $T_e \sim 30-200$ eV - Densità $\sim 10^{16}-10^{20}$ e⁻/cm³
- Questo comporta la necessità di alte densità di potenza in ingresso, siano esse ottiche o elettriche: nel primo caso si hanno le sorgenti da plasmi prodotti con laser (LPP), concentrando la potenza del fascio su opportuni bersagli; il secondo caso riguarda i plasmi prodotti da scarica (DPP), in cui la concentrazione della potenza elettrica, e quindi termica, si ottiene grazie all'effetto di costrizione della scarica stessa.



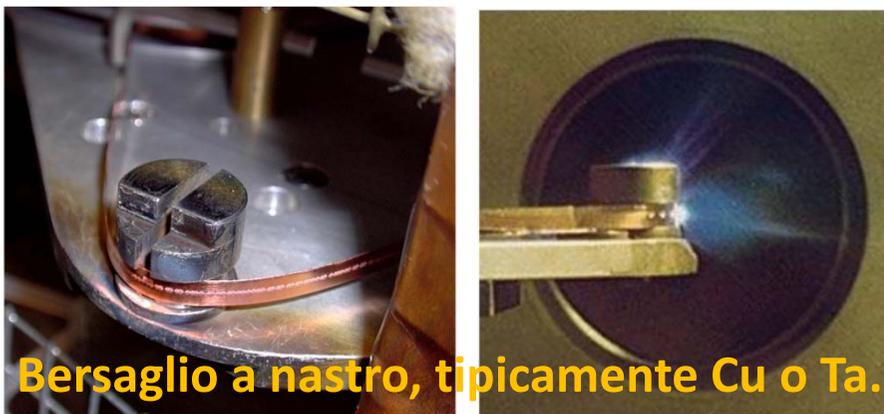
1 - Sorgente LPP EGERIA



Camera da vuoto di EGERIA



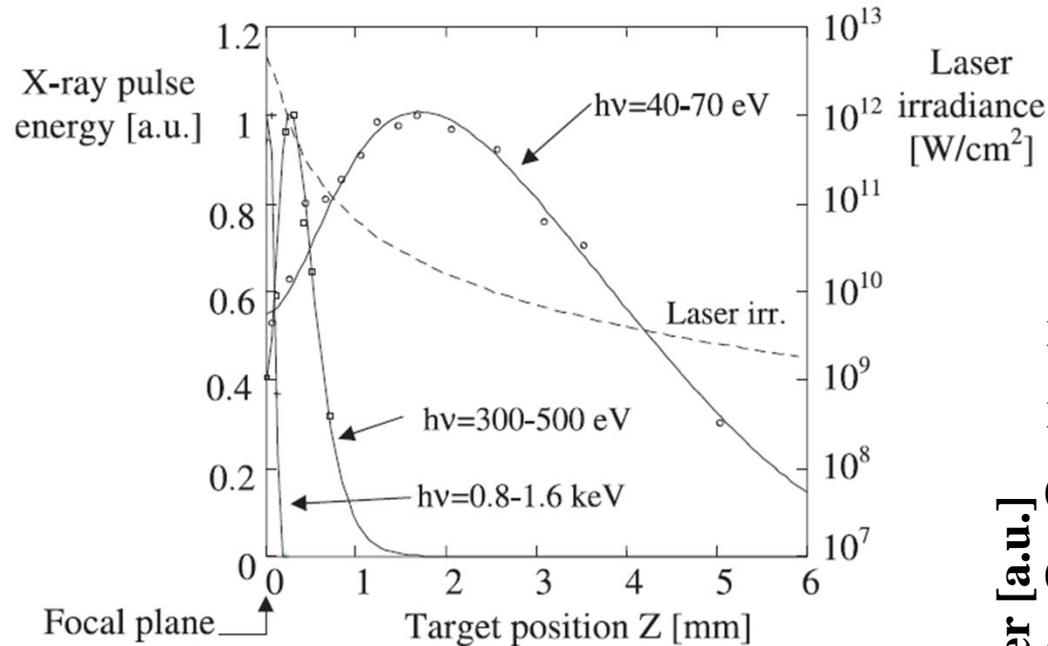
I due laser a XeCl ($\lambda=308$ nm) utilizzati per la creazione del plasma di EGERIA



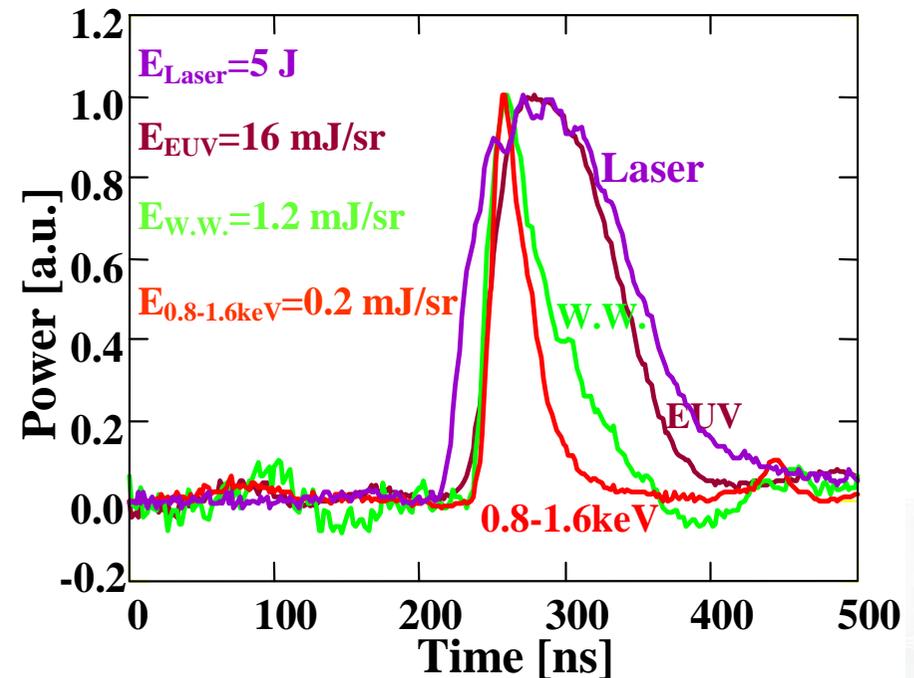
Bersaglio a nastro, tipicamente Cu o Ta.

	LPX 305 Pro	HERCULES
Energia[J]	0.5	5
Durata [ns]	30	120
Freq. [Hz]	50	5

1 - Sorgente LPP EGERIA



Evoluzione temporale dell'impulso laser di HERCULES e della radiazione emessa dalla sorgente EGERIA con bersaglio di rame (spessore 100 μm) in diverse regioni spettrali



Variando la distanza della lente dal bersaglio si varia la dimensione dello spot e quindi l'intensità del laser \rightarrow si può ottimizzare l'emissione del plasma in diverse regioni spettrali



1 - Sorgente LPP EGERIA+MET



MET = Micro-Exposure Tool , ossia apparato per microlitografia in proiezione nell'EUV a $\lambda=14.4$ nm



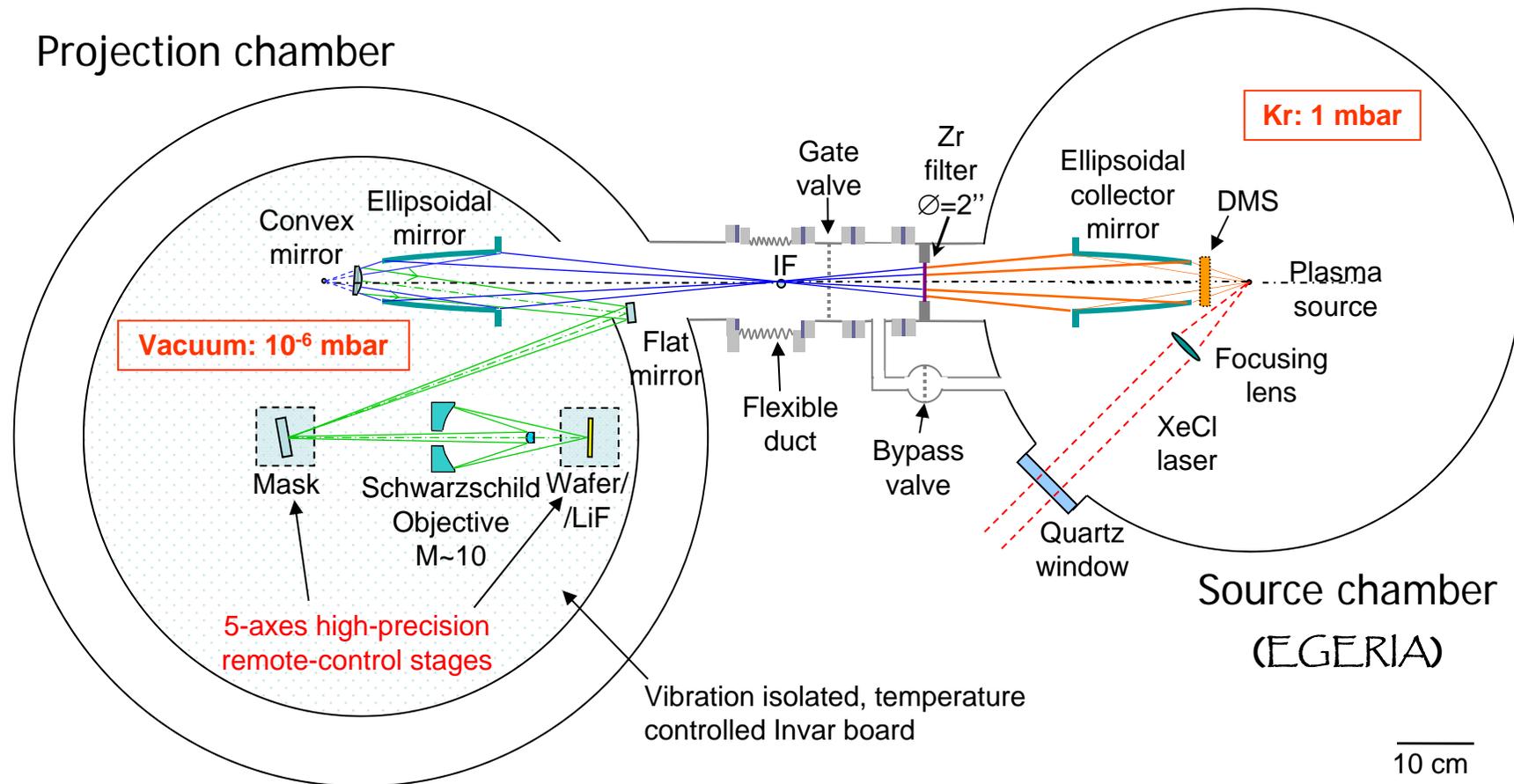
Progetto FIRB (cod. RBNE01ABPB, 2003-2008) «Prototipo per nanofabbricazione di chip per elettronica e di dispositivi per optoelettronica basato su microlitografia EUV»

1 - Sorgente LPP EGERIA+MET



MET = Micro-Exposure Tool, ossia apparato per microlitografia in proiezione nell'EUV a $\lambda=14.4$ nm

Projection chamber

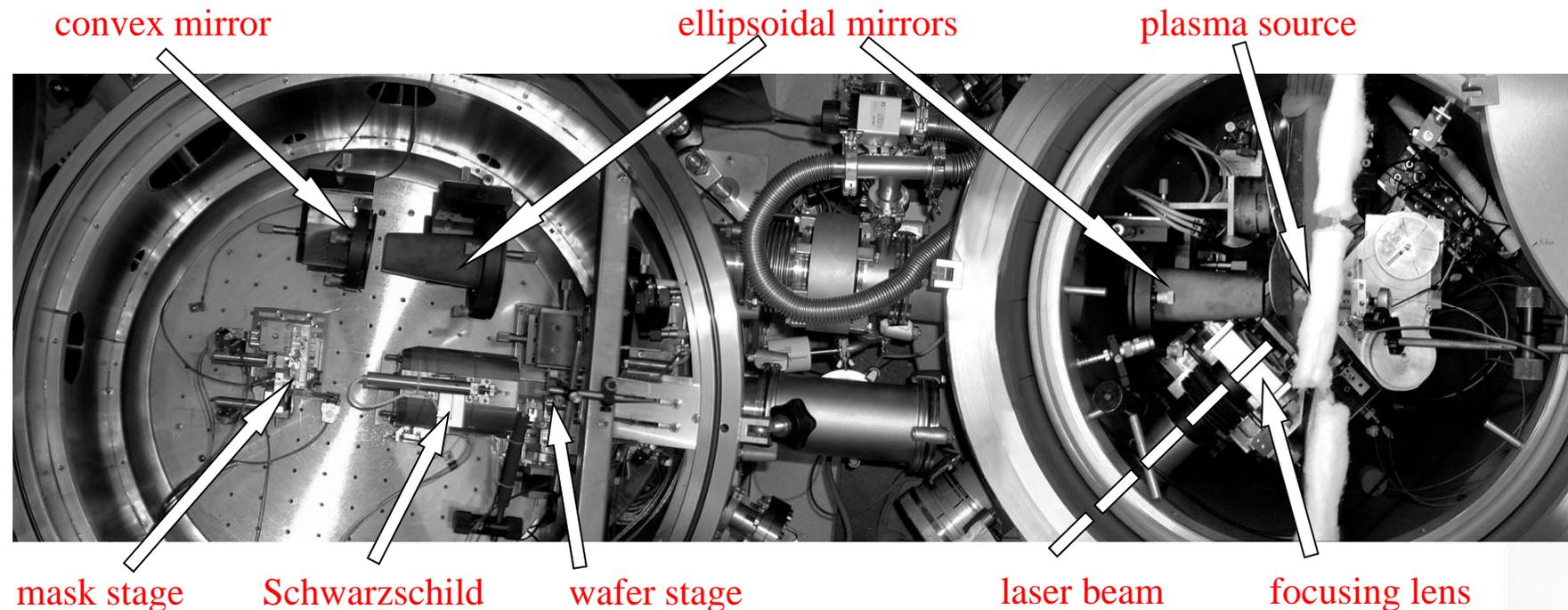


Progetto FIRB (cod. RBNE01ABPB, 2003-2008) «Prototipo per nanofabbricazione di chip per elettronica e di dispositivi per optoelettronica basato su microlitografia EUV»

1 - Sorgente LPP EGERIA+MET



MET = Micro-Exposure Tool , ossia apparato per microlitografia in proiezione nell'EUV a $\lambda=14.4$ nm

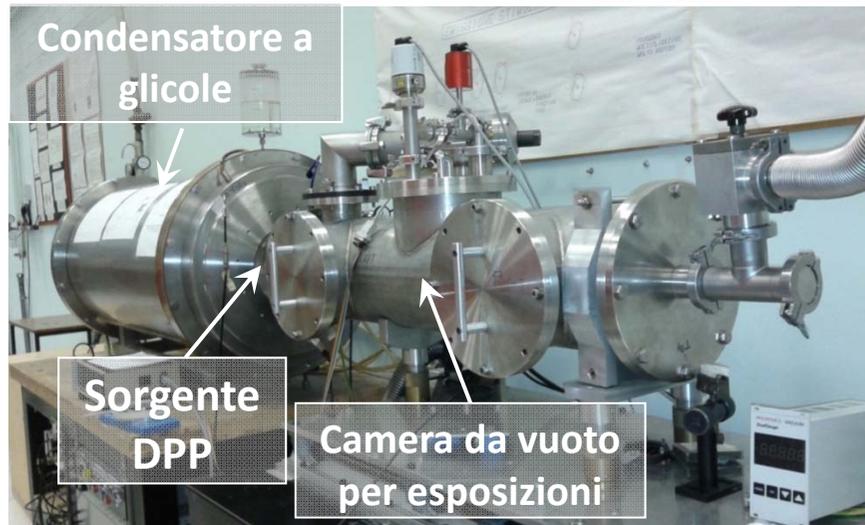


Fondamentale la messa a punto di un sistema di mitigazione dei detriti emessi dalla LPP basato sull'uso di krypton a bassa pressione e di un sistema meccanico: Progetto Integrato «More Moore» nel VI Programma Quadro.



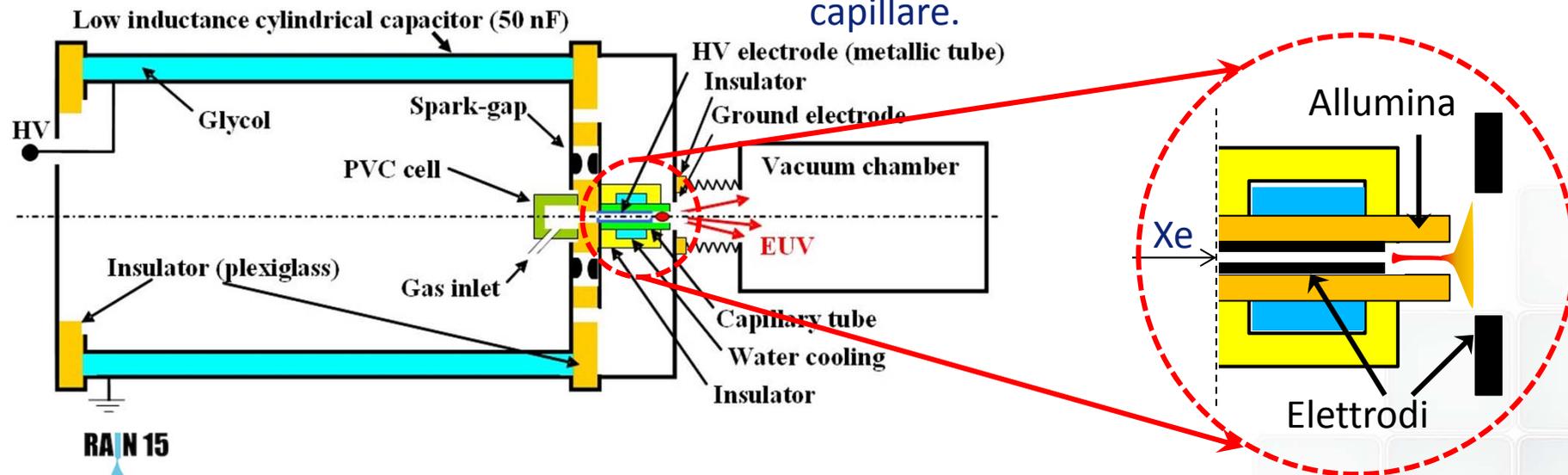
Progetto FIRB (cod. RBNE01ABPB, 2003-2008) «Prototipo per nanofabbricazione di chip per elettronica e di dispositivi per optoelettronica basato su microlitografia EUV»

2 – Sorgente DPP

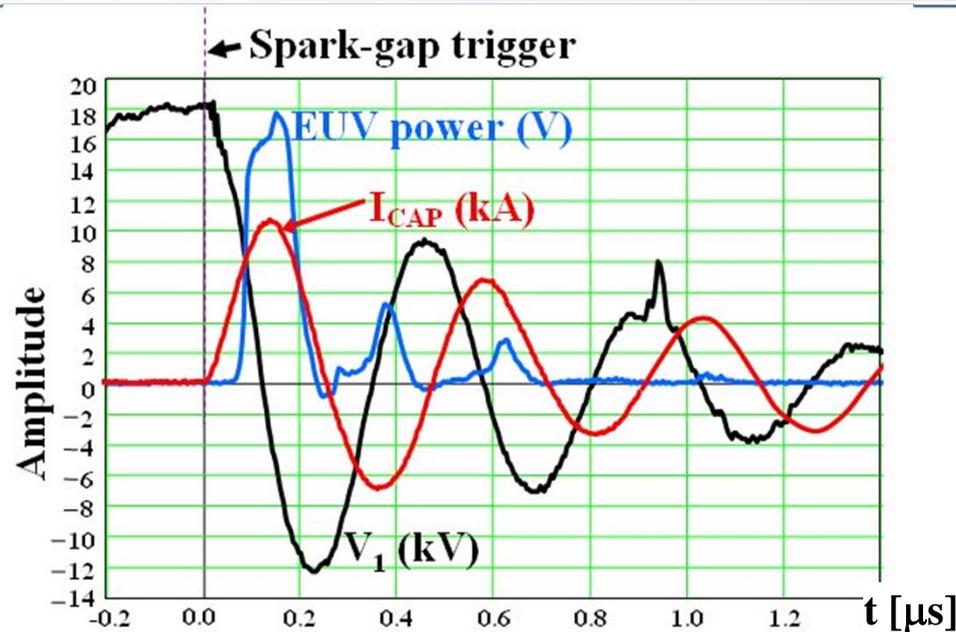


Nella sorgente DPP un condensatore a glicole a bassa induttanza (50 nF) caricato a $V \approx 20$ kV viene rapidamente scaricato attraverso una spark-gap sull'elettrodo ad alta tensione. Quest'ultimo è un tubicino metallico parzialmente inserito in un capillare di allumina, attraverso il quale fluisce il gas xenon a bassa pressione (0.5–1.0 mbar). E' in quest'ultimo quindi che si sviluppa la scarica verso l'elettrodo di massa di forma anulare posto al termine del capillare.

Schema meccanico della DPP



2 – Sorgente DPP



EUV emission band	10-20 nm
In-band pulse energy	20 mJ/shot/sr
EUV pulse duration	100 ns
EUV source transverse size	0.3 mm
Repetition rate	10 Hz
Energy stability	\approx 4% rms
Usable emission solid angle	\approx 1 sr

V_1 = tensione del condensatore a glicole; I_{CAP} = corrente di scarica; EUV power = segnale del PIN diode filtrato da Zr spesso 150 nm per la selezione dell'intervallo 10-20 nm.

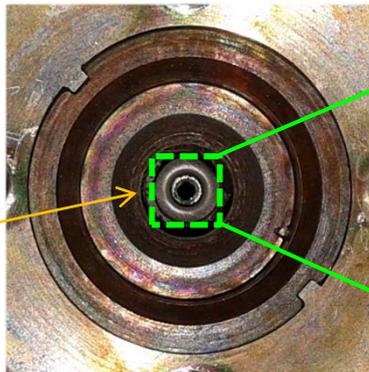
Dopo una fase di preionizzazione a bassa corrente (20–30 A per \approx 2 μ s), la scarica principale (corrente di picco 11 kA, semiperiodo 240 ns) porta alla formazione di un plasma ad alta temperatura, che, grazie all'intenso campo magnetico generato ($>$ 1 T alla superficie del capillare), collassa radialmente verso l'asse del capillare. Di conseguenza si ha un aumento sia della resistenza del plasma che della sua temperatura, che raggiunge i 30–40 eV, ottimali per l'emissione nell'EUV.



2 – Sorgente DPP

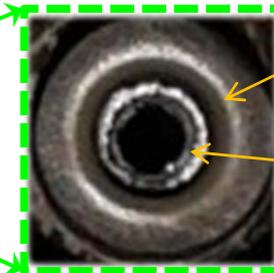
Vista longitudinale
della zona di scarica

Elettrodo
di massa

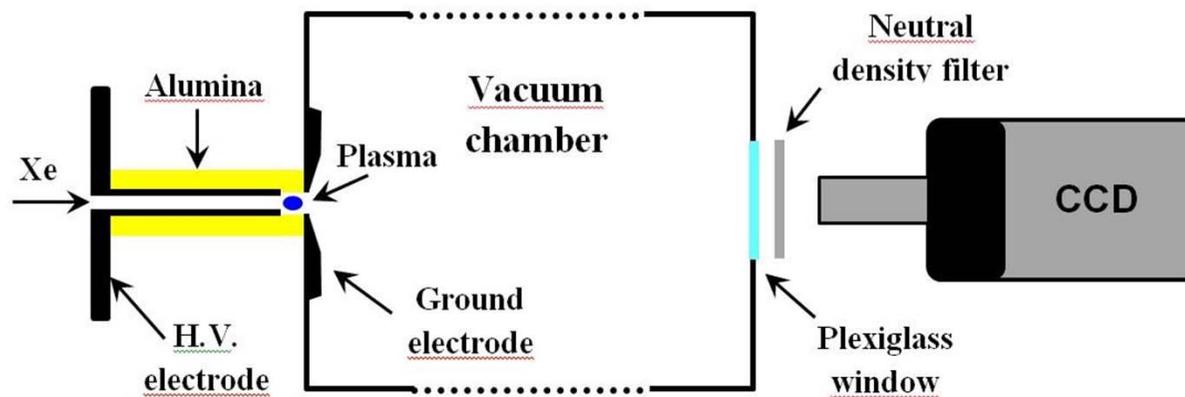


Allumina

Elettrodo ad
alta tensione



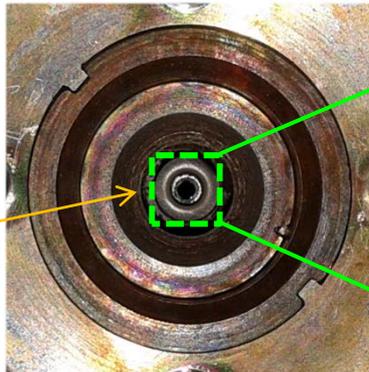
Evoluzione della scarica
nel visibile



2 – Sorgente DPP

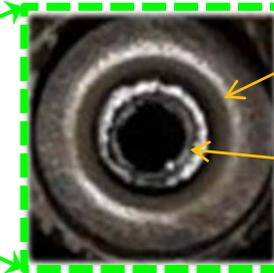
Vista longitudinale della zona di scarica

Elettrodo di massa



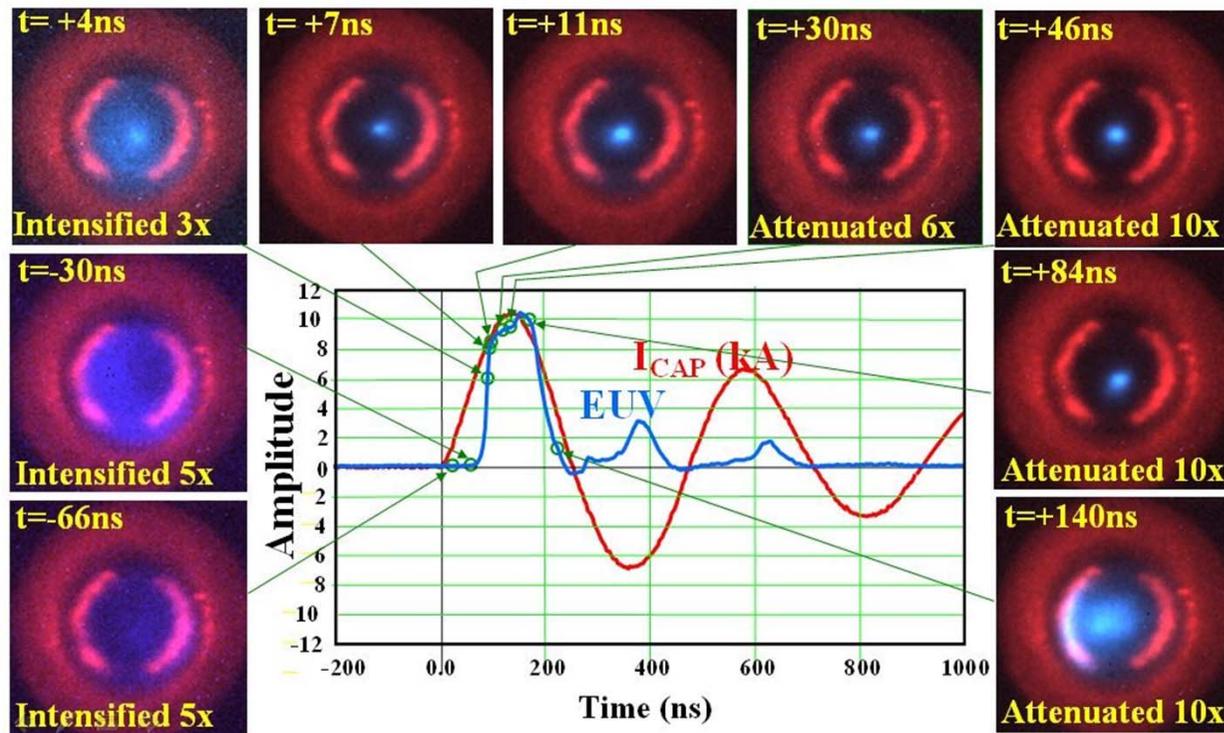
Allumina

Elettrodo ad alta tensione



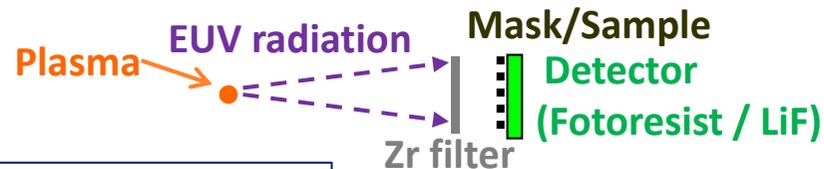
Evoluzione della scarica nel visibile

Immagini in falsi colori dell'emissione visibile del plasma a diversi ritardi dalla salita dell'impulso EUV, con gate temporale di 20 ns

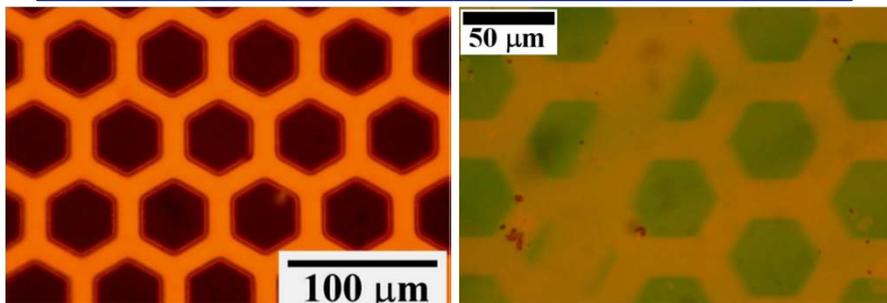


3 – Applicazioni dell'EUV

Esposizioni a contatto con DPP



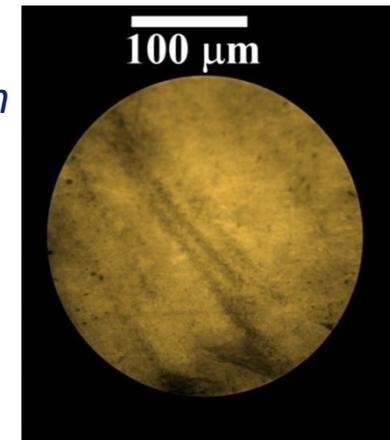
Studio di materiali innovativi per nanopatterning e nanofabbricazioni (Progetto CARIPLO, 2013-2015)



Maschera (a sin): griglia di rame (400 fori/inch)
Fotore Resist (a dx) caricato con Titania con la riproduzione della maschera (visibile l'ombra di un filo di Ni di supporto del filtro di Zr).
(Collab. con CNR-IFN di Roma per maschere innovative in trasmissione)

Radiografia di film sottili

Radiografia EUV di un filtro di Al spesso $0.8 \mu\text{m}$ su cristallo di LiF con DPP. L'osservazione al microscopio a fluorescenza (50x) ne mostra le irregolarità.



L'EUV genera nel LiF centri di colore stabili che possono essere osservati con un microscopio a fluorescenza.
Collaborazione con il Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica dell'ENEA.

3 – Applicazioni dell'EUV

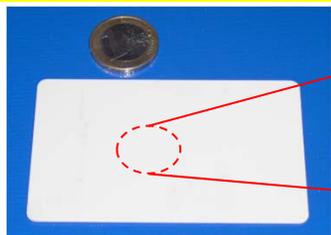
Microlitografia per anticontraffazione

La ricopertura di etichette/oggetti con film di LiF trasparenti ed il successivo irraggiamento tramite maschera con opportune dosi di radiazione EUV creano marcature invisibili che sono rivelabili solo tramite opportuna illuminazione.

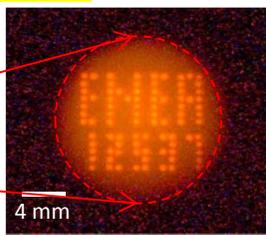
Oggetti/Documenti per l'identificazione



Mask



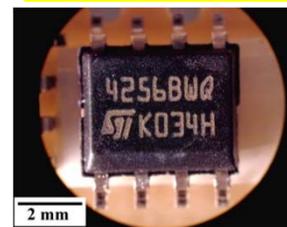
Visible light image



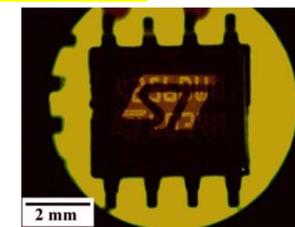
Fluorescent image



Mask



Visible light image



Fluorescent image

Prodotti farmaceutici



RAIN 15



Beni di lusso



Rifiuti pericolosi



3 – Applicazioni dei soft X-Rays



Microradiografia: esempio di ala di zanzara su LiF

Sorgente: ENEA LPP EGERIA

Intensità laser $I_L = 10^{13}$ W/cm²

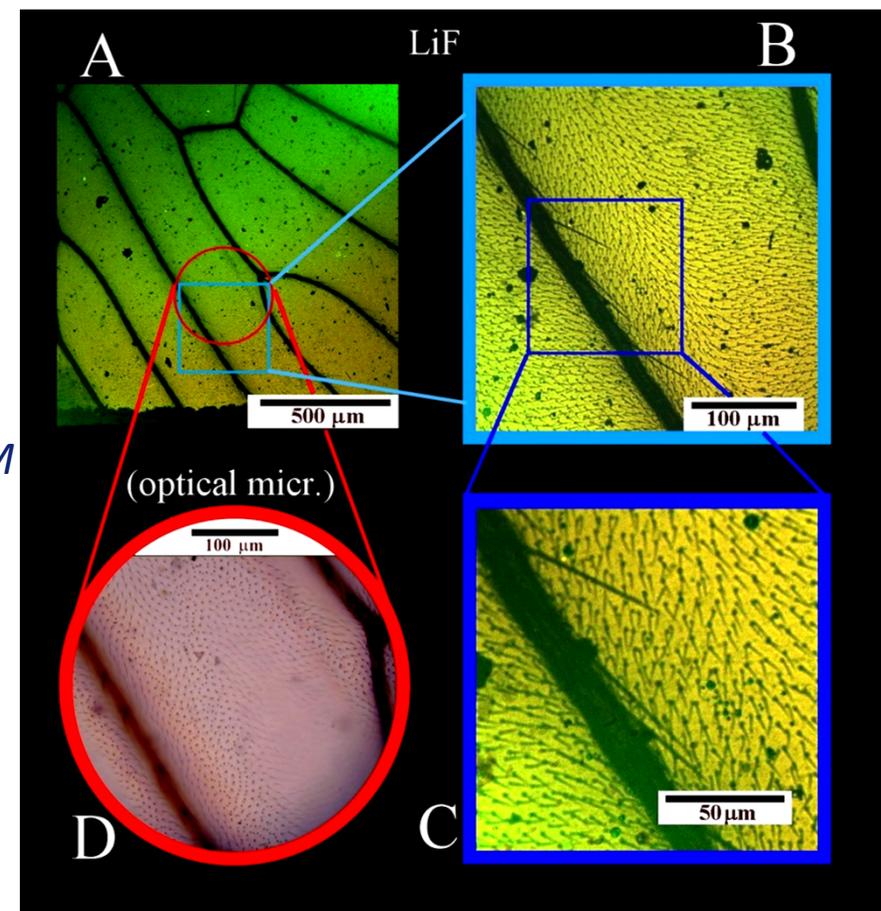
Target: Cu

Distanza dalla sorgente: 10 cm

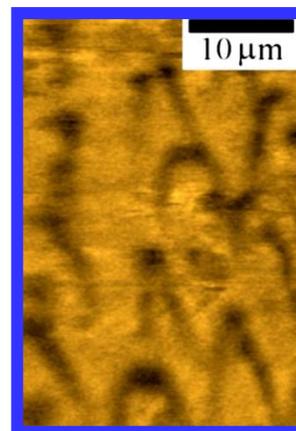
Numero di colpi: 1000

Esposizione: 400 mJ/cm²

Letture al microscopio confocale: A) 10x; B),C) 40x; D) Lettura al microscopio ottico



Prova di lettura con SNOM



Attività in collaborazione con il Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica dell'ENEA



3 – Applicazioni dell'EUV

Microlitografia in proiezione → microelettronica

EGERIA+MET (Progetto FIRB)

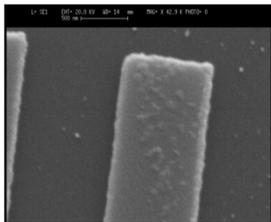


Immagine SEM del bordo di una linea da 1 μm

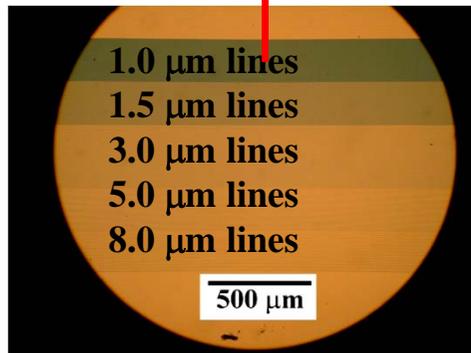
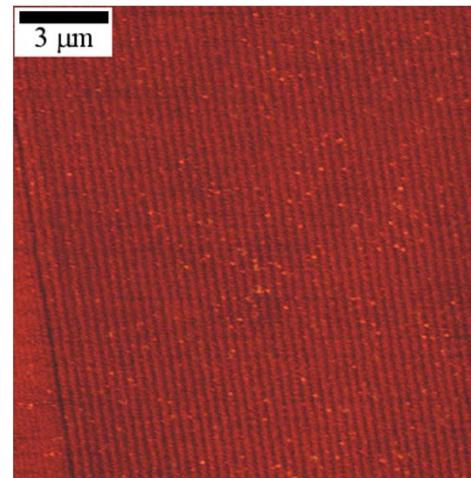
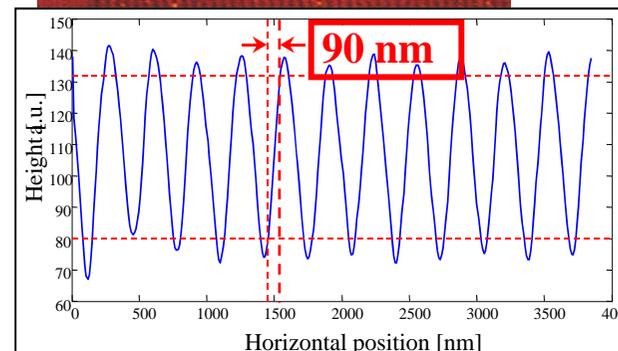
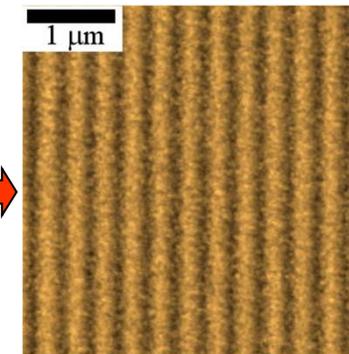


Immagine al microscopio ottico di una maschera in riflessione a 14.4 nm sviluppata dal CNR-IFN di Roma con righe di diversi periodi



AFM-Riproduzione di righe da 160 nm su fotoresist PMMA



Conclusioni



- Nel Centro ENEA di Frascati (FUSPHY-SAD) sono operative due sorgenti a plasma: LPP, regolabile spettralmente, con dimensione sorgente fino a $30 \mu\text{m}@h\nu=1 \text{ keV}$ DPP, per ora limitata all'EUV, ma più potente della LPP
- Entrambe le sorgenti sono già state applicate in diversi campi: litografia, studio di nuovi materiali, microscopia/microradiografia, anticontraffazione, ecc.
- Grazie ad un progetto FIRB (MIUR, 2003-2008), la LPP EGERIA è stata arricchita del MET per litografia in proiezione: con la sua scala *table-top* e la sua risoluzione $\sim 100 \text{ nm}$, ha le sue più immediate applicazioni in metrologia e test di nuovi fotoresist di interesse per la microelettronica.
- La realizzazione di strutture a scala nanometrica sia su fotoresist che su materiali fluorescenti è di interesse rispettivamente in nanobiotecnologia ed in fotonica.
- Si ringrazia la Fondazione Cariplo per il finanziamento del progetto “*New materials for direct nanopatterning and nanofabrication by EUV and soft X-rays exposures*”, con partners le Università di Pavia (coord.) e Padova (2013-2015).
- Si ricorda la pluriennale collaborazione con il Dip. di Fisica dell'Università dell'Aquila nelle fasi iniziali di sviluppo delle sorgenti.
- **Il Laboratorio SAD (Sorgenti, Antenne e Diagnostiche) sarebbe HAPPY di trovare altre collaborazioni/applicazioni per le proprie sorgenti.**

