

Belichten von Fotolack



Version: 2013-11-07 Quelle:

www.microchemicals.com/de/downloads/anwendungshinweise.html

Lichtquellen: Mask-Aligner, Stepper, und Laser

Mask-Aligner und Stepper

Das typische Spektrum eines Mask-Aligners mit Hg-Lampe ohne weitere optisch selektive Elemente enthält g- (436 nm), h- (405 nm) und i-line (365 nm) (Abb. rechts), wobei die i-line-Intensität etwa 40 % der Gesamtemission im Bereich 450 ... 350 nm ausmacht.

An diese Linien ist das Absorptionsspektrum des Fotoinitiators in AZ® und TI Fotolacken (vgl. folgender Abschnitt) angepasst.

Besonders für Dosis-sensitive Prozesse (Umkehrlack-, Dicklackprozessierung) empfiehlt sich eine regelmäßige Kalibrierung der Lichtintensität, welche sich mit der Betriebsdauer einer Lampe ändert. Eine Messung der lateralen Intensitätsverteilung über die beleuchtete Fläche sollte weniger als 10 % relative Abweichung über 6" Wafer ergeben, um die Einstellung einer optimalen Belichtungsdauer für zentrale und randnahe Bereiche zu ermöglichen.

Laser als Lichtquelle zur Belichtung von Fotolacken

Das Belichten von Fotolack mit Lasern anstelle der üblicherweise eingesetzten Hg-Lampen in Mask-Alignern bringt zwei Unterschiede mit sich.

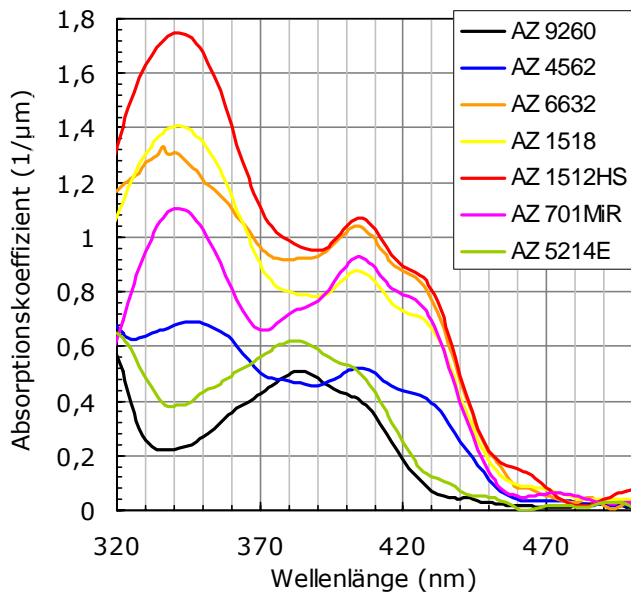
Zum einen ist die Belichtungs-Intensität (also die Flächenlichtleistung auf der Lackoberfläche) eine ganz andere: Während bei der Laser-Interferenz-Lithografie meist sehr geringe Intensitäten auftreten, liegt die Intensität beim Laser-Schreiben viele Größenordnungen über der Belichtung mittels Mask-Aligner oder Stepper. Zum anderen ist die Belichtungswellenlänge der verwendeten Laser meist eine andere als die der Hg-Linien bei 365, 405 oder 435 nm.

Da die spektral breiten Absorptionsbanden des Fotoinitiators nicht abrupt bei einer bestimmten Wellenlänge enden, kann bei entsprechender Dosis (z. B. Laserbelichtung) generell auch mit Wellenlängen einige 10 nm außerhalb der in den Datenblättern angegebenen Bereichen belichtet werden.

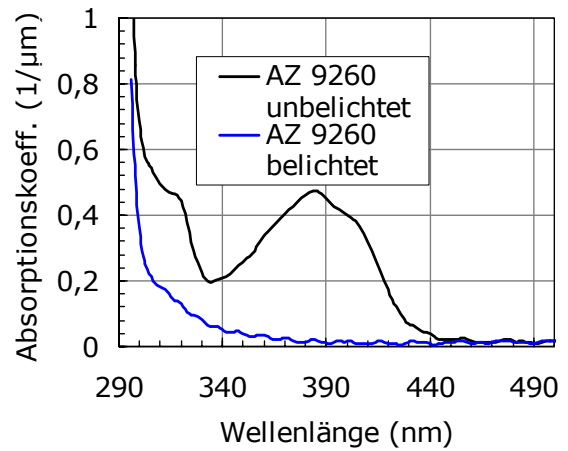
Details zu technischen Aspekten der Laserbelichtung von Fotolacken gibt das Dokument [Laserbelichtung von Fotolacken](#).

Optische Absorption und spektrale Empfindlichkeit von Fotolacken

Die optische Absorption unbelichteter Fotolacke erstreckt sich vom kurzwelligen sichtbaren bis in den nahen ultravioletten Spektralbereich und ist den Emissionslinien der üblicherweise verwendeten Hg-Dampflampen angepasst (Abb. links unten). Die meisten Fotolacke absorbieren bei der g-, h- und i-Linie (435, 405 und 365 nm), während einigen moderneren Lacken wie dem AZ® 9260 oder 5214E die langwellige Absorption um die g-Linie fehlt. Moderne Negativlacke wie die AZ® nLOF 2000 Serie oder der AZ® 15 nXT oder 125 nXT sind als reine i-line Lacke nur unterhalb ca. 380 nm empfindlich.



Beim Belichten bleichen Fotolacke bis herunter zu ca. 300 nm Wellenlänge nahezu vollständig (Abb. unten):

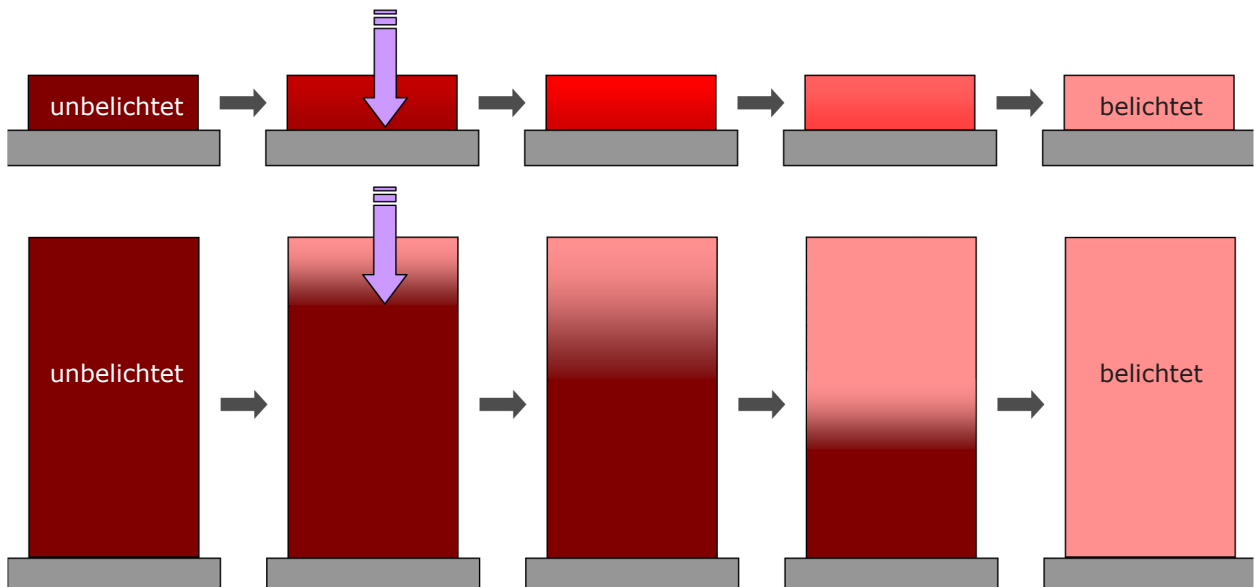


Belichtung „dicker“ und „dünner“ Fotolack-Schichten

Mit „dicken“ Lackschichten sind hier Lacke gemeint, deren Schichtdicke ein wenigstens Mehrfaches der Eindringtiefe der verwendeten Belichtungswellenlänge beträgt. Bei chemisch nicht verstärkten Lacken welche mit geeigneten Wellenlängen belichtet werden trifft diese Bedingung auf Schichtdicken > 5 μm zu. Entsprechend sind hier mit „dünnen“ Lackschichten solche gemeint, bei denen die Schichtdicke mit < 1 μm deutlich kleiner als die Eindringtiefe des Lichts ist.

Der Absorptionskoeffizient typischer Fotolacke von ca. 1-2 μm⁻¹ würde eine Durchbelichtung dicker Lackschichten verhindern, wenn die optischen Parameter während der Belichtung konstant blieben. Jedoch verringert sich, wie im letzten Abschnitt gezeigt, die UV-Absorption des Lacks mit der empfangenen Lichtdosis um Größenordnungen.

Wie das Schema unten im Vergleich dicker und dünner Lackschichten zeigt, absorbieren dicke Lackschichten zu Beginn der Belichtung nur in den obersten μm, welche dabei UV-transparent werden und das Licht während der weiteren Belichtung immer tiefer in Richtung Substrat lenken. Hierbei steigt die entwickelbare Schichtdicke annähernd linear mit der Belichtungsdosis



Während „dünne“ Fotolackschichten (oben) nahezu gleichmäßig durchbelichtet werden, bleichen „dicke“ Schichten (unten) mit zunehmender Lichtdosis in Richtung Substrat.

an, was Anwendungen in der Grauton-Lithografie ermöglicht (Details hierzu im Dokument [Grauton-Lithografie mit Fotolacken](#)).

Dünne Lackschichten hingegen werden von Anfang der Belichtung an gleichmäßig bis zum Substrat durchbelichtet, womit mit zunehmender Belichtungs-dosis die spätere Entwicklungsrate ansteigt.

Belichtungsdosis und -dauer: Gut zu wissen ...

Grundsätzliches zum Belichter und den Datenblättern der Photolacke

Zur korrekten Bestimmung der mit dem vorhandenen Belichter durchgeführten Belichtungsdauer aus den in technischen Datenblättern zu den jeweiligen Lacken angegebenen Belichtungsdosen muss folgendes bekannt sein:

- Welches Spektrum gibt der Belichter ab? Werden die g-, h- und i-Linie emittiert oder bestimmte Linien herausgefiltert?
- Über welchen Wellenlängenbereich ist die Lichtleistung des Belichters gemessen bzw. angegeben? Oftmals wird nur die i-Linien Intensität bestimmt, die g- und h-Linie jedoch ebenfalls emittiert.
- Bezieht sich die in den Datenblättern der Fotolacke gegebene Belichtungsdosis auf a) einen Spektralbereich bei Breitbandbelichtung, b) i-line bei monochromatischer Belichtung oder c) die integrale Dosis über g-, h-, und i-line?
- In welchem Wellenlängenbereich ist der Fotolack empfindlich (vgl. Abschnitt „Optische Absorption und spektrale Empfindlichkeit“ dieses Dokuments)?

Lichtintensitäten typischer Belichter

Sehr häufig kommen Mask-Aligner mit 350 W Hg-Lampe zum Einsatz. Ohne zusätzlichen i-line Filter oder andere optisch selektive Elemente geben diese Belichter ca. 20-30 mW/cm² Licht, verteilt auf die g-, h- und i-Linie ab, wobei davon auf i-Linie bei 365 nm ca. 6-12 mW/cm² entfallen. Bei der Verwendung von 1000 W Lampen sind diese Werte etwa zu verdreifachen.

Die Bestimmung der optimalen Belichtungsdauer

Für die meisten Positivlack-Anwendungen kann als optimale Belichtungsdosis die genannte werden, ab der die spätere Entwicklungsrate zu sättigen beginnt. Zu geringe Belichtungsdosen verlängern die Entwicklungsdauer und erhöhen so den Dunkelabtrag, während zu hohe Dosen durch Streuung und Beugung auch von der Fotomaske abgeschattete Bereiche mitbelichten und so die erzielte Auflösung verringern. Bei Negativlacken hängt die optimale Belichtungsdosis vom gewünschten Quervernetzungsgrad und der Form der Lackflanken ab.

Falls keine Möglichkeit zur Bestimmung der Lichtintensität besteht, kann beim Einsatz von 350 W Mask-Alignern als grober Startwert für weitere Optimierungen eine Flächenlichtleistung von ca. 20-25 mW/cm² angenommen werden, bei der Verwendung von 1000 W Hg-Lampen der etwa dreifache Wert. Beim Einsatz von i-line Filtern oder der Verwendung reiner i-line Lacke (wie z. B. die AZ[®] nLOF 2000 Serie, oder der AZ[®] 15 nXT oder 125 nXT, Details zu diesen Lacken [hier](#)) ist dieser Wert zu dritteln.

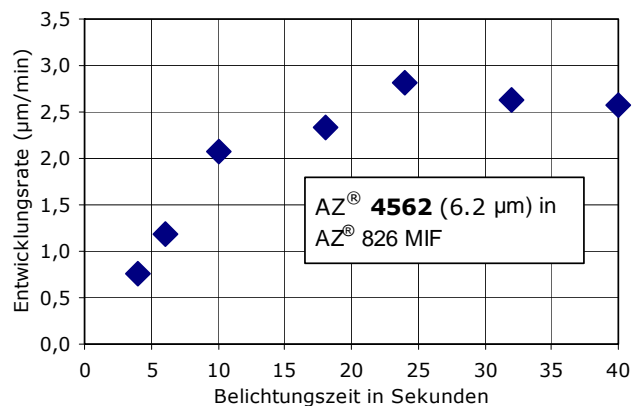
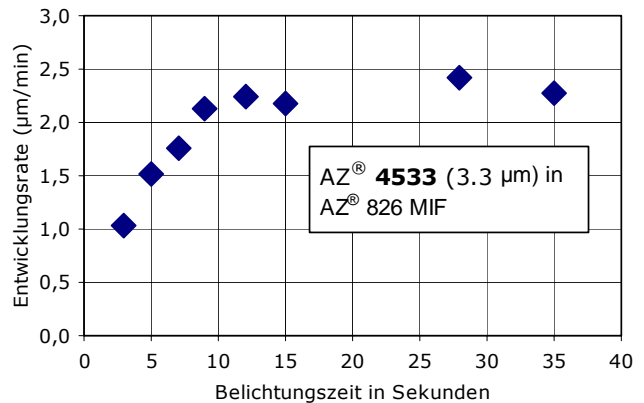
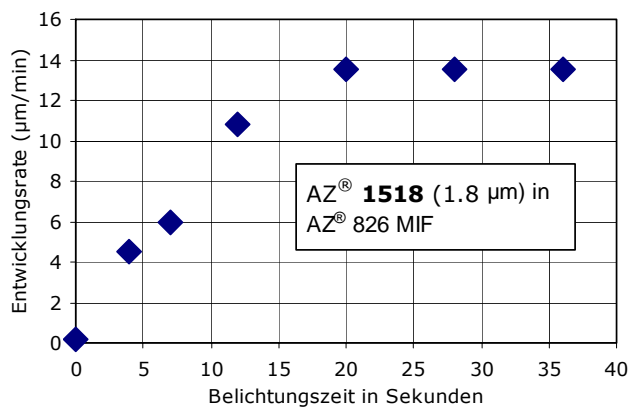
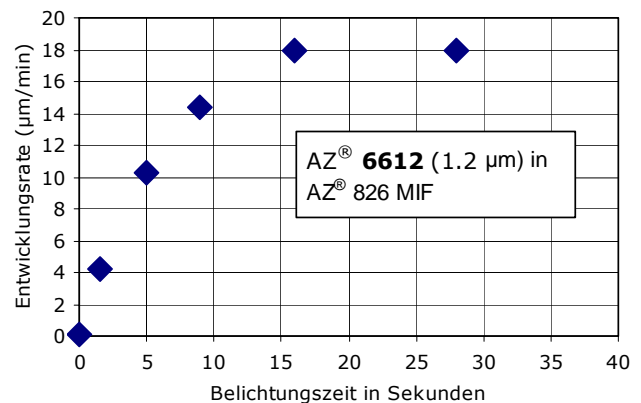
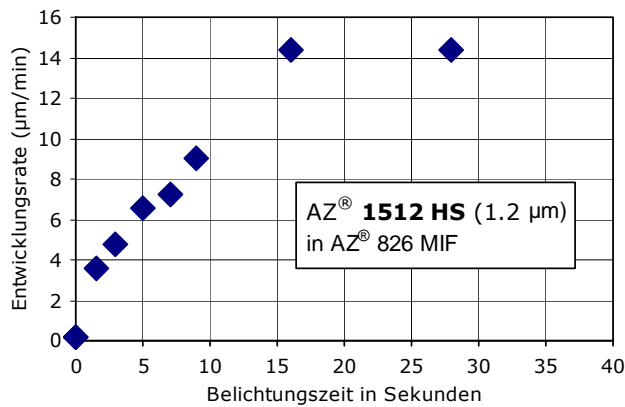
Grundsätzlich empfiehlt sich zur Optimierung eines jeden Prozesses eine Belichtungsreihe, in welcher die Belichtungsdauer zwischen etwa 50 und 200 % des geschätzten optimalen Wertes variiert wird. Trägt man bei Positivlacken die erzielte Entwicklungsrate bzw. -dauer über der Lichtdosis auf, zeigt sich eine Sättigung bei einer bestimmten Belichtungsdauer, welche für die meisten Fotolackanwendungen dem Optimum entspricht. Bei Negativlacken gelten als Kriterien der gewünschte Quervernetzungsgrad bzw. die Form der Lackflanken.

Belichtungsreihen typischer Positivlacke

Um Ihnen einen Anhaltspunkt für eigene (sehr empfohlenen!) Belichtungsreihen zu geben, zeigen wir an ausgewählten Positivlacken den Einfluss der Belichtungsdauer bzw. -dosis auf die erzielte Entwicklungsrate.

Alle Lacke wurden bei 4.000 U/min aufgeschleudert, bei 100°C (Hotplate) für 1 Minute je µm Lackschichtdicke gesoftbaked, und nach dem Belichten im AZ[®] 826 MIF tauchentwickelt. Bei allen Beispielen zeigt sich deutlich, wie die Entwicklungsrate ab einer bestimmten Dosis beginnt zu sättigen.

Belichtet wurde mit einem Maskaligner mit 350 W Hg Lampe, mit einer i-line Intensität von 8.5 mW/cm², und einer über g-, h- und i-line integrierten Intensität von ca. 22 mW/cm².



Die Fotoreaktion

DNQ-basierte Positivlacke

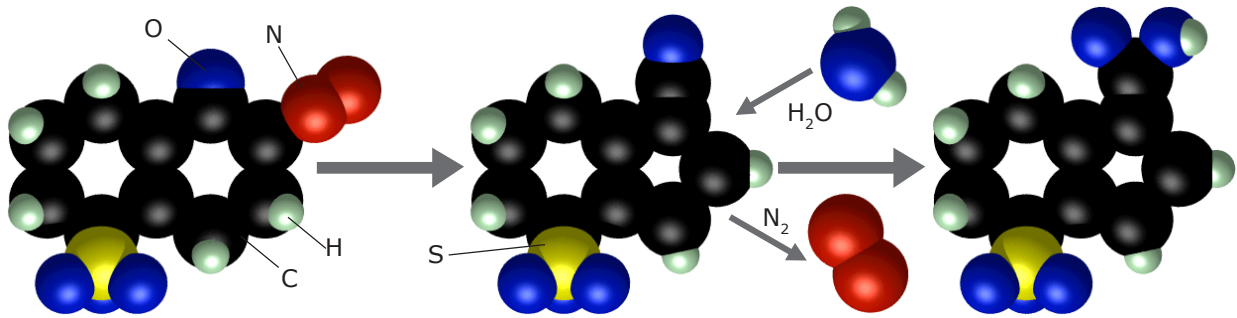
Alle g-, h- und i-line AZ[®] und TI Positiv- und Umkehrlacke besitzen als Fotoinitiator DiazoNaphthoQuinon-Sulfonat (kurz: DNQ), welches sich beim Belichten unter N₂-Abspaltung und Wasseraufnahme in eine Indenkarbonsäure umwandelt.

Das umseitige Schema zeigt die wesentlichen Schritte der Fotoreaktion, d. h. die bei der Belichtung gewünschte chemische Reaktion des Fotoinitiators im Fotolack.

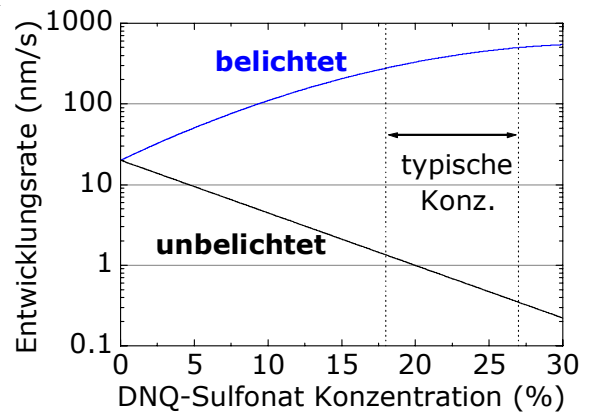
Um die Löslichkeit im Lack und die thermische Stabilität zu erhöhen, als auch die Eigenschaften als „Inhibitor“ (verringertes Dunkelabtrag) zu verstärken, sind jeweils mehrere DNQ-Sulfonat-Moleküle an ein sog. *backbone*-Molekül gebunden.

Die Quanteneffizienz der Fotoreaktion definiert die Anzahl „erfolgreicher“ Fotoreaktionen pro in der Lackschicht absorbierten Photonen und erreicht Werte von ca. 20-30 %.

Die DNQ-Konzentration eines Fotolacks bestimmt nicht nur die von der Belichtungs-dosis ab-



hängige Entwicklungsrate, sondern auch den Dunkelabtrag unbelichteten Lacks im Entwickler: Wie der sog. Meyerhofer-Plot (Abb. rechts) zeigt, ist unbelichtetes DNQ ein Inhibitor und verringert den Abtrag im Entwickler, während vollständig belichteter Fotolack umso rascher entwickelt, je höher die DNQ-Konzentration ist.



Fehlt in der Lackschicht eine Mindestmenge an Wasser, kann das Keton als Zwischenprodukt der Fotoreaktion (Schema oben, Mitte) verschiedene Nebenreaktionen eingehen (z. B. Veresterung mit dem Harz oder Polymerisation unter CO_2 -Abspaltung). In beiden Fällen bildet sich keine Indenkarbonsäure, die Löslichkeit im Entwickler steigt ausschließlich über die Abnahme der Konzentration des Inhibitors DNQ. Die entsprechend geringe Entwicklungsrate bei gleichzeitig unverändertem Dunkelabtrag erschwert sowohl steile Lackflanken als auch hohe Auflösungen bzw. große Aspektverhältnisse. Aus diesem Grund ist für optimale Prozessergebnisse eine ausreichende Konzentration an Wasser in der Lackschicht unerlässlich. Details hierzu gibt das Dokument [Rehydrierung von Fotolacken](#).

Quervernetzende Negativlacke

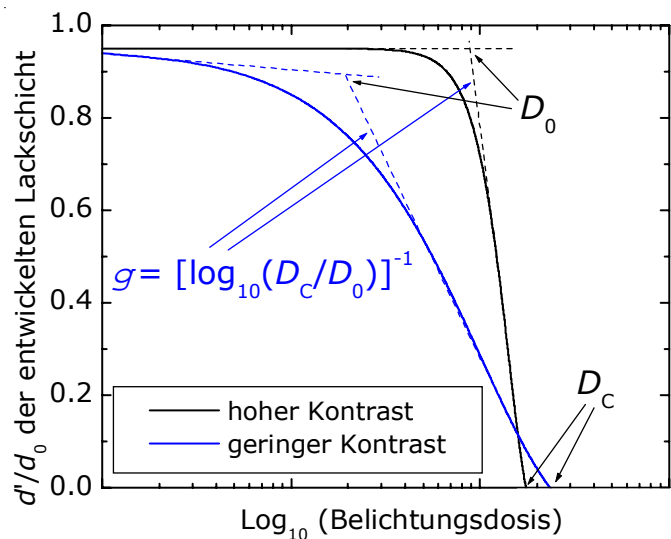
Bei vielen Negativlacken (wie z. B. die AZ® nLOF 2000 Serie, oder der AZ® 15 nXT oder 125 nXT, Details zu diesen Lacken [hier](#)) generiert die Belichtung einen Aktivator, welcher die Harzketten - meist thermisch aktiviert durch einen nachfolgenden Backschritt - chemisch miteinander verbindet. Entsprechend erhöht sich mit zunehmender Belichtungsdosis der später erzielte Quervernetzungsgrad, was neben einer höheren chemischen und thermischen Stabilität auch Einfluss auf die Form der entwickelten Lackflanken hat.

Der Kontrast

Fotolacke mit hohem Kontrast weisen einen geringen Dunkelabtrag auf und entwickeln ab einer bestimmten Lichtdosis D_0 mit konstanter Rate, während bei $D < D_0$ Lackreste stehen bleiben:

Die Kontrastkurve eines Fotolacks (Abb. rechts) trägt die nach dem Entwickeln verbliebene Lackschichtdicke, bezogen auf die ursprüngliche Schichtdicke d'/d_0 , als Funktion der (logarithmisch aufgetragenen) Belichtungsdosis auf.

Beim Vergleich einer gegebenen Kontrastkurve und dem eigenen Prozess sind sämtliche Prozessparameter, welche sich auf die Entwicklungsrate und -zeit



auswirken wie Lackschichtdicke, Softbake, Rehydrierung, Lufttemperatur, Entwickler etc. zu berücksichtigen.

Die Kontrastkurve eines „perfekten“ Positivlacks wäre eine Stufenfunktion (unendlich hoher Kontrast). Realistische Kontrastkurven weisen ein $d'/d_0 < 1$ für eine Belichtungs-dosis = 0 (Dunkelabtrag) und einen endlichen logarithmischen Abfall in $d'/d_0 \rightarrow 0$ über einen Bereich der Belichtungs-dosis bis D_c (*dose to clear*) auf. Die Steigung dieses Abfalls definiert den Kontrast.

Auflösungsgrenzen beim Belichten

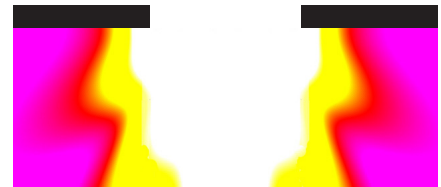
Die Fotomaske

Der Kontrast von Fotolacken bewirkt bei geringen Belichtungs-dosen, dass Defekte der Fotomaske (kleinste Öffnungen, „graue Bereiche“ mit Abschattung < 100 %) bis zu einem gewissen Grad toleriert werden können. Ab mittleren Dosen verstärkt die Kontrastkurve des Fotolacks jedoch Defekte der Maske und bildet sie überproportional stark im Lack ab.

Entwickelte Positivlacke zeigen z. B. Bereiche hohen Dunkelabtrags bzw. unregelmäßige Lackkanten, bei der Umkehr- bzw. Negativlack- Prozessierung invertieren und verstärken sich diese Inhomogenitäten.

Die Belichtungswellenlänge

Die Belichtungswellenlänge begrenzt das theoretisch Auflösungs-limit. Die freien Öffnungen der Fotomaske bilden Spalte, wodurch sich nach wellenoptischen Gesetzmäßigkeiten Beugungsmuster auf und in der Lackschicht bilden. Diese Verteilungen der Lichtintensität sind Abweichungen vom Idealfall einer rechteckigen, lateral scharf begrenzten Lichtverteilung im Lack. Da die Dimensionen der Beugungsmuster mit der Wellenlänge skalieren, lässt sich die minimale Auflösung mit kürzeren Wellenlängen erhöhen.



Querschnitt der Intensitätsverteilung von i-line (365 nm) Licht in einer 1 µm dicken Lackschicht unter einer 1 µm Öffnung

In diesem Zusammenhang sind jedoch zwei Dinge zu berücksichtigen: Die mögliche laterale Auflösung sinkt nur mit der Quadratwurzel der Wellenlänge, so dass ein Übergang von g-line (435 nm) auf i-line (365 nm) weniger als 10 % möglicher Auflösung bewirkt. Die Verwendung noch kleinerer Wellenlängen für g-, h- und i-line Lacke ist nicht ratsam, da dafür die Absorption dieser Lack stark zunimmt. Durch die notwendigerweise höheren Belichtungs-dosen sinkt über Streuung und Beugung die mögliche Auflösung.

Ein Maskenabstand

Ein Maskenabstand zur Lackoberfläche verringert die mögliche laterale Auflösung, da sich das Beugungsbild unterhalb der Fotomaske aufweitet. Ein solches Proximity Gap sollte unbedingt vermieden werden. Gründe für ein unbeabsichtigtes Gap können sein:

- Partikel in der Lackschicht über die Reinraumluft, verunreinigte Substrate oder gealterten Fotolack,
- Luftblasen in der Lackschicht durch manuelles Dispensieren des Lacks oder zu kurze Wartezeit nach dem Umfüllen/ Bewegen von Fotolack,
- Maskenschmutz durch Partikel oder Lackreste,
- raue, texturierte oder gewellte (verspannte) Substrate, oder
- ein Randwall oder eine verkehrt herum eingebaute Maske ☺.



Querschnitt der Intensitätsverteilung von i-line (365 nm) Licht in einer 2 µm dicken Lackschicht unter einem 2 µm breiten Spalt ohne (oben) und mit (unten) einem 10 µm proximity gap.

Die Belichtungsdosis

Eine optimale Belichtungsdosis ist eine weitere Voraussetzung für eine maximale Auflösung. Ist die Belichtungsdosis zu gering, dauert bei Positivlacken die Entwicklung länger und der absolute Dunkelabtrag nimmt zu, während bei negativ- und Umkehrlacken durch eine unzureichende Quervernetzung der Abtrag der belichteten Bereiche erhöht. Bei einer zu großen Belichtungsdosis werden durch Beugung, Streuung und Reflexionen zunehmend auch nominell unbelichtete Bereiche belichtet, was bei Positivlacken die frei entwickelten Bereiche vergrößert, und bei Umkehr- und Negativlacken verringert bzw. eine Öffnung sehr feiner Strukturen unmöglich macht.

Details zur Bestimmung der optimalen Belichtungsdosis gibt der Absatz „Die Bestimmung der optimalen Belichtungsdauer“ auf Seite 3 dieses Dokuments.

Die Substrateigenschaften

Die optischen Substrateigenschaften spielen bei der erzielten Auflösung ebenfalls eine Rolle: Raue oder texturierte Substrate streuen Licht auch in nominell dunkle Bereiche, und transparente Substrate wie Glas oder Quarz, oder Substrate mit UV-transparenter Beschichtung (dickes SiO₂ auf Si) führen Licht lateral und belichten Lack so ebenfalls an Stellen wo er nicht belichtet werden sollte.

Als Folge steigt bei Positivlacken der Abtrag nominell dunkler Bereiche im Entwickler, bzw. sinkt die Entwickelbarkeit nominell unbelichteter Bereiche von Negativlacken.

Weitere Auflösungsgrenzen

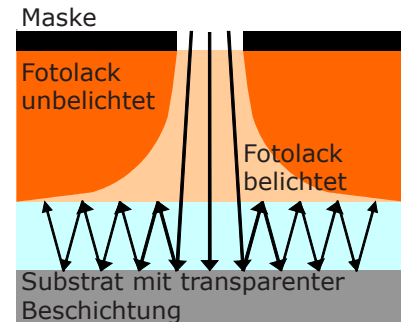
Weitere Voraussetzungen zur Erzielung einer maximalen Auflösung bei Fotolackprozessen gibt das Dokument [Hochauflösende Fotolack-Prozessierung](#).

Gewährleistungsausschluss

Alle in diesem Dokument enthaltenen Informationen, Prozessbeschreibungen, Rezepturen etc. sind nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Dennoch können wir keine Garantie für die Korrektheit der Angaben übernehmen.

Wir garantieren nicht für die vollständige Angabe von Hinweisen auf (u. a. gesundheitliche, arbeitssicherheitstechnische) Gefahren, die sich bei Herstellung und Anwendung der Rezepturen ergeben (können).

Grundsätzlich ist jeder Mitarbeiter dazu angehalten, sich im Zweifelsfall in geeigneter Fachliteratur über die angedachten Prozesse vorab ausreichend zu informieren, um Schäden an Personen und Equipment auszuschließen.



AZ® und das AZ Logo sind eingetragene Markenzeichen der AZ Electronic Materials (Germany) GmbH.