

Gold-beschichtete Lichtleitfaser-Mikrotaper für sensorische Anwendungen auf Basis der Oberflächenplasmonenresonanz

Torsten Wieduwilt, H. Bartelt, R. Willsch

Institut für Photonische Technologien e.V. Jena
<mailto:torsten.wieduwilt@ipht-jena.de>

Es wird über das Design, die Herstellung und experimentelle Untersuchungen an Gold-beschichteten Lichtleitfaser-Mikro-Tapern berichtet, welche basierend auf dem Phänomen der Oberflächenplasmonenresonanz eine hohe Sensitivität gegenüber kleinsten Brechzahländerungen an der Grenzfläche zur Umgebung zeigen.

1 Einführung

Sensoren auf Basis der Oberflächenplasmonenresonanz haben eine große Bedeutung beim Studium von bio-chem. Reaktionen, infolge ihres hohen Grades an Empfindlichkeit gegenüber kleinsten Brechzahländerungen. Ein großer Vorteil ist, dass man hierbei ohne Marker auskommt.

In „getaperten“ Lichtleitfasern wird durch Reduzierung des Kern- und Manteldurchmessers erreicht, dass sich die Fasermode in den Mantel ausbreitet (s. Abb. 1), und im Fall einer dünnen metallischen Beschichtung (z.B. Au), über das evaneszente Feld, eine Oberflächenplasmonwelle an der Grenzfläche Metall/Dielektrikum angeregt werden kann, welche als geführte Mode an dieser Grenzfläche propagiert.

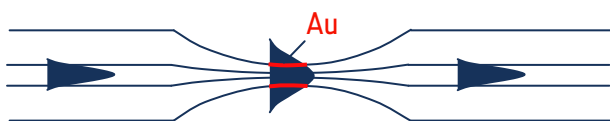


Abb. 1 Lichtleitfasertaper (schematisch)

Die Anregung erfolgt, wenn die Propagationskonstante der Fasermode gleich der der Plasmonmode ist, was Gl. 1 näherungsweise angibt:

$$k_0 n_{eff} = k_0 \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_{Metall}(\lambda) \cdot \tilde{\epsilon}_{Analyt}(\lambda)}{\tilde{\epsilon}_{Metall}(\lambda) + \tilde{\epsilon}_{Analyt}(\lambda)}} \quad (1)$$

Der rechte Teil der Gleichung beschreibt hierbei die Propagationskonstante der Plasmonmode und deren Abhängigkeit von den dielektrischen Eigenschaften des Metalls und der Umgebung (Analyt). Im Fall der Anregung zeigt sich im transmittierten Licht ein Resonanzminimum, dessen spektrale Lage sich mit Änderung der Analytbrechzahl verschiebt. Da Oberflächenwellen TM-Moden sind, ist eine Anregung an Grenzflächen nur mit p-polarisiertem Licht möglich. Bei einer kompletten Metallbeschichtung auf einem zylindersymmetrischen Wellenleiter kann diese Forderung für unterschiedliche Polarisationsmoden erfüllt werden, was den Aufbau sehr einfacher Sensoren ohne Verwendung von Polarisationsselementen möglich macht.

2 Sensordesign (Modellierung)

Mittels Modellierung wurde untersucht, wie sich Taperdurchmesser, Goldschichtlänge und -dicke auf das Plasmonresonanzspektrum auswirken. Die Rechnungen wurden für eine Singelmodefaser mit dem Durchmesser Verhältnis 4,06/125 µm durchgeführt. Abb. 1 zeigt am Bsp. eines 10 u. 20 µm Tapers (Golddicke: 30 nm, Analytwechselwirkungslänge: 1 mm) berechnete Transmissionsspektren.

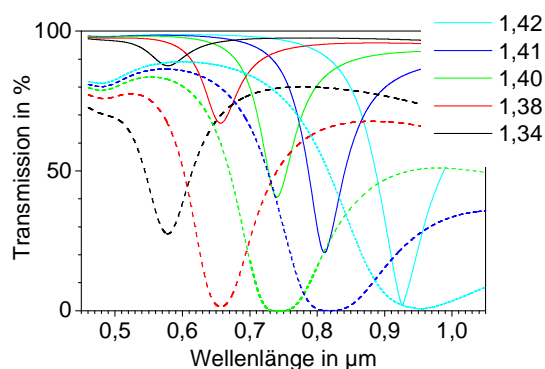


Abb. 2 Berechnete Transmissionsspektren: — 20 µm Taper, --- 10 µm Taper

Man erkennt, dass mit steigender Analytbrechzahl und bei Verringerung des Taperdurchmessers die Dämpfung zunimmt. Darüber hinaus nimmt sie auch mit Vergrößerung der Wechselwirkungslänge zu. Bei Vergrößerung der Golddicke nimmt sie dagegen ab. Je nach Brechzahlbereich des Analyten kann daher ein optimales Taper-Design gefunden werden, bei dem die Resonanz einen hohen Signalkontrast aufweist. Dies ist für die genaue Bestimmung des Minimums von Vorteil.

3 Taperherstellung

Für die Herstellung der Taper nutzen wir eine im Institut entwickelte Anlage, bei welcher über zwei Strahlen eines CO₂-Lasers eine Lichtleitfaser auf die zum Verziehen notwendige Temperatur aufgeheizt wird. Das Verziehen der Faser wird über zwei motorgetriebene Linearversteller, zwischen denen die Faser gespannt ist, realisiert. Die Länge der Tapertaille wird durch die Aufheizlänge entlang der

Faser bestimmt und erfolgt durch die Scanbewegung der Laserstrahlen – die Heizlänge ist konstant während des Ziehprozesses. Um die Qualität des Tapers schon während des Ziehvorganges beurteilen zu können, wird immer der momentane Wert für Transmission und Taperdurchmesser bestimmt. Wesentlich für eine hohe Transmission ist, dass der Taperübergang hinreichend adiabatisch erfolgt, um eine Energiekopplung in höhere Moden zu vermeiden. Wir erreichen für solche Taper Transmissionen >90 %. Die Gesamtlänge dieser Taper beträgt hierbei 50-60 mm.

4 Herstellung der Goldbeschichtung

Um die Forderung nach einer auf dem gesamten Tailenumfang und über eine Länge von einigen Millimetern entlang der Taille gleichmäßigen Golddicke ($d = 30...40$ nm) zu erfüllen, bedienen wir uns des DC-Magnetron-Sputterns unter Verwendung eines Gold-Ring-Targets ($\varnothing_i = 47$ mm, $H = 25$ mm). Hierfür wird der Faser-Taper in einen Halter eingespannt und die Taille im Mittelpunkt des Ring-Targets positioniert. Der Halter bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Länge der Goldbeschichtung definiert einzustellen, indem zwei Röhrchen, welche als Blende fungieren, entlang der Tapertaille verschoben werden. Aufgrund der geringen Sputterraten von 1,6 nm/s ist es uns möglich, auch bei manueller Sputterzeitführung Schichten mit einer Dickengenauigkeit von ± 1 nm herzustellen. Entlang der Tapertaille erreichen wir eine homogene Schichtdicke auf einer Länge von ca. 3 mm. Das entspricht dann der max. Analytwechselwirkungslänge, was völlig ausreichend für viele Anwendungen ist.

5 Experimentelle Ergebnisse

Zur Überprüfung der Modellierungsergebnisse, wurden goldbeschichtete Faser-Taper mit Durchmessern im Bereich 20 μ m bis 10 μ m hergestellt und die Transmission des in der Faser geführten Lichtes in Abhängigkeit des äußeren Brechungsindex (Analytflüssigkeit) gemessen. Als Lichtquelle wurde eine Supercontinuumquelle (450..1200 nm) und als Detektor ein Spektralanalysator eingesetzt. Zur Eliminierung des spektralen Intensitätsverlaufs der Lichtquelle wurden die gemessenen Analyt-Spektren auf das Transmissionsspektrum für Luft als Umgebungsmedium normiert. Als Analytflüssigkeit verwendeten wir Brechzahlöle im Bereich 1,3-1,43 (Cargille™ Lab. Inc.). Um eine definierte Analytwechselwirkungslänge zu gewährleisten, wurde der Kontakt zwischen Analyt und Goldschicht über einen mit dem Brechzahlöl benetzten Teflonstempel realisiert.

Abb. 3 zeigt am Beispiel eines 20 μ m Tapers (Goldschichtlänge ≈ 6 mm, Schichtdicke 38 ± 1 nm) die für verschiedene Analytbrechzahlen gemessenen Transmissionsspektren.

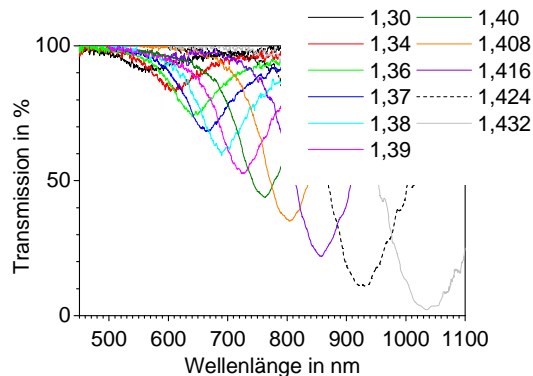


Abb. 3 Transmissionsspektren in Abhängigkeit des Analytbrechungsindex (n -Werte für $\lambda = 589$ nm); Analytwechselwirkungslänge 1,5 mm

Ausgehend von den Daten in Abb. 3 ist in Abb. 4 die Resonanzwellenlänge in Abhängigkeit der Umgebungsbrechzahl, sowie die daraus berechnete Brechzahlempfindlichkeit dargestellt. Zusätzlich zeigt das Diagramm einen Vergleich mit theoretisch ermittelten Werten. Unter der Voraussetzung einer Bestimmung der Resonanzwellenlänge auf 0,1 nm genau, ergibt sich für Messungen im Brechzahlbereich des Wassers eine Brechzahlgenauigkeit von 10^{-4} . Im Bereich höherer Brechungsindizes steigt sie auf Werte $>10^{-5}$.

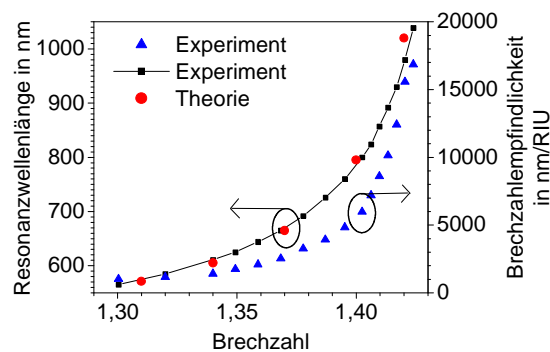


Abb. 4 Resonanzwellenlänge und Brechzahlempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Umgebungsbrechzahl für einen 20 μ m Taper (Golddicke 38 ± 1 nm)

6 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass mit goldbeschichteten Fasertapern auf einfache Weise – ohne spezifische Polarisationskontrolle, eine Umgebungsbrechzahlmessung realisierbar ist. Aufgrund seiner Abmessungen lässt sich der Taper gut in eine Mikrofluidikanordnung integrieren, was für bioanalytische Untersuchungen vorteilhaft ist.