

FORSCHUNGSINSTITUT

der Forschungsgesellschaft für Feingeräte-, Mikro- und Uhrentechnik e.V.
Stuttgart

ANWENDUNG VON LASERSTRAHLEN ZUR HERSTELLUNG VON MIKROSTRUKTUREN

S. Büttgenbach

1. Einleitung

Die vielfältigen Möglichkeiten der Materialbearbeitung mit Lasern beruhen auf den einzigartigen Eigenschaften von Laserlicht:

- Räumliche Kohärenz. Sie erlaubt eine extreme Fokussierbarkeit der Laserstrahlung und damit die Erzeugung sehr hoher Leistungsdichten. Dies kann zu einer lokalen Wärme- oder chemischen Behandlung von Materialien mit einer Auflösung von kleiner als 1 μm ausgenutzt werden.
- Monochromasie. Sie ermöglicht - in Verbindung mit einer Veränderung der Wellenlänge - die selektive, nichtthermische Anregung von Atomen oder Molekülen in der Oberfläche des Substrats oder in dem umgebenden Medium.
- Erzeugung kurzer, exakt definierter Laserpulse. Dadurch wird eine zeitlich exakt kontrollierte thermische oder chemische Materialbearbeitung zwischen etwa 10^{-14} s und cw Betrieb möglich.

2. Laserinduzierte Prozesse in der Mikrostrukturtechnik

Man unterscheidet die konventionelle, nicht-reaktive und die chemische Lasermaterialbearbeitung. Bei der ersten Methode handelt es sich um eine Wärmebehandlung, die im Vakuum oder in einer nicht-reaktiven Atmosphäre durchgeführt wird. Die durch das absorbierte Laserlicht induzierte Temperaturverteilung hängt dabei von der Bestrahlungszeit und der Intensität des Laserlichtes sowie von der Absorption und der Temperaturleitfähigkeit des zu bearbeitenden Materials ab.

Etablierte Prozesse mittels thermischer, nicht-reaktiver Laser-materialbearbeitung sind das Bohren, Schneiden, Schweißen. Hier verwendet man hohe Leistungsdichten (10^5 bis 10^9 W/cm²), die zum Aufschmelzen und Verdampfen des Materials führen. Es werden vorwiegend CO₂- und Nd:YAG-Laser eingesetzt, CO₂-Laser mit einer vergleichsweise hohen mittleren Ausgangsleistung vor allem bei größeren Werkstückgeometrien, Nd:YAG-Laser wegen ihrer besseren Fokussierbarkeit und der geringeren mittleren Ausgangsleistung im allgemeinen bei kleineren Geometrien. Es können mit Nd:YAG-Lasern z.B. in nahezu allen Metallen, Kunststoffen, Gläsern und Keramiken Bohrungen mit Durchmessern zwischen 5 µm und 100 µm angefertigt werden.

Neben den etablierten nicht-reaktiven Anwendungen haben jedoch auch für die Mikrostrukturtechnik wichtige laserinduzierte strukturelle Umwandlungen in Materialoberflächen und dünnen Schichten an Bedeutung gewonnen: Defektausheilung, Rekristallisation, Glasbildung, Härten, Legieren. Die verwendeten Leistungsdichten sind kleiner (10^3 bis 10^5 W/cm²).

Bei der chemischen Materialbearbeitung wird durch den Laserstrahl eine chemische Reaktion aktiviert bzw. bei einer bereits ablaufenden Reaktion die Rate erhöht. Man unterscheidet Laserpyrolyse und Laserphotolyse. Bei der Laserpyrolyse handelt es sich um einen thermisch aktivierten Prozeß. Die chemische Reaktion erfolgt i.w. im Bereich des heißen Flecks, der durch die absorbierte Laserstrahlung erzeugt wird.

Bei der Laserphotolyse handelt es sich um einen nicht-thermischen Prozeß. Durch das Laserlicht werden direkt chemische Bindungen aufgebrochen und zwar entweder im Substrat oder im umgebenden Medium. Dies geschieht durch Anregung dissoziativer elektronischer Übergänge (für die meisten Moleküle im ultravioletten Spektralbereich) oder durch selektive Multiphoton-Schwingungsanregung im infraroten Spektralbereich.

In den meisten Fällen spielen sowohl pyrolytische wie auch photolytische Prozesse eine Rolle, wobei jedoch i.a. einer dominiert. Die Abhängigkeit der Reaktionsrate von der Wellenlänge der Laserstrahlung ist bei der Photolyse sehr viel stärker als bei der Pyrolyse.

Die lokale chemische Lasermaterialbearbeitung erlaubt direktes Schreiben von Strukturen mit lateralen Abmessungen bis in den Submikronbereich. Die Nichtlinearität laserinduzierter chemischer Reaktionen erlaubt außerdem die Herstellung von Strukturen, deren laterale Abmessungen kleiner sind als der beugungsbegrenzte Durchmesser des Laserfokus.

LCP (Laser Chemical Processing) erlaubt auch die Bearbeitung temperaturempfindlicher Materialien wie z.B. III-V-Halbleiter (GaAs, InP, etc.).

Chemische Lasermaterialbearbeitung kann erfolgen in adsorbierten Schichten, an Gas-Festkörper- und Flüssigkeit-Festkörper-Grenzflächen oder in der Oberfläche des Materials selbst (Abb.1).

Generell besteht eine laserinduzierte chemische Reaktion aus den folgenden Schritten, von denen der eine oder andere natürlich auch fehlen kann bei einem bestimmten Prozeß:

- (1) Transport der reagierenden Spezies in das Reaktionsvolumen.
- (2) Adsorption einer oder mehrerer Spezies an der Substratoberfläche.
- (3) Pyrolytische oder photolytische Aktivierung von Molekülen in der Nähe oder auf der Substratoberfläche.
- (4) Transport von Produkten der chemischen Reaktion zur Substratoberfläche, ggf. weitere chemische Reaktionen auf diesem Weg.
- (5) Kondensation bzw. weitere Reaktionen auf der Substratoberfläche.
- (6) Desorption von Reaktionsprodukten von der Substratoberfläche.
- (7) Transport der Reaktionsprodukte aus dem Reaktionsvolumen.

Typische Prozesse mittels laserinduzierter chemischer Materialbearbeitung sind: Belichtung von Resistmaterialien, Materialabtragung und -abscheidung, Oberflächenmodifikation (z.B. Oxidation, Reduktion), Dotierung. Abb. 2 zeigt schematisch die wichtigsten laserinduzierten Grundprozesse in der Mikrostrukturtechnik.

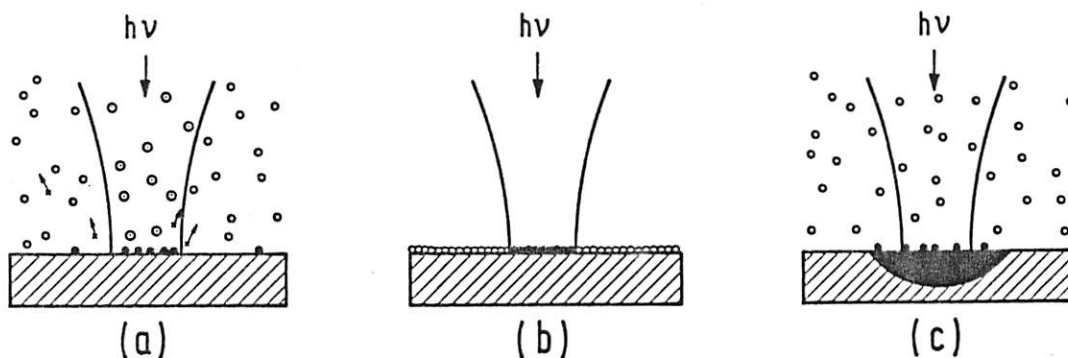
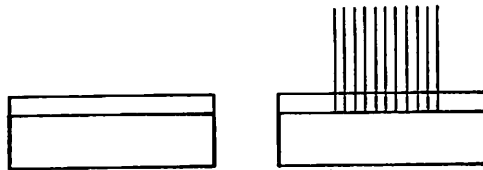
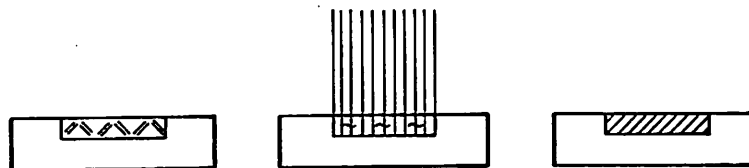


Abb. 1. Schematische Darstellung laserinduzierter chemischer Prozesse an Oberflächen. (a) Photolyse. (b) Bearbeitung einer adsorbierten Schicht. (c) Pyrolyse. ○ - nicht angeregte Moleküle; ⊙ - angeregte Moleküle; ● - adsorbierte reaktive Radikale; * - gasförmige Reaktionsprodukte.

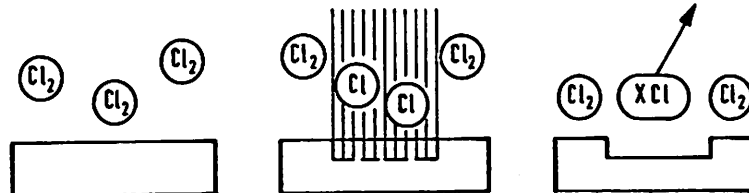
Belichten



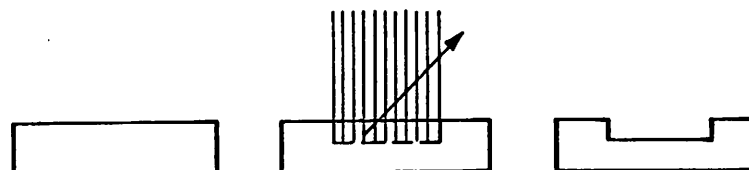
Ausheilen



Ätzen

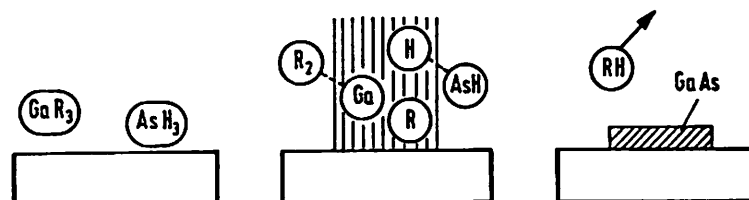


Photoabtrag



Auftragen

$R = CH_3$



Dotieren

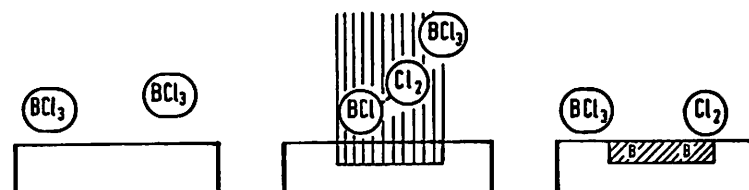


Abb. 2. Laserinduzierte Grundprozesse in der Mikrostruktur-technik.

3. Experimentelle Techniken

In Abb. 3 sind die wichtigsten Lasertypen und inkohärenten Lichtquellen zusammengestellt, die in der Mikrostrukturtechnik angewendet werden.

Die Mikrostrukturierung mittels Laserlicht kann sowohl durch "direktes Schreiben" wie auch durch Maskenprojektion erfolgen. Zur lokalen direkten Bearbeitung wird der Laserstrahl auf die Materialoberfläche fokussiert (bis etwa $1\text{ }\mu\text{m}$) und gegebenenfalls über diese gescannt. Bei einer großflächigen direkten Bearbeitung erzeugt man mit Hilfe einer Zylinderlinse einen Strichfokus, der über das Substrat bewegt wird (Abb. 4).

Chemische Lasermaterialbearbeitung kann mit senkrecht auf das Substrat einfallendem Laserlicht, in vielen Fällen jedoch auch mit parallel zur Substratoberfläche verlaufendem Laserstrahl durchgeführt werden. Abb. 5 zeigt schematisch den generellen experimentellen Aufbau zur Lasermikromaterialbearbeitung, der an die meisten pyrolytischen und photolytischen Prozesse angepaßt werden kann.

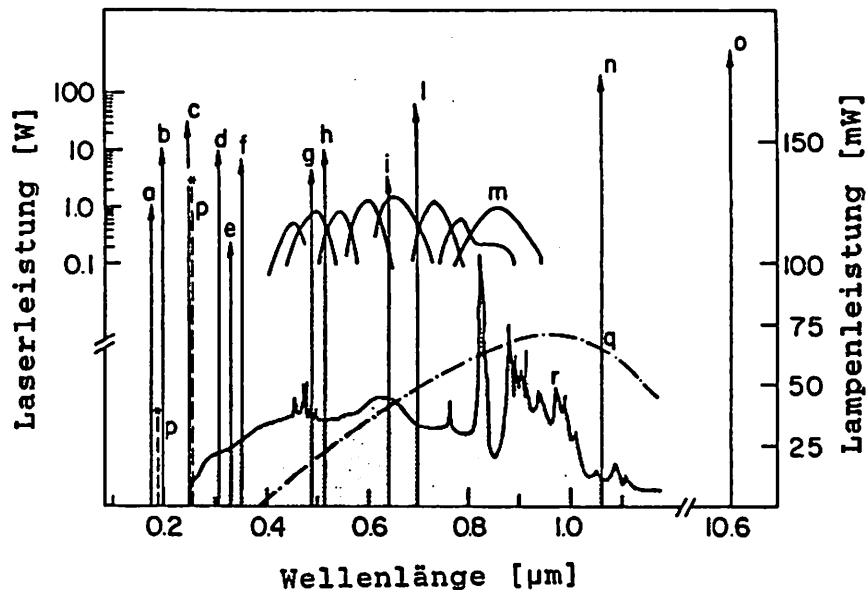


Abb. 3. Kohärente und inkohärente Lichtquellen für die Mikro-materialbearbeitung. Laser: a - F₂, b - ArF, c - KrF, d - XeCl, e - N₂, f - XeF, g und h - Ar⁺, i - Kr⁺, l - Rubin, m - Farbstoff, n - Nd:YAG, o - CO₂. Lampen: p - Hg (Niederdruck), q - Wolfram, r - Xenon (Bogen).

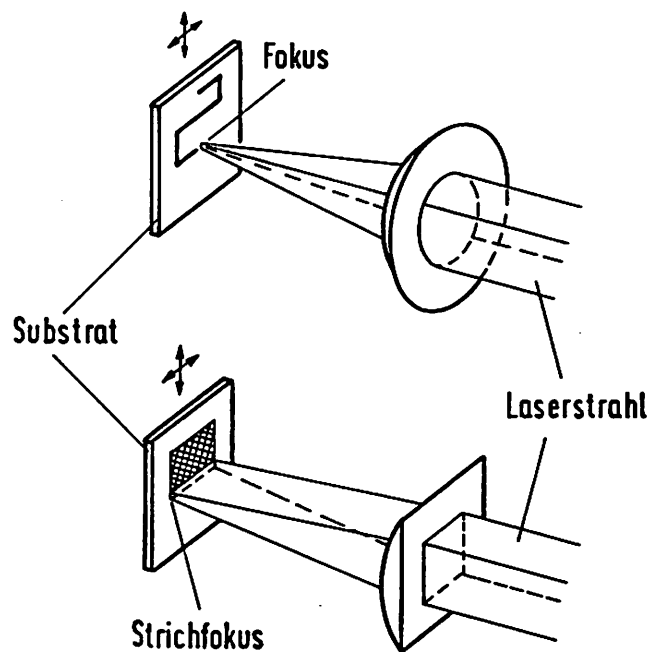


Abb. 4. Optische Anordnungen zur lokalen und großflächigen Mikro-materialbearbeitung.

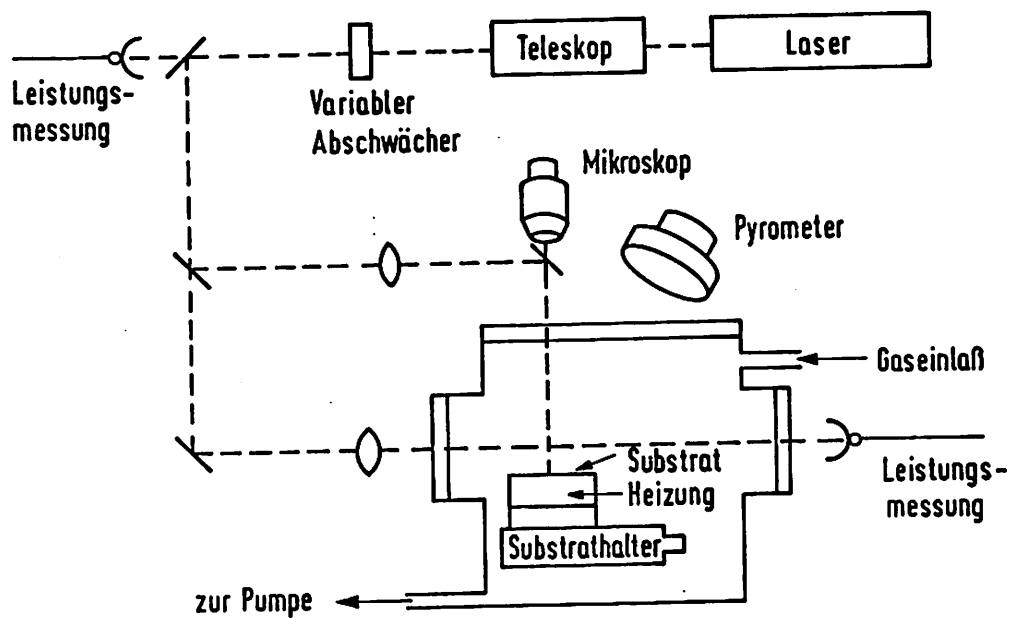


Abb. 5. Schematischer Aufbau zur Lasermikromaterialbearbeitung.

4. Pyrolytische laserinduzierte Materialabscheidung aus der Gasphase (LCVD)

Bei der pyrolytischen LCVD beruht der Abscheidemechanismus wie beim konventionellen CVD-Verfahren auf einer thermischen Aktivierung der Reaktion. Es können daher alle aus der konventionellen Technik bekannten Reaktionen auch für die pyrolytische LCVD verwendet werden. Dabei darf allerdings das Laserlicht nicht von den Reaktionsgasen absorbiert werden. Zur Abscheidung benutzte Ausgangsstoffe sind häufig Metallalkyle $[M(CH_3)_n]$ oder $M(C_2H_5)_n$, Metallacetylacetonate, Metallcarbonyle $[M(CO)_n]$, Hydride $[GeH_4, SiH_4]$, Fluoride $[WF_6]$.

Gegenüber der konventionellen CVD-Technik weist das LCVD-Verfahren folgende Besonderheiten auf:

- (a) Das Laserlicht erzeugt eine lokale Temperaturverteilung. Die Abscheidung erfolgt deshalb nur in einem eng begrenzten Bereich.
- (b) Die Temperatur ist i.a. zeitlich nicht konstant, da sich bereits in der Nukleationsphase die Reflektivität und damit die absorbierte Leistung ändert. Die zeitliche Änderung der Temperaturverteilung hängt daher von den physikalischen Eigenschaften des Substrats und des abgeschiedenen Materials sowie von dessen Geometrie ab. Mit der zeitlichen Änderung der Temperaturverteilung ist als Folge auch eine zeitliche Änderung der Wachstumsrate verbunden.

Abb. 6 zeigt als Beispiel die punktförmige Abscheidung von Nickel auf ein Glas-Substrat mit einer 1000 Å dicken Schicht von amorphem Silizium. Abb. 7 gibt die Abhängigkeit des Punktdurchmessers von der Bestrahlungszeit wieder.

Pyrolytische laserinduzierte Materialabscheidung aus der Gasphase ermöglicht das direkte Schreiben von Strukturen; wird dabei das Substrat senkrecht zum Laserstrahl bewegt, so erhält man Streifen von abgeschiedenem Material, deren Form von der Laserleistung abhängt. Ein Beispiel sind Si-Streifen, die auf einen Si-Wafer abgeschieden wurden. Bei höheren Laserleistungen ($T > T_m = 1683$ K) entsteht in der zunächst konvexen Form eine Rille (Abb. 8). Dies kann durch Oberflächenspannungen in dem geschmolzenen Streifen erklärt werden.

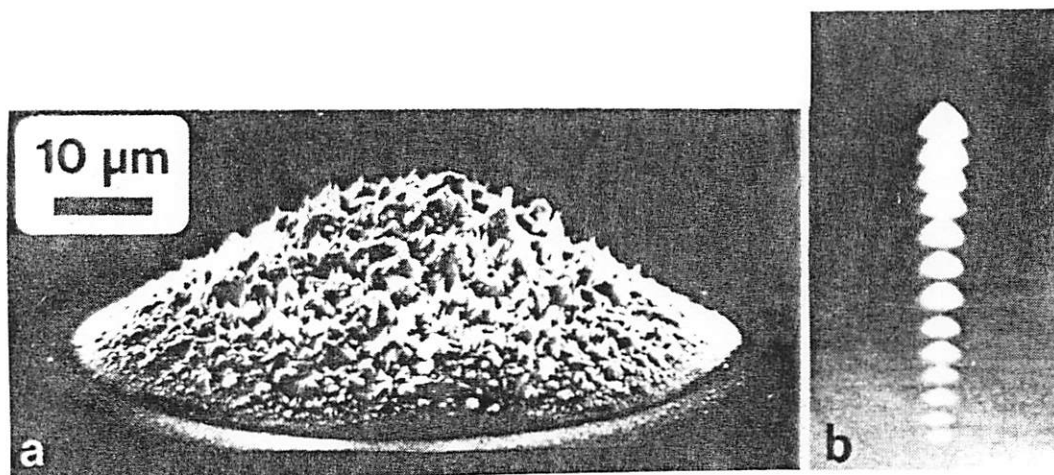


Abb. 6. Ni-Punkte, abgeschieden aus $\text{Ni}(\text{CO})_4$ bei $p_{\text{tot}} = p(\text{Ni}(\text{CO})_4) = 200 \text{ mbar}$, mit einem Kr^+ -Laser (647 nm, Strahldurchmesser 6 μm). (a) Typische Punktform. (b) Punkte, die mit konstanter Laserleistung, aber mit zunehmender Bestrahlungsdauer abgeschieden wurden.

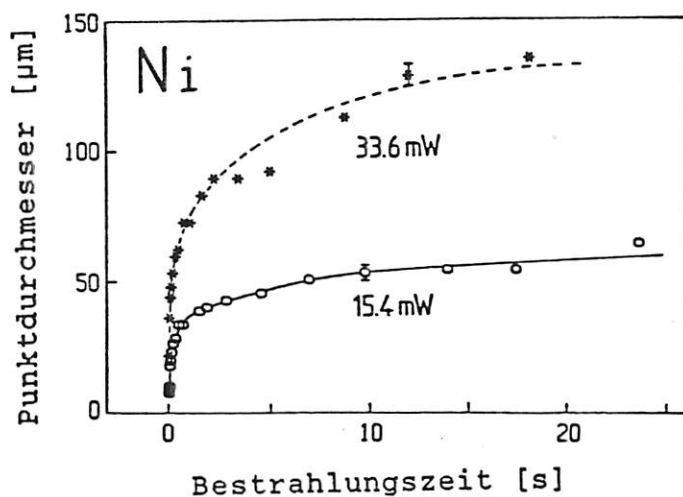


Abb. 7. Durchmesser der abgeschiedenen Ni-Punkte in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit.

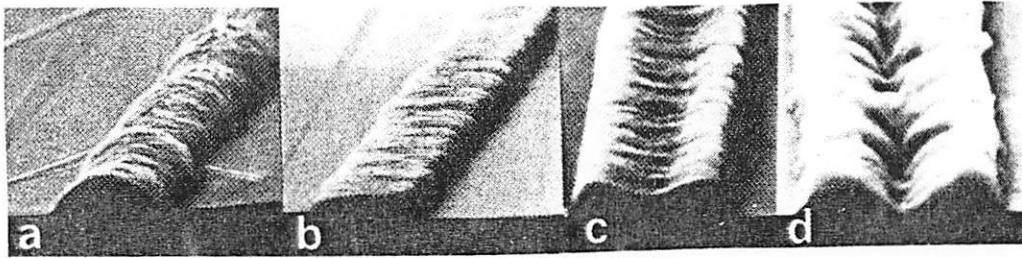
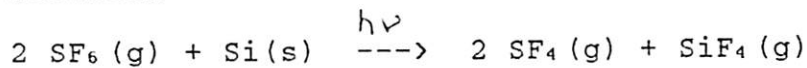


Abb. 8. Si-Streifen, abgeschieden aus SiH_4 mit zunehmender Leistung eines Ar^+ -Lasers (488 nm). $p(\text{SiH}_4) = 40 \text{ mbar}$, $v = 10 \mu\text{m/s}$.

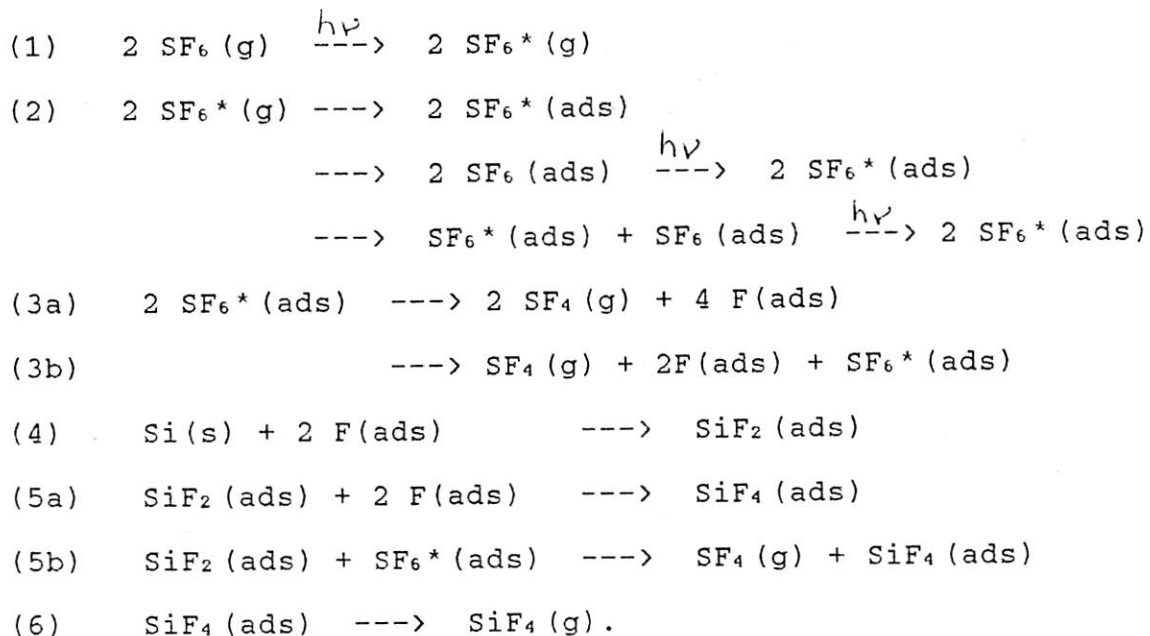
5. Photolytisches laserinduziertes Ätzen

Auch laserinduziertes Ätzen kann direkt, d.h. ohne Maskierschicht, erfolgen. In vielen Fällen führt die Anwendung von Laserlicht zu wesentlich höheren Ätzraten. Dies soll am Beispiel des Si-SF_6 -Systems illustriert werden.

Silizium ist relativ inert gegen SF_6 . Eine 3- oder 4-Photonenanregung der ν_3 -Schwingung durch CO_2 -Laserstrahlung führt zu einer wesentlichen Erhöhung der Adsorptionsrate der SF_6 -Moleküle. Reaktionsprodukte sind hauptsächlich SiF_4 und SF_4 . Die Gesamtreaktion



zerfällt in mehrere Schritte:



Daß tatsächlich die selektive Anregung der ν_3 -Schwingung eine wesentliche Rolle spielt, zeigt die Abhängigkeit der Ätzrate von der Laserwellenlänge ($\nu_3 = 948 \text{ cm}^{-1}$, Abb. 9).

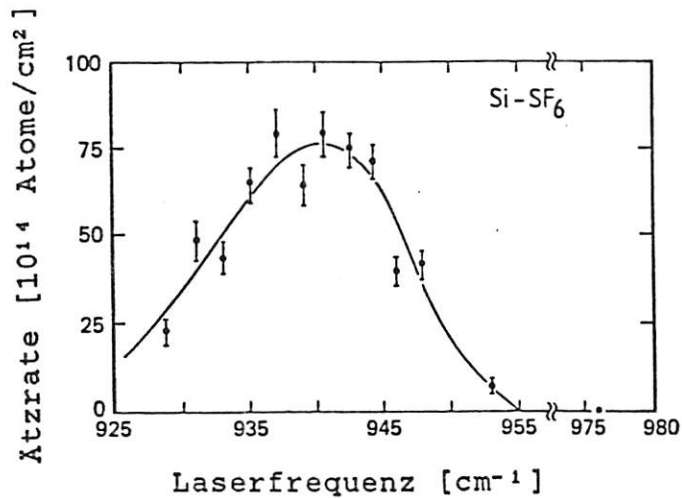


Abb. 9. Ätzrate von Si in SF_6 ($p(\text{SF}_6) = 3.3 \text{ mbar}$) als Funktion der CO_2 -Laserwellenlänge.

6. Photoabtrag bei Polymeren

Laserinduziertes Ätzen von organischen Polymeren und biologischen Materialien wird im Vakuum oder in nichtreaktiver Atmosphäre durchgeführt. Dabei werden chemische Bindungen durch das Laserlicht (UV) direkt in der Materialoberfläche aufgebrochen. Abb. 10

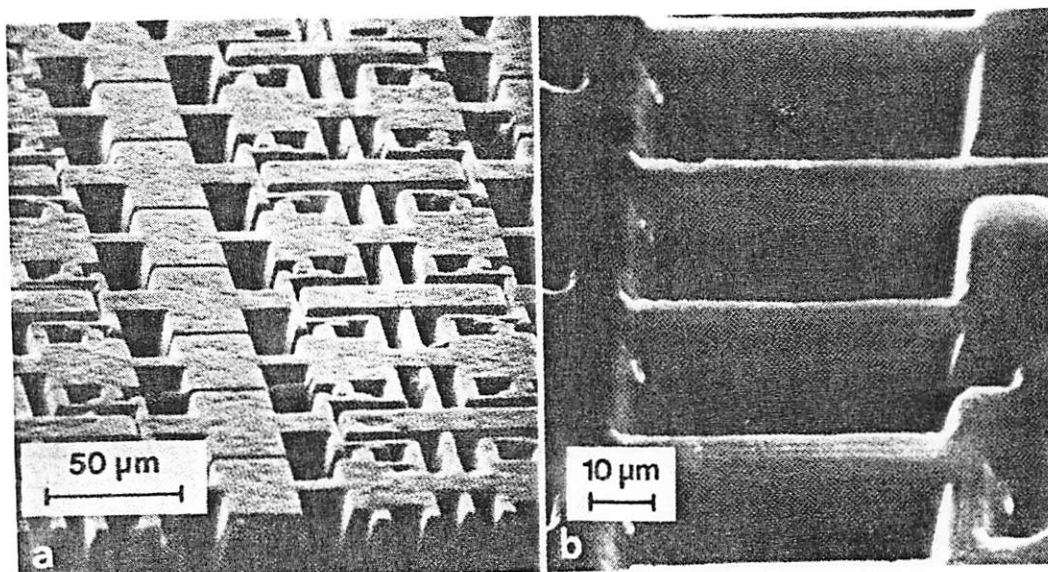


Abb. 10. Polymere, geätzt mit ArF-Laserlicht. (a) PMMA. (b) Riston.

zeigt PMMA bzw. Riston, das mit ArF-Excimerlaserlicht durch eine mechanische Maske geätzt wurde. Es können hohe Leistungsdichten verwendet werden; dadurch erzielt man hohe Ätzraten ($0.1 \mu\text{m}/\text{Laserpuls}$). Die vorwiegend photolytische Natur des Ätzprozesses kommt in der großen Flankensteilheit zum Ausdruck, die man in diesen wärmeempfindlichen Materialien erzielt.

In Tabelle 1 sind die optimalen Laserparameter für das Bohren von $100 \mu\text{m}$ Löchern in verschiedenen Polymerfolien von 1 mm Dicke zusammengestellt. Abb. 11 zeigt schematisch den experimentellen Aufbau.

Material	Wellenlänge [nm]	Energiedichte [J/cm ²]	Ätztiefe pro Puls [μm]
Polycarbonat	248	4	0.4
Polyester	248	4	0.8
Polyethylen	248	3.7	1.0
	193	6	0.4
Siliconkautschuk	308	10	1.5
	248	30	0.17
Kapton	308	10	1.2
Plexiglas	193	1	0.3
Hostaform	248	2.8	0.57

Tabelle 1. Optimale Laser-Parameter für das Bohren von Löchern in Polymerfolien.

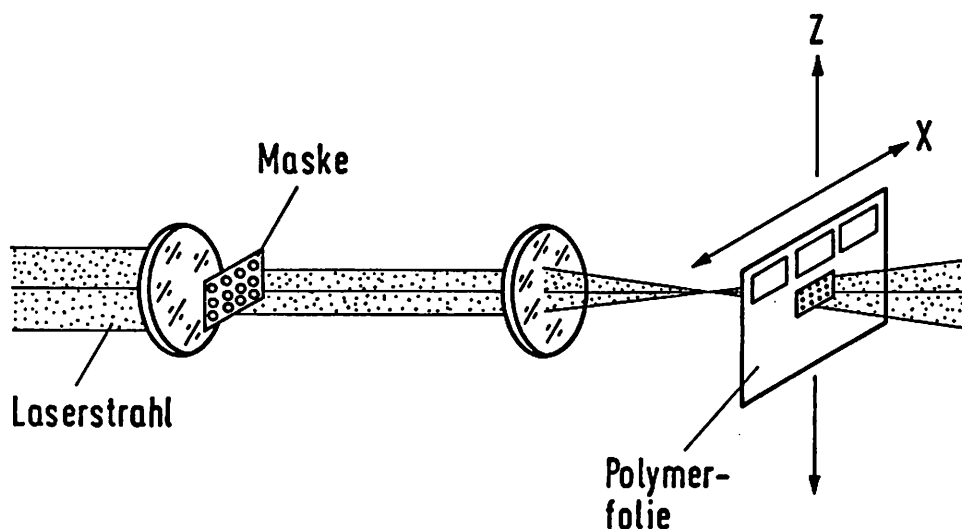


Abb. 11. Schematischer experimenteller Aufbau zum Bohren von Löchern in Polymerfolien.

7. Literatur

D. Bäuerle: Chemical Processing with Lasers.
Springer Series in Material Sciences Vol. 1, 1986

F. Micheli, I.W. Boyd: Laser Microfabrication of Thin Films.
Optics and Laser Technology 18 (1986) 313; 19 (1987) 19;
19 (1987) 75

H. Vogt, G. Zimmer: Anwendung des Lasers zur Herstellung neuer
Strukturen für die Mikroelektronik.
Laser und Optoelektronik Nr. 1/1986, S. 49

H. Pummer: Der Excimerlaser - ein nützliches Werkzeug?
Phys. Bl. 41 (1985) 199

Y. Pauleau, G. Auvert: Laser-Induced Growth of Microstructures.
Springer Proceedings in Physics Vol. 13, 1986, S. 109

Lambda Highlights, Lambda Physik GmbH, Göttingen

12.87