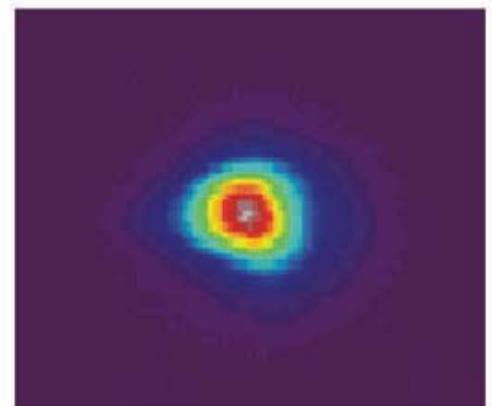
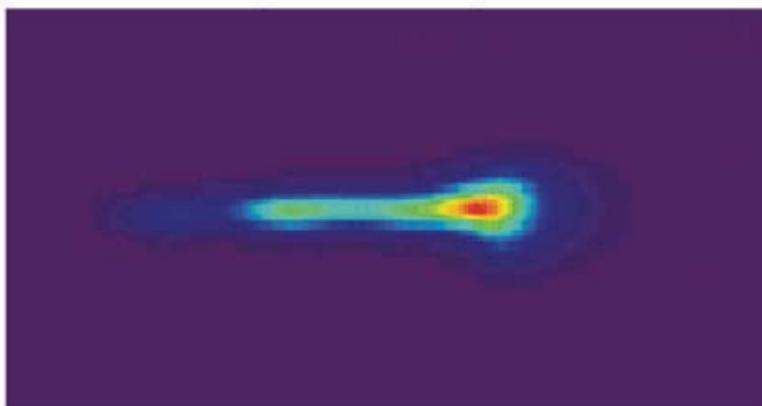


**Sebastian Kranzusch**

---

**Erzeugung und Charakterisierung  
laser-induzierter Plasmen im  
extrem-ultravioletten  
Spektralbereich**

---



**Cuvillier Verlag Göttingen**

# Erzeugung und Charakterisierung laser-induzierter Plasmen im extrem-ultravioletten Spektralbereich

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten

der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

**Sebastian Kranzusch**

aus Bremen

Göttingen 2002

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2003  
Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2002  
ISBN 3-89873-690-3

D 7

Referent: Professor Dr. G. Marowsky

Korreferent: Professor Dr. G. Schmahl

Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2003

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2003  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2003

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89873-690-3



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Motivation / Zielsetzung . . . . .	3
2.2	Laser-Plasma Quelle . . . . .	9
2.2.1	Theorie der Laserplasmaerzeugung . . . . .	9
2.2.2	Wechselwirkung von Laserstrahlung mit einem Plasma . . . . .	10
2.2.3	Emission aus einem Plasma . . . . .	15
2.2.4	Targetkonzepte . . . . .	17
2.3	Optiken für den EUV-Wellenlängenbereich . . . . .	20
2.3.1	Transmissionsoptiken . . . . .	20
2.3.2	Reflektive Optiken . . . . .	24
2.4	EUV-Analytik . . . . .	29
2.4.1	Spektrale Filterung . . . . .	29
2.4.2	Strahlanalyse . . . . .	32
2.4.3	Optikcharakterisierung . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Experimenteller Aufbau zur Erzeugung und Charakterisierung extrem-ultravioletter Strahlung</b>	<b>37</b>
3.1	Erzeugung des EUV-Plasmas . . . . .	37
3.2	Düsengeometrien . . . . .	40
3.2.1	Zylindrische Düse . . . . .	40
3.2.2	Doppelstrahldüse . . . . .	41
3.2.3	Konische Düse . . . . .	42
3.3	Lochkamera . . . . .	43
3.3.1	Auflösungsvermögen . . . . .	43
3.3.2	Konstruktion . . . . .	47
3.4	Spektrograph . . . . .	49

<b>4</b>	<b>Einfluss der Targetgasparameter auf die EUV-Intensität</b>	<b>51</b>
4.1	Visualisierung des Gasstromes . . . . .	51
4.1.1	Laser-induzierte Fluoreszenz . . . . .	51
4.1.2	Rayleigh-Streuung . . . . .	54
4.2	Einfluss des Gasdruckes auf die EUV-Intensität . . . . .	57
4.2.1	Zylindrische Düse . . . . .	57
4.2.2	Doppelstrahldüse . . . . .	59
4.2.3	Konische Düse . . . . .	61
4.2.4	Vergleich der Düsen . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Einfluss der Laserparameter auf die EUV-Intensität</b>	<b>65</b>
5.1	Laserwellenlänge . . . . .	65
5.2	Laserpulslänge . . . . .	67
5.3	Laserpulsenergie . . . . .	67
5.4	Laserfokus-Position . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Räumliche Charakterisierung des EUV-Plasmas</b>	<b>72</b>
6.1	Bestimmung der Quellgröße . . . . .	72
6.2	Plasmalagestabilität . . . . .	73
6.3	Laserfokus-Position . . . . .	74
6.4	Plasmaposition im Gasstrom . . . . .	75
6.5	Winkelabhängigkeit der EUV-Emission . . . . .	76
6.5.1	Messungen der azimutalen und polaren Winkelabhängigkeit . . . . .	76
6.5.2	Theoretische Beschreibung der Reabsorption im Targetgas . . . . .	79
6.5.3	Vergleich Theorie und experimentelle Ergebnisse . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Spektrale Analyse des EUV-Plasmas</b>	<b>83</b>
7.1	Einzelstrahldüse . . . . .	83
7.1.1	Spektren unterschiedlicher Targetgase . . . . .	83
7.1.2	Einfluss der Laserpulsenergie auf das Spektrum . . . . .	85
7.2	Doppelstrahldüse . . . . .	87
7.2.1	Druckabhängigkeit des Spektrums . . . . .	87
7.2.2	Spektrale Filterung durch Multischichtspiegel . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Wellenfrontmessungen an EUV-Strahlung</b>	<b>96</b>
8.1	Theoretische Beschreibung eines Hartmann-Wellenfrontsensors . . . . .	96
8.2	Hartmann-Wellenfrontsensor für den EUV-Spektralbereich . . . . .	100
8.3	Wellenfrontvermessung nach Multischichtspiegel . . . . .	104
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>108</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>111</b>
<b>Eigene wissenschaftliche Beiträge</b>	<b>119</b>
<b>Danksagung</b>	<b>122</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>124</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Im Verlauf der letzten Jahrhunderte ist das wissenschaftliche Interesse an bestimmten Bereichen des elektromagnetischen Spektrums stark mit der praktischen Anwendung der jeweiligen Strahlung gestiegen. So gewann Licht im sichtbaren Spektralbereich im 17. bis 19. Jahrhundert große Bedeutung für die Mikroskopie und Astronomie. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dienten zum besseren Verständnis grundlegender optischer Eigenschaften wie der Entdeckung des Brechungsgesetzes durch W. Snellius 1621. Die Nutzung des ultravioletten Lichtes im 20. Jh. führte zu Kenntnissen des Atom- und Molekülaufbaus, während sich mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 [Rön96] ein großes Potential an medizinischen Anwendungen erschloss.

Im elektromagnetischen Spektrum befindet sich zwischen dem VUV-Bereich<sup>1</sup> und den weichen Röntgenstrahlen eine bisher wenig genutzte Region: der EUV-Spektralbereich (extremes Ultraviolett), der in den meisten Publikationen durch den Wellenlängenbereich von 5 – 40nm beziehungsweise den Quantenenergiebereich von 30 – 250eV charakterisiert ist [Att99]. Erst seit der Entdeckung der Synchrotronstrahlung im Jahr 1947 ist es möglich, künstlich intensive EUV-Strahlung zu erzeugen. Natürliche Strahlungsquellen finden sich hingegen in der Natur: In der Astronomie werden Sterne wie unsere Sonne beobachtet, die auch im EUV-Bereich emittieren. Die Vermessung dieser Strahlquellen erfolgt außerhalb der Erdatmosphäre durch satellitengestützte Teleskope (z.B. ROSAT).

Die Einsatzmöglichkeiten für EUV-Strahlung sind vielfältig: Beispiele sind die Mikroskopie, die Absorptions-Spektroskopie oder die Photoelektronen-Spektroskopie. Insbesondere die Entwicklung mikrolithographische Verfahren zur Herstellung integrierter Schaltkreise sind ein Motor für die ständige Weiterentwicklung von Strahlungsquellen für kürzere Wellenlängenbereiche. Bei der Lithographie ist das Zusammenwirken einer leistungs-optimierten Strahlquelle mit effektiven Strahlführungsoptiken unabdingbar, da nur so während der Produktion ein hoher Durchsatz an Mikrochips gewährleistet werden kann. Für lithographische Anwendungen standen bisher keine kompakten, intensiven Strahl-

---

<sup>1</sup>VUV=Vakuum-Ultraviolett

quellen zur Verfügung. Unterschiedliche Konzepte wie Röntgen-Lithographie, Ionenstrahl-Lithographie, Elektronen-Lithographie oder die Lithographie im extrem ultravioletten Spektralbereich (EUVL) wurden diskutiert, von denen möglicherweise nur Synchrotronstrahlquellen, Gasentladungs- oder Laser-Plasma-Quellen im EUV-Spektralbereich den gestellten Anforderungen der Zukunft genügen werden. Parallel zu der Konstruktion von EUV-Quellen steht die Entwicklung von Messtechniken zur Charakterisierung der EUV-Strahlung. Viele Quellparameter konnten bisher auf Grund fehlender Charakterisierungswerkzeuge nicht vermessen werden, beziehungsweise sind weiterhin zum Großteil unverstanden wie zum Beispiel die Plasmaform und -größe oder die Winkelabhängigkeit der Emission.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zum besseren Verständnis der laser-erzeugten Plasmen für den extrem-ultravioletten Spektralbereich liefern. Derartige Laser-Plasma-Quellen für den EUV-Bereich sind bisher kommerziell noch nicht erhältlich. Daher wurde eine EUV-Quelle, basierend auf einem Gastarget, konzipiert und experimentell realisiert, um den Einfluss einer Vielzahl möglicher Parameter zu untersuchen. Gasdüsen werden benötigt um das Targetgas mit einer möglichst hohen Dichte in den Rezipienten einzubringen. Dabei spielt die Wahl der Düse eine entscheidende Rolle; so ermöglicht eine konische Düsenform die Bildung von Clustern, wodurch weitaus höhere Dichten als bei einem konventionellen Gasstrom erzeugt werden können.

Zur Analyse der Quellparameter und des Abstrahlverhaltens von EUV-Plasmen werden unterschiedliche Geräte wie spezielle Lochkameras oder ein Spektrograph eingesetzt. Diese sind zum Teil aus langwelligeren Spektralbereichen bekannt, mussten zum Großteil aber neu konstruiert und für den EUV-Wellenlängenbereich optimiert werden. Andere Verfahren wie der Hartmann-Wellenfrontsensor wurden für extrem-ultraviolette Strahlung bisher überhaupt noch nicht eingesetzt, bieten aber hervorragende Möglichkeiten für die Planung und Charakterisierung von EUV-Optiken.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

*In diesem Kapitel wird zunächst ausführlich die Motivation für diese Arbeit gegeben. Anschließend wird die Plasmaerzeugung und Aufheizung des Plasmas durch die anregende Laserstrahlung theoretisch beschrieben. Zum Ende des Kapitels werden diverse Optikkonzepte und eine Auswahl an Analysewerkzeugen für die Quell- und Optikcharakterisierung aus der Literatur kurz vorgestellt.*

### 2.1 Motivation / Zielsetzung

Weltweit besteht eine starke Nachfrage nach immer leistungsfähigerer Mikroelektronik. Um dem gestiegenen Interesse an schnelleren Übertragungsraten und höheren Informationsdichten nachzukommen, müssen Bauelemente elektronischer Geräte immer weiter miniaturisiert werden. Dieses findet sich in dem von G.E. Moore [Moo65] Mitte der 60'er aufgestellten empirischen Gesetz wieder, in dem er alle 18 Monate eine Verdoppelung der Transistorendichte auf einem Mikrochip vorhersagt.

Integrierte Schaltkreise werden heute auf Basis lithographischer Verfahren hergestellt. Bei der Lithographie werden die zu erzeugenden Strukturen (Leiterbahnen, Transistoren etc.) durch eine Maske in einen strahlungsempfindlichen Lack (den so genannten Resist) abgebildet, wobei die Maske prinzipiell beliebig oft verwendet werden kann. Die Abbildung erfolgt mit UV-Lasern, die das Bild der Maske über Strahlführungsoptiken um den Faktor 4 verkleinert abbilden [Kas00].

Die minimale Linienbreite ( $R$ ) und die Fokustiefe ( $F$ ) für die lithographische Herstellung kleiner Strukturen hängen von der numerischen Apertur der eingesetzten Optiken und der Wellenlänge ab. Nach dem Rayleigh-Kriterium können zwei Bildpunkte noch genau dann getrennt wahrgenommen werden, wenn das Beugungsmaximum des ersten Bildpunktes in das erste Beugungsminimum des zweiten fällt. Hieraus ergibt sich für die minimale

Linienbreite:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad , \quad (2.1.1)$$

mit der Konstante  $k_1$ , der Wellenlänge  $\lambda$ , der numerischen Apertur  $NA = n \cdot \sin \alpha$  mit dem Brechungsindex  $n$  und dem halben maximalen Öffnungswinkel  $\alpha$ . Die Konstante  $k_1$  wird durch die Abbildungsoptiken, den Lack und den Belichtungsprozess bestimmt und liegt für heutige Fertigungstechniken bei 0,5 [Att99].

Für die Fokustiefe gilt [Att99]:

$$F = k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad , \quad (2.1.2)$$

mit der Konstante  $k_2$ , die bei heutigen Fertigungstechniken einem Wert von 0,6 entspricht. Um die Strukturbreite zu verkleinern, kann zum einen die numerische Apertur erhöht werden, was zu einer starken Verringerung der Fokustiefe führt (vergleiche quadratischen Anstieg in Gleichung (2.1.2)). Das stellt sehr große Anforderungen an die Positionierungsgenauigkeit der zu bearbeitenden Strukturen und bedeutet einen hohen technischen Aufwand. Der Maximalwert der numerischen Apertur beträgt theoretisch  $NA = 1$ . Heutige Systeme arbeiten schon mit hohen numerischen Aperturen. Somit bleibt als einzige Möglichkeit zur Verkleinerung der Strukturgrößen die Erniedrigung der Wellenlänge.

Stand der heutigen Technik ist der Einsatz von KrF-Excimerlasern der Wellenlänge 248nm mit denen Strukturbreiten bis 130nm erzeugt werden können. Ähnliche Strukturbreiten werden zurzeit auch durch ArF-Laser der Wellenlänge 193nm erreicht. Mit diesen sollen in Zukunft Strukturen bis 90nm produziert werden [Car01]. Die Erzeugung solch geringer Strukturbreiten geht einher mit der Entwicklung so genannter „Enhancement“-Techniken wie Phasenmasken oder speziellen Photolacken, die es ermöglichen scharf begrenzte Strukturen auch unterhalb der nach dem Rayleigh-Kriterium bedingten Unschärfe herzustellen [Kas00].

Der nächste Schritt zur Verkleinerung der Strukturbreiten steht im Einklang mit der Einführung der letztmöglichen kommerziell sinnvoll einsetzbaren Laserwellenlänge im VUV-Bereich, dem 157nm F<sub>2</sub>-Laser. Ob diese wirklich für lithographische Zwecke zum Einsatz kommt, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen [McC01].

Um noch kleinere Strukturen zu erzeugen, werden kürzere Wellenlängen benötigt. Im elektromagnetischen Spektrum findet man zwischen der Strahlung im Vakuum-UV (VUV) und der Röntgenstrahlung die extrem-ultraviolette Strahlung (EUV) im Wellenlängenbereich von ca. 5 – 40nm (vergleiche Abbildung 2.1.1).

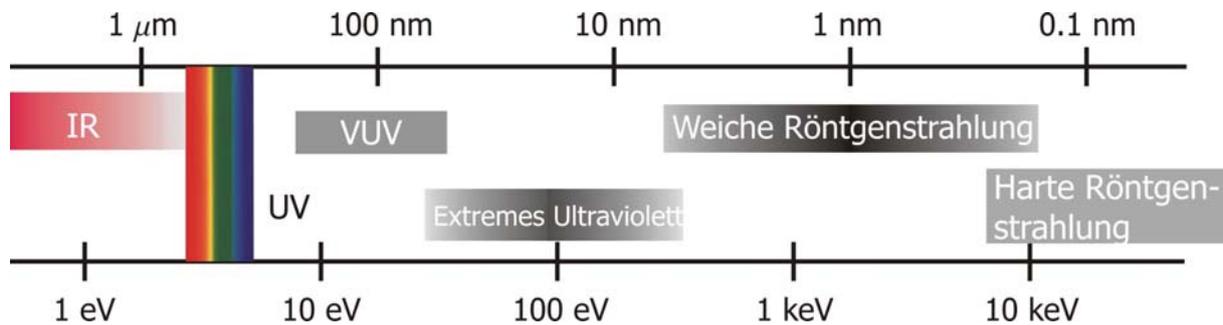


Abbildung 2.1.1: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom infraroten Spektralbereich bis zu harten Röntgenstrahlen nach [Att99].

Im Vergleich zu harten Röntgenstrahlen lassen sich für den EUV-Wellenlängenbereich beständige Strahlführungsoptiken herstellen. Schon in den 80'er Jahren fand man heraus, dass mit Hilfe von Multischicht-Spiegeln Reflektivitäten  $\geq 10\%$  für den so genannten weichen Röntgen- bzw. EUV-Bereich erreicht werden konnten [Hei90]. Die Dünnschichttechnologie wurde soweit verbessert, dass heute Multischichtspiegel mit Reflektivitäten von ungefähr 70% für 13nm produziert werden können [Kai00]. Da lithographische Verfahren auf verkleinerten Abbildungen von Masken beruhen und somit Optiken benötigt werden, ist die EUV-Lithographie (EUVL) der aussichtsreichste Kandidat für die zukünftige Chipherstellung. Dieses findet sich auch im internationalen Technologiewegweiser der Halbleiterindustrie (ITRS) wieder (vgl. Abb. 2.1.2).

Ab dem Jahr 2007 wird die Einführung von EUV-Quellen zum Einsatz in industriellen lithographischen Systemen geplant. Mit diesen Quellen sollen Strukturbreiten um die 65nm erzeugt werden. Eine weitere Reduzierung der Strukturbreiten um den Faktor 3 ergeben sich durch die Anpassung der Optiken, Masken und Photolacke.

Wie schon Strahlungsquellen im VUV-Spektralbereich können EUV-Quellen nicht mehr unter Luft-Atmosphäre arbeiten. EUV-Strahlung hat bei Normaldruck und 20°C Temperatur an Luft-Atmosphäre eine freie Weglänge von  $\sim 150\mu\text{m}$  (berechnet nach [Cen02]). Somit müssen künftige EUV-Quellen und Optiken für den Einsatz unter Vakuumbedingungen konzipiert werden.

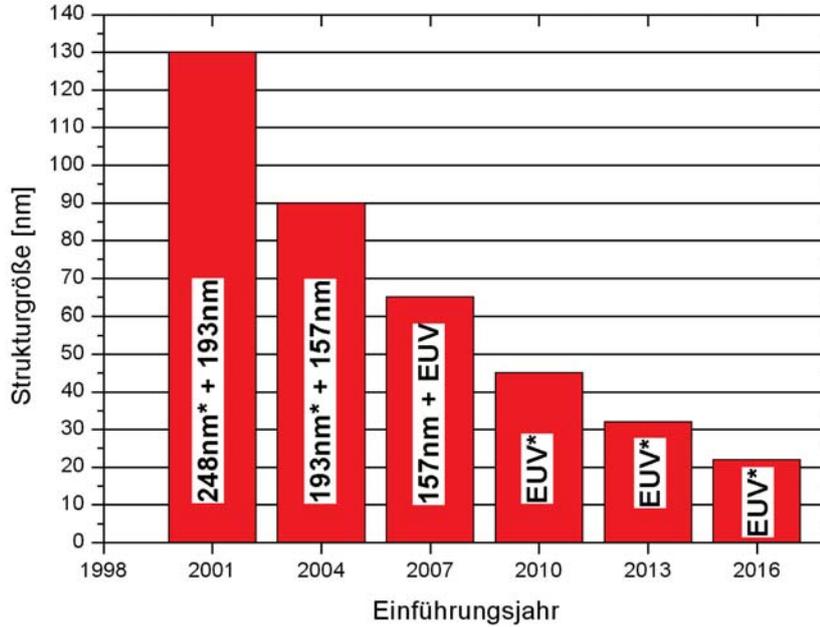


Abbildung 2.1.2: Technologiewegweiser der Halbleiterindustrie nach [Sem01]; \*: Einsatz so genannter „Enhancement“-Techniken wie Phasenmasken oder spezielle Photolacke.

Zur Erzeugung extrem ultravioletter Strahlung stehen verschiedene Quellkonzepte in direkter Konkurrenz zueinander. Zunächst stellt sich die Frage warum nicht wie im harten Röntgenstrahlbereich auch im weichen Röntgen- bzw. EUV-Bereich Röntgenröhren eingesetzt werden. Dies soll durch eine kurze Abschätzung erklärt werden: Um charakteristische Röntgenstrahlung bei 100eV zu erzeugen, müssen nach dem Moseley’schen Gesetz leichte Elemente wie Lithium ( $Z=3$ ), Beryllium ( $Z=4$ ) oder Bor ( $Z=5$ ) als Antikathode verwendet werden, da die emittierte Frequenz ( $\nu_{K_\alpha}$ ) für kleinere Ordnungszahlen ( $Z$ ) abnimmt [Ger93]:

$$\nu_{K_\alpha} = \frac{3}{4}R_\infty(Z - 1)^2 \quad , \quad (2.1.3)$$

mit der Rydberg-Konstanten  $R_\infty$ .

Für den Wirkungsgrad  $\eta$  findet sich folgende Abschätzung [Koh85]:

$$\eta \approx c \cdot Z \cdot U \quad (2.1.4)$$

mit der Beschleunigungsspannung  $U$  und einer experimentell bestimmten Konstante  $c \approx 10^{-6}$ . Die Grenzfrequenz  $\nu$  der erzeugten Strahlung berechnet sich aus:

$$\begin{aligned} h\nu &= eU \\ \Rightarrow \nu &\propto U \end{aligned} \tag{2.1.5}$$

mit dem Planck'schen Wirkungsquantum  $h$  und der Elementarladung  $e$ .  
Aus Gleichungen (2.1.4) und (2.1.5) folgt

$$\eta \propto Z \cdot \nu \quad . \tag{2.1.6}$$

Somit ist der Wirkungsgrad proportional zum Produkt aus Atomzahl und Frequenz. Vergleicht man den Wirkungsgrad für eine Wolframkathode ( $Z=74$ ) für harte Röntgenstrahlung bei 10keV mit Lithium ( $Z=3$ ) bei 100eV, erhält man für Lithium einen um ca. 2500 schlechteren Wirkungsgrad als für Wolfram. Bedenkt man zusätzlich, dass schon bei herkömmlichen Röntgenröhren der Wirkungsgrad sehr gering ist, scheiden solche Quelle auf Grund der hohen Energiekosten und den immensen Anforderungen an die Kühlung für den EUV-Spektralbereich aus.

Als weitere mögliche Quellen für den EUV-Spektralbereich kommen Synchrotrons, Gasentladungsquellen oder Quellen basierend auf laser-erzeugten Plasmen in Frage.

Für wissenschaftliche Arbeiten eignen sich Synchrotronquellen mit ausgezeichneten, wohldefinierten Strahleigenschaften [Sch00b, Hen00]. Auf Grund ihrer Größe und den hohen Betriebs- und Investitionskosten scheiden diese Strahlquellen für den industriellen Einsatz und als dezentrale Laborquelle aus.

Bei Gasentladungsquellen wird in einer speziellen Elektrodenanordnung durch Entladung kapazitiv gespeicherter elektrischer Energie ein intensives Plasma erzeugt, welches ein Prozessgas (z.B. Xe) zur Emission von kurzwelliger Strahlung anregt. Als mögliche Entladungskonzepte kommen zurzeit vor allem Pinch-Plasmen, Plasmafoki sowie Kapillarentladungen in Frage [Leb99, Ber99, Pan02, Bor02, For02]. Die derzeit erreichten Konversionseffizienzen (elektrische Leistung in EUV-Strahlung) liegen im Bereich von 0,1% in  $4\pi$  Steradian und 2% Bandbreite um 13nm.

Die Vorteile der Gasentladungsquellen liegen in ihrem prinzipiell einfachen und kompakten Aufbau, der leichten Justage und der unkomplizierten Bedienung. Nachteilig sind der konstruktionsbedingt geringe nutzbare Raumwinkel der Quelle und die relativ große und lang gestreckte Form des Plasmas, die die Berechnung der Strahlengänge für nachfolgende Optiken kompliziert. Zusätzlich gibt es erhebliche Probleme mit Kontaminationen durch Elektroden-Erosion sowie der Wärmeabführung bei hohen Repetitionsraten.

Trotz der genannten noch vorhandenen Defizite haben entladungsproduzierte Plasmen aufgrund der relativ geringen Kosten und einfachen Skalierbarkeit zu höheren middle-