

BELICHTUNG

Wie die Bezeichnung *Fotolithografie* ausdrückt, stellt die Belichtung von Fotolacken einen Schlüsselprozess bei der Mikrostrukturierung dar. Die hierbei statt findenden chemischen Prozesse in der Lackschicht führen zu einer erhöhten (Positivlacke) bzw. verringerten (Negativlacke) Löslichkeit im Entwickler, wodurch sich beim Entwickeln eine lateral strukturierte Lackmaske realisieren lässt.

Dieses Kapitel geht im Detail auf alle Aspekte der Belichtung ein: Von den spektralen Empfindlichkeiten von Fotolacken und den Eigenheiten gängiger Belichtungsverfahren über die chemischen und physikalischen Vorgänge in der belichteten Lackschicht hin zu Erläuterungen und Hilfestellungen für eine optimal belichtete Lackschicht.

Die Fotoreaktion

DNQ-basierte Positiv- und Umkehrlacke

Abb. 82 zeigt die wesentlichen Schritte der Fotoreaktion, d. h. die bei der Belichtung gewünschte chemische Reaktion des Fotoinitiators im Fotolack: Unter Stickstoff-Abspaltung und Bindung von Wassermolekülen wandelt sich das Molekül des Fotoinitiators in eine Indenkarbonsäure um.

Die Bindungsstelle der Sulfonat-Gruppe bestimmt, ob ein Fotolack h- und i-line-empfindlich (Bindungsstelle am „rechten“ Kohlenstoffring), oder auch g-line-empfindlich (Bindungsstelle am „linken“ Kohlenstoffring) ist. Um die Löslichkeit im Lack und die thermische Stabilität zu erhöhen, wie 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 obiger Fotoreaktionen pro in der Lackschicht absorbierten Photon. Ausreichend rehydrierte DNQ-basierte Fotolacke mit bei den Belichtungswellenlängen transparentem Harz erreichen eine Quanteneffizienz von ca. 20 - 30 %.

Fehlt in der Lackschicht eine Mindestmenge an Wasser (unzureichende Rehydrierung, s. Kapitel 14), kann das Keton (Abb. 82 Mitte) verschiedene unerwünschte Nebenreaktionen eingehen wie eine Veresterung mit dem Harz oder Polymerisation unter CO_2 -Abspaltung. Hierbei bildet sich keine Indenkarbonsäure, die Entwicklungsrate steigt ausschließlich durch die Abnahme der Konzentration des Inhibitors DNQ.

Nicht-DNQ-basierte Positivlacke

Beim Ultradicklack AZ[®] 40 XT wird beim Belichten keine Indenkarbonsäure, sondern eine Sulfonsäure gebildet. Hierzu wird weder Wasser benötigt, noch Stickstoff freigesetzt, wodurch sich die Prozessierung dieses Lacks v. a. bei sehr großen Schichtdicken wesentlich einfacher und schneller gestaltet als dies mit DNQ-basierten Lacken möglich wäre.

Quervernetzende Negativlacke

In einigen Negativlacken wie der AZ[®] nLOF 2000 Serie oder dem AZ[®] 15 nXT aktiviert die Belichtung einen Melamin-Quervernetzer, der im nachfolgenden Backschritt (*Post Exposure Bake*) die Verknüpfung von kurzen Phenolharz-Einheiten zu längeren Ketten bewirkt.

Beim AZ[®] 125 nXT startet die Belichtung bereits bei Raumtemperatur eine Photopolymerisation von Acryl-Monomeren, einen Post Exposure Bake benötigt dieser Lack daher nicht.

Spektrale Empfindlichkeit von Fotolacken

g-, h- und i-Linien empfindliche Fotolacke

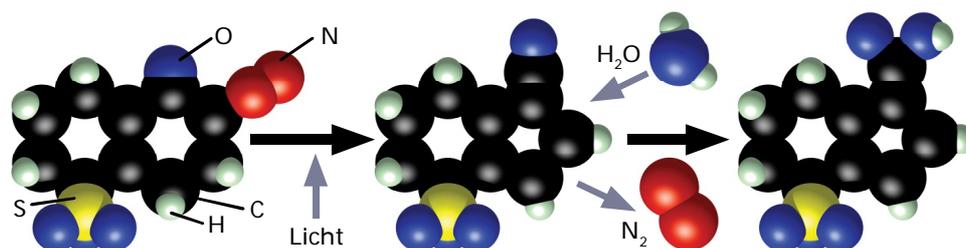


Abb. 82: Durch Belichten mit geeigneten Wellenlängen wandelt sich der Fotoinitiator, ein DiazoNaphthoQuinon-(DNQ-) Sulfonat (links) unter N_2 -Abspaltung und H_2O -Aufnahme in (Mitte) eine Indenkarbonsäure (rechts) um.

Die spektrale Empfindlichkeit unserer AZ®- und TI Fotolacke liegt im nahen UV-Bereich und bei den meisten Lacken zusätzlich im kurzwelligeren sichtbaren (blauen) Spektralbereich.

Lacke welche nur im Bereich der i-Linie (365 nm) empfindlich sind werden *i-line Lacke* genannt. Hierzu gehören u. a. chemische verstärkte Positivlacke wie der AZ® 40 XT oder Negativlacke wie der AZ® 15 nXT, AZ® 125 nXT oder die AZ® nLOF 2000 Serie. Breitband-Lacke absorbieren auch bei der g- (435 nm) und h- (405 nm) Linie, können aber ebenso monochromatisch innerhalb ihrer spektralen Empfindlichkeit belichtet werden.

Tief-UV Lacke

Tief-UV Lacke besitzen eine spektrale Empfindlichkeit unterhalb 250 nm Wellenlänge. Durch Belichtungswellenlängen von z. B. 247 oder 193 nm kann die Auflösung der erzielten Lackstrukturen verglichen mit i-Linien oder Breitband-Lacken deutlich verbessert werden. In Kombination mit der sog. *Immersionlithografie* auf welche hier nicht näher eingegangen werden soll werden Strukturgrößen unter 50 nm erzielt.

Fotolacke der nächsten Generation

Um der Anforderung immer kleinerer Strukturgrößen gerecht zu werden bedarf es Fotolacke welche bei noch kürzeren Wellenlängen belichtet werden können. Der Übergang zur sog. *Extrem-UV (EUV)*-Strahlung (< 120 nm Wellenlänge) und Röntgenlithografie (< 10 nm) erfordert jedoch vollkommen andersartige optische Systeme und Materialien als die zur Zeit in industriellen Fotolithografieverfahren eingesetzten.

Belichtungstechniken

Mask-Aligner

Bei der Belichtung mit einem Mask-Aligner fällt paralleles Licht durch die transparenten Bereiche einer Fotomaske auf die Lackschicht (Abb. 83 links). Die Fotomaske besteht üblicherweise aus einer Glas- oder Quarzscheibe als Träger auf welcher eine dünne, ihrerseits über einen lithografischen Schritt strukturierte Chrom-Beschichtung das nicht-transparente Muster bildet.

Die Abmessungen der Strukturen auf der Fotomaske entsprechen 1 : 1 den Dimensionen der belichteten Bereichen der Lackschicht, die Abbildung ist also *kongruent*. Für eine Optimierung der erzielten Auflösung befinden sich Fotomaske und Oberfläche der Lackschicht in direktem Kontakt, während z. B. texturierte Substrate einen Abstand zwischen Maske und Lackschicht erfordern können.

Stepper

Bei der Belichtung mit einem Stepper erfolgt die Belichtung ebenfalls als Projektion durch eine Fotomaske (Abb. 83 Mitte). Durch eine Verkleinerungsoptik sind die Dimensionen der belichteten Lackbereiche jedoch kleiner als die Strukturen der Fotomaske, an deren Auflösung demnach geringere Anforderungen gestellt werden können.

Da durch die verkleinerte Abbildung bei jedem Belichtungsschritt nur ein Teil der Lackschicht belichtet wird,

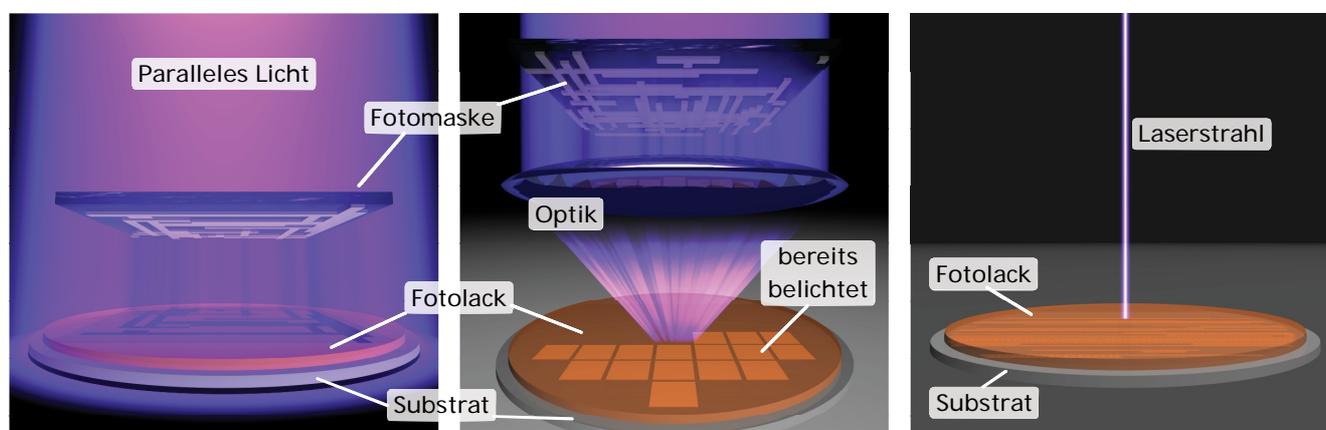


Abb. 83: Die gängigsten Methoden zur Belichtung von Fotolackschichten sind die direkte Projektion auf das gesamte Substrat durch eine Fotomaske mit einem *Mask-Aligner* (links, die Fotomaske und Lackschicht sind üblicherweise in direktem Kontakt), das schrittweise Belichten rechteckiger Teilflächen durch eine verkleinernde Optik (*Stepper*, Mitte) oder das direkte Schreiben der Strukturen mit einem Laserstrahl (rechts).

erfolgt die Belichtung des gesamten Wafers schrittweise (daher die Bezeichnung *Stepper*) nacheinander mit immer der gleichen Abbildung wodurch eine größere Anzahl identischer Bauteile auf einem Wafer realisiert werden können.

Laserbelichtung

Hierbei beschreibt ein Laser sequenziell, d. h. Punkt für Punkt bzw. Linie für Linie die Fotolackschicht auf direktem Weg (Abb. 83 rechts). Dadurch entfällt die Notwendigkeit der Herstellung teurer Fotomaschinen, Layouts können sofort umgesetzt werden wenn sie in geeigneter elektronischer Form dem Laserbelichter zur Verfügung stehen. Ein Nachteil der Laserbelichtung sind die langen Schreibzeiten pro Substrat, weshalb sich diese Belichtungstechnologie dann anbietet, wenn ein Layout auf nur wenigen Substraten geschrieben werden soll wie es z. B. bei der Herstellung von Fotomaschinen der Fall ist.

Weitere Belichtungstechniken

Zur Umsetzung hoher Auflösungsanforderungen, einer reproduzierbaren Strukturtreue und definierten Lackflanken sind an die Absorption des Lacks angepasste Belichtungswellenlängen sowie eine perfekte Optik unerlässlich, wie sie Mask-Aligner, Stepper oder Laserbelichter bieten.

Falls keine speziellen Belichter zur Verfügung stehen und auch keine hohen Ansprüche an die Auflösung und Strukturtreue der erzielten Lackmaske gestellt werden, kann eine Belichtung auch via z. B. gedruckte Folienmasken über beliebige andere Lichtquellen mit einem geeigneten Spektrum erfolgen. Beispielsweise erlaubt auch das Emissionsspektrum weißer Leuchtstoffröhren mit der darin stark vertretenen blauen g-Linie (435 nm) die Belichtung üblicher Breitband-Lacke.

Spektrale Emission typischer Belichter

Quecksilberdampf-Lampen

Das typische Emissionsspektrum eines Mask-Aligners oder Steppers mit Quecksilberdampf-Lampe ohne weitere optisch selektive Elemente enthält die g- (Wellenlänge 435 nm), h- (405 nm) und i-Linie (365 nm). Ein 6"-Mask-Aligner mit 350 W Hg-Lampe erreicht üblicherweise eine Lichtleistung von ca. 15 - 30 mW/cm², wobei die i-line-Intensität meist ca. 40 % der Gesamtemission aller drei Emissionslinien ausmacht. An diese Linien ist das Absorptionsspektrum des Fotoinitiators entsprechender Fotolacke angepasst.

Besonders für Dosis-empfindliche Anwendungen wie die Umkehrlack- oder Dicklackprozessierung bzw. für hohe Auflösungsanforderungen empfiehlt sich eine regelmäßige Kalibrierung der Lichtintensität, welche sich mit der Betriebsdauer der Lampe ändert. Eine Messung der lateralen Intensitätsverteilung über die beleuchtete Fläche sollte weniger als 10 % relative Abweichung über den Bereich eines 6 Zoll Wafers ergeben, um die Einstellung einer optimalen Belichtungsdauer für zentrale und randnahe Bereiche zu ermöglichen.

Laserbelichtung

Neben Hg-Lampen sind auch Laser mit passender Wellenlänge eine geeignete Lichtquelle zur Belichtung von Fotolack. Da die spektralen Absorptionsbanden des Fotoinitiators nicht abrupt bei einer bestimmten Wellenlänge enden, kann mit entsprechend angepasster Dosis auch mit Wellenlängen einige 10 nm oberhalb der in den Datenblättern angegebenen Spektralbereiche belichtet werden, was allerdings die Schreibzeiten deutlich verlängert.

Bestimmung der optimalen Belichtungsdosis bzw. Belichtungsdauer

Umrechnungsfaktoren zwischen Belichtungsdosis und Belichtungsdauer

Zur korrekten Bestimmung der Belichtungsdauer aus den in den Datenblättern angegebenen Belichtungsdosen muss folgendes bekannt sein bzw. in Erfahrung gebracht werden:

- Welches Spektrum emittiert der Belichter (monochromatisch bei i-, h- oder g-line), oder breitbandig?
- Bei welcher Wellenlänge wurde die Lichtintensität gemessen? Viele Detektoren messen nur i-line, wo für typische Werte bei 350 W Hg Lampen ca. 6 - 12 mW/cm² betragen, bei 1000 W Hg Lampen ungefähr das Dreifache.
- Bei welchen Wellenlängen ist der Fotolack empfindlich (i-, h- oder/und g-line)?
- Auf welche Wellenlänge bezieht sich die Angabe der Lichtdosis in den technischen Datenblättern der Fo-

tolacke? Meist wurden die dort aufgezeigten Belichtungsreihen monochromatisch mit i-line Belichtung durchgeführt.

Austauschbarkeit von Belichtungsintensität und Belichtungsdauer

Die Fotoreaktion bei Positiv- und Umkehrlacken ist üblicherweise ein Ein-Photonen-Prozess. Deshalb spielt es grundsätzlich keine Rolle, über welchen Zeitraum (von Femtosekunden bei gepulsten Lasern, über Sekunden bei Kontaktlithografie bis hin zu Stunden bei Laser-Interferenz-Lithografie) die benötigte Dosis als Produkt aus Intensität und Zeit in die Lackschicht eingetragen wird.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass mit zunehmender Lichtintensität und Lackschichtdicke die verzögerte Abfuhr der beim Belichten gebildeten Wärme oder Gase (N_2 bei Positiv- und Umkehrlacken) aus der Lackschicht zu einer thermischen oder mechanischen Schädigung des Lacks führen kann.

Weitere Einflussfaktoren auf die optimale Belichtungsdosis

Die Reflektivität des Substrats bestimmt vor allem bei optisch dünnen Lackschichten, welcher Anteil der einfallenden Intensität tatsächlich von der Lackschicht absorbiert wird. Glas-Wafer reflektieren ca. 5 - 10 % der kurzwelligen Strahlung, Silicium-Wafer ca. 30 %, bestimmte Metallfilme können einen Reflexionskoeffizient über 90 % aufweisen.

Welche Belichtungsdosis „optimal“ ist hängt auch von den Anforderungen an den Lithografieprozess ab. Eine gewisse Unterbelichtung kann Belichtungsartefakte durch texturierte, diffus reflektierende oder texturierte Substrate mindern. Bei der Dicklackprozessierung hält eine ausreichend bemessene Lichtdosis die spätere Entwicklungsdauer vertretbar kurz.

Belichtungsreihen für Positivlacke

Grundsätzlich empfiehlt sich zur Prozessoptimierung, bei jedem neuen Prozess und bei Änderungen an Equipment oder Fotolack eine Belichtungsreihe zur Bestimmung der optimalen Lichtdosis. Diese hängt neben dem Fotolack und den optischen Substrateigenschaften auch von den individuellen Prozess-Anforderungen ab.

Bei Positivlacken liegt für die meisten Lithografie-Prozesse die „optimale“ Lichtdosis in der Nähe des Wertes, bei dem die Entwicklungsrate zu sättigen beginnt, also zu größeren Lichtdosen hin nicht weiter ansteigt.

Die Grafen in Abb. 84 zeigen die Entwicklungsraten verschiedener positiver Fotolacke als Funktion der Belichtungsdauer bzw. -dosis. Alle Lacke wurden bei 4000 U/min aufgeschleudert, bei 100°C auf der Hotplate für 1 Minute je μm Lackschichtdicke gebacken und nach dem Belichten im TMAH-basierten AZ[®] 826 MIF tauchentwickelt. Belichtet wurde mit einem Mask-Aligner mit 350 W Hg Lampe bei einer i-line Intensität von 8.5 mW/cm² und einer über g-, h- und i-line integrierten Intensität von ca. 22 mW/cm².

Bei allen Beispielen zeigt sich deutlich, wie bei den verwendeten Positivlacken die Entwicklungsrate ab einer bestimmten Dosis zu sättigen beginnt, was der Umwandlung des gesamten Fotoinitiators im Lack entspricht,

Belichtungsreihen für Umkehrlacke und Negativlacke

Bei im Negativmodus prozessierten Umkehrlacken verstärkt eine hohe Dosis bei der ersten (Struktur gebenden) Belichtung den Grad der Umkehrreaktion wie es in Kapitel 20 im Detail beschrieben ist.

Bei der Negativlackprozessierung nimmt der Grad der Quervernetzung des Harzes und damit die Lackunlöslichkeit im Entwickler mit der Lichtdosis zu, wie es in Abb. 85 anhand des AZ[®] nLOF 2070 gezeigt ist. Zu hohe Lichtdosen können zu einer unbeabsichtigten Belichtung benachbarter, nominell „dunkler“ Lackbereiche führen. Dadurch vergrößern sich die Abmessungen der entwickelten Lackstrukturen wodurch sich das Freientwickeln kleiner Löcher bzw. schmaler Gräben erschwert bzw. unmöglich macht.

Falls Umkehr- oder Negativlacke für lift-off Prozesse eingesetzt werden, ist die Auswirkung der Belichtungsdosis auf das Lackprofil zu berücksichtigen: Da die empfangene Lichtdosis von der Lackoberfläche zum Substrat hin aufgrund der begrenzten Eindringtiefe der verwendeten Wellenlängen exponentiell abnimmt, definiert sich die optimale Belichtungsdosis aus dem für den jeweiligen Prozess gewünschten Lackprofil.

Das Bleichen DNQ-basierter Positivlacke

Der Absorptionskoeffizient unbelichteter und belichteter Fotolacke

Der Fotoinitiatorgehalt typischer Fotolacke bewirkt einen Absorptionskoeffizienten im Bereich des Empfind-

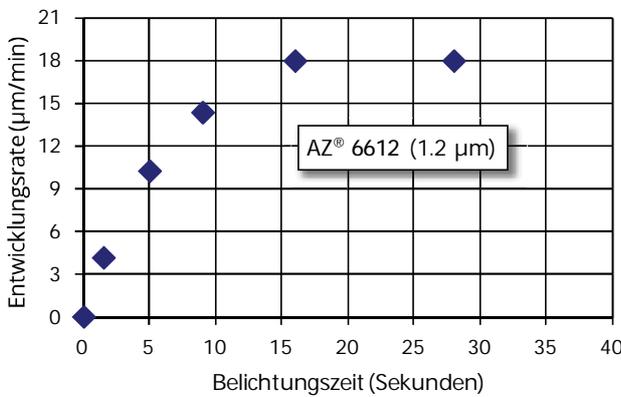
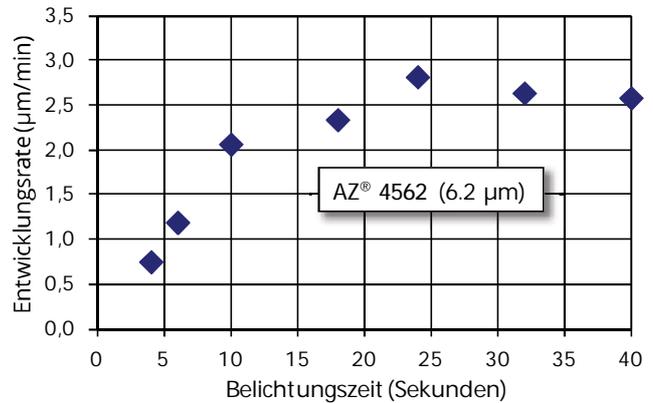
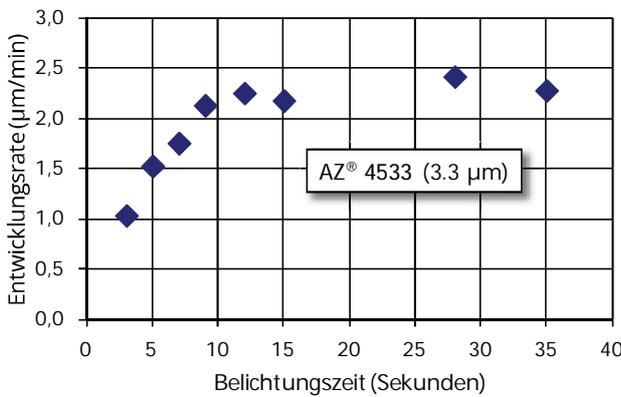
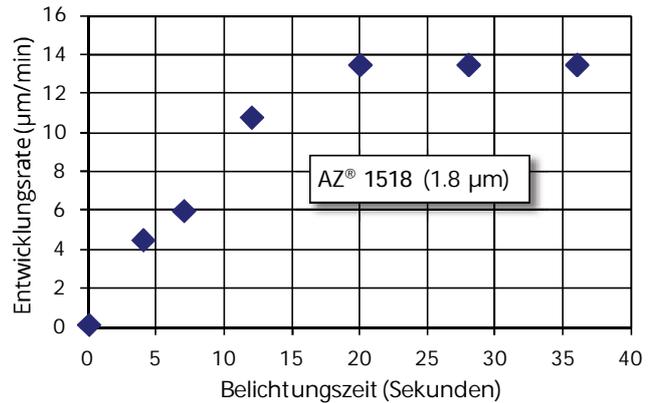
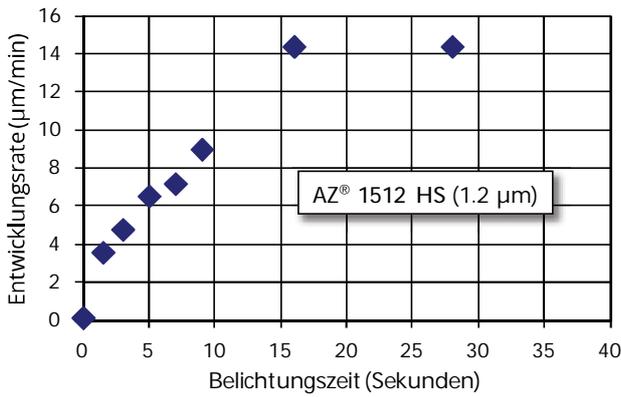


Abb. 84: (Fünf Grafen links und oben) Die Entwicklungsrate verschiedener Fotolacke steigt zunächst mit zunehmender Belichtungszeit, um dann auf einem Wert zu sättigen der vom Fotolack, dem Entwickler und den vorhergehenden Prozessparametern wie Softbake und Rehydrierung abhängt.

Die Lichtintensität bei diesen Reihen lag bei ca. 22 mW/cm² (summiert über die g-, h- und i-Linie), so dass eine Sekunde Belichtungszeit einer Dosis von ca. 22 mJ/cm² entspricht. Entwickelt wurde im AZ[®] 826 MIF (2.38 % TMAH) mittels Tauchentwicklung, als Substrate dienten polierte Silicium-Wafer.

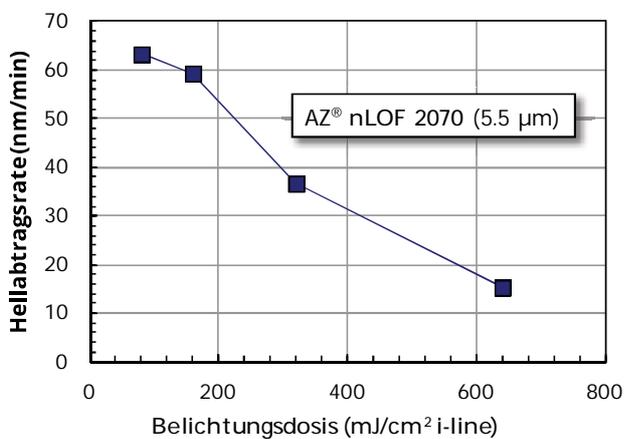


Abb. 85: (Links) Bei quervernetzenden Negativlacken (hier: AZ[®] nLOF 2070) steigt der Quervernetzungsgrad des Harzes mit der Belichtungs-dosis. Die in diesem Grafen gezeigte Abtragsrate des belichteten Lacks im Entwickler wiederum sinkt mit zunehmendem Quervernetzungsgrad und ist im Idealfall Null, wobei ggfalls. die Zeiten und Temperaturen eines für manche Lacke der Belichtung folgenden, die Quervernetzungsreaktion abschließenden Post Exposure Bakes ebenfalls eine Rolle spielen.

Die Lichtintensität lag bei ca. 8 mW/cm² (i-Linie). Entwickelt wurde im AZ[®] 826 MIF (2.38 % TMAH) mittels Tauchentwicklung, als Substrate dienten polierte Silicium-Wafer.

lichkeitsmaximums von ca. $1 - 2 \mu\text{m}^{-1}$ (Abb. 40 auf Seite 29), was aufgrund der damit verbundenen Eindringtiefe des Lichts von wenigen μm eine Durchbelichtung dicker Fotolackschichten theoretisch unmöglich machen würde.

Allerdings verringert sich während der Belichtung durch die Umwandlung des Fotoinitiators der Absorptionskoeffizient um Größenordnungen: Der Fotolack bleicht beim Belichten (*Bleaching*) und wird unterhalb von ca. 440 nm Wellenlänge weitgehend transparent (Abb. 86).

Dadurch steigt in den bereits belichteten Lackbereichen die Eindringtiefe der Belichtungswellenlängen, was einer selbstverstärkten Kanalisierung für das auf die Lackschicht einfallende Licht entspricht. Erst dadurch wird sowohl eine vollständige Belichtung auch dicker Lackschichten, als auch das Erzielen hoher Aspektverhältnisse möglich.

Belichtung dünner und dicker Fotolackschichten

Die auf die Eindringtiefe des Lichts bezogene Lackschichtdicke bestimmt, wie sich das Tiefenprofil der bereits empfangenen Lichtdosis mit der Belichtungsdauer ändert:

Bei *optisch dünnen* Lackschichten (mit einer Schichtdicke kleiner als die Eindringtiefe der Belichtungswellenlänge) erfolgt wie in Abb. 87 (obere Reihe) gezeigt eine vom Belichtungsstart an nahezu homogene Durchbelichtung bis zum Substrat. Eine Erhöhung der Lichtdosis bis zum vollständigen Umwandeln des Fotoinitiators bewirkt demnach eine größere, aber von der Lackoberfläche bis zum Substrat weitgehend homogene Entwicklungsrate.

Optisch dicke Lackschichten (mit einer Stärke von mehreren Eindringtiefen des Lichts) absorbieren zu Beginn der Belichtung nur in den obersten μm , welche dabei bleichen und das Licht während der weiteren

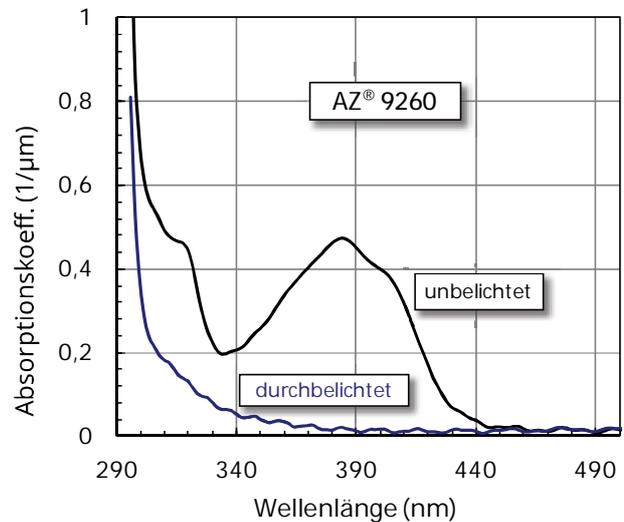


Abb. 86: Das Absorptionsspektrum des AZ® 9260 vor (schwarz) und nach (blau) dem Belichten zeigt deutlich den Effekt des Bleichens.

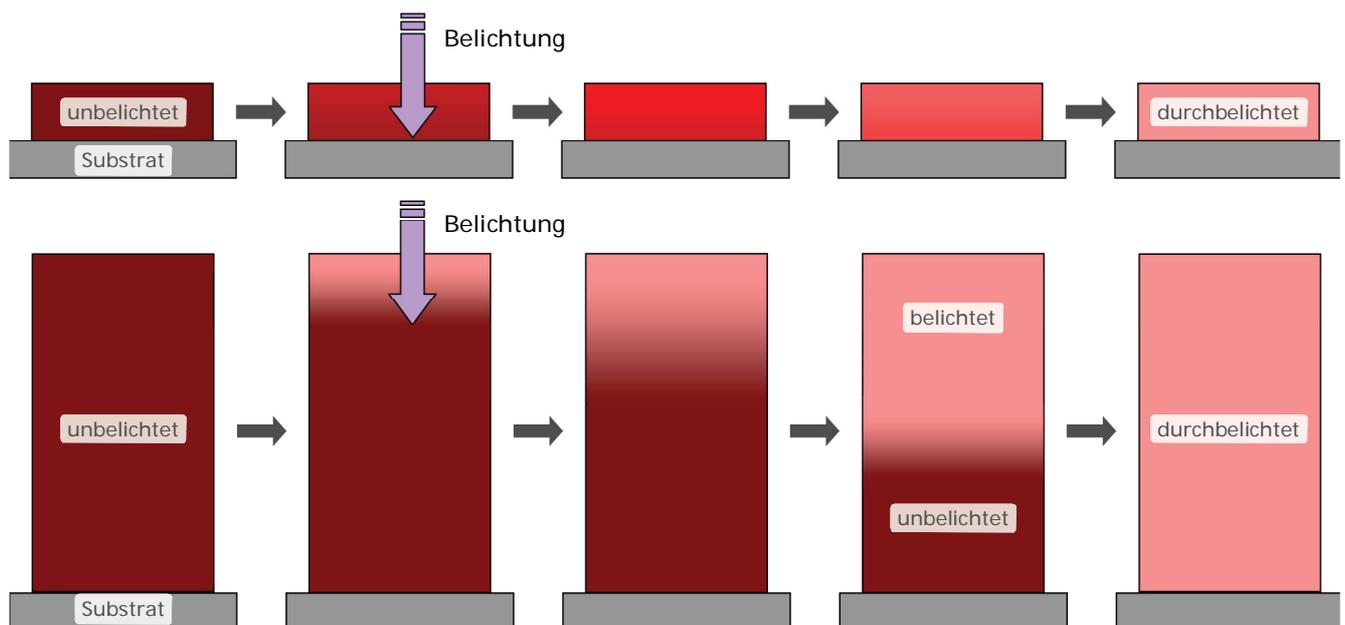


Abb. 87: Während optisch dünne Fotolackschichten (obere Reihe) nahezu gleichmäßig durchbelichtet werden, bleichen Lackschichten mit einer Dicke von mehreren Eindringtiefen der Belichtungswellenlänge (untere Reihe) mit zunehmender Lichtdosis (von links nach rechts) in Richtung Substrat. Dadurch ergibt sich beim späteren Entwickeln eine für Dünn- und Dicklacke unterschiedlich geartete Abhängigkeit zwischen Belichtungsdosis und Entwicklungsrate bzw. Dauer der Durchentwicklung.

Belichtung immer tiefer in Richtung Substrat lenken (Abb. 87, untere Reihe). Hierbei steigt die entwickelbare Schichtdicke annähernd linear mit der Belichtungs-dosis an, was bestimmte Anwendungen in der Grautonlithografie ermöglicht: Erst ab einer bestimmten Mindestdosis kann die Lackschicht komplett durchentwickelt werden.

Der Kontrast von Fotolacken

Bedeutung des Kontrasts

Die Lichtbeugung aufgrund der Wellennatur des Lichts verhindert beim Belichten eine perfekt binäre Abbildung des Masken-Layouts im Lackfilm. Es wird also auch mit perfekten Fotomasken stets „Graubereiche“ im Fotolack geben, welche eine Dosis zwischen Null und der Maximaldosis größerer belichteter Bereiche erhalten (vgl. Abb. 89).

Würde die Entwicklungsrate eines Fotolacks linear mit der Belichtungs-dosis ansteigen, wären deshalb weder senkrechte Lackflanken, noch hohe Auflösungen im sub- μm -Bereich möglich. Dass beides dennoch erzielt werden kann liegt am hohen Kontrast eines Fotolacks. Fotolacke mit hohem Kontrast erzielen einen sehr geringen Abtrag schwach belichteter Bereiche und entwickeln ab einer bestimmten Lichtdosis mit konstanter und hoher Rate.

Definition des Kontrasts: Die Kontrastkurve

Die Kontrastkurve eines Fotolacks trägt das Verhältnis der nach dem Entwickeln verbliebenen Lackschichtdicke zur ursprünglichen Schichtdicke d/d_0 als Funktion der logarithmisch skalierten Belichtungs-dosis auf (Abb. 88).

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 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.

Der mögliche bzw. erzielte Kontrast hängt nicht nur vom Fotolack selbst ab: Beim Vergleich einer gegebenen Kontrastkurve und dem eigenen Prozess sind sämtliche Parameter, welche sich auf die Entwicklungsrate und -zeit auswirken wie Lackschichtdicke, Softbake, Rehydrierung, Lufttemperatur, Entwickler etc. zu berücksichtigen.

Kontrasterhöhung für maximale Auflösung und Aspektverhältnisse

Geeignete Methoden zur Kontrasterhöhung (= steiles Lackprofil und hohes Aspektverhältnis) sind ...

- die Verwendung eines hoch-kontrastigen Fotolacks wie dem Dünnlack AZ® 1512HS oder der AZ® ECI 3000 Serie mit vergleichsweise hohem Fotoinitiatorgehalt, was eine hohe Entwicklungsrate bei minimalem Dunkelabtrag ermöglicht (s. Abschnitt 6.2),
- die Verwendung eines Negativlacks wie der AZ® nLOF 2000 Serie oder AZ® 15 nXT oder AZ® 125 nXT), die an den belichteten Stellen durch ihre Quervernetzung einen sehr geringen Abtrag im Entwickler aufweisen,
- bei DNO-basierten Lacken eine ausreichende Rehydrierung, welche eine kurze Entwicklungsdauer ermöglicht.
- die Minimierung des Dunkelabtrags und Aufrechterhaltung einer hohen Entwicklungsrate von Positivlacken über optimierte Softbakeparameter, und
- die Verwendung eines hoch-selektiven, optimal verdünnten Entwicklers wie beispielsweise die TMAH-

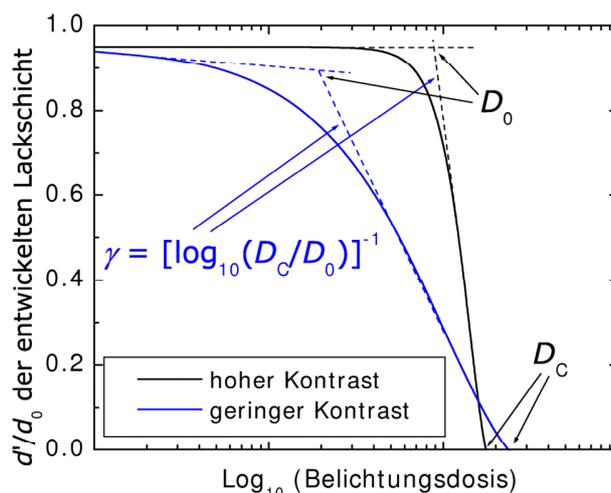


Abb. 88: Der Kontrast von Fotolacken definiert als die Steigung der Abhängigkeit der nach dem Entwickeln verbliebenen zur ursprünglichen Schichtdicke d/d_0 von der logarithmisch aufgetragenen Belichtungs-dosis.

basierten Entwickler AZ® 326 MIF und AZ® 726 MIF, oder dem AZ® 400K oder 351B in einer 1 : 4 oder im Falle sehr dünner Lackschichten bedarfsweise auch höheren Verdünnung.

Der Vorteil eines hohen Kontrasts lässt sich bei Positivlacken grundsätzlich nur dann nutzen, wenn über eine Belichtungsreihe die hierfür optimale Belichtungs-dosis bestimmt und angewandt wird. Nur so kann eine unnötig lange Entwicklung zu schwach belichteten Lacks, als auch ein Abtrag nominell unbelichteter, durch Beugung und Streuung aber dennoch teilbelichteter Lackbereiche verhindert werden.

Kontrastverringering in der Grautonlithografie mit Positivlacken

Bei der Grautonlithografie sowie speziellen Anwendungen der Laserinterferenzlithografie (LIL) ist hingegen ein geringer Kontrast erwünscht, d. h. ein möglichst linearer Zusammenhang zwischen Lichtdosis und Entwicklungsrate, wie es Abschnitt 16.11 im Detail beschreibt.

Wellenlänge und Maskenabstand als untere Auflösungsgrenze

Physikalische Grundlagen der Beugung

Die Dimensionen der Öffnungen in Fotomasken für die Mikrostrukturierung liegen oft in der Größenordnung einiger bis einiger 10 Belichtungs-wellenlängen. Deshalb ist die Abbildung durch eine solche Öffnung auf die Lackoberfläche nicht perfekt parallel, sondern ein Beugungsmuster.

Behandelt man diesen Fall wellenoptisch als *Beugung am Einfachspalt* ist die erzielbare laterale Auflösung d der auf die Lackoberfläche einfallenden Abbildung durch die Formel $d = (\lambda g)^{1/2}$ mit der Belichtungs-wellenlänge λ und dem Gap (= Abstand der Maskenunterseite zur Lackoberfläche) g .

Ein solches definiertes Gap kann beabsichtigt bzw. unumgänglich sein, um bei texturierten Substraten eine Beschädigung der Fotomaske, oder bei glatten Substraten ein Verkleben der Fotomaske mit der Lackschicht zu verhindern. Gründe für ein unbeabsichtigtes Gap hingegen 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 oder Bewegen von Lackgebinden,

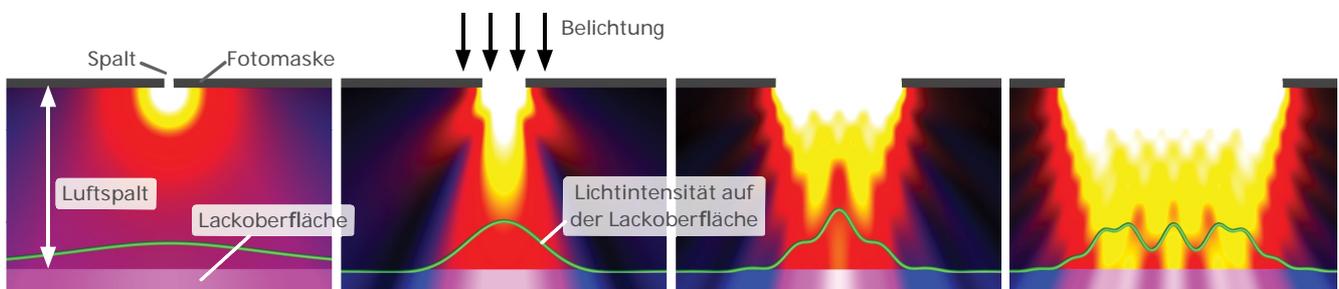
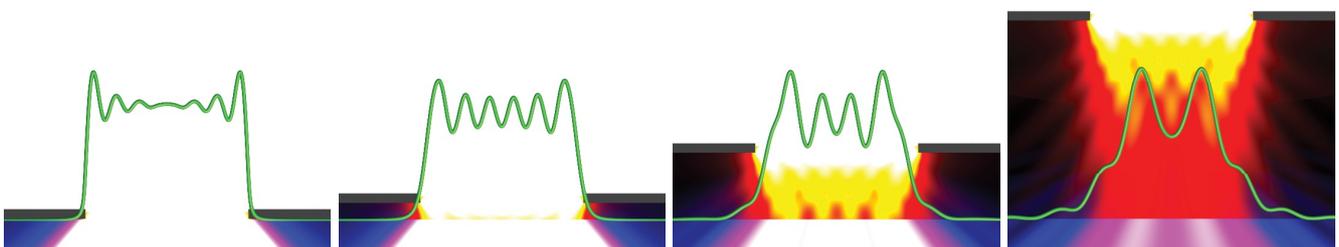


Abb. 89: (Obere Reihe) Bei der Belichtung einer Lackschicht durch verschieden große Öffnungen der Fotomaske entspricht die Intensitätsverteilung des Lichts in dem Luftspalt (Gap) zwischen Fotomaske und Lackoberfläche (von schwarz über rot nach weiß zunehmend) einem Beugungsmuster am Einfachspalt. Die Lichtintensitätsverteilung auf der Lackoberfläche (von schwarz über blau und violett nach weiß zunehmend, zusätzlich als grüner Plot dargestellt) entspricht für eine bezogen auf die Belichtungs-wellenlänge kleine Spaltbreite und großes Gap (ganz links) dem einer Punkt- bzw. Linienquelle, und für breite Spalte (ganz rechts) einer zunehmend parallelen Abbildung durch die Öffnung der Fotomaske auf die Lackoberfläche.

Abb. 90: (Untere Reihe) Im selben (Farb-)Schema wie in Abb. 89 erläutert wird hier der Abstand zwischen Fotomaske und Lackoberfläche bei konstanter Spaltbreite von Null (Kontaktbelichtung, links) auf einen Wert von mehreren Belichtungs-wellenlängen (rechts) variiert. Die nahezu homogene, binäre Verteilung der Lichtintensität ohne Gap geht mit zunehmendem Gap über in ein zunehmend ausgeprägtes Beugungsmuster mit entsprechend inhomogener Intensitätsverteilung.



UV-transmittierende Substrate (z. B. Quarz, Glas, dickes SiO₂ auf Si, Polymere wie PET oder Polycarbonat) leiten Licht lateral im Substrat, erlauben Rückreflexionen vom Substrathalter und verringern so die laterale Auflösung und Kantensteilheit der entwickelten Lackstrukturen.

In beiden Fällen helfen ...

- eine optimale, v. a. nicht zu große Belichtungsdosis,
- eine Antireflexionsbeschichtung wie z. B. AZ® Barli II, oder
- die Verwendung von Umkehr- oder Negativlacken, bei denen eine Durchbelichtung bis zum Substrat nicht immer erforderlich ist, wodurch dessen optische Eigenschaften keine dominierende Rolle spielen.

Laserbelichtung

Geeignete Wellenlängen

Grundsätzlich empfiehlt sich auch bei der Laserbelichtung eine Belichtungswellenlänge im Bereich der Empfindlichkeitsmaxima des zu belichtenden Fotolacks. Da die spektrale Empfindlichkeit von Fotolacken hin zu großen Wellenlängen jedoch nicht abrupt auf Null sinkt, ist beim Laser-Schreiben aufgrund der sehr hohen Lichtintensitäten auch eine Belichtung einige 10 nm entfernt von den Absorptionsbanden möglich. Durch die dort geringe Absorption verlängern sich die Schreibzeiten jedoch entsprechend.

Direkt-Schreiben

Das Schreiben von Linien in die Fotolackschicht mit Lasern als Lichtquelle unterscheidet sich von herkömmlichen Belichtungsmethoden vor allem durch die sehr hohe Lichtintensität des Laserstrahls (bis ca. 10¹⁰ - 10¹¹ mW/cm² bei Laser-Dioden!). Dadurch kann sich die Lackschicht so stark erwärmen, dass sich der Fotoinitiator thermisch zersetzt, womit sich die spätere Entwicklungsrate verringert. Ebenfalls möglich ist eine thermische Quervernetzung der Lackschicht in den belichteten Bereichen, was deren Entfernung am Ende des Prozesses erschweren bzw. unmöglich machen kann. Bei Umkehr- oder Negativlacken kann die Umkehrreaktion bzw. die Quervernetzung durch die Erwärmung bereits während der Laserbelichtung selbst stattfinden.

Bei DNO-basierten Positivlacken ist eine Bläschenbildung in der Lackschicht oder deren Abplatzen durch den beim Belichten gebildeten Stickstoff möglich, falls dieser nicht rasch genug aus der Schicht ausgasen kann.

In diesen Fällen kann der Ausweg darin bestehen, entweder bei geringerer Intensität jeden Punkt länger zu belichten, oder die gesamte Struktur in mehreren Durchgängen zu schreiben.

Laser-Interferenz-Lithografie: Geeignete Fotolacke

Bei der Laser-Interferenz-Lithografie sind die Anforderungen an die Auflösung des Lacks meist sehr hoch. Des Weiteren werden dabei meist sehr dünne Lackschichten von wenigen 100 nm benötigt, welche durch Verdünnung bestehender Lacke realisiert werden können. Aus beiden Gründen empfehlen sich für die Laser-Interferenz-Lithografie z. B. der AZ® 701 MiR (geeignet für nachfolgendes Trockenätzen oder Lift-off) oder die AZ® ECI 3000 Serie (optimiert für nasschemische Prozesse wie Ätzen) in entsprechender Verdünnung.

Grauton-Lithografie

Grundlagen der Grauton-Lithografie

Normalerweise ist man in der Fotolithografie danach bestrebt, ein binäres Verhalten der verwendeten Fotolacke zu erzielen: Bestimmte Bereiche auf dem Substrat sollen komplett frei entwickelt werden, die verbleibenden Lackstrukturen möglichst steile Flanken aufweisen.

Die Grauton-Lithografie hat das Ziel, über die laterale Variation der Belichtungsdosis eine bestimmte Topografie aus der Lackschicht heraus zu entwickeln. Im folgenden ist beschrieben, über welche Mechanismen und Prozessparameter dies erzielt werden kann, die Auswahl geeigneter Lacke richtet sich im Wesentlichen nach der Funktion der Lackmaske.

Grauton-Lithografie mit „dünnen“ Fotolacken

Als „dünne Lackschichten“ sind hier optisch dünne Lacke gemeint, deren Schichtdicke also kleiner als die Eindringtiefe der verwendeten Belichtungswellenlänge ist. Bei typischen g-/h-/i-line Lacken welche mit diesen Linien belichtet werden trifft diese Bedingung auf Schichtdicken < 1- 2 µm zu.

Da bei der Belichtung dünner Lackschichten diese weitgehend homogen bis zum Substrat belichtet wer-

den ist die Entwicklungsrate von der Lackoberfläche bis zum Substrat ebenfalls konstant (vgl. obere Reihe in Abb. 87), hängt jedoch von der lateral variierenden Belichtungs-dosis ab und überträgt sich beim Entwickeln in die gewünschten Lack-Topologie.

Der entscheidende Parameter ist demnach die Form der Abhängigkeit der Entwicklungsrate von der Belichtungs-dosis. Wie das Schema rechts zeigt, hat ein realer Lack (grün) eine einer Stufenfunktion ähnliche Abhängigkeit: Unterhalb einer bestimmten Belichtungs-dosis wird der Lack nur über den Dunkelabtrag im Entwickler gelöst, etwas über dieser Dosis beginnt die Entwicklungsrate auf um mehrere Größenordnungen über dem Dunkelabtrag liegenden Niveau zu sättigen. Um mit solchen Lacken Grautonlithografie zu betreiben müsste die Lichtdosis innerhalb eines sehr schmalen Bereichs der Dosis über das Substrat variiert werden, was schwer reproduzierbar ist. Die Entwicklungsrate eines für die Grauton-Lithografie idealen Fotolacks wäre eine lineare Funktion der Lichtdosis (blau).

Der Kontrast eines realen Fotolacks lässt sich über seine Prozessparameter in Grenzen verringern, wodurch er sich für die Grauton-Lithografie eignen kann, indem die Entwicklungsrate über einen vergleichsweise großen Bereich der Belichtungs-dosis gesteuert wird:

Ein kurzer oder/und kühler Softbake (z. B. 60 - 70°C für eine Minute je μm Lackschichtdicke) erhöht, bezogen auf normale Softbakebedingungen, den Dunkelabtrag über den hohen Restlösemittelanteil stärker als die Entwicklungsrate belichteten Fotolacks.

Alternativ verringert ein sehr heißer oder/und langer Softbake (z. B. 120°C für 5 - 10 Minuten) den Kontrast über i) die Verringerung der Entwicklungsrate durch thermisch zersetzten Fotoinitiator und ii) die Erhöhung des Dunkelabtrags, da der zersetzte Fotoinitiator nicht mehr als Inhibitor zur Verfügung steht.

Zusätzlich kann eine kurze Flutbelichtung einen „Offset“ der Entwicklungsrate der bei der Struktur-gebenden Belichtung unbelichteten Lackbereiche bewirken.

Ein scharf angesetzter Entwickler (z. B. AZ® 400K oder 351B 1 : 2.5 ... 1 : 3 in H_2O) hat eine deutlich geringere Selektivität (Verhältnis der Entwicklungsrate zum Dunkelabtrag) als ein schwächer angesetzter Entwickler, was einem geringeren Kontrast des Fotolacks gleichkommt.

Grauton-Lithografie mit „dicken“ Fotolacken

Optisch dicke Lackschichten besitzen eine Dicke von einem Mehrfachen der Eindringtiefe der verwendeten Belichtungswellenlänge, was für üblichen Positivlacke einer Schichtdicken ab 5 - 10 μm entspricht.

Wie Abb. 87 (unten) zeigt, ermöglicht bei entsprechend dicken Lackschichten das Bleichen des Fotolacks beim Belichten deren Anwendung in der Grautonlithografie: Durch den Effekt des Bleichens 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. Dadurch steigt die entwickelbare Schichtdicke annähernd linear mit der Belichtungs-dosis.

Im Gegensatz zu den im vorherigen Unterabschnitt aufgeführten Anforderungen an dünne Lackschichten sollten in der Grautonlithografie dicke Lackschichten möglichst hochkontrastig prozessiert werden. Die zu diesem Ziel aufgeführten Maßnahmen helfen, den oberen, belichteten Lackbereich möglichst zügig zu entwickeln und beim Übergang zum wenig bis gar nicht belichteten Bereich die Entwicklung zu stoppen.

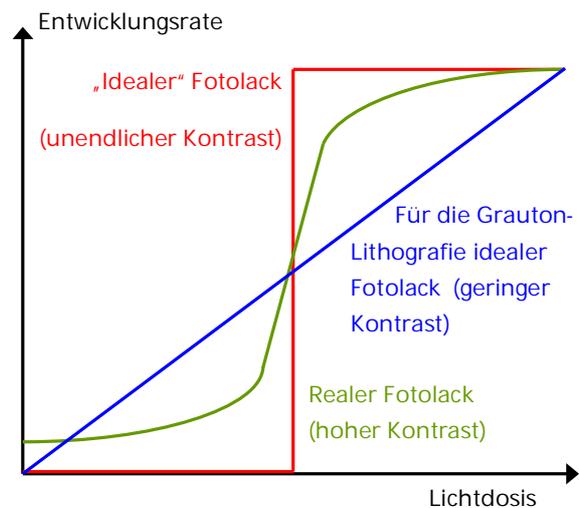


Abb. 92: Die schematische Darstellung der Bedeutung eines geringen (blaue Kurve), hohen (grüne Kurve) und im Idealfall unendlich großen (rote Kurve) Kontrasts bei Fotolacken bzgl. der Abhängigkeit zwischen Belichtungs-dosis und erzielbarer Entwicklungsrate.

Stickstoffbildung beim Belichten

Fotoreaktion und Stickstoffbildung

Wie im Schema der Fotoreaktion in Abb. 82 gezeigt, setzen die meisten DNO-basierten Positivlacke beim Belichten Stickstoff frei. Dieses Gas bildet sich bei der Umwandlung des Fotoinitiators in eine Karbonsäure in Mengen, welche ein Mehrfaches des Lackvolumens betragen können.

Im Idealfall diffundiert der gebildete Stickstoff bereits während des Belichtens rasch genug aus der Lackschicht ohne diese zu schädigen. Mit zunehmender Lackschichtdicke und Belichtungsintensität, sowie während Backschritten nach der Belichtung steigt jedoch die Gefahr, dass der Stickstoff-Partialdruck in der Lackschicht soweit ansteigt, dass sich darin Bläschen oder Spannungsrisse bilden können.

Blasenbildung während der Belichtung

Bilden sich bereits während der Belichtung bzw. unmittelbar danach Stickstoff-Bläschen im Lack, bzw. schäumt die Lackschicht regelrecht auf (milchiges bzw. unter dem Mikroskop styroporartiges Erscheinungsbild, siehe Abb. 93), kann sich dies wie folgt auswirken:

- Bereits beim Belichten gebildete N_2 -Blasen streuen das Licht, wodurch sich zum einen die mögliche Auflösung verringert, zum anderen v. a. bei dicken Lackschichten Substrat-nahe Lackbereiche eine stark verringerte Lichtleistung erhalten. Gerade bei dicken Lackschichten kann dies eine Durchentwicklung erschweren bzw. unmöglich machen.
- Mechanische Verspannungen in der Lackschicht durch den N_2 -Partialdruck können zu einer Lackabhebung und einem Unterätzen bei nachfolgenden nasschemischen Ätzprozesse bzw. einem Unterwachsen der Lackstrukturen bei der galvanischen Abscheidung führen.
- Nach dem Entwickeln zeigen die Lackflanken kraterförmige Strukturen und Risse, welche die an der Grenze vom belichteten zum unbelichteten Lackbereich gebildeten Bläschen und Spannungsrisse abbilden (Abb. 94).

Mögliche Ursachen und Abhilfen

Eine schlechte Lackhaftung, verstärkt durch den in Substratnähe höheren Restlösemittelanteil, fördert die Bildung von N_2 -Bläschen an der Grenzfläche zum Substrat. Die Kapitel 8 und 13 geben Hinweise zur Maximierung der Lackhaftung über eine korrekte Substratvorbehandlung und optimale Softbakeparameter.

Hohe Belichtungsintensitäten (z. B. bei der Laserbelichtung oder Verwendung von 1000 W Mask-Alignern) bedeuten eine erhöhte Stickstoff-Generationsrate, wodurch der Stickstoff gerade aus dicken Lackschichten u. U. nicht rechtzeitig erweichen kann. Mögliche Abhilfen sind entweder eine Verringerung der Belichtungsintensität, oder – falls technisch machbar – eine Aufteilung der Dosis auf mehrere Belichtungsschritte mit Pausen dazwischen.

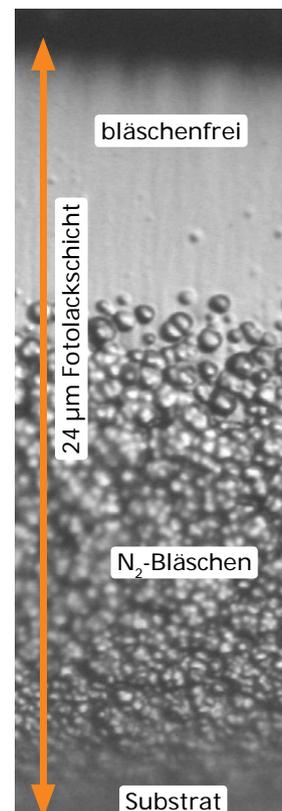
Fotoinitiator-reiche Dünnlacke wie z. B. die AZ® 1500 oder AZ® 6600 Serie sind wegen ihrer entsprechend stärkeren Neigung zur N_2 -Bildung beim Belichten nicht für große Lackschichtdicken über ca. 5 μm geeignet. Für Schichtdicken von ca. 5 - 20 μm empfehlen wir die Dicklacke wie den AZ® 4562 oder 9260

Für noch dickere Lackschichten empfiehlt sich die Verwendung eines Fotolacks, der durch eine andere Fotochemie beim Belichten gar keinen Stickstoff freisetzt. So erlaubt der chemisch verstärkte Ultradicklack AZ® 40 XT Schichtdicken von ca. 20 - 100 μm .

Stickstoffbildung bei thermischen Prozessen nach dem Belichten

Ursachen und Erscheinungsbild

Abb. 93: Der Querbruch einer dicken belichteten Positivlackschicht (hier der AZ® 9260) zeigt deutlich, wie der beim Belichten gebildete Stickstoff vorwiegend im substratnahen Lackbereich zahlreiche Bläschen bildet.



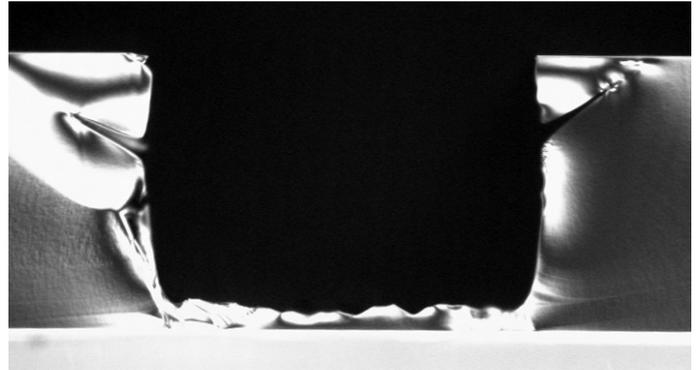
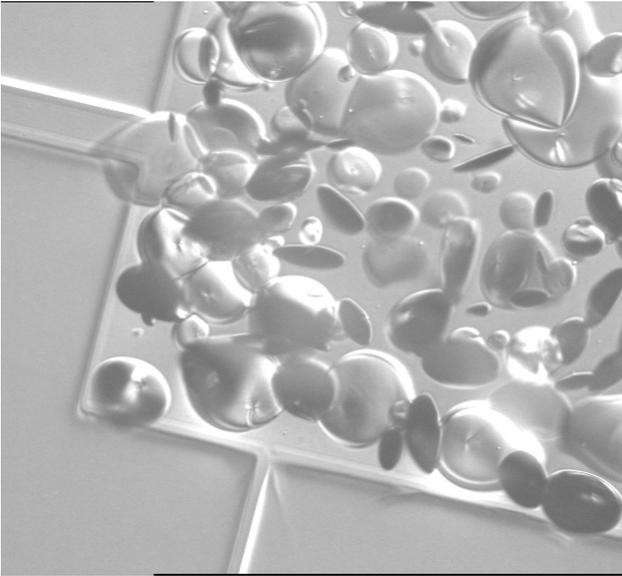


Abb. 94: Hier haben sich beim Belichten durch den dabei gebildeten Stickstoff in der Lackschicht keine Bläschen, sondern linseförmige Spannungsrisse gebildet. Diese können in Aufsicht (links) ähnlich wie Bläschen aussehen, während der Querbruch einer entwickelten Struktur (rechts) die Risse deutlich zeigt.

Manchmal entstehen Stickstoff-Bläschen erst bei thermischen Prozessschritten nach dem Belichten in einer bis dahin bläschenfreien Lackschicht. Durch die erhöhte Temperatur ist der noch in der Lackschicht gelöste Stickstoff zum einen mobiler und kann sich dadurch rascher zu Bläschen zusammenfinden. Die Bläschenbildung selbst wird durch die Abnahme der Viskosität der erwärmten Lacks gefördert.

Diesbezüglich kritische Backschritte sind z. B. ein Post Exposure Bake oder Umkehrbackschritt, wobei der bei der Belichtung gebildete, noch in der Lackschicht befindliche Stickstoff im beim Backen erweichenden Fotolack Bläschen bildet.

Eine Bläschenbildung ist auch in bis dahin unbelichteten, entwickelten Lackstrukturen möglich wenn bei einem nachfolgenden Prozessschritt eine unbeabsichtigte Belichtung begleitet von ggfalls. höheren Temperaturen folgt. Dies kann bei Beschichtungsprozessen (z. B. via Aufdampfen, Sputtern oder CVD) oder Trockenätzen geschehen, wo kurzweilige thermische Strahlung oder UV-Strahlung aus dem Plasma in Kombination mit einer Erwärmung der Lackschicht auftreten.

Maßnahmen zur Abhilfe

Treten Stickstoff-Bläschen bei Backschritten nach dem Belichten in den belichteten Lackstrukturen auf, hilft eine Wartezeit bei Raumtemperatur vor dem Backschritt um den Stickstoff möglichst vollständig ausgasen zu lassen. Die dazu notwendige Dauer wächst für einen gegebenen Lack mit dem Quadrat der Lackschichtdicke, und kann für mehrere μm dicke Lackschichten einige Minuten, bei mehreren $10\ \mu\text{m}$ dicken Lacken auch mehrere Stunden betragen.

Eine vorsichtige, graduelle oder stufenförmige Anhebung der Temperatur während dieser Wartezeit z. B. von Raumtemperatur auf 40°C und 60°C) kann die Wartezeit deutlich verkürzen, da hierdurch die thermisch aktivierte Diffusion des Stickstoffs beschleunigt wird. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass sich nicht hierbei schon N_2 -Bläschen bilden. In diesem Fall sollte die vorherige Wartezeit bei Raumtemperatur verlängert, oder/und die Anhebung der Temperatur sachter erfolgen.

Unsere Fotolacke: Anwendungsbereiche und Kompatibilitäten

Anwendungsbereiche ¹		Lackserie	Fotolacke	Schichtdicke ²	Empfohlene Entwickler ³	Empfohlene Remover ⁴
Positiv	Hohe Haftung für nasschemisches Ätzen, kein Fokus auf senkrechte Lackflanken	AZ [®] 1500	AZ [®] 1505 AZ [®] 1512 HS AZ [®] 1514 H AZ [®] 1518	≈ 0,5 µm ≈ 1,0 - 1,5 µm ≈ 1,2 - 2,0 µm ≈ 1,5 - 2,5 µm	AZ [®] 351B, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] Developer	AZ [®] 100 Remover TechniStrip [®] P1316 TechniStrip [®] P 1331
		AZ [®] 4500	AZ [®] 4533 AZ [®] 4562	≈ 3 - 5 µm ≈ 5 - 10 µm	AZ [®] 400K, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF	
		AZ [®] P4000	AZ [®] P4110 AZ [®] P4330 AZ [®] P4620 AZ [®] P4903	≈ 1 - 2 µm ≈ 3 - 5 µm ≈ 6 - 20 µm ≈ 10 - 30 µm	AZ [®] 400K, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF	
		AZ [®] PL 177	AZ [®] PL 177	≈ 3 - 8 µm	AZ [®] 351B, AZ [®] 400K, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF	
	Sprühbelackung	AZ [®] 4999		≈ 1 - 15 µm	AZ [®] 400K, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF	
	Tauchbelackung	MC Dip Coating Resist		≈ 2 - 15 µm	AZ [®] 351B, AZ [®] 400K, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF	
	Steile Flanken, hohe Auflösung und großes Aspektverhältnis für z. B. Trockenätzen und Galvanik	AZ [®] ECI 3000	AZ [®] ECI 3007 AZ [®] ECI 3012 AZ [®] ECI 3027	≈ 0,7 µm ≈ 1,0 - 1,5 µm ≈ 2 - 4 µm	AZ [®] 351B, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] Developer	
		AZ [®] 9200	AZ [®] 9245 AZ [®] 9260	≈ 3 - 6 µm ≈ 5 - 20 µm	AZ [®] 400K, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF	
Hoher Erweichungspunkt und hochauflösend für z. B. Trockenätzen	AZ [®] 701 MiR	AZ [®] 701 MiR (14 cPs) AZ [®] 701 MiR (29 cPs)	≈ 0,8 µm ≈ 2 - 3 µm	AZ [®] 351B, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] Developer		
Positiv (chem. verstärkt)	Steile Flanken, hohe Auflösung und großes Aspektverhältnis für z. B. Trockenätzen und Galvanik	AZ [®] XT	AZ [®] 12 XT-20PL-05 AZ [®] 12 XT-20PL-10 AZ [®] 12 XT-20PL-20 AZ [®] 40 XT	≈ 3 - 5 µm ≈ 6 - 10 µm ≈ 10 - 30 µm ≈ 15 - 50 µm	AZ [®] 400K, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF	AZ [®] 100 Remover TechniStrip [®] P1316 TechniStrip [®] P1331
		AZ [®] IPS 6050		≈ 20 - 100 µm		
Image reversal	Hoher Erweichungspunkt und unterschrittene Lackprofile für Lift-off	AZ [®] 5200	AZ [®] 5209 AZ [®] 5214	≈ 1 µm ≈ 1 - 2 µm	AZ [®] 351B, AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF	TechniStrip [®] Micro D2 TechniStrip [®] P1316 TechniStrip [®] P1331
		TI	TI 35ESX TI xLift-X	≈ 3 - 4 µm ≈ 4 - 8 µm		
Negativ (quervernetzend)	Unterschnittene Lackprofile und dank Quervernetzung kein thermisches Erweichen für Lift-off	AZ [®] nLOF 2000	AZ [®] nLOF 2020 AZ [®] nLOF 2035 AZ [®] nLOF 2070	≈ 1,5 - 3 µm ≈ 3 - 5 µm ≈ 6 - 15 µm	AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF	TechniStrip [®] NI555 TechniStrip [®] NF52 TechniStrip [™] MLO 07
		AZ [®] nLOF 5500	AZ [®] nLOF 5510	≈ 0,7 - 1,5 µm		
	Hohe Haftung, steile Lackflanken und große Aspektverhältnisse für z. B. Trockenätzen und Galvanik	AZ [®] nXT	AZ [®] 15 nXT (115 cPs) AZ [®] 15 nXT (450 cPs)	≈ 2 - 3 µm ≈ 5 - 20 µm	AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF	
AZ [®] 125 nXT			≈ 20 - 100 µm	AZ [®] 326 MIF, AZ [®] 726 MIF, AZ [®] 826 MIF		

¹ Theoretisch können alle Lacke für nahezu alle Anwendungen eingesetzt werden. Mit dem Anwendungsbereich sind hier die besonderen Eignungen der jeweiligen Lacke gemeint.
² Mit Standardequipment unter Standardbedingungen erzielbare und prozessierbare Lackeschichtdicke. Manche Lacke können für geringere Schichtdicken verdünnt werden, mit entsprechendem Mehraufwand sind auch dickere Lackeschichten erziel- und prozessierbar.
³ Metallionenfremde (MIF-) Entwickler sind deutlich teurer und - dann sinnvoll, wenn metallionenfremd entwickelt werden muss

Unsere Entwickler: Anwendungsbereiche und Kompatibilitäten

Anorganische Entwickler

(typischer Bedarf bei Standard-Prozessen: ca. 20 L Entwickler je L Fotolack)

AZ[®] Developer basiert auf Na-Phosphat und Na-Metasilikat, ist auf minimalen Aluminiumabtrag optimiert und wird 1 : 1 verdünnt in DI-Wasser für hohen Kontrast bis unverdünnt für hohe Entwicklungsraten eingesetzt. Der Dunkelabtrag ist verglichen mit anderen Entwicklern etwas höher.

AZ[®] 351B basiert auf gepufferter NaOH und wird üblicherweise 1 : 4 mit Wasser verdünnt angewandt, für Dicklacke auf Kosten des Kontrasts bis ca. 1 : 3

AZ[®] 400K basiert auf gepufferter KOH und wird üblicherweise 1 : 4 mit Wasser verdünnt angewandt, für Dicklacke auf Kosten des Kontrasts bis ca. 1 : 3

AZ[®] 303 speziell für den AZ[®] 111 XFS Fotolack basiert auf KOH / NaOH und wird üblicherweise 1 : 3 - 1 : 7 mit Wasser verdünnt angewandt, je nach Anforderung an Entwicklungsrate und Kontrast.

Metallionenfremde Entwickler (TMAH-basiert)

(typischer Bedarf bei Standard-Prozessen: ca. 5 - 10 L Entwicklerkonzentrat je L Fotolack)

AZ[®] 326 MIF ist eine 2.38 %ige wässrige TMAH- (TetraMethylAmmoniumHydroxid) Lösung.

AZ[®] 726 MIF ist 2.38 % TMAH in Wasser, mit zusätzlichen Netzmitteln zur raschen und homogenen Benetzung des Substrates z. B. für die Puddle-Entwicklung.

AZ® 826 MIF ist 2.38 % TMAH in Wasser, mit zusätzlichen Netzmitteln zur raschen und homogenen Benetzung des Substrates z. B. für die Puddle-Entwicklung und weiteren Additiven zur Entfernung schwer löslicher Lackbestandteile (Rückstände bei bestimmten Lackfamilien), allerdings auf Kosten eines etwas höheren Dunkelabtrags.

Unsere Remover: Anwendungsbereiche und Kompatibilitäten

AZ® 100 Remover ist ein Amin-Lösemittel Gemisch und Standard-Remover für AZ® und TI Fotolacke. Zur Verbesserung seiner Performance kann AZ® 100 Remover auf 60 - 80°C erhitzt werden. Da der AZ® 100 Remover mit Wasser stark alkalisch reagiert eignet er sich für diesbezüglich empfindliche Substratmaterialien wie z. B. Cu, Al oder ITO nur wenn eine Kontamination mit Wasser ausgeschlossen werden kann.

TechniStrip® P1316 ist ein Remover mit sehr starker Lösekraft für Novolak-basierte Lacke (u. a. alle AZ® Positivlacke), Epoxy-basierte Lacke, Polyimide und Trockenfilme. Bei typischen Anwendungstemperaturen um 75°C kann TechniStrip® P1316 auch z. B. durch Trockenätzen oder Ionenimplantation stärker quervernetzte Lacke rückstandsfrei auflösen. TechniStrip® P1316 kann auch im Sprühverfahren eingesetzt werden. Nicht kompatibel mit Au oder GaAs.

TechniStrip® P1331 ist im Falle alkalisch empfindlicher Materialien eine Alternative zum TechniStrip® P1316. Nicht kompatibel mit Au oder GaAs.

TechniStrip® NI555 ist ein Stripper mit sehr starker Lösekraft für Novolak-basierte Negativlacke wie dem AZ® 15 nXT und der AZ® nLOF 2000 Serie und sehr dicke Positivlacken wie dem AZ® 40 XT. TechniStrip® NI555 wurde dafür entwickelt, auch quervernetzte Lacke nicht nur abzulösen, sondern rückstandsfrei aufzulösen. Dadurch werden Verunreinigungen des Beckens und Filter durch Lackpartikel und -häutchen verhindert, wie sie bei Standard-Strippern auftreten können. Nicht kompatibel mit GaAs.

TechniClean™ CA25 ist ein Remover für post etch residue (PER) removal. Äußerst effizient beim selektiven Entfernen organo-metallischer Oxide von Al, Cu, Ti, TiN, W und Ni.

TechniStrip™ NF52 ist ein Sehr effizienter Remover für Negativlacke (Flüssiglacke als auch Trockenfilme). Durch seine Zusammensetzung und speziellen Additive kompatibel mit Metallen üblicherweise eingesetzt für BEOL interconnects oder WLP bumping.

TechniStrip™ Micro D2 ist ein Vielseitig einsetzbarer Stripper für Lift-off Prozesse oder generell dem Auflösen von Positiv- und Negativlacken. Seine Zusammensetzung zielt auf eine verbesserte Kompatibilität zu vielen Metallen sowie III/V Halbleitern.

TechniStrip™ MLO 07 Hoch-effizienter Remover für Positiv- und Negativlacke eingesetzt in den Bereichen IR, III/V, MEMS, Photonic, TSV mask und solder bumping. Kompatibel zu Cu, Al, Sn/Ag, Alumina und einer Vielzahl organischer Substrate.

Unsere Wafer und ihre Spezifikationen

Silicium-, Quarz-, Quarzglas und Glaswafer

Silicium-Wafer werden aus über das Czochralski- (CZ-) oder Floatzone- (FZ-) Verfahren hergestellten Einkristallen gefertigt. Die deutlich teureren FZ-Wafer sind in erster Linie dann sinnvoll, wenn sehr hochohmige Wafer (> 100 Ohm cm) gefordert werden welche über das CZ-Verfahren nicht machbar sind.

Quarzwafer bestehen aus einkristallinem SiO₂, Hauptkriterium ist hier die Kristallorientierung bzgl. der Waferoberfläche (z. B. X-, Y-, Z-, AT- oder ST-Cut)

Quarzglaswafer bestehen aus amorphem SiO₂. Sog. JGS2-Wafer sind im Bereich von ca. 280 - 2000 nm Wellenlänge weitgehend transparent, die teureren JGS1-Wafer bei ca. 220 - 1100 nm.

Unsere Glaswafer bestehen wenn nicht anders angegeben aus im Floatverfahren hergestelltem Borosilikatglas.

Spezifikationen

Für alle Wafer relevant sind Durchmesser, Dicke und Oberfläche (1- oder 2-seitig poliert). Bei Quarzglaswafern ist die Frage nach dem Material (JGS1 oder JGS2) zu klären, bei Quarzwafern die Kristallorientierung. Bei Silicium-Wafern gibt es neben der Kristallorientierung (<100> oder <111>) die Parameter Dotierung (n- oder p-Typ) sowie die elektrische Leitfähigkeit (in Ohm cm)

Prime- Test- und Dummy-Wafer

Bei Silicium-Wafern gibt neben dem üblichen „Prime-grade“ auch „Test-grade“ Wafer, die sich meist nur in einer etwas breiteren Partikelspezifikation von Prime-Wafern unterscheiden. „Dummy-Wafern“ erfüllen aus unterschiedlichen Gründen (z. B. sehr breite oder fehlenden Spezifizierung bestimmter Parameter, evtl. auch Reclaim-Wafer und solche völlig ohne Partikelspezifikation) weder Prime- noch Test-grade, können jedoch für z. B. Belackungstests oder das Einfahren von Equipment eine sehr preiswerte Alternative sein.

Unsere Silicium-, Quarz-, Quarzglas und Glaswafer

Eine ständig aktualisierte Liste der aktuell verfügbaren Wafer finden Sie hier:

☞ www.microchemicals.com/de/produkte/wafer/waferlist.html

Weitere Produkte aus unserem Portfolio

Galvanik

Elektrolyte und Hilfsstoffe für die elektrochemische Abscheidung von z. B. Gold, Kupfer, Nickel, Zinn oder Palladium: ☞ www.microchemicals.com/de/produkte/galvanik.html

Lösemittel (MOS, VLSI, ULSI)

Aceton, Isopropanol, MEK, DMSO, Cyclopentanon, Butylacetat, u. a.

☞ www.microchemicals.com/de/produkte/loesungsmittel.html

Säuren und Basen (MOS, VLSI, ULSI)

Salzsäure, Schwefelsäure, Salpetersäure, KOH, TMAH, u. a.

☞ www.microchemicals.com/de/produkte/saeuren_basen.html

Ätzmischungen

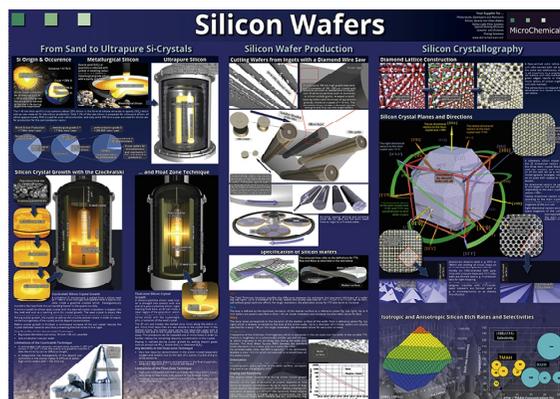
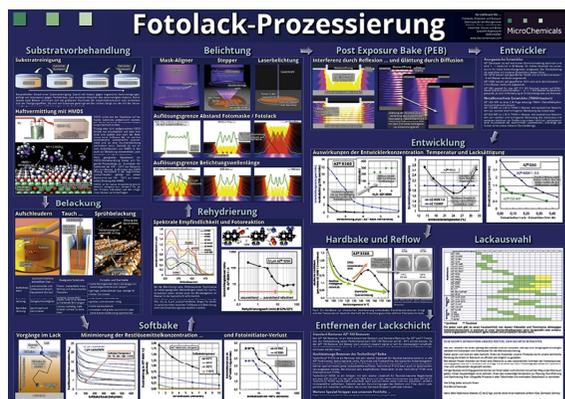
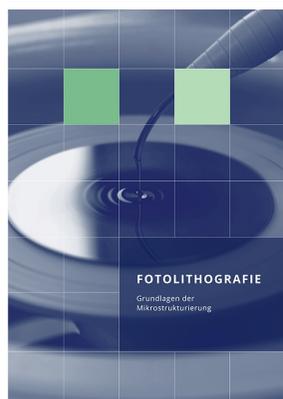
Für z. B. Chrom, Gold, Silicium, Kupfer, Titan, Titan / Wolfram u. a.

☞ www.microchemicals.com/de/produkte/aetzmischungen.html

Weiterführende Informationen

Technische Datenblätter: www.microchemicals.com/de/downloads/technische_datenblaetter/fotolacke.html
Sicherheitsdatenblätter: www.microchemicals.com/de/downloads/sicherheitsdatenblaetter/sicherheitsdatenblaetter.html

Unsere Lithografiebücher und -Poster



Wir sehen es als unsere Aufgabe, Ihnen möglichst alle Aspekte der Mikrostrukturierung anwendungsorientiert verständlich zu machen.

Diesen Anspruch umgesetzt haben wir derzeit mit unserem Buch **Fotolithografie** auf über 200 Seiten, sowie ansprechend gestalteten DIN A0 **Postern** für Ihr Büro oder Labor.

Beides senden wir Ihnen als unser Kunde gerne gratis zu (ggf. berechnen wir für außereuropäische Lieferungen Versandkosten):

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

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

Vielen Dank für Ihr Interesse!

Gewährleistungs- und Haftungsausschluss & Markenrechte

Alle in diesem Dokument enthaltenen Informationen, Prozessbeschreibungen, Rezepturen etc. sind nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Dennoch können wir keine Gewähr für die Korrektheit der Angaben übernehmen. Insbesondere bezüglich der Rezepturen für chemische (Ätz-)Prozesse übernehmen wir keine Gewährleistung für die korrekte Angabe der Bestandteile, der Mischverhältnisse, der Herstellung der Ansätze und deren Anwendung. Die sichere Reihenfolge des Mischens von Bestandteilen einer Rezeptur entspricht üblicherweise nicht der Reihenfolge ihrer Auflistung.

Wir garantieren nicht für die vollständige Angabe von Hinweisen auf (u. a. gesundheitliche, arbeitssicherheitstechnische) Gefahren, die sich bei Herstellung und Anwendung der Rezepturen und Prozesse ergeben. Die Angaben in diesem Buch basieren im Übrigen auf unseren derzeitigen Erkenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verwender wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei Verarbeitung und Anwendung unserer Produkte nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine Garantie bestimmter Eigenschaften oder die Eignung für einen konkreten Einsatzzweck kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. 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. Alle hier vorliegenden Beschreibungen, Darstellungen, Daten, Verhältnisse, Gewichte, etc. können sich ohne Vorankündigung ändern und stellen nicht eine vertraglich vereinbarte Produktbeschaffenheit dar. Etwaige Schutzrechte sowie bestehende Rechtsvorschriften sind vom Verwender unserer Produkte in eigener Verantwortung zu beachten.

Merck, Merck Performance Materials, AZ, the AZ logo, and the vibrant M are trademarks of Merck KGaA, Darmstadt, Germany

MicroChemicals GmbH
Nicolaius-Otto-Str. 39
89079, Ulm
Germany

Fon: +49 (0)731 977 343 0
Fax: +49 (0)731 977 343 29
e-Mail: info@microchemicals.net
Internet: www.microchemicals.net