



Doctoral Thesis

On the optimal design of photonic structures

Author(s):

Komarevskiy, Nikolay

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010039137> →

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. 21380

ON THE OPTIMAL DESIGN OF PHOTONIC STRUCTURES

A dissertation submitted to the

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

NIKOLAY KOMAREVSKIY

Diplom Physicist

Lomonosov Moscow State University, Russia

born February 10, 1986

citizen of Russia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ch. Hafner, examiner

Dr. V. Shklover, co-examiner

Prof. Dr. J. Leuthold, co-examiner

2013

Abstract

Fabrication technologies have greatly improved in recent decades. The manufacture of photonic crystals and metamaterials with characteristic features on the nanometer scale is now achievable. Photonic structures often demonstrate such a complex behavior that even accurate electromagnetic solvers and good physical intuition are insufficient for an appropriate design process. Further assistance is required. At this point, fast numerical optimizers combined with efficient and robust electromagnetic solvers can be extremely useful. Not only can optimizers assist in the design of novel structures, but they can also find interesting counter-intuitive solutions and even new effects. Thus, the success in designing photonic structures is usually based on the combination of three factors: physical insight, accurate and reliable numerical solvers, and powerful numerical optimizers.

The focus of this dissertation is on the design of reflectors for space re-entry applications. Heat shields, which are currently used for space vehicles are designed primarily against conductive heat propagation and offer minor protection against radiation absorption. However, incident electromagnetic radiation flux can be substantial or even superior to the convective flux (depending on the velocity of a vehicle and properties of the atmosphere). Various photonic structures for reflecting strong electromagnetic radiation are proposed, intensively studied and optimized, namely layered structures, inverse opals, woodpiles, woven structures, guided-mode resonance structures.

Different electromagnetic solvers are used in this dissertation, including: finite-element method, Fourier modal method, C method and ray tracing technique. Most of these methods were linked with optimizers to achieve structures with high performance.

The design concepts considered are rather general and include the design based 1) on the photonic band gap, 2) on the resonant reflection effect, and 3) on the incoherent scattering in the medium. Surprisingly, the concepts of designing reflecting coatings are very scantily covered in the literature, as opposed to, e.g., anti-reflection coatings. This disserta-

tion fills the gap.

Fabrication inaccuracies and temperature dependence of the involved materials may be substantial for re-entry and other high-temperature applications. Thus, for the proposed structures, the impact of geometrical inaccuracies and material deviations on the reflection is analyzed. The results of this sensitivity analysis are rather surprising. Some of the structures appeared to be extremely sensitive with respect to very small variations of material losses. This effect is thoroughly studied in this dissertation. Certain extraordinary structures are discovered with the aid of the optimizer. These structures exhibit a transition from ideal reflectors to nearly ideal absorbers by a marginal change in material properties. Highly sensitive sensors and switches can be interesting and prospective applications of this effect.

Since photonic structures may be much larger than a wavelength, a part of the dissertation is devoted to studies of large optical systems, where rigorous solutions of Maxwell's equations are not feasible. As an example, the optical spectra of the fiber-based materials, which are currently used in space vehicles, are calculated with the Monte Carlo ray tracing method. To the best of our knowledge, simulations of such fiber-based materials have, so far, not been reported in literature.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten wurden wesentliche Fortschritte bei den Herstellungsverfahren der Nanotechnologie gemacht. Insbesondere können photonische Kristallen und Metamaterialien mit charakteristischen Abmessungen im Nanometerbereich fabriziert werden. Derartige photonischen Strukturen sind oft so komplex, dass sogar genaue elektromagnetische Simulationsverfahren und gute physikalische Intuition nicht ausreichen, um ein bestimmtes Designziel zu erreichen. Zusätzliche Verfahren sind deshalb erforderlich. Numerischen Optimierer kombiniert mit elektromagnetischen Simulationsverfahren können extrem nützlich sein. Die Optimierung kann nicht nur die Suche nach neuartigen Strukturen unterstützen, sondern auch interessante, nicht so offensichtliche Lösungen und neue Effekte offenbaren. Die Kombination von drei Faktoren bestimmt den Erfolg im Design von photonischen Strukturen: ein gutes Verständnis der intrinsischen physikalischen Vorgänge, genaue und schnelle numerische Simulationsverfahren und effiziente numerische Optimierer.

Ein Schwerpunkt dieser Dissertation liegt auf dem Design von Reflektoren zum Schutz gegen Hitze für Raumfahrzeuge beim Wiedereintritt in die Atmosphäre aus dem Weltraum. Hitzeschilder schützen zumeist gegen Wärmekonvektion, bieten aber nur einen geringen Schutz vor elektromagnetischer Absorption. Allerdings kann der Beitrag der elektromagnetischen Strahlung vergleichbar oder sogar grösser als der Konvektionsfluss sein (abhängig von der Geschwindigkeit des Raumfahrzeuges und den Eigenschaften der Atmosphäre). Verschiedene photonischen Strukturen, welche die Absorption reduzieren, werden untersucht und optimiert, insbesondere Schichtstrukturen, inverse Opale, Woodpiles, gewobene Strukturen und guided-mode Resonanzstrukturen.

Verschiedene elektromagnetischen Simulationsverfahren wurden in dieser Dissertation verwendet, unter anderem: Finite-Elemente-Methode, Fourier Modal Methode, C Methode und das Ray-Tracing Verfahren. Die meisten dieser Verfahren wurden in effiziente Optimierer eingebundenen um optimale Strukturen zu entwickeln.

Basierend auf den Theorien 1) des photonischen band gaps 2) der reso-

nanten Reflexionen, und 3) der inkohärenten Streuung im Material werden verschiedene Konzepte zum Design photonischer Strukturen analysiert. Erstaunlicherweise sind die Design-Konzepte von reflektierenden Beschichtungen in der Literatur sehr spärlich abgedeckt, im Vergleich z. B. zu Anti-Reflexion-Beschichtungen. Diese Dissertation füllt diese Lücke.

Toleranzen im Fertigungsprozess und die Temperaturabhängigkeit der beteiligten Materialien beeinflussen die Strahlungsabsorption erheblich. Daher wird die Sensitivität des Reflektionskoeffizienten bezüglich der Variation der Geometrie und der dielektrischen Materialeigenschaften für die untersuchten Strukturen analysiert. Die gefundenen Ergebnisse entsprachen nicht den Erwartungen. Einige der Strukturen erwiesen sich als enorm empfindlich bzgl. sehr kleiner Variationen der Materialverluste. Dieser Effekt wurde ausführlich in dieser Dissertation untersucht. Ferner wurden bestimmte aussergewöhnliche Strukturen mit Hilfe des Optimierers entdeckt. Diese Strukturen verändern ihre Eigenschaft von einem idealen Reflektoren zu einem idealen Absorber schon bei marginaler Veränderung der Materialeigenschaften. An Hand dieses Effektes lassen sich hochsensible Sensoren und Schalter für interessante Anwendungen entwickeln.

Da photonischen Strukturen in Grössenordnungen von mehreren Wellenlängen angelegt sein können, ist ein Teil der Dissertation Studien von grossen optischen Systemen gewidmet, deren Berechnung durch Simulationsverfahren basierend auf den Maxwell'schen Gleichungen kaum durchführbar ist. Daher wurde zur Analyse von optischen Spektren der Fasermaterialien ein Monte Carlo basiertes Ray Tracing Verfahren entwickelt. Fasermaterialien werden zur Zeit in Raumfahrzeugen verwendet. Unseres Wissens wurden derartiger Simulationenverfahren von Fasermaterialien in der Literatur noch nicht beschrieben.