

Mit kleinen Partikeln ganz groß – Polarisatoren für UV, VIS und IR

André Volke, Günter Heine, CODIXX AG

Wer Polarisatoren mit Kontrasten über 10 000:1 (40 dB) bei gleichzeitig geringen Transmissionsverlusten von unter 0,1 dB ($\approx 2,3\%$) benötigt, herkömmliche Polarisatoren aber aufgrund ihrer voluminösen Bauform, des Preises oder der unzureichenden Temperaturbeständigkeit nicht einsetzen kann, dem helfen kleinste Partikel in einem dünnen Glassubstrat weiter. Denn diese Nanopartikel können hocheffizient polarisieren, vorausgesetzt sie haben die richtige Form und Ausrichtung.

Runde, metallische Partikel, kleiner als die Wellenlänge des Lichtes, die in eine glasartige Matrix, ein Dielektrikum, eingebettet sind, zeigen ein sehr stark wellenlängenabhängiges Verhalten: Sie können für bestimmte Wellenlängen absorbieren, reflektieren oder praktisch durchsichtig sein. Diese Effekte, seit 1908 mit der Mie'schen Streutheorie (Gustav Mie 1868-1957) erklärbar, werden seit Jahrhunderten in den so genannten Anlaufgläsern genutzt, beispielsweise in farbigen Kirchenfenstern, wo rot durch Kupfer-Partikel, gelb oder braun durch Silber-Partikel erzeugt wird. Technische Anwendungen von Anlaufgläsern sind hochbeständige Kanten- oder Absorptionsfilter, die durch ihre hohe Lebensdauer und Güte überzeugen. Da die Filterwirkung auf der Plasmonenresonanz der Nanopartikel beruht, brauchen weder Schichten noch organische Moleküle oder Farbstoffe eingesetzt zu werden. Unter Nutzung dieses Prinzips sind seit einigen Jahren auch Polarisatoren am Markt verfügbar, die die gleichen positiven Eigenschaften ihrer nicht polarisierenden Vorläufer aufweisen: lange Lebensdauer, hohe Temperatur- und Klimaresistenz, brillante und homogene optische Eigenschaften.

1 Funktionsprinzip

Die Plasmonenresonanz, unter der eine kollektive Schwingung aller Elektronen – das Mie-Plasmon – eines Nanopartikels verstanden wird, wirkt unabhängig vom Einfallswinkel des Lichtes. Im Fall runder Partikel wirkt sie auch unabhängig von der

Richtung des elektrischen Feldvektors (E-Vektor), also der Polarisationsrichtung. Strahlung mit einer Frequenz nahe der Plasmonen-Resonanzfrequenz eines Partikels regt das Plasmon des Partikels an. Beim Abklingen der angeregten Schwingung (Dauer ca. 10^{-13} Sekunden) wandelt sich die Energie in Wärme um: Die Strahlung ist absorbiert.

Die Resonanzfrequenz hängt neben dem Material der Partikel und des umgebenden Dielektrikums auch von der Größe und vor allem der Form der Partikel ab. So spielt bei länglichen, zeppelinförmigen Teilchen die Polarisationsrichtung der auftreffenden Strahlung eine große Rolle. Die Resonanzfrequenz für Strahlung, deren E-Vektor parallel zur *kurzen* Halbachse des Teilchens liegt, ist höher als die der Strahlung, deren E-Vektor parallel zur *langen* Halbachse des Teilchens liegt. Liegen die beiden Resonanzfrequenzen (**Bild 1**) in ausreichendem Abstand zueinander, so polarisiert ein solches Teilchen Strahlung mit Frequenzen nahe einer der beiden Resonanzfrequen-

zen, da dann nur die eine Polarisationsrichtung Plasmonenresonanz hervorruft und absorbiert wird, die andere jedoch nahezu ungehindert passieren kann (**Bild 2**).

2 Polarisatoren

Für einen flächigen Polarisator reicht ein einzelnes Partikel natürlich nicht aus. Um eine Trennung der Polarisationsrichtungen von mehr als 40 dB (das entspricht einem Kontrast von 10 000:1) zu erreichen, sind mehr als 10^{10} Partikel je mm^2 Polarisatorfläche notwendig. Diese müssen alle eine entsprechende zeppelinartige Form besitzen und einheitlich ausgerichtet sein, d.h. die langen Halbachsen müssen alle parallel zueinander liegen. Sind die Partikel im gesamten Glas gleichmäßig über die Dicke verteilt, so spricht man von einem Volumenbauelement. Ordnet man die Partikel jedoch in einem oberflächennahen Bereich an, werden Parallaxe-Effekte verhindert und es ergeben sich eine Reihe von Vorteilen wie ein hoher Reflexionsanteil bei der unterdrückten Polarisationsrichtung oder die Strukturierbarkeit.

In **Bild 3** sind Polarisatoren aus Glas dargestellt, die entsprechend der schematischen Vergrößerung einheitlich ausgerichtete Nanopartikel aus Silber enthalten. Die Kennzeichnung der Polarisatoren gibt immer die Durchlassrichtung an: Bei IR-Filtern liegt sie entlang der kurzen Partikel-Halbachsen, bei Filtern für den UV-Bereich

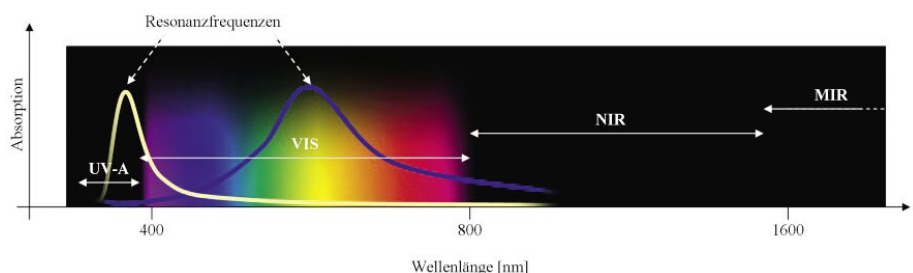


Bild 1: Plasmonen-Absorptionsbande von zeppelinförmigen Silberpartikeln in Glas

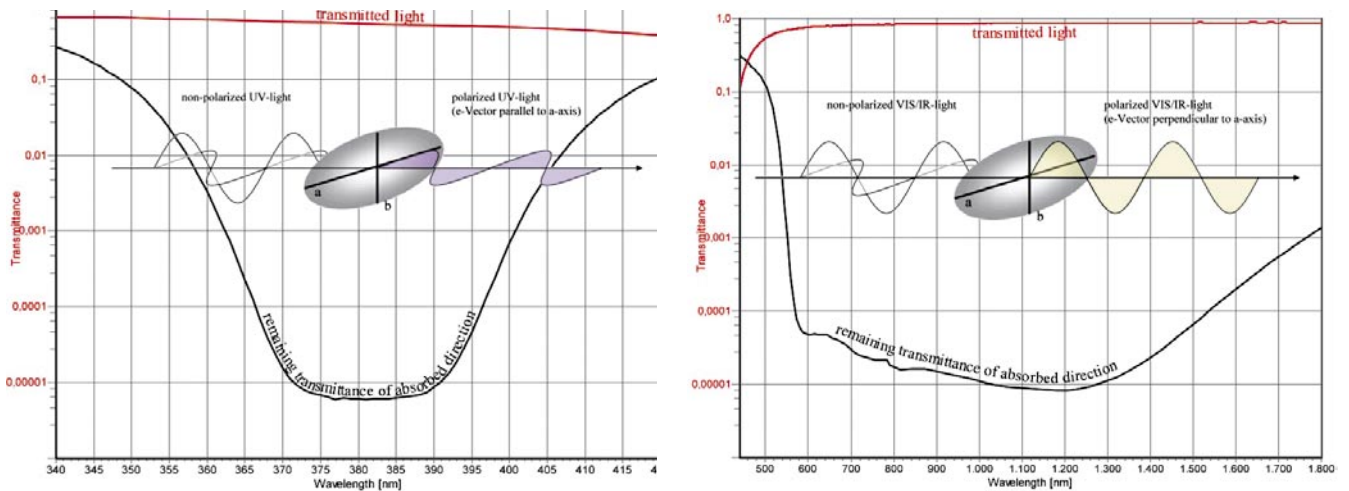


Bild 2: Darstellung der polarisationsrichtungsabhängigen Transmission an einem zeppelinförmigen Silberpartikel in Glas, links im UV, rechts im VIS/IR. Die rote Linie zeigt die Transmission entlang der Durchlassrichtung, die schwarze die der absorbierten Richtung.

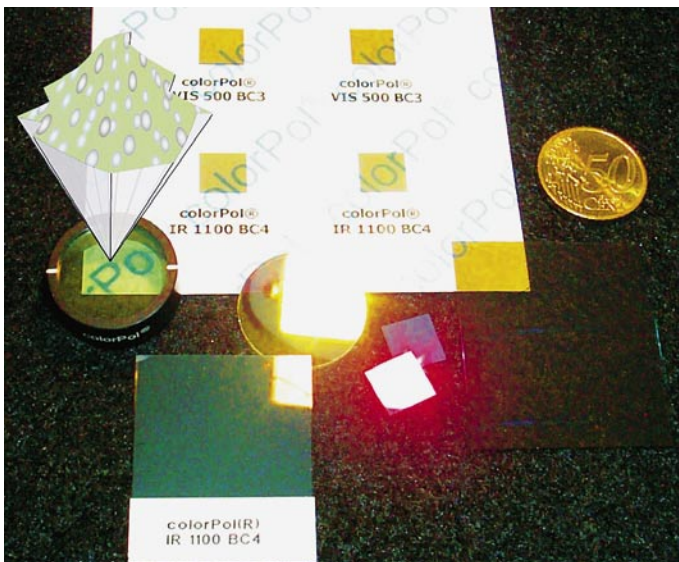


Bild 3: Verschiedene Polarisatoren. Das Schema zeigt die Ausrichtung der Nanopartikel eines IR-Filters: Die kurzen Halbachsen sind parallel zur Durchlassrichtung.

kann. Auch ultraviolettes Licht mit einer Frequenz nahe der (höheren) Resonanzfrequenz der kurzen Halbachse, also etwa 800 THz bzw. 375 nm Wellenlänge, kann mit diesem IR-Filter polarisiert werden, allerdings gerade andersherum: senkrecht zur Kennzeichnung polarisiertes UV-Licht passiert das Filter, während parallel zur Kennzeichnung polarisiertes UV-Licht absorbiert wird.

Da das Halbachsenverhältnis die Lage der polarisationsrichtungsabhängigen Resonanzfrequenzen beeinflusst, ist es möglich, durch Gemische unterschiedlich geformter Nanopartikel breitbandige Polarisatoren herzustellen. Diese können optisch durchaus mit Kristallpolarisatoren konkurrieren, bestehen dabei aber durch ihre flache Bauform, verfügbare Größe und günstigen Preis. Ein weiterer Vorteil gegenüber vielen anderen Verfahren zur Polarisation ist die weitgehende Unabhängigkeit vom Einfallswinkel, der fast ausschließlich durch das Fresnelsche Reflexionsgesetz limitiert wird: Bei 20° Einfallswinkel tritt im ungünstigsten Fall ein zusätzlicher Transmissionsverlust von ca. 1,4% (je Glaskante ca. 0,7% höhere Reflexionen) auf. Der Kontrast bleibt weitestgehend unbeeinflusst.

In **Bild 4** sind die für einen Polarisator entscheidenden Parameter Kontrast (rechte Achse, schwarze Kurven) und Transmission (linke Achse, rote Kurven) dargestellt. Die Transmission ist definiert durch den Transmissionsgrad des Nutzsignals τ_N und der Kontrast C als Verhältnis der Transmissionsgrade von Nutz- und Störsignal τ_S über

$$C = \frac{\tau_N}{\tau_S} \quad (1)$$

entlang der langen Halbachse. Im Fall des dargestellten Filters regt infrarotes Licht mit einer Frequenz von 300 THz bzw. einer Wellenlänge von 1000 nm, dessen E-Vektor senkrecht zur Kennzeichnung ausgerichtet

ist, die Plasmonen zur Schwingung an und wird absorbiert, während Licht, dessen E-Vektor parallel zur Kennzeichnung und somit parallel zur kurzen Halbachse liegt, das Filter nahezu ungehindert passieren

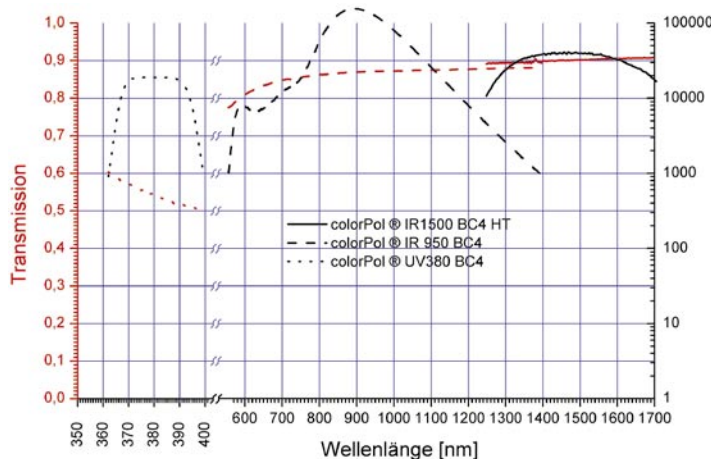


Bild 4: Kontrast- (schwarz) und Transmissionskurven (rot) von Polarisationsfiltern für verschiedene Wellenlängenbereiche.

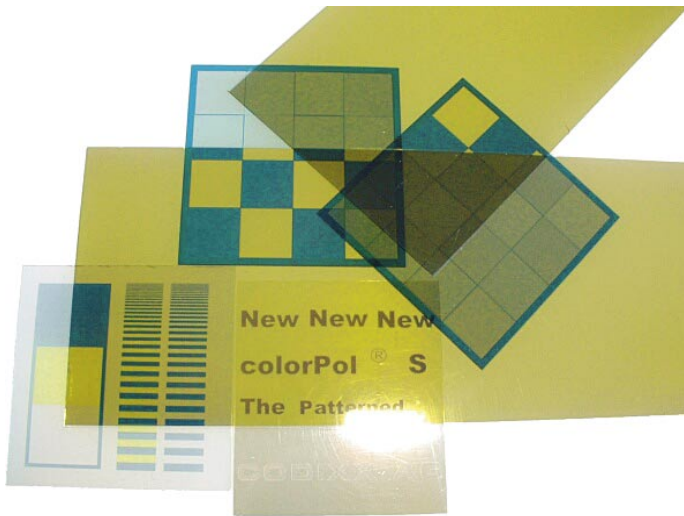


Bild 5: Strukturierte Polfilter

3 Weitere Möglichkeiten

Doch damit erschöpfen sich die Möglichkeiten dieser neuen Technologie noch lange nicht. Sind die Halbachsen der Nanopartikel in einem Gebiet anders ausgerichtet als in einem andern, beispielsweise benachbarten Gebiet, so erhält man einen *strukturierten Polarisator* (Bild 5 und 6). Sowohl Polarisationsrichtung als auch optische Eigenschaften der Strukturen wie Kontrast, Transmission oder Wellenlängenbereich sind durch die Einbettung sich von Gebiet zu Gebiet unterscheidender Partikel in einem Glas einstellbar. Auch transparente, nicht polarisierende Bereiche oder wellenlängenselektiv absorbierende Gebiete sind realisierbar. Dies funktioniert jedoch nur dann gut, wenn die Partikel in einer dünnen Schicht angeordnet sind, um Parallaxeneffekte gering zu halten. Derartige strukturierte Polarisatoren sind erstmals mit den colorPol S-Filtern verfügbar, die maximale Auflösung der Strukturen beträgt ca. 30 µm. Damit werden eine Reihe neuer

Anwendungen möglich, insbesondere in der integrierten oder Mikrooptik, wo es auf kleinstem Raum gilt, Polarisatoren mit verschiedenen, zueinander exakt ausgerichteten Polarisationsrichtungen zusammensetzen. In zunehmendem Maße finden sich Anwendungen in der Halbleitersensorik, wo strukturierte Filter direkt auf dem Halbleiter aufgebracht werden oder in der Analytik, etwa zur Bestimmung des

Polarisationszustandes von Licht.

Auch bei altbewährten Anwendungen wie zum Beispiel der Ellipsometrie ergeben sich mit diesen integrierten Bauelementen durch die Anwendung effizienterer Verfahren Vorteile gegenüber bisherigen Lösungen.

4 Zusammenfassung

Nichtsphärische Nanopartikel aus Silber, die einheitlich ausgerichtet in einem flachen Glas eingebettet sind, ergeben durch ihre Plasmonen-Absorption einen effizienten Polarisator für den UV- sowie VIS- und IR-Bereich. Sie haben hohe Transmissionswerte und hervorragende Kontraste bei einem großen Akzeptanzwinkelbereich und sind aufgrund ihrer anorganischen Zusammensetzung extrem stabil. Durch verschiedenartige Ausrichtung der Nanopartikel werden strukturierte Polarisatoren verwirklicht, die zum Beispiel in der Mikrooptik neue und günstigere Lösungen ermöglichen.

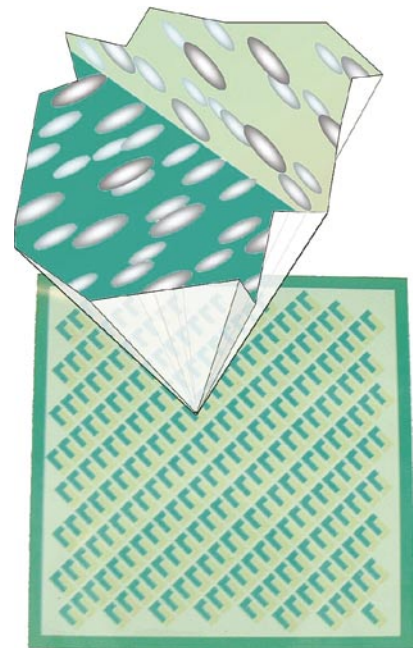


Bild 6: Beispiel eines strukturierten Polarisators. Das Schema zeigt die Anordnung und Ausrichtung der Nanopartikel

Ansprechpartner

André Volke
Manager R&D

Dr. Günter Heine
Plant Manager

CODIXX AG
Steinfeldstr.3
D-39179 Barleben
Tel. 039203/963-0
Fax 039203/963-33
eMail: colorPol@codixx.de
Internet: www.codixx.de



Optatec: Stand 3.0/C60

▲ Kennziffer **025**

Webcode **3025**