

Dielektrische Nanowellenleiter als Metaatome für großflächige Metaoberflächen

W. Spiller, J. Jahns, FernUniversität in Hagen

mailto: walspill@yahoo.de

Dielektrische Metaoberflächen, bestehend aus nanoskaligen Metaatomen, dienen der lokalen Kontrolle der Funktionalität optischer Bauelemente. Im Gegensatz zu häufig betrachteten resonanten Metaatomen aus Silizium untersuchen wir hier Nanowellenleiter aus Polymeren. Wir klären relevante physikalische Prozesse, untersuchen Entwurfsmöglichkeiten, geeignete Parameter und Perspektiven der Fertigung in Polymermaterialien.

1 Einführung

Dielektrische Metaoberflächen (MO) bestehend aus nanoskaligen Metaatomen (MA) dienen der lokalen Formung des Wellenfrontes. Dabei sind Resonanz und Wellenführung die grundlegenden Effekte [1] [2] [3]. Neuere Arbeiten deuten auf eine fundamentale Einschränkung der Effizienz von resonanten MA im sichtbaren Bereich hin, hervorgerufen durch eine ggf. zu starke Wechselwirkung zwischen den einzelnen Resonatoren. Eine kollektive Optimierung bringt wenig Verbesserung, außerdem führen an sich notwendige Symmetriebrüche oft zu kaum beherrschbaren Abweichungen zwischen Simulation und Realisierung [1] [3]. Als Alternative werden nicht-resonante Nano-Wellenleiter (NWL) angesehen. Diese weisen bessere Isolation zwischen einzelnen MA, hohe Effizienz und Toleranz auf. Das Ziel unserer Untersuchungen zu Polymer-basierten MA ist es, geeignete Aspektverhältnisse der NWL, Abstand zu nächsten Nachbarn, zulässige Lageverschiebungen u. a. zu finden. Polymer als Material ist noch wenig untersucht, aber evtl. attraktiv wegen Verfügbarkeit von neuen Fertigungsverfahren, d.h. Zwei-Photonen-Absorption (2PA) und Polymerisation im Direkt-Schreiben-Verfahren.

2 Nanoresonatoren oder NWL

Von den beiden Design-Ansätzen für MA zur Erzeugung von Phasenverschiebungen (d.h. Nanoresonator, Nanowellenleiter, Abb.1) erscheint wegen kleinem Δn nur der zweite Ansatz sinnvoll, dazu hier einige Berechnungen und Betrachtungen für den Entwurf.

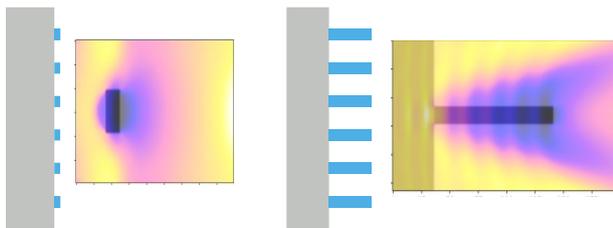


Abb. 1 Strukturen und räumliche Verteilung der Phasenverzögerung: Nanoresonator (links), NWL (rechts).

3 Optischer Entwurf: zwei Ansätze

Von den zwei Ansätzen für den optischen Entwurf, - als einzelnes Meta-Atom (kollektive Effekte werden vernachlässigt) und als Gruppe (kollektive Effekte werden berücksichtigt) halten wir beide als anwendbar. Allerdings, wegen starker Wechselwirkung zwischen MA aus Polymeren ist der strukturelle Cut-Off [1] in etwa doppelt so groß, als bei vergleichbaren MA aus TiO₂. Außerdem erscheinen relativ glatte „Lösungslandschaften“ bei nichtresonanten NWL als besonders gut für das inverse Design (mit Hilfe Künstlicher Intelligenz) geeignet. Dafür spricht auch die mögliche individuelle Wahl der Länge der NWL als wichtiger Freiheitsgrad.

4 Physikalische Prozesse

Wir unterscheiden zwischen longitudinaler Wellenführung und lateralen Moden. Als grundlegende physikalischen Prozesse erscheinen Rayleigh-Wood-Anomalie [4], laterale Kopplung durch „schräge Abstrahlung“, unterschiedliche Geschwindigkeit der Wellen innerhalb- und außerhalb des MA und dadurch entstehende periodische Phasenunterschiede als auch sehr kleine numerische Aperturen des Wellenleiters. Die evaneszenten lateralen Moden scheinen gemäß unseren Untersuchungen weniger von Bedeutung zu sein. Auch die in [3] erwähnten mehreren longitudinalen Moden bei zu großen Abständen zwischen MA wurden hier nicht als Störfaktor befunden.

5 Modell und Kriterien

Wir erfassen in einem 3D-Modell eingehende und abgehende Leistung: lateral, schräg und longitudinal, Abb.2. Über die Winkelcharakteristik kann man die „richtungsabhängige Effizienz“

$$RE(\theta_0, \Delta\theta) = \frac{1}{P_{in}} \int_{\theta_0 - \Delta\theta/2}^{\theta_0 + \Delta\theta/2} P(\theta) d\theta$$

als einfache Kennzahl für die „Schärfe“ des entsprechenden Richtungsdiagramms definieren. Als

weitere Kriterien dienen Abstand-zu-Wellenlänge [3] und (im Fernfeld) das Winkelspektrum, insb. Effizienz der 0-ten und der 1-ten Beugungsordnung falls die MO als Gitter gestaltet wird.

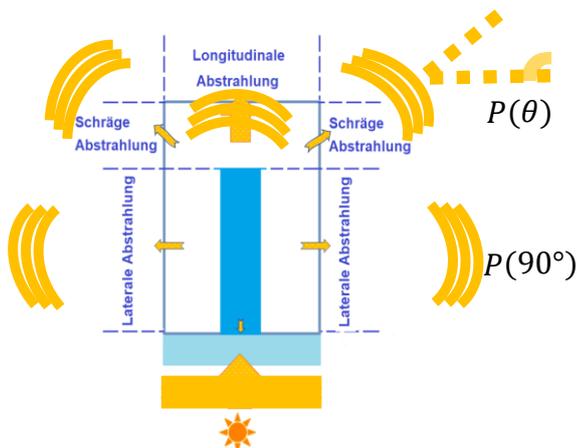


Abb. 2 Modell. Anregung (ebene Welle) von unten und drei Bereiche der Abstrahlung.

6 Ausgewählte Ergebnisse

Als Beispiel der erfassten lateralen und schrägen Abstrahlung zeigt Abb.3 zwei Darstellungen, nach Wellenlänge und Ort. Eine „Oszillation“ der Schrägen Abstrahlung nach Wellenlänge (Abb.3 links) ermöglicht eine Optimierung eines einzelnen NWL. Die räumliche Dominanz der schrägen Abstrahlung (Abb.3 rechts) ist charakteristisch für alle NWL, kann jedoch ggf. minimiert werden.

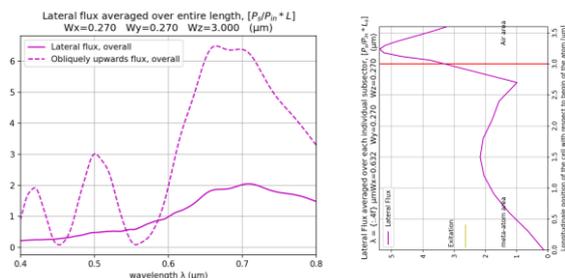


Abb. 3 Laterale und schräge Abstrahlung *abh. von λ* (links) und *x mit $\lambda=const$* (rechts).

Abb.4 zeigt den Einfluss der lateralen Wechselwirkungen durch Interferenz, die Feldstärke und Phase je nach Abstand zu den Nachbarn wesentlich verändern kann. Frequenzgänge des Kollektivs zeigen eine ausgeprägte „Nivellierung“ gegenüber des einzelnen MA: Das Kollektiv gleicht den Verlauf aus und zeigt eine hohe Effizienz um 80-95%.

Abschließend wurde der Einfluss von lokalen Veränderungen bei Periodizität, Material, Abstand und individuelle Höhe untersucht. Die stärksten, nahezu entscheidenden Auswirkungen hat der Abstand und die Höhe (Abb.5).

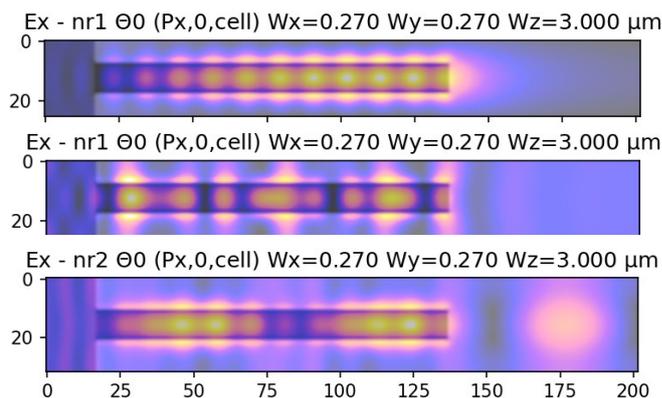


Abb. 4 Wechselwirkungen und Interferenz: Oben: Einzelner NWL. Bilder unten: Kollektiv, variabler Abstand.

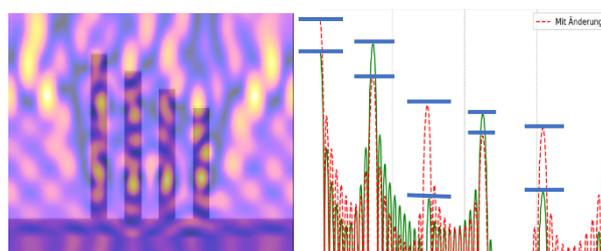


Abb. 5 Individuell eingestellte Länge der NWL: Starker Einfluss auf die Effizienz der Beugungsordnungen.

7 Zusammenfassung

Untersucht wurden Nanowellenleiter als Metaatome, speziell aus Polymeren. Hohe Aspektverhältnisse sind vorteilhaft, eine vernünftige Grenze (ca. < 30-40) erscheint als sinnvoll, um die seitliche Abstrahlung zu begrenzen. Die individuelle Länge ist ein wichtiger zusätzlicher Freiheitsgrad. Günstige Fertigungstoleranzen sind für die 2PA zu verzeichnen. Eine individuelle Optimierung vermag die Effizienz um ca. 5-10 dBp erhöhen. Wir gehen jedoch davon aus, dass eine kollektive Optimierung zusätzlichen Nutzen bringt.

Literatur

- [1] C. Gigli, Q. Li, P. Chavel, G. Leo, M. L. Brongersma, P. Lalanne, Fundamental limitations of Huygens' metasurfaces for optical beam shaping, *Laser & Photonics Reviews*, **15** (8), 2000448 (2021).
- [2] W. Spiller, S. Helfert, J. Jahns, Räumliche und zeitliche Simulation von nanoskaligen dielektrischen Dipolresonatoren, 123. DGaO-Jahrestagung (2022).
- [3] P. Lalanne, J.P. Hugonin, P. Chavel, Optical properties of deep lamellar gratings: a coupled Bloch-mode insight, *IEEE J. Lightwave Tech.*, **24**, 2442 (2006).
- [4] A. A. Darweesh, S. J. Bauman, D. T. Debu, J. B. Herzog, The Role of Rayleigh-Wood Anomalies and Surface Plasmons in Optical Enhancement for Nano-Gratings, *mdpi Nanomaterials*, **8**, 809 (2018).