

LED schließt die gelbe Lücke

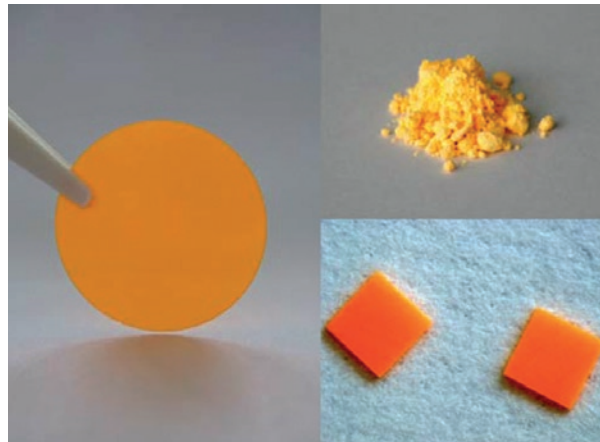
Vollständige Umwandlung von blauem in gelbes Licht durch neuartigen Nitridphosphor

Einfarbige Leuchtdioden decken einen großen Teil des sichtbaren Lichtspektrums mit hoher Effizienz ab. Für blaues Licht erreichen Nitridioden externe Quanteneffizienzen von über 65 %, d.h. für etwa 2/3 der in die Diode injizierten Elektron-Loch-Paare wird jeweils ein Photon abgestrahlt. Beim roten Licht erzielen Phosphidioden Effizienzen von ca. 50%. Doch für die „gelbe Lücke“ um 560 nm standen bisher keine hocheffizienten einfarbigen LEDs zur Verfügung. Jetzt haben Forscher von Philips Lumileds eine monochromatische Nitridiode entwickelt, die diese Lücke schließt.

Die von Regina Mueller-Mach und ihren Kollegen vorgestellte gelbe LED nutzt die Abwärtskonversion von blauem Licht, das von einer InGaN-LED geliefert wird, zu langwelligerem Licht mit Hilfe eines Phosphors. Dies ist ein gängiges Verfahren, mit dem man z.B. aus blauem LED-Licht kaltes oder warmes Weißlicht für unterschiedliche Anwendungen erzeugt.

Schon vor vier Jahren hatten die Lumiled-Forscher LEDs für warmes Weißlicht hergestellt, bei denen die Abwärtskonversion mit einem europiumdotierten, barium- und strontiumhaltigen Nitridphosphor erfolgte. Dabei hatten sie bemerkt, dass sich je nach Ba-Sr-Mengenverhältnis und Eu-Dotierung auch farbiges Licht unterschiedlicher Wellenlänge erzeugen ließ. Auf den exakten Wert der Wellenlänge des blauen Pumpstrahls kam es dabei nicht an.

Jetzt ist es den Forschern mit dieser neuen Phosphorsorte gelungen, durch Abwärtskonversion blaues LED-Licht in monochromatisches gelbes Licht von 595 nm Wellenlänge



Lumiramic™-Wafer (links) und -Platten, hergestellt durch Sinterung von feinkörnigem $M_2Si_3N_8:Eu^{2+}$ -Pulver (oben rechts, M = Erdalkalielelement). Die daraus erzeugte transparente Keramik des LED-Konzepts lässt sich leicht mit der Architektur InGaN-basierter Pump-LEDs kombinieren.
(Quelle: Philips Lumileds)

umzuwandeln, das eine Farbreinheit von 98,7% hat. Die externe Quanteneffizienz der gelben LED liegt je nach Temperatur zwischen 30% und 40%. Verglichen mit direkt emittierenden gelben LEDs ist die neue, indirekt gelb strahlende LED etwa doppelt bis fünfmal so hell. Sie erreicht dabei eine Helligkeit von 70 Lumen für eine Stromstärke von 350 mA.

Die neue Phosphorsorte lässt sich als polykristallines keramisches Material produzieren. Diese lumineszente Keramik absorbiert das anregende blaue Licht sehr effizient. Ein weiterer Vorteil ist, dass die optischen Eigenschaften des Phosphors nur relativ wenig von der Temperatur abhängen. Die Farbstabilität der LED in Abhängigkeit von der Stromstärke und der Temperatur ist nach den Messergebnissen der Forscher hervorragend.

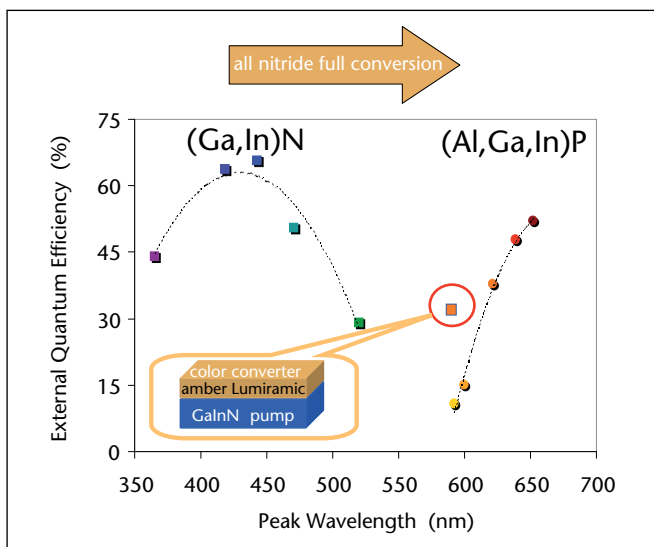
Für die neue gelbe LED gibt es zahlreiche Anwendungen. So kann sie in gelben Ampellichtern oder Verkehrssignalen ebenso eingesetzt werden wie in Blinklichtern von

Autos oder in Warnlichtern an Baustellen. Auch in der Unterhaltungselektronik könnte sie vielfältig zum Einsatz kommen. Zudem ist sie durch ihre hohe Effizienz preiswert. Auch in der Praxis könnte die gelbe Lücke schon bald der Vergangenheit angehören.

Rainer Scharf

Weitere Infos:

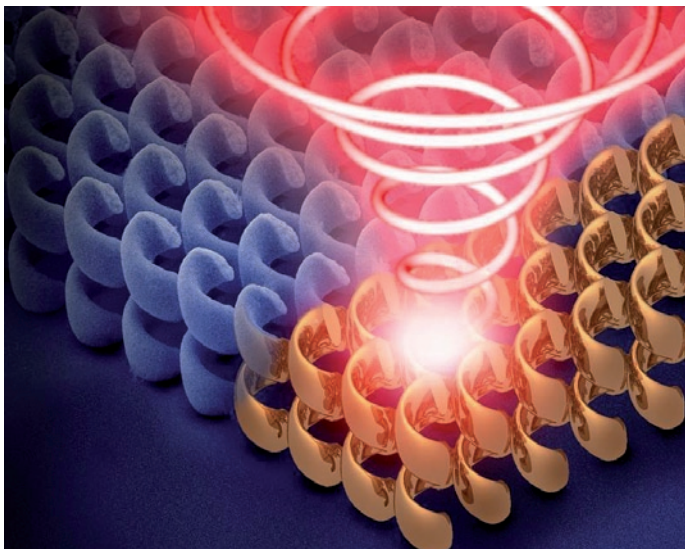
- Originalveröffentlichung: Regina Mueller-Mach *et al.*: All-nitride monochromatic amber-emitting phosphor-converted light-emitting diodes. *Phys. Status Solidi RRL* 3, 215 (2009) <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.200903188>
- Kommentar: Wolfgang Schnick: Shine a light with nitrides. *Phys. Status Solidi RRL* (2009) <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.200903264>
- Philips Lumileds: www.philipslumileds.com
- Regina Mueller-Mach *et al.*: Highly efficient all-nitride phosphor-converted white light emitting diode. *Phys. Status Solidi A* 202, 1727 (2005) <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.200520045>



Externe Quanteneffizienz aufgetragen über der Peak Wellenlänge um 560 nm: das neue LED-Konzept (s. Punkt „pc“ im Diagramm) schließt die Effizienzlücke „yellow gap“, wo weder InGaN noch AlGaInP effizient sind. Dabei ist Nitridphosphor als dichte Keramik auf einer hocheffizienten blau emittierenden InGaN Diode aufgebracht.
(Quelle: Regina Müller-Mach/Philips Lumileds/pss)

Metamaterialien mit Dreh oder Gedächtnis

Zwei neue nanostrukturierte Materialien zeigen bemerkenswerte optische Eigenschaften



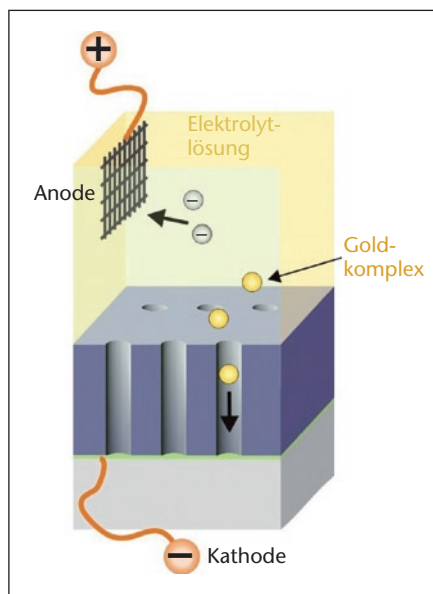
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Metamaterials mit mikroskopisch kleinen Wendeln aus Gold, kombiniert mit einer Computergrafik. Die rot-weiße Spirale symbolisiert das zirkular polarisierte Licht. (Quelle: CFN)

Metamaterialien sind künstliche Kristalle aus Bausteinen mit maßgeschneiderten elektrischen und magnetischen Eigenschaften. Ein hinreichend langwelliges elektromagnetisches Feld kann die Mikrostruktur eines solchen künstlichen Kristalls nicht auflösen. Deshalb nimmt es ihn als homogene Substanz wahr, deren physikalische Eigenschaften mit natürlichen Materialien nur schwer oder gar nicht verwirklicht werden können. Ein Beispiel dafür sind Metamaterialien mit negativem Brechungsindex, die das Licht in die falsche Richtung brechen. Zwei jetzt vorgestellte Metamaterialien haben eine ungewöhnliche Wirkung auf zirkular polarisiertes Licht bzw. ein Gedächtnis für unterschiedliche optische Eigenschaften.

Justyna Gansel und ihre Kollegen von der Universität Karlsruhe haben ein Metamaterial mit einer linkshändigen Mikrostruktur entwickelt, das eine sehr stark polarisierende Wirkung auf Licht hat. Während es linkszirkular polarisierte Infrarotstrahlung in einem weiten Wellenlängenbereich fast vollständig reflektiert, lässt es die rechtszirkular polarisierte Strahlung durch. Das Material enthält eine zweidimensionale regelmäßige Anordnung von mikroskopisch kleinen Wendeln aus Gold, die einer linkshändigen Schraubenlinie folgten und dabei zwei vollständige Drehungen machten. Diese auch ästhetisch sehr ansprechenden Korkezieherstrukturen haben die Forscher mit Laserstrahlen in einen Fotolack geschrieben, herausgeätzt und anschließend elektrochemisch mit Gold gefüllt.

Im Bereich von 5 bis 8 μm ließ das Metamaterial weniger als 10% des linkszirkularen

und mehr als 85% des rechtszirkularen Lichtes durch. Das linkszirkulare Licht regte entlang der Goldwendeln resonante elektrische Ströme an. Diese Resonanzen führten zusammen mit Bragg-Reflexionen an der periodischen Ladungsverteilung in den Goldwendeln dazu, dass nur ein geringer Teil des linkszirkularen Lichts das Metamaterial passieren konnte, während der größte Teil des Lichts über einen großen



Prinzip der galvanischen Goldabscheidung: Im Elektrolyt gelöste Gold-Komplexe diffundieren in die Hohlräume der Struktur, wo sie an der Kathode zersetzt werden. Die dabei entstehenden Goldionen werden abgeschieden und füllen schließlich die Hohlräume vollständig aus. (Quelle: CFN)

Wellenlängenbereich absorbiert oder reflektiert wurde. Die Korkezieherschicht wirkte also stark polarisierend obwohl sie nur 4 μm dick war. Eine zirkular polarisierende Wirkung über einen noch größeren Wellenlängenbereich versprechen sich die Forscher von einem Metamaterial mit konischen Goldwendeln, bei denen der Wendeldurchmesser stetig entlang der Achse zunimmt.

Ein Metamaterial mit Gedächtnis, dessen optische Eigenschaften mit kurzen Strompulsen umgeschaltet werden können, haben Tom Driscoll von der UC San Diego und seine Kollegen entwickelt. Dazu haben sie auf eine 90 nm dicke Schicht aus Vanadiumdioxid eine quadratische Anordnung von Resonatoren aus 20 μm großen geschlitzten Goldringen aufgebracht. Solche geschlitzten Ringe kommen in vielen Metamaterialien zum Einsatz, da ihre elektrische Permittivität ϵ und ihre magnetische Permeabilität μ etwa bei derselben Anregungsfrequenz resonant werden können, sodass unter Umständen der Brechungsindex negativ wird.

Die Resonanzfrequenz der geschlitzten Ringe ließ sich durch die dielektrischen Eigenschaften der VO_2 -Schicht beeinflussen. Vanadiumdioxid zeigt einen Isolator-Metall-Übergang, der thermisch, elektrisch oder optisch ausgelöst werden kann. Erhöhten die Forscher die Temperatur ihrer VO_2 -Schicht über 340 K, so wurde das zuvor isolierende Oxid metallisch. Zugleich nahm seine elektrische Permittivität stark zu, sodass die Kapazität der aufliegenden geschlitzten Goldringe anstieg und somit ihre Resonanzfrequenz abnahm.

Der Isolator-Metall-Übergang zeigte eine starke Hysterese, sodass die VO₂-Schicht erst bei Abkühlung unter 330 K wieder in ihren Ausgangszustand zurückkehrte. Die Resonanzfrequenz der Goldresonatoren übernahm die Hysterese der VO₂-Schicht und bekam damit ein Gedächtnis: Wurde die VO₂-Schicht durch einen schwachen Strompuls erwärmt, so nahm die Resonanzfrequenz ab und behielt ihren neuen Wert auch nach erneuter Abkühlung der Schicht für mehr als 10 Minuten. Auf diese Weise konnten die Forscher durch wiederholte Anwendung von Strompulsen die Resonanzfrequenz des Metamaterials schrittweise um insgesamt 20% senken. Sie sind zuversichtlich, ein Metamaterial entwickeln zu können, das sich auch bei Zimmertemperatur und über einen größeren Frequenzbereich schalten lässt. Die Eigenschaften eines solchen Materials ließen sich schnell und flexibel an die jeweiligen Erfordernisse anpassen.

Ob mit Gedächtnis oder mit Dreh – die Möglichkeiten der Metamaterialien gehen weit über das hinaus, was „natürliche“ Stoffe zu bieten haben.

Rainer Scharf

Weitere Infos:

- Originalveröffentlichung:
Justyna K. Gansel *et al.*: Gold Helix Photonic Metamaterial as Broadband Circular Polarizer. *Science* (online 20.8.2009)
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1177031>
- Originalveröffentlichung:
T. Driscoll *et al.*: Memory Metamaterials. *Science* (online 20.8.2009)
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1176580>
- Gruppe von Martin Wegener an der Uni Karlsruhe: www.aph.uni-karlsruhe.de/wegener/de/home
- Gruppe von Dimitri N. Basov an der UC San Diego: <http://infrared.ucsd.edu/pi.html>
- Bilder mit freundlicher Genehmigung des Karlsruhe Institute of Technology www.kit.edu
www.cfn.uni-karlsruhe.de

Nanolinsen überwinden Beugungsgrenze

Organische Moleküle formen selbstorganisiert winzige Linsen, mit denen sich das Auflösungsvermögen optischer Mikroskope steigern lässt

Pohang (Korea) – Strukturen, die kleiner sind als die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts, können mit optischen Mikroskopen nicht mehr aufgelöst werden. Dieses Limit kann bisher nur mit ausgeklügelten Methoden wie der STED-Mikroskopie, die eine stimulierte Lichtemission ausnutzt, oder mit einem Rasternahfeldmikroskop (SNOM) überwunden werden. Doch nun entwickelten koreanische Physiker eine winzige Nanolinse aus organischem Material, mit denen der Blick selbst von klassischen Lichtmikroskopen im optischen Nahfeld über die Beugungsgrenze hinaus geschärft werden kann.

Diese Nanolinsen haben – im Gegensatz zu geometrischen, optischen Linsen – eine erstaunlich kurze Nahfeld-Brennweite. Ju Young Lee und seine Kollegen vom Center for Superfunctional Materials an der Pohang University of Science and Technology erzielten bei ihren Versuchen eine Vergrößerung um etwa den Faktor 2,5. Dies reichte aus, um nur 220 Nanometer feine Metallstreifen aus Palladium, die sie mittels Elektronenstrahl-Lithographie auf einen Glaträger deponierten, mit einem klassischen Lichtmikroskop mit Licht einer Wellenlänge von 472 Nanometern optisch aufzulösen. Mit einer numerischen Apertur von 0,9 lag das Rayleigh-Auflösungslimit ohne Nanolinsen bei 262 und die Grenze für die Sparrow-Auflösung noch bei 249 Nanometer.

Verantwortlich für diesen Sprung über die Beugungsgrenze machen Lee und Kollegen die gekrümmte („curvilineare“) Ausbreitung der Lichtwellen innerhalb der Nanolinsen. Die plankonvexen Linse mit einem Durchmesser von knapp einem Mikrometer und einer Höhe von 220 Nanometern erreichte damit eine Brennweite von 590 Nanometern. Mit einem Brechungsindex von $n=1,5$ läge diese Brennweite für eine klassische, geometrische Linse dagegen bei 1300 Nanometern. Die deutlich verkürzte Brennweite verbessert die Auflösung von Lichtmikroskopen allerdings nur im optischen Nahfeld mit einem direkten Kontakt von Objekt und Nanolinse.

Für die Fertigung dieser Linsen nutzten die Wissenschaftler die Fähigkeit zur Selbstorganisation von organischen Molekülen aus. Sie wählten die Substanz Calix[4]-Hy-

droquinon (CHQ), ein Molekül, in dem sich vier p-Hydroquinon-Gruppen und acht Hydroxyl-Gruppen über Wasserstoffbrückenbindungen zu einem größeren Komplex zusammen lagern. Verteilt in einer Wasser-Azeton-Lösung ordneten sich die CHQ-Monomere nach und nach selbstständig zu größeren Nanostrukturen zusammen. Nun benetzten die Forscher einen Glaträger mit den eingepägten Metallstreifen mit der CHQ-Lösung. Kontrolliert über die Temperatur ordneten sich die Moleküle zu kleinen, plankonvexen Linsen zusammen.

Lee und Kollegen sehen zahlreiche Anwendungen für die relativ einfach herstellbaren Nanolinsen. „Die Linsen weisen neue Wege der optischen Bildgebung bei sehr geringen Intensitäten auf, die für das Bio-Imaging, die Nahfeld-Lithographie, optische Datenspeicher, Solarzellen und zur spektralen Signalverstärkung nützlich sein können“, so die Forscher in ihrer Veröffentlichung.

Jan Oliver Löfken

Weitere Infos:

- Originalveröffentlichung:
Ju Young Lee *et al.*: Near-field focusing and magnification through self-assembled nanoscale spherical lenses. *Nature* 460, 498 (2009)
<http://dx.doi.org/10.1038/nature08173>
- Center for Superfunctional Materials, Department of Chemistry, Pohang University of Science and Technology: <http://csm.postech.ac.kr/>
- SKKU Advanced Institute of Nanotechnology, Sungkyunkwan University, Suwon: www.skku.edu/eng/core/saint.html