



Doctoral Thesis

## Analysis and design of metamaterials

**Author(s):**

Matthew, Mishrikey

**Publication Date:**

2010

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006042086> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 18889

# Analysis and Design of Metamaterials

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**Matthew Mishrikey**

S.B., M.Eng., **Massachusetts Institute of Technology**, Cambridge MA, USA

born November 2, 1980

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Christian Hafner, examiner  
Prof. Dr. Daniel Erni, co-examiner

2010

# Abstract

Metamaterials can be engineered to provide new and useful electromagnetic devices. These range from extremely practical antireflective coatings to state of the art superlenses and cloaks. Their special properties often arise from resonances or crystal effects like electromagnetic bandgaps. It is exactly because of these behaviors that metamaterials are not simple to analyze or design. The utility of metamaterials for scientific and industrial applications warrants a description of the tools and numerical techniques available to deconstruct their functionality and synthesize or optimize new designs.

Two powerful tools are suitable for these purposes. Band diagrams can be used for infinitely periodic structures, and scattering spectra for semiperiodic ones. We demonstrate the generation of reliable finite-difference time-domain generated (FDTD) band diagrams using a systematic brute-force algorithm that generates node maps and performance statistics for photonic crystals and their band diagram simulations, respectively. From these we are able to draw conclusions about the placement of sensors and detectors for the optimal detection of harmonic modes.

We also need scattering spectra to study the reflection and transmission of metamaterial scatterers. FDTD is useful for generating these spectra for one, two, and three dimensional scatterers. As we demonstrate, this also works well for obliquely incident polarized fields, resulting in broadband, broad angle scattering surface plots.

Even with these tools, it is still necessary to reduce very large problems using effective media approximations. We provide a numerical procedure for evaluating and visualizing the accuracy of mixing formulas for these computations. For photonic crystal systems, we show how to increase the approximation accuracy for intermediate wavelengths on the order of a lattice constant.

We finally apply these tools to several practical design examples. We optimize a nanorod thin-film coating for low reflection optics, multiplying the previously published attainable bandwidth by a factor of three. The internal roughness morphology of a thin-film silicon solar cell is also investigated. Using simulations, we are able to draw conclusions about the fabrication process matching industrial expert-knowledge on the relationship between zinc oxide deposition and cell absorption. Another high-performance antireflective coating is analyzed for a three dimensional infrared application, where we compare the performance of FDTD to other methods. We also design an electromagnetic bandgap radiation seal for microwave ovens in a demonstration of all of the techniques necessary for the numerical analysis and design of metamaterials. This seal performs on-par with conventional quarter-wave choke seals while providing several manufacturing advantages.

# Zusammenfassung

Metamaterialien ermöglichen die Entwicklung einer neuen Klassen von Strukturen. Diese haben vielfältige Anwendungen, von in der Praxis eingesetzten Entspiegelungsbeschichtungen bis zu hochmodernen Superlinsen und Tarnkappen. Ihre Spezialeigenschaften stammen häufig aus Resonanzen oder Kristalleffekten wie elektromagnetischen Bandlücken. Wegen solcher Effekte ist es kompliziert, Metamaterialien zu analysieren, beziehungsweise zu entwerfen. Die Evaluierung und Weiterentwicklung der zur Verfügung stehenden Analysewerkzeuge sowie der numerischen Methoden, welche in der Lage sind, neue Metamaterialien zu synthetisieren und optimieren, sind von grosser Bedeutung und ermöglichen es, das Anwendungspotential auszuschöpfen.

Für diese Zwecke gibt es zwei gut geeignete Werkzeuge: Banddiagramme für unendlich periodische Strukturen und Streuspektren für halbperiodische Strukturen. Wir demonstrieren die finite-difference time-domain (FDTD) Berechnung von Banddiagrammen mittels einem brute-force Algorithmus der sogenannte Node-maps und Qualitätsstatistiken für photonische Kristalle beziehungsweise ihre Banddiagramme berechnen kann. Daraus ziehen wir Rückschlüsse zur Platzierung von FDTD Sensoren und Detektoren, um die automatische Erkennung harmonischer Modi zu optimieren.

Die Reflektion und die Transmission stellen wir mit Streuspektren dar. FDTD kann diese für ein-, zwei-, und drei-dimensionale Anordnungen berechnen. Es wird beschrieben, wie dies auch für schräg einfallende Wellen gemacht werden kann. Dies führt auf sogenannte breitbandige, breitwinkelige Flächendiagramme.

Bei größeren Problemen reichen diese Werkzeuge manchmal nicht. In solche Fällen benutzen wir effektive Medien, um die Problemgröße zu verkleinern. Wir geben ein Prozedur an, um die Genauigkeit dieser Approximationen zu evaluieren und zu visualisieren. Für photonische Kristallsysteme zeigen wir wie die Genauigkeit mit Hilfe angepasster Grenzbedingungen gesteigert werden kann.

Verschiedene Designbeispiele werden vorgestellt und die Anwendung der erwähnten Werkzeuge demonstriert. Wir optimieren eine nanorod Dünnschichtbeschichtung für die optische Entspiegelung, und verdreifachen dabei die bisher erreichbare Bandbreite. Die Morphologie der Mikrorauigkeit von Dünnschichten einer Siliziumsolarzelle wird eingehend untersucht. Mit Hilfe zahlreicher Simulationen untersuchen wir die Rolle Zinkoxidschichten auf die Absorption einer Solarzelle. Unsere Resultate decken sich mit den Erfahrungen von Experten in der Industrie. Außerdem wird eine drei-dimensionale Antispiegelungsbeschichtung mit infrarot Anwendung untersucht. Dabei vergleichen wir FDTD mit anderen Methoden. Als Anwendung aller vorgenannter Verfahren entwerfen wir eine Strahlungsdichtung für Mikrowellenöfen welche auf einem Metamaterial mit elektromagnetischer Bandlücke basiert. Diese ist herkömmlichen Viertelwellenchokes ebenbürtig und bietet verschiedene Herstellungsvorteile.