

Halbleitertechnologie von A bis Z

Lithografie

DUV vs. EUV	3
<i>Einordnung</i>	3
<i>Technologie im Vergleich</i>	3
<i>Auflösung und Rayleigh-Kriterium</i>	4
<i>Herausforderungen und Kosten</i>	4
<i>Vergleichstabelle</i>	5

DUV vs. EUV

Einordnung

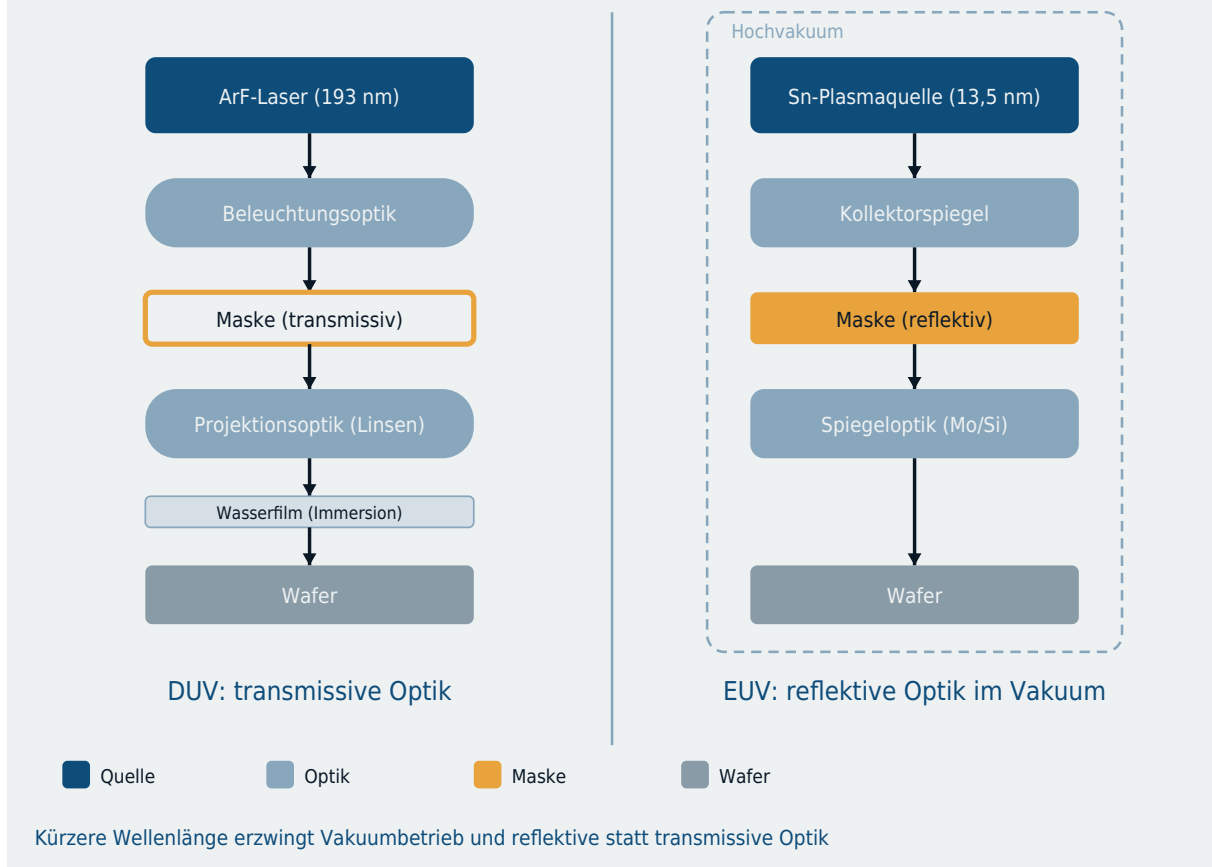
DUV (Deep Ultraviolet) und EUV (Extreme Ultraviolet) sind keine grundverschiedenen Belichtungsverfahren, sondern zwei Wellenlängen-Regime derselben Grundidee: der reduzierenden Projektionsbelichtung, wie sie im [Kapitel zu den Belichtungsverfahren](#) beschrieben ist. Der Sprung von 193 nm (DUV) auf 13,5 nm (EUV) klingt nach einem kleinen Zahlenunterschied, zieht aber technisch fast alles neu auf – von der Optik über die Maske bis zur Betriebsumgebung der gesamten Anlage.

Technologie im Vergleich

DUV-Anlagen arbeiten meist mit ArF-Excimerlasern bei 193 nm, häufig als Immersionslithografie: Ein dünner Wasserfilm zwischen der letzten Linse und dem Wafer erhöht den effektiven Brechungsindex und damit die Auflösung. Die Optik ist transmissiv – Licht durchläuft ein System aus Quarzglaslinsen, die Maske ist transparent wie ein Diapositiv.

EUV-Strahlung bei 13,5 nm wird dagegen von praktisch jedem Material absorbiert, auch von Luft und Glas. Deshalb muss die gesamte Anlage im Hochvakuum arbeiten, und Linsen sind unbrauchbar – abgebildet wird stattdessen über ein System aus Molybdän-Silicium-Multilagenspiegeln, die durch destruktive/konstruktive Interferenz einen Bruchteil der Strahlung reflektieren. Auch die Maske selbst ist kein Transparent, sondern ein strukturierter Spiegel.

DUV vs. EUV – Belichtungsanlagen im Vergleich



Auflösung und Rayleigh-Kriterium

Nach dem Rayleigh-Kriterium ist die minimal auflösbare Strukturbreite direkt proportional zur Wellenlänge des verwendeten Lichts. Der Sprung von 193 auf 13,5 nm bringt damit einen enormen Auflösungsgewinn – im Prinzip könnten mit EUV deutlich feinere Strukturen in einem einzigen Belichtungsschritt erzeugt werden als mit DUV.

In der Praxis stößt DUV an diese physikalische Grenze schon bei fortgeschrittenen Knoten. Der Ausweg heißt Multipatterning: Eine einzelne Layer-Ebene wird in mehrere Teilbelichtungen mit jeweils eigener Maske und eigenem Ätzschritt zerlegt (LELE, SADP, SAQP), um Strukturen zu erzeugen, die eine einzelne DUV-Belichtung nicht auflösen könnte. Das funktioniert, vervielfacht aber Prozessschritte, Maskenkosten und Overlay-Anforderungen. EUV kann viele dieser Layer wieder in einem einzigen Belichtungsschritt erzeugen – der eigentliche Auflösungsgewinn wird also oft in eingesparte Prozesskomplexität übersetzt, nicht nur in kleinere Zahlen auf dem Datenblatt.

Herausforderungen und Kosten

EUV-Anlagen zählen zu den komplexesten Maschinen, die je gebaut wurden: Die Lichtquelle erzeugt ein Zinn-Plasma durch Beschuss winziger Zinntröpfchen mit einem Hochleistungslaser, wobei nur ein sehr kleiner Bruchteil der eingesetzten Energie tatsächlich als nutzbare EUV-Strahlung austritt. Jeder Spiegel im optischen Pfad reflektiert zudem nur einen Teil der Strahlung, sodass am Wafer nur noch wenige Photonen pro Pixel ankommen – das führt zu statistischem Rauschen (Schrotrauschen), das bei kleinsten Strukturen sichtbare Kantenrauigkeit verursacht. Hinzu kommt die Pellicle-Problematik: Eine Schutzfolie vor der Maske, die Partikelkontamination verhindert, muss bei EUV nahezu perfekt transparent für eine Strahlung sein, die von fast jedem Material absorbiert wird. Eine einzelne EUV-Anlage kostet dementsprechend deutlich über 150 Millionen US-Dollar.

DUV-Anlagen sind technologisch ausgereift, breit verfügbar und im Vergleich deutlich günstiger. Der Preis dafür ist die Multipatterning-Komplexität bei den kleinsten Strukturen: mehr Masken, mehr Prozessschritte, strengere Anforderungen an die Justiergenauigkeit (Overlay) zwischen den Teilbelichtungen – Kosten, die sich in die Gesamtfertigung statt in die Anlage selbst verlagern.

Vergleichstabelle

Merkmal	DUV	EUV
Wellenlänge	193 nm	13,5 nm
Optik	transmissiv (Linsen)	reflektiv (Mo/Si-Spiegel)
Betriebsumgebung	Luft / Immersion	Hochvakuum
Auflösungsgrenze	niedriger, Multipatterning nötig	höher, oft Single-Exposure
Anlagenkosten	niedriger	sehr hoch (>150 Mio. \$)
Typischer Einsatz	Massenfertigung, reifere Knoten	modernste Logik-/Speicherknoten