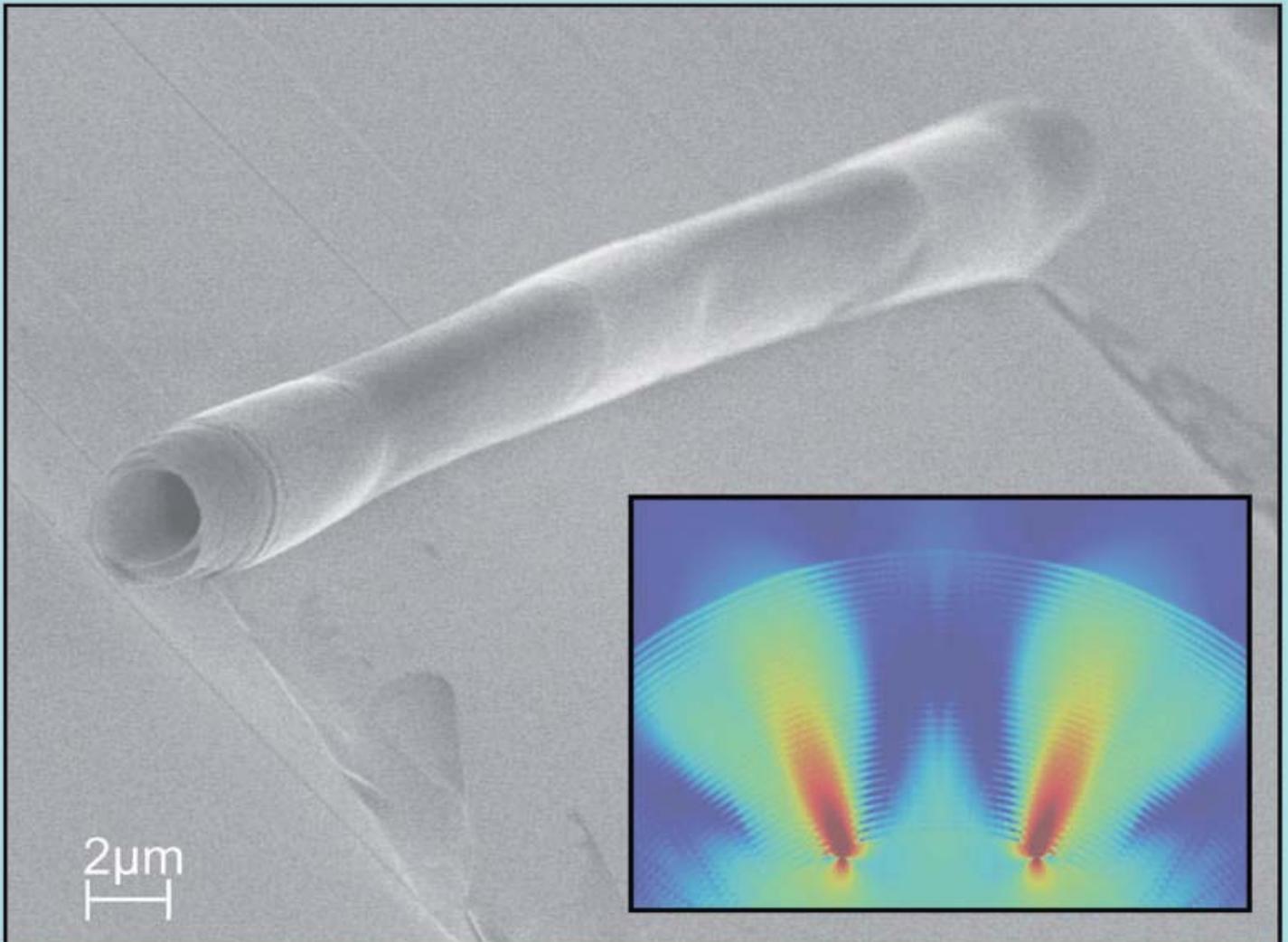


METAMATERIALS BASED ON METAL/SEMICONDUCTOR MICROROLLS



METAMATERIALS BASED ON METAL/SEMICONDUCTOR MICROROLLS

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
des Department Physik
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Markus Bröll
aus Unterhaching

Hamburg
2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2010
Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2010
978-3-86955-466-2

Gutachter der Dissertation	Prof. Dr. Detlef Heitmann Prof. Dr. Ulrich Merkt
Gutachter der Disputation	Prof. Dr. Detlef Heitmann Prof. Dr. Wolfgang Hansen
Datum der Disputation	19.02.2010
Vorsitzender des Prüfungsausschusses	Prof. Dr. Daniela Pfannkuche
Vorsitzender des Promotionsausschusses	Prof. Dr. Jochen Bartels
Dekan der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften	Prof. Dr. Heinrich Graener

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

978-3-86955-466-2

ABSTRACT

In this work novel three-dimensional metamaterials are realized by rolling-up strained metal/semiconducting nanolayers. The properties of these artificial, optical crystals can be described by effective parameters, which are investigated by numerical simulations as well as experimental transmission and reflection measurements.

Three-dimensional radial metamaterials were fabricated by rolling up a strained Ag/GaAs/InGaAs multilayer into a microroll with several rotations. The radial metamaterial, which is defined by the windings of the wall of the microroll, exhibits a dispersive and strongly anisotropic permittivity. It is shown by numerical simulations that such structures work as hyperlenses for specific wavelengths in the visible and near-infrared regime, i.e. they allow magnified, optical images with subwavelength resolution. To characterize the optical properties of the rolled-up hyperlenses a fiber-based transmission and reflection setup has been developed. From the measured reflectivity and transmission spectra the operation wavelength of the hyperlens could be determined. We could show experimentally that this wavelength depends on the ratio of layer thicknesses of the Ag/(In)GaAs layers and could be tuned in a wavelength range from 680 nm to 780 nm. Furthermore first near-field scanning microscopy measurements were performed in cooperation with the University of Bourgogne to prove the magnifying subwavelength imaging of the hyperlens.

A further concept of this work is concerned with metamaterials made of arrays of many rolled-up Chromium/InGaAs microrolls. We have shown by analytical and numerical simulations that these structures interact resonantly with the magnetic component of an electromagnetic field and exhibit a negative permeability in the far infrared at frequencies of a few terahertz. By optimizing the roll-up process arrays with a high density of microrolls were prepared and first transmission measurements were performed in the far infrared.

INHALTSANGABE

In dieser Arbeit werden durch Aufrollen verspannter Metall/Halbleiter Schichten neuartige, dreidimensionale Metamaterialien realisiert. Die Eigenschaften dieser künstlichen optischen Kristalle können durch effektive Parameter beschrieben werden. Diese werden durch numerische Simulationen, sowie Transmissions- und Reflexionsmessungen experimentell untersucht.

Radiale Metamaterialien wurden durch mehrfaches Aufrollen einer verspannten Ag/GaAs/InGaAs Multilage zu einem Mikroröllchen hergestellt. Das radiale Metamaterial wird dabei durch die Windungen der Röllchenwand definiert und besitzt eine dispersive und stark anisotrope Permittivität. Durch numerische Simulationen wurde gezeigt, dass diese Strukturen für bestimmte Wellenlängen im sichtbaren- und nahinfraroten Bereich als Hyperlinsen wirken, d.h. vergrößerte, optische Abbildungen mit Subwellenlängeauflösung ermöglichen. Zur optischen Charakterisierung der Hyperlinsen wurde ein faserbasierter Transmissions- und Reflexionsmeßaufbau entwickelt. Aus den gemessenen Transmissions- und Reflexionsdaten konnte die Arbeitswellenlänge der aufgerollten Hyperlinsen bestimmt werden. Wir konnten experimentell zeigen, dass die Wellenlänge vom Schichtdickenverhältnis der Ag/(In)GaAs Schichten abhängt und konnten sie in einem Wellenlängenbereich von 680-780 nm variieren. Zum experimentellen Nachweis der vergrößernden Subwellenlängenabbildung durch die Röllchenwand wurden außerdem erste Nahfeldmikroskopmessungen an der Universität von Burgund durchgeführt.

Ein weiteres Konzept dieser Arbeit beschäftigt sich mit Metamaterialien, welche nicht durch die Wände einzelner Mikrorollen definiert sind, sondern aus einem Gitter vieler aufgerollter Chrom/InGaAs Mikroröllchen bestehen. Wir haben durch analytische sowie numerische Simulationen gezeigt, dass diese periodischen Strukturen resonant mit der magnetischen Komponente des elektro-magnetischen Feldes wechselwirken und somit eine negative Permeabilität im Ferninfraroten bei Frequenzen von wenigen THz aufweisen. Durch eine Optimierung des Aufrollprozesses wurden Arrays mit einer hohen Röllchendichte hergestellt und erste Transmissionsmessungen im Ferninfraroten durchgeführt.

CONTENTS

ABSTRACT	i
INHALTSANGABE	ii
LIST OF FIGURES	v
LIST OF TABLES	vii
CHAPTERS	
1. INTRODUCTION	1
2. PRINCIPLES OF ROLLED-UP NANOTECH	3
3. METAMATERIALS MADE OF ROLLED-UP METAL/SEMICONDUCTOR SUPERLATTICES	6
3.1 Electromagnetic fields inside superlattices and effective media	6
3.1.1 Imaging through superlattices with subwavelength resolution	10
3.1.1.1 Influence of finite layer thicknesses on the resolution of a hyperlens	16
3.1.1.2 Influence of absorption on the resolution of a hyperlens	17
3.1.2 The image of a double slit transmitted through a superlattice consisting of GaAs and silver layers	18
3.1.3 Cylindrical hyperlenses	20
3.2 Preparation of cylindrical hyperlenses by rolled-up microrolls	21
3.3 Transmission and reflection measurements on rolled-up microrolls	25
3.3.1 Preparation of nanosized light sources	25
3.3.2 Microscope setup for transmission and reflection analysis on rolled-up superlattices	28
3.3.2.1 Transmission measurements	29
3.3.2.2 Reflectivity measurements	30
3.3.3 Shifted plasma frequencies of metal/semiconductor superlattices	31
3.3.4 Retrieval of optical parameters	37
3.4 Near-field scanning microscopy measurements in cooperation with the University of Bourgogne	41
4. METAMATERIALS MADE OF INAS/METAL MICROROLL ARRAYS	46
4.1 Negative permeabilities for microroll arrays	46
4.2 Preparation of microroll arrays	49

5. SUMMARY AND OUTLOOK	56
5.1 Summary	56
5.2 Outlook	58
 APPENDICES	
A. TRANSFER MATRIX FOR METAL/DIELECTRIC SUPERLATTICES AND EFFECTIVE MEDIA	60
A.1 Transfer matrix for metal/dielectric superlattices	60
A.2 Dispersion in the effective medium approximation	63
B. SAMPLE AND ETCHING PARAMETERS	65
B.1 Sample parameters	65
B.2 Etching parameters	65
REFERENCES	67
PUBLICATIONS AND CONFERENCE CONTRIBUTIONS	71

LIST OF FIGURES

2.1	Principle of rolling up metal/semiconductor nanolayers	4
2.2	Phase diagram for epitaxial growth of $In_xGa_{1-x}As$	5
3.1	Sketch of the unit cell of a superlattice	8
3.2	Permittivities of silver and GaAs	10
3.3	Wavevector dispersion of an effective medium in different frequency ranges .	14
3.4	Wavevector dispersion and group velocities of a superlattice for different frequency regimes	15
3.5	Transmission of a Gaussian beam through a slab with isotropic and highly anisotropic permittivity	16
3.6	Wavevector dispersion for finite layer widths	17
3.7	Influence of absorption on the transmission through a hyperlens	18
3.8	Subwavelength imaging of a double slit through a hyperlens	20
3.9	Finite difference time domain simulation of a magnifying hyperlens	21
3.10	Sketch of a rolled-up metal/semiconductor superlattice	22
3.11	Preparation of metal/semiconductor microrolls with multiple rotations	24
3.12	Scanning electron micrograph of metal/semiconductor microrolls	25
3.13	Sketch of a home-built fiber puller	27
3.14	Scanning electron micrograph of a tapered fiber and the FIB drilled structure inside the fiber metallization	28
3.15	Fiber based microscopy setup	29
3.16	Sketch and micrograph of the nanosized light source used for transmission measurement	30
3.17	Micrograph of the transmitted signal	31
3.18	Exemplary reflection and transmission spectra	33
3.19	Calculated transmission and reflection spectra for superlattices and their corresponding effective permittivities	34
3.20	Transmission measurements on rolled-up microrolls with different ratio of layer thicknesses	35
3.21	Reflection measurements on rolled-up microrolls with different ratio of layer thicknesses	36