

Musterhaft polarisieren – Ordnung ins Licht mit strukturierten Polarisatoren

André Volke, Dr. Günter Heine, CODIXX AG, Barleben

Die Optischen Technologien nutzen die Polarisation immer stärker als wichtigen Informationsträger. Daraus ergeben sich neue Forderungen an die optischen Parameter der Polarisatoren, aber auch an deren Aufbau: Strukturierte Polarisatoren, die Bereiche unterschiedlicher Orientierung und/oder unterschiedlicher Spektralbereiche maximaler Polarisation integrieren, fordern die Herstellungstechnik heraus. Dabei erweisen sich dichroitische Polarisatoren, die sich der Funktion deformierter Silber-Nanopartikel bedienen, als aussichtsreicher Weg zur Herstellung feinstrukturierter Polarisatoren.

Die Polarisation der elektromagnetischen Strahlung und insbesondere auch des Lichtes (Wellenlängenbereich 390 nm bis 780 nm) wird seit Jahrzehnten in der Optik erfolgreich genutzt, z.B. zur Unterdrückung von reflektiertem Licht (Photographie), zur Analyse optisch aktiver Materialien (Polarimetrie) oder zur Bestimmung von Schichtdicken und optischen Materi-

alkonstanten (Ellipsometrie). Zunehmende Beachtung erfährt die Polarisation in den letzten Jahren als Informationsträger, da Strukturen und Materialien die Polarisation unterschiedlich verändern.

Polarisatoren werden in vielfältigen Varianten kommerziell auf dem Markt angeboten. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der physikalischen Wirkprinzipien, die zur Erzeugung polarisierter Strahlung zur Anwendung kommen, hinsichtlich ihrer optischen Parameter wie Kontrast, Transmission und relevanter Wellenlängenbereich und natürlich auch signifikant in den Preisen. Der am weitesten verbreitete Polarisator ist der Folienpolarisator, der allein durch seinen Einsatz in Flüssigkristall-Displays in Flächen produziert wird, die in km^2 gemessen werden. Da dieser Polarisator aber ein recht spezielles, wenn auch sehr preiswertes Produkt für den sichtbaren Spektralbereich ist und bei weitem nicht alle Anforderungen an einen Polarisator abdeckt, so z.B. hinsichtlich der Temperatur- und UV-Beständigkeit aber auch in Bezug auf Kontrastverhältnis, Homogenität, Transmissionsvermögen und Wellenlängenbereich, sind

eine Vielzahl anderer Polarisatoren auf dem Markt (**Bild 1**). Sie teilen sich nach ihren Wirkprinzipien in insgesamt fünf Gruppen auf:

1. Folienpolarisatoren polarisieren auf der Grundlage von einheitlich ausgerichteten Farbstoffmolekülen, die in einer Trägerfolie eingebettet sind.
2. Kristallpolarisatoren nutzen die doppelbrechenden Eigenschaften verschiedener, zumeist optisch einachsiger Kristalle wie beispielsweise Kalzit. Die verschiedenen Bauformen wie z.B. Glan-Thomson, Rochon oder Wollaston bewirken unterschiedliche Effekte, zum Beispiel polarisationsabhängige Strahlablenkung, Reflexion oder Strahlversatz.
3. Dielektrische Schichtpolarisatoren nutzen die polarisationsabhängigen Reflexionseigenschaften an Grenzschichten zwischen Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex bei Einfallswinkeln $\neq 0^\circ$. Dabei wird der Polarisator so im Strahlengang gekippt, dass das Licht im Brewster-Winkel auf die Oberfläche trifft. Durch geschickte Wahl mehrerer miteinander interferierender Dünnschichten können sowohl für die Transmission als auch für die Reflexion Werte bis nahe an die idealen 100% erreicht werden. Solche Filter sind unter anderem als TFP (thin film polarizer) und PCB (polarizing cube beamsplitter) bekannt.

Bild 1: Die verschiedenen Polarisator-Grundarten

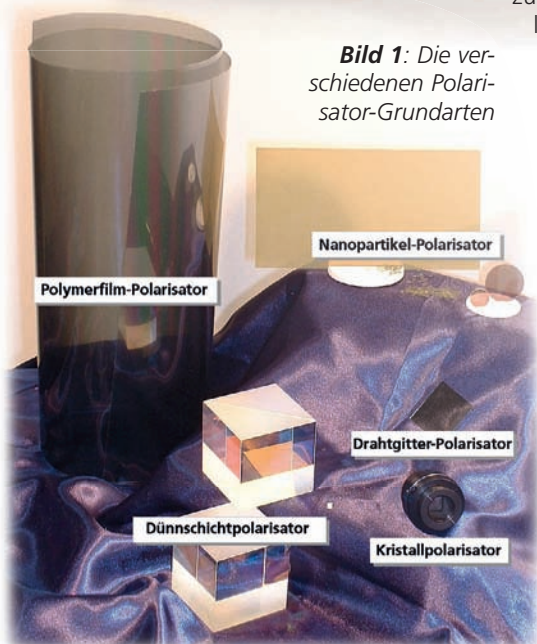




Bild 2: Strukturiert Polarisieren: Das linear polarisierte Licht der Quelle wird in den einzelnen Feldern unterschiedlich beeinflusst

4. Drahtgitterpolarisatoren (wire grid polarizers) reflektieren elektromagnetische Wellen, deren elektrisches Feld parallel zu den Drähten schwingt, während sie Wellen mit Polarisationsrichtung quer zu den Drähten durchlassen.
5. Nanopartikel-Polarisatoren nutzen die polarisationsabhängige Plasmonenabsorption länglicher metallischer Nanopartikel, die in einem transparenten dielektrischen Medium wie z.B. Glas eingebettet sind.

Für alle gibt es spezielle Anwendungsfelder, auf denen sie teilweise konkurrenzlos sind.

Strukturiert polarisieren

In der Regel wird mit einem Polarisator das gesamte Strahlungsbündel erfasst und die den Polarisator verlassende Strahlung hat über den gesamten Bündelquerschnitt die gleichen Polarisations-eigenschaften. Zunehmend mehr Anwendungen benötigen aber eine partiell unterschiedliche Polarisierung von Strahlenbündeln, z.B. zur ortsaufgelösten Polarisationsanalyse oder für optisch codierte Schlüssel, die nicht oder nur mit sehr großem Aufwand kopierbar sind [1].

Entsprechend ist gegenwärtig eine wachsende Nachfrage nach strukturierten Polarisatoren zu verzeichnen. Mit diesen kann Strahlung so polarisiert werden, dass benachbarte Bereiche im Strahlenbündel nach Durchtritt durch den Polarisator unterschiedliche Polarisations-eigen-

schaften besitzen. Entweder sind sie im gesamten betrachteten Spektralbereich in unterschiedlichen Richtungen polarisiert, oder auch in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen (Bild 2). Derartige Strukturen schließen auch Bereiche ein, in denen die Strahlung vollständig und unpolarisiert das Filter passieren kann, bzw. vollständig geblockt wird.

Abhängig von der jeweiligen Anwendung werden an die Polarisatoren spezielle Anforderungen hinsichtlich Spektralbereich, Kontrastverhältnis, Transmissionsvermögen aber auch an ihre geometrischen Abmessungen und die Bauform gestellt. So werden Filter gefordert, bei denen die lateralen Abmessungen benachbarter Bereiche im μm^2 -Bereich liegen, andererseits aber auch Filter mit Strukturabmessungen im Bereich von einigen cm^2 . Abhängig von diesen Forderungen ist abzuschätzen, ob ein spezieller Polarisatortyp zur Anwendung kommen kann oder nicht.

Die Beispiele in Bild 1 zeigen bereits, dass nicht alle Polarisatortypen zur Strukturierung verwendet werden können. So können Dünnpolymarpolarisatoren und Kristallpolarisatoren schon wegen ihrer Baugröße nicht oder nur stark eingeschränkt zur Anwendung kommen. Am besten eignen sich plane Polarisatoren wie Folien oder dünne Gläser, die bevorzugt die polarisierenden Eigenschaften in oberflächennahen Bereichen bzw. als Schichtsystem auf der Oberfläche von dünnen Substraten aufweisen.

Für die Strukturierung werden hauptsächlich drei Verfahren unterschieden:

- Mosaik-Technik
- lithographische Verfahren
- thermische Modifikation

Sie sind für unterschiedliche Polarisatorgrößen und -Anforderungen geeignet. Weitere Möglichkeiten der Strukturierung sind z.B. Laserstrukturierung oder die Strukturierung durch Einwirken elektrischer Felder, die zwar erhebliche Potentiale aufweisen, jedoch derzeit noch nicht die erforderliche Serienreife besitzen und daher hier nicht näher behandelt werden.

Mosaik-Technik

Vor allem für größere Strukturbereiche $>2 \text{ mm}$ ist die Mosaik-Technik geeignet: der gewünschten Struktur entsprechend zugeschnittene Filtersegmente werden nebeneinander angeordnet. Die unterschiedliche Orientierung der einzelnen Segmente wird ausschließlich über Verdrehung der einzel-

nen Segmente erzielt (Bild 3), natürlich lassen sich auch vollständig transparente und opake Bereiche einbauen. Auch Filter für unterschiedliche Spektralbereiche können nebeneinander angeordnet werden.

Im Grenzbereich zwischen zwei Segmenten ist die Transmission gestört. Inwiefern, ist im Wesentlichen durch die Genauigkeit der Vereinzelungsprozesse und durch eventuell auftretende Störungen des aktiven Bereiches bestimmt. Bei der Verwendung von Nanopartikel-Polarisatoren lassen sich Werte zwischen $0,1 \text{ mm}$ und $20 \mu\text{m}$ erreichen. Die Stabilität des Filters wird durch das Einbetten des Filtermosaiks zwischen einer Grund- und einer Deckplatte gewährleistet. Durch nachfolgende Schleif- und Polierprozesse lassen sich dann auch die Wellenfrontverzerrung und die Strahlablenkung verbessern.

Da die Polarisations-eigenschaften des Mosaiks denen der Ausgangsprodukte entsprechen, werden neben Kostengesichtspunkten deren Vor- bzw. Nachteile bestimmen, auf welches Ausgangsmaterial zurückgegriffen wird. Glas beispielsweise lässt sich präzise zuschneiden und bietet

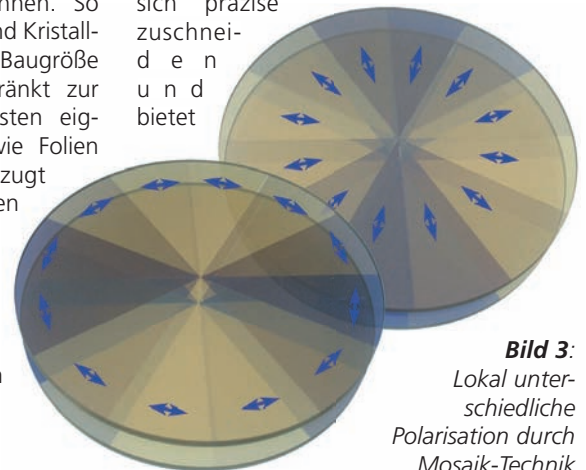


Bild 3: Lokal unterschiedliche Polarisierung durch Mosaik-Technik

einen passenden Brechungsindex und einen großen Wellenlängenbereich auch außerhalb des Sichtbaren. Folien hingegen sind preisgünstig, lassen sich jedoch nur mit eingeschränkter Genauigkeit vereinzelnd und assemblieren.

Lithographisch Strukturieren

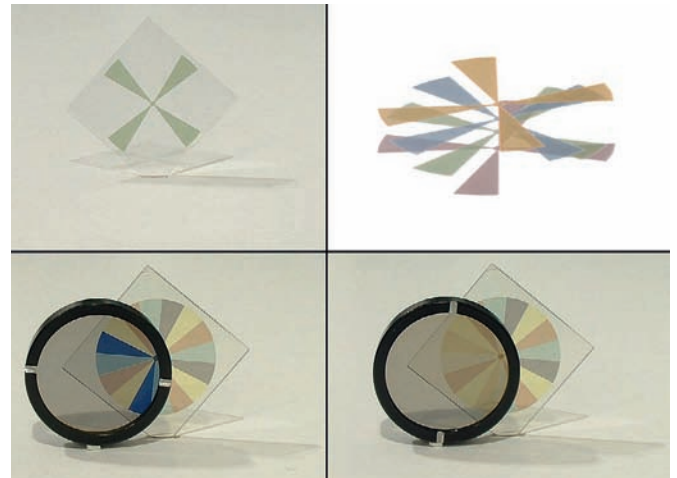
Werden die Segmente zu klein oder ihre Formen zu kompliziert, wird auf das lithographische Verfahren zurückgegriffen. Wichtige Voraussetzung für die Herstellung strukturierter Polarisatoren nach diesem Verfahren ist, dass die polarisierende Schicht oberflächennah bzw. auf der Oberfläche lokalisiert und mittels geeigneter Prozessschritte wie z.B. Ätzen entfernbar ist.

Für diese Technik sind Glaspolarisatoren gut geeignet, die zeppelinförmige Silber-Nano-

partikel enthalten [2]. Diese polarisierenden Partikel entstehen, indem in Natrium-Silikatgläsern Natriumionen durch Silberionen ersetzt werden, die durch nachfolgende reduktive Temperung oberflächennah Silberkolloide unterschiedlicher Größe bilden. Durch eine entsprechende Behandlung der Gläser werden die Silberteilchen in einheitlicher Richtung deformiert. Die Wellenlänge der maximalen Polarisation, der Polarisationsgrad und das Transmissionsvermögen hängen ab von der Größe der Silberteilchen, ihrer Dichte und Elliptizität, d.h. dem Verhältnis der Halbachsen der Rotationsellipsoide zueinander. Die so hergestellten Polarisatoren zeichnen sich durch hohen Kontrast und gutes Transmissionsvermögen aus, sind hoch temperaturbeständig und resistent gegenüber UV-Strahlung und Chemikalien. Die zwischen 200–500 µm dicken Polarisatoren lassen sich wie einfache Dünngläser sehr präzise bearbeiten.

Beim lithographischen Verfahren werden zuerst ein oder mehrere Glaspolarisatoren strukturiert, sodass jeder einzelne Polarisator anschließend transparente und polarisierende Bereiche aufweist. Dazu werden

Bild 5: Mehrschichtiger lithographisch strukturierter Polarisator: Mehrere Einfach-Schichten (oben links) werden kombiniert (oben rechts)



über Maskentechnik, wie sie beispielsweise in der Halbleiterindustrie üblich ist, die späteren polarisierenden Bereiche durch eine Lackschicht abgedeckt. Durch Wegätzen der dünnen, nanopartikelhaltigen Schicht in den frei liegenden Flächen entstehen dann die transparenten Bereiche. Die Strukturen sind so gestaltet, dass sie beim Übereinanderlegen der einzelnen Polarisatoren die

gewünschte Gesamtstruktur bilden, wobei für jede Polarisationsrichtung ein Polarisator bzw. eine Ebene erforderlich ist. Ein einfaches Beispiel zeigt **Bild 4**. Zuerst werden zwei Polarisatoren schachbrettartig strukturiert. Anschließend werden sie so gefügt, dass die Polarisationsrichtungen um 90° zueinander gedreht sind und die transparenten Felder des einen die polarisierenden Felder des anderen Polarisators überdecken. Somit entsteht eine Schachbrettstruktur, deren nebeneinander liegende Felder mit zueinander um 90° gedrehter Polarisationsrichtung polarisieren. Da die aktiven, polarisierenden Schichten beim Fügen von zwei Polarisatoren zueinander (face-to-face) angeordnet werden können, treten kaum Parallaxeffekte auf.

Mit diesem Verfahren lassen sich strukturierte Polarisatoren mit zwei unterschiedlichen Polarisationsrichtungen, sowie mit vollständig transparenten oder opaken Bereichen herstellen. Die Strukturabmessungen sind bestimmt durch die verfügbaren Ätztechniken und die Dicke der polarisationsaktiven Schichten. Die Minimalabmessungen der lateralen Bereiche liegen bei ca. 5 µm, erfordern aber extrem aufwendige Prozesse wie beispielsweise Ionenstrahlätzen. Da die Ausrichtung der separat strukturierten und anschließend gefügten Polarisatoren praktisch nur durch die Genauigkeit beim Fügen begrenzt wird, ist eine hohe Präzision erreichbar. Mit Mask-Alignern sind Abweichungen von weniger als 1 µm realisierbar.

Die Anzahl unterschiedlicher Polarisationsrichtungen lässt sich erhöhen, indem weitere Gläser photolithographisch strukturiert werden, die dann wie ein Stapel übereinander angeordnet gefügt werden (**Bild 5**). Ein Filter mit beispielsweise vier solchen Ebenen ist ca. 1 mm dick.

Damit nicht nur die Orientierung der Polarisation strukturiert ist, sondern auch unterschiedliche Spektralbereiche polarisiert wer-

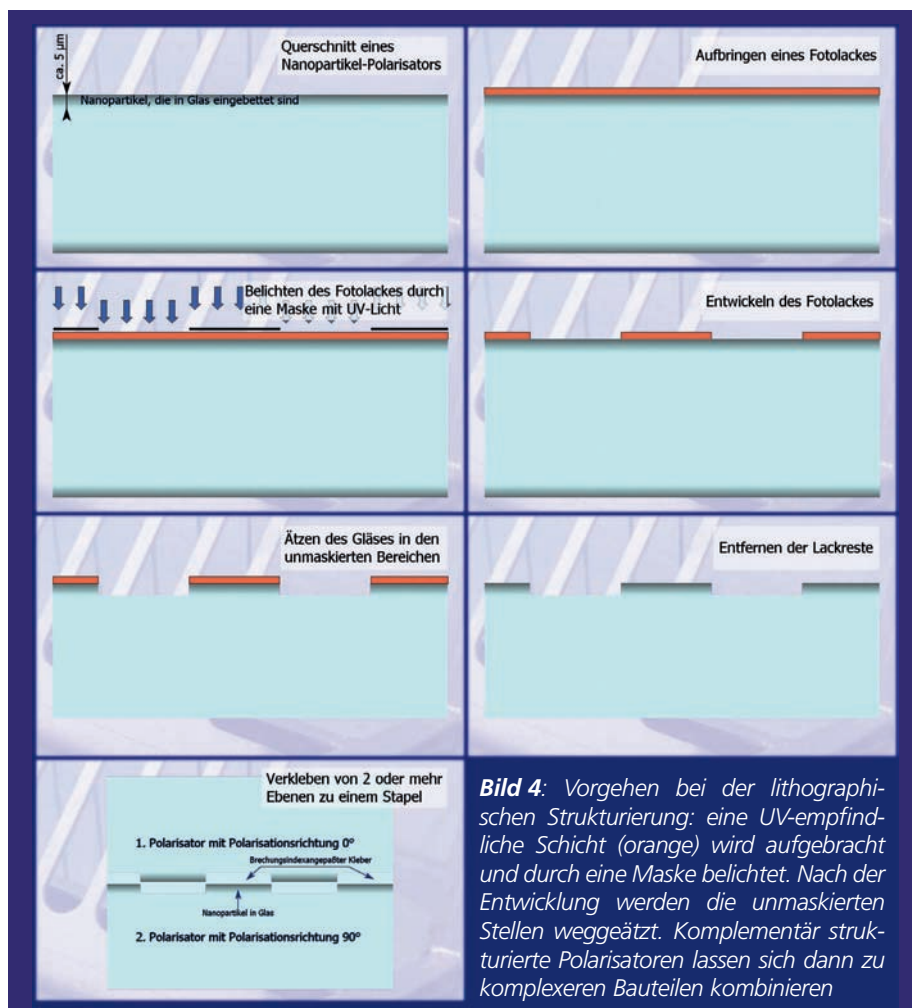


Bild 4: Vorgehen bei der lithographischen Strukturierung: eine UV-empfindliche Schicht (orange) wird aufgebracht und durch eine Maske belichtet. Nach der Entwicklung werden die unmaskierten Stellen weggeätzt. Komplementär strukturierte Polarisatoren lassen sich dann zu komplexeren Bauteilen kombinieren

den, kann die beschriebene Strukturierung mit Ausgangsfiltern für unterschiedliche Wellenlängenbereiche durchgeführt werden. Die colorPol-Polarisatoren beispielsweise sind im Spektralbereich von 340 nm bis 5 μm verfügbar.

Thermische Modifikation

Für den Fall, dass bei gleicher Orientierung der Polarisation mehrere Spektralbereiche selektiert werden sollen, kann durch einen lokalen Energieeintrag, z.B. mittels Laser- oder Elektronenstrahl, die Teilchen deformation verringert werden. Durch die Reduzierung ihres Halbachsenverhältnisses, welches die Lage der Absorptionsbande bestimmt, ändert sich der Spektralbereich maximaler Polarisation. Man spricht hier von einer thermisch induzierten Formrelaxation der Nanopartikel. Dieses Verfahren funktioniert nur mit Glaspolarisatoren, bei denen oberflächennah einheitlich ausgerichtete Nanopartikel im Glas eingebettet sind.

Sowohl das lithographische Verfahren als auch die thermische Modifikation bieten einen kostengünstigen Zugang zu Filtern

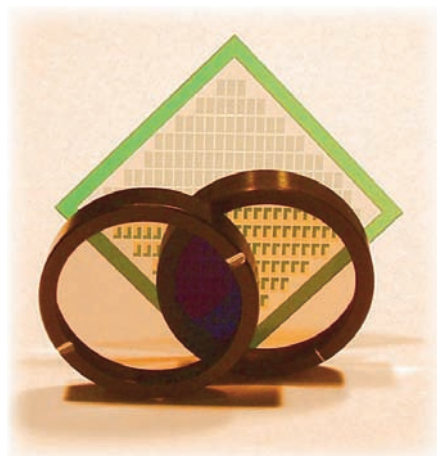


Bild 6: Struktur-Polarisatoren lassen sich in großer Stückzahl herstellen

mit nur wenigen verschiedenen Segmenten kleiner Abmessungen. Ähnlich wie in der Halbleitertechnik lassen sich so „Glaswafer“ mit einer großen Anzahl dieser Filter herstellen, die wie Chips in der Mikroelektronik aus dem Waferverband herausgeschnitten werden können (**Bild 6**). Für derartig strukturierte Filter in Abmessungen von wenigen mm^2 gibt

es derzeit keine wirtschaftliche, industriell verfügbare Alternative.

Literaturhinweise

- [1] Patent *Optisches Sicherheitssystem* DE 000 010 225 375 B4
- [2] A. Volke, G. Heine, *Mit kleinen Partikeln ganz groß – Polarisatoren für UV, VIS und IR*, Photonik 3/2004, S. 70
- [3] Patent *Structured polarizer and method for making the same*, US 000 007 256 937 B2

Kontakt

André Volke
Betriebsleiter
CODIXX AG
Steinfeldstr. 3
D-39179 Barleben
Tel. 039203/9630
Fax 039203/96333
eMail: colorpol@codixx.de
Internet: www.codixx.de



www.photonik.de ▶ Webcode 2006