

Scatterer Laser: Full-Maxwell Calculations

kladde by ede

July 18, 2011

Abstract

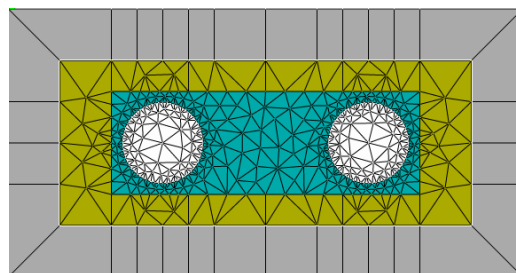
Das Programm JCMwave wird benutzt, um Moden und Schwellen von Streuer-Lasern (SL) mittels voller Lösung der Maxwellgleichungen zu berechnen und mit den Näherungsergebnissen der im RL-PRL verwendeten Mie-Näherung zu vergleichen. Ergebnis: bei Paar-Lasern ist die Mie-Näherung auch bei kleinen Abständen akzeptabel, wenn nicht der Abstand von Zentrum zu Zentrum der Streuer als Gainlänge benutzt wird, sondern die gainfreie Strecke in den Streuern abgezogen wird. Probleme gibt es mit höheren Moden.

1 Introduction

Im RL-PRL hatten wir die an den Streuern einfallenden Amplituden als ebene Wellen approximiert und die Mie-Formeln für das gestreute Fernfeld benutzt. Das gilt nur, wenn der Abstand L zwischen den Streuern groß gegen deren Radius a ist. Hier nutze ich das neue Programm JCMwave, um die Abweichungen von der vollen Lösung der Maxwellgleichungen zu quantifizieren.

2 Numerische Umsetzung

Die Abbildung zeigt die Draufsicht auf das 2D-Simulationsgebiet für $L = 4\mu\text{m}$. Helle Kreise: streuende Luftlöcher mit $a = 0.79\mu\text{m}$. Blaues Rechteck: Streifen mit $n = 2$ und geschätztem Gain (Mie-Approximation). Gelbgrün darum herum: Gebiet mit $n = 2$ ohne Gain. Ganz aussen: Zusatzgebiet zur Realisierung absorbierender Randbedingungen (macht das Programm automatisch).

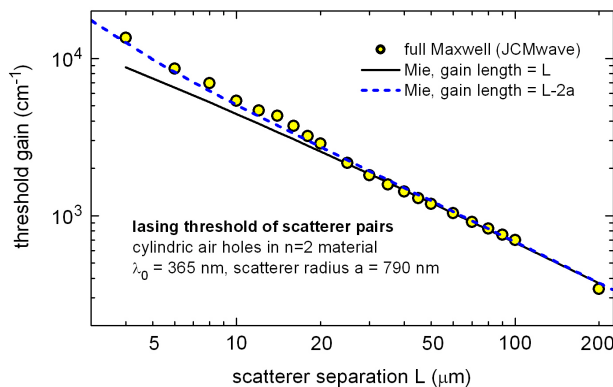


Das Programm liefert komplexe Eigenwerte ω nahe einem Schätzwert, aus denen sich die Wellenlängen der Moden (Realteil) und die Korrekturen des angenommenen Schwellengains (Imaginärteil) bestimmen lassen.

Das eigentliche Simulationsgebiet ist hier $8\mu\text{m}$ breit und $3\mu\text{m}$ hoch. Die halbe Wellenlänge im Halbleiter ist nur $0.19\mu\text{m}$. Die Diskretisierung (schwarze Linien) muss feinmaschiger sein. Selbst bei diesen künstlich kleinen Dimensionen ergeben sich sehr viele finite Elemente und die Rechenzeit für eine Mode liegt im Minutenbereich. Das erhöht sich drastisch bei Vergrößerung des Gebiets. Ich habe deshalb zunächst die Höhe so gelassen und nur den Abstand schrittweise erhöht. Ich bin dabei bis zu $L = 200\mu\text{m}$ gekommen, bei $L = 500\mu\text{m}$ ist photo0 ohne Fehlermeldung ausgestiegen.

Diese Erfahrungen machen klar, dass die Simulation von Gebieten im mm-Bereich mit vielen Streuern kaum möglich und das Mie-Modell seinen Wert behalten wird.

3 Schwelle versus L ($\lambda \approx 365$ nm)



Durchgezogen schwarz: Mie-Approximation $g_{th} = \ln(2\pi\sigma_{back}/L)/L$ mit dem Mie-Rückstruequerschnitt $\sigma_{back} = 790$ nm. Kreise: Ergebnisse von JCMwave. Blau gestrichelt: modifizierte Mie-Approximation

$$g_{th} = \frac{1}{L - 2a} \ln\left(\frac{2\pi\sigma_{back}}{L - 2a}\right), \quad (1)$$

welche berücksichtigt, das die Gainstrecke zwischen den Streuern nur $L - 2a$ lang ist.

Anscheinend ist die Verkürzung der Gainstrecke der Haupteffekt und die Rückstreumplitude bleibt bis hinunter zu $L = 4\mu\text{m} \approx 5a$ auf dem Mie-Wert.

$L = 4 \mu\text{m}$:

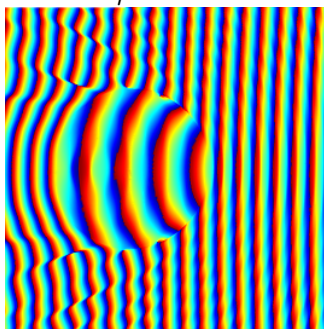


Die nebenstehenden Phasenporträts machen das etwas verständlich. Die Phase (modulo 2π) der vertikalen Komponente des elektrischen Feldes in der Nähe des linken Streuers ist oben für einen extrem kurzen und unten einen sehr großen Streuerabstand in Falschfarben kodiert.

Für $L = 4 \mu\text{m}$ (oben) ist die Krümmung der von rechts einlaufenden Phasenfronten deutlich zu sehen. Ihr Krümmungsradius ist nur 5 mal so groß, wie der Kugelradius.

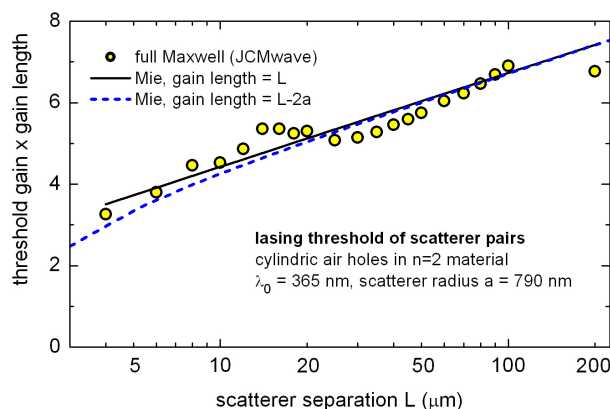
Für $L = 100 \mu\text{m}$ (unten) ist diese Relation 125, die Krümmung der Phasenfronten ist vernachlässigbar und es handelt sich praktisch um Mie-Streuung.

$L = 100 \mu\text{m}$:



Trotzdem ist die Lage der Phasenfronten in den Streuern und dahinter in beiden Fällen praktisch gleich. Das bedeutet, dass die gestreute Amplitude auch nahezu gleich ist (evtl. bis auf den Betrag).

Es gibt natürlich kleine Unterschiede. Erstens sind die Farben etwas verschoben. Das bedeutet, dass die vorn an der Kugel einlaufenden Phasen leicht verschieden sind. Also muss auch der Rückstreu-Phasenshift leicht anders sein. Zweitens sieht man oben deutlich Stehende-Wellen-Interferenzen zwischen einlaufender und gestreuter Welle, unten aber nicht. Das bedeutet, dass oben die Amplituden beider Wellen vergleichbar sein müssen, unten aber nicht. Dieses Amplitudenverhältnis kann grob durch $g_{th}L$ abgeschätzt werden. Das ist in der Tat oben nur 3 und unten 7 (s. nächstes Bild).



Schwellengain mal Gainlänge als Funktion des Streuerabstands. Analog zur Abbildung oben.

Die Schwankung der JCM-Werte ist evtl. ein Effekt numerischer Ungenauigkeit. Sie entsprechen einem relativen Fehler von nur $|\delta\omega/\omega| \leq 10^{-5}$.

4 Modenspektren

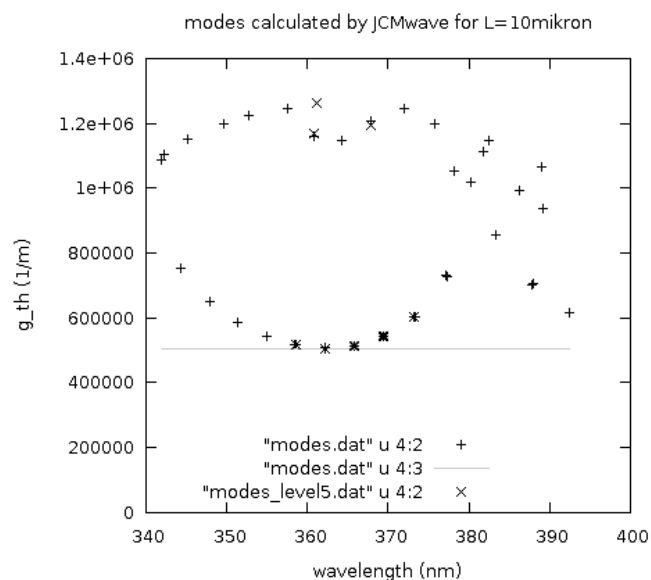
Im vorigen Abschnitt wurde die Schwelle der zu $\lambda = 365$ nm nächsten Mode als Funktion des Paarabstandes L bestimmt. Um das Modenspektrum zu berechnen, wird L fixiert und bei der Modensuche der Startwert der komplexen Frequenz variiert. Die Schwelle der gefundenen Moden wird über ihrer Wellenlänge aufgetragen.

Ermittelte Moden für $L = 10 \mu\text{m}$.

x: mit 5 Verfeinerungsschritten ermittelt (lange Rechenzeit).

+: nur noch 4 Verfeinerungsschritte (offensichtlich noch genau genug).

Horizontale Linie: modifizierte Mie-Schwelle (1) für Wellenlänge 365 nm.



Es wurden offensichtlich Grundmoden (kleine Schwelle) gefunden, wie auch "höhere" Moden (ähnliche Wellenlänge aber größere Schwelle). Die Grundmoden haben bei $\lambda \approx 365$ nm ihr Minimum. Kein Wunder – der Streueradius wurde so gewählt, dass der Mie-Rückstreuquerschnitt σ_{back} bei dieser Wellenlänge maximal ist. Bei abweichenden Wellenlängen nimmt deshalb die Schwelle zu – bis eine neue Mie-Periode beginnt (rechts noch zu sehen). Wenigstens nahe des Minimums sind die Grundmoden quasi äquidistant mit etwa 3.6 nm Abstand, was zwischen den Fabry-Perot-Werten $\lambda^2/(2nL) = 3.3$ nm und $\lambda^2/(2n(L - 2a)) = 3.9$ nm liegt.

Die Schwelle der höheren Moden ist bei 365 nm maximal. An den Umschaltpunkten der Mie-Perioden scheinen sie zu Grundmoden zu werden und umgekehrt (rechts zu sehen). Wahrscheinlich entsprechen Sie einer entsprechend anderen Resonanz in den Streuern. Das wird später zu untersuchen sein.

Ermittelte Moden für $L = 30 \mu\text{m}$.

Analog zum kürzeren Fall. Modenabstand nur ein Drittel. Einige Moden fehlen wahrscheinlich. Das Verhalten der höheren Moden noch unklar.

