

Neuartige Lichtzustände: gleichzeitig thermisch und kohärent

Superlumineszenzdiode emittieren Licht mit hybriden Eigenschaften.

Nach einem Paradigma der Quantenoptik ist spektral breitbandiges inkohärentes Licht immer mit „photon bunching“, also mit einer erhöhten Intensitätskorrelation von zwei verknüpft. Die Intensität monochromatischer Laserstrahlung ist mit einem Wert von eins dagegen unkorreliert. Forschern der TU Darmstadt um Wolfgang Elsässer ist es nun gelungen, neuartige Hybrid-Lichtzustände zu erzeugen und so dieses fundamentale Paradigma zu widerlegen: An von Quantenpunkt-Superlumineszenzdiode (QP-SLDs) emittiertem Licht beobachteten sie eine Reduktion der zentralen Intensitätskorrelation von 2 auf einen Wert von 1,3, also in Richtung der Intensitätskorrelation von 1,0, wie sie ein Laser aufweist. „Diese neuartigen Hybrid-Lichtzustände, sind einerseits spektral breitbandig, weisen aber reduzierte Intensitätskorrelationen auf und sind damit gleichzeitig thermisch und kohärent. Diese faszinierenden Lichtzustände entstehen am Übergang zwischen spontaner und stimulierter Emission, im Bereich verstärkter spontaner Emission (Amplified Spontaneous Emission ASE) die beispielsweise optoelektronische halbleiterbasierte QP-SLDs abgeben. „Hybrid kohärentes Licht ist nicht nur unter dem Aspekt der Grundlagenforschung hochinteressant, sondern erlaubt es ganz gezielt die Intensitätsfluktuationen von Licht für eine Fülle von Anwendungen maßzuschneidern“, erläutert Elsässer.

Seit den Anfängen der Quantenoptik sind die Fragen der Kohärenz und der statistischen Eigenschaften von Licht untrennbar miteinander verbunden. Dabei spielt der zugrundeliegende Emissionsprozess der Lichterzeugung und damit die Beschaffenheit der Lichtquelle eine entscheidende Rolle, wie theoretische und experimentelle Untersuchungen zeigen. Eine Möglichkeit, die statistischen Eigenschaften von Licht zu charakterisieren stellen Korrelationsfunktionen dar, die sich einmal in räumliche und zeitliche bzw. raum-zeitliche Korrelationen aufspalten lassen, wobei zeitliche Korrelationen erster Ordnung Korrelationen des optischen Feldes und Korrelationen zweiter Ordnung Korrelationen der Intensität beschreiben. Beide lassen sich im Prinzip mit einem Michelson-Interferometer-Aufbau als Funktion der Verzögerungszeit messen. Feldkorrelationen sind hierbei mit dem optischen Spektrum und Intensitätskorre-

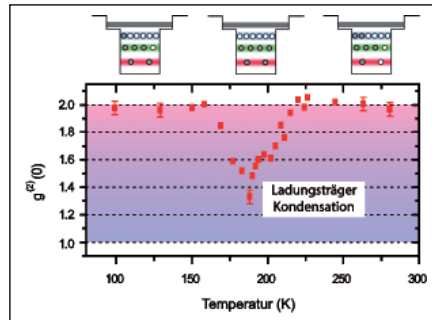


ABB.: Zentraler Intensitätskorrelationskoeffizient $g^{(2)}(\tau=0)$ als Funktion der Temperatur der Superlumineszenzdiode. Eingezeichnet sind die Grenzen des thermisch inkohärenten Lichtzustandes mit einem $g^{(2)}(\tau=0) = 2$ und die des in zweiter Ordnung kohärenten Lichtzustandes mit einem $g^{(2)}(\tau=0) = 1$. Im oberen Bildteil sind schematisch die Besetzungen der Quantenpunktzustände für drei verschiedene Temperaturen von 290, 190 und 90 K eingezeichnet, die so die erhöhten stimulierten Emissionsanteile der bei 190 K erzeugten Hybrid-Lichtzustände aufgrund der erhöhten Besetzung des oberen angeregten quantisierten Zustandes illustrieren. (Quelle: TU Darmstadt)

lationen mit den Fluktuationen der Lichtintensität verknüpft, wobei letztere die statistischen Eigenschaften des Photonenstroms beschreiben. Intensitätskorrelationen sagen aus, wie ein emittiertes Photon zeitlich mit dem Nachfolgenden korreliert ist und spiegeln damit ebenso wie die Statistik die physikalische Natur ihres Emissionsprozesses wider.

Die Untersuchung von Intensitätskorrelationen wurden schon im Rahmen des berühmten Hanbury-Brown-Twiss-Experiments (HBT) durchgeführt, wo in einem Michelson-Interferometer-Aufbau die Photonenkorrelationen zwischen den Intensitäten in den beiden Interferometerarmen bestimmt wurden. Dabei zeigte sich, dass die Kohärenzeigenschaften zweiter Ordnung von Lasern und thermischen Quellen unterschiedlich sind, selbst wenn die Kohärenzeigenschaften erster Ordnung, also das Spektrum gleich sind. Im Detail bedeutet dies, dass der Laser eine zentrale (also bei Verzögerung $\tau = 0$) Korrelationsfunktion zweiter Ordnung von $g^{(2)}(\tau = 0)$ gleich 1

besitzt, das heißt, die Emission erfolgt in Form eines vergleichsweise regulären, geordneten Photonenstroms, wohingegen thermische oder inkohärente Strahlung „Photon Bunching“, also die Emission sogenannter „Photonenklumpen“ aufweist. Sie besitzt deshalb ein $g^{(2)}(\tau = 0)$ gleich 2, was zu Beginn als kontraintuitiv betrachtet und daher recht kontrovers diskutiert wurde. Daraus entwickelte sich letztlich das Paradigma, dass nämlich die spektral breitbandige, inkohärente Emission einer thermischen Quelle immer mit einer erhöhten zentralen Intensitätskorrelation von verbunden ist, während der Laser eine solche von eins aufweist.

Martin Blazek untersuchte im Rahmen seiner Doktorarbeit die photonenstatistischen Eigenschaften von auf InAs/InGaAs-Quantenpunkten basierten Superlumineszenzdiode (SLDs). Sie stammen von der Universität Sheffield und den III-V Labs in Palaiseau und sollen als Breitbandlichtquellen dienen, etwa in biophotonischen Anwendungen wie der Optischen Kohärenztomographie. Diese elektrisch gepumpten SLDs emittieren spektral breitbandiges Licht mit einer zentralen Wellenlänge von rund 1200 Nanometern, das durch verstärkt spontane Emission entlang der verkippten Rippenwellenleiter-Struktur von typischerweise sechs Millimetern Länge entsteht. Das Emissionsspektrum spiegelt darüber hinaus die Besonderheiten der Halbleiter-Quantenpunkte wider, wie die Emission aus einem Grundzustand und einem angeregten Zustand heraus, dessen Ursprung in der Physik des quantisierten und stark inhomogen verbreiterten Energieschemas der Quantenpunkte liegt. All diese Eigenschaften lassen sich sowohl über die Herstellung wie auch mittels externer Parameter kontrollieren.

Zur Untersuchung der Photonenkorrelationen verwendete Martin Blazek nun eine moderne Version des HBT-Experimentes bestehend aus einem Michelson-Interferometer, in dem allerdings ein Zwei-Photonen-Absorptionsprozess in einem Photomultiplier zur Messung der Intensitätskorrelationen ausgenutzt wird, wie kürzlich Boitier et. al vorschlugen. Dies gewährleistet die notwendige extrem hohe zeitliche Auflösung im Femtosekundenbereich für Untersuchungen der Kohärenz zweiter Art.



Um hybrid-kohärentes Licht zu erzeugen, wurden die SLDs in einem Kryostaten mit variabler Temperatur betrieben. Beginnend mit Raumtemperatur äußerte sich die inkohärente Emission der SLDs in einem zentralen Korrelationskoeffizienten zweiter Ordnung von 2. Bei Erniedrigung der Temperatur zeigte sich jedoch bei einer spezifischen Temperatur eine Erniedrigung auf einen Wert von 1,3. Zur Erklärung bediente sich Blazek eines Modells, das die optischen Verluste in Quantenpunktlasern beschreibt, vereinigte also die beiden faszinierenden Welten, der Quantenpunkte und der Quantenoptik: Eine Erniedrigung der Temperatur reduziert die „Kommunikation“ oder Wechselwirkung der Ladungsträger in den individuellen Quantenpunkten, die über die sie umgebende Halbleiterschicht erfolgt aufgrund einer Einschnürung der Fermi-Verteilungsfunktion im Energieraum mit der Konsequenz, das nun die Ladungsträger in die niedrigst-liegenden Zustände des Quantenpunkt-Ensembles kondensieren. Die hieraus resultierende erhöhte optische Verstärkung hat ihren Ursprung

zwar immer noch im verstärkten spontanen Emissionsprozess, nun jedoch mit einer höheren Beimischung stimulierter Anteile, sodass sich die Photonenstatistik in Richtung eines Lasers entwickelt, also weniger „gebuncht“ ist, gleichzeitig aber immer noch ihre spektrale Breitbandigkeit beibehält. Das erzeugte Licht ist daher nun inkohärent in erster Ordnung und laserähnlich in zweiter Ordnung. Darüber hinaus erlaubt dieser neue Hybrid-Lichtzustand, der gleichermaßen thermisch und kohärent ist, weitere Einblicke sowohl in die Manipulation von quantenoptischen Eigenschaften als auch in die elektronischen Nichtgleichgewichtseigenschaften von Quantenpunktemittern.

Darüber hinaus stellt Blazek auch einen neuen theoretisch-empirischen Zusammenhang zwischen den Kohärenzeigenschaften erster und zweiter Art, also zwischen Intensitätsrauschen und Spektrum für diese neuartigen hybriden Lichtzustände auf, in Analogie zu der Siegert-Relation für thermisches Licht. Dieses neuformulierte, verallgemeinerte Intensitätsrauschenmodell, das

neben den beiden Spezialfällen der thermischen Emission und kohärenten Emission nun auch die hybrid-kohärente Emission beschreibt, erlaubt es maßgeschneidertes Intensitätsrauschen für die vielfältigen Anwendungsbereiche von SLDs quasi einzustellen, was sich unmittelbar in verbesserten Eigenschaften von optischen Messsystemen, wie etwa der Optischen Kohärenztomographie widerspiegelt.

M. Blazek & W. Elsässer

Referenzen

- [1] M. Blazek & W. Elsässer: Coherent and thermal light: Tunable hybrid states with second-order coherence without first-order coherence, *Phys. Rev. A* **84**, 063840 (2011)
- [2] M. Blazek, S. Hartmann, A. Molitor & W. Elsässer: Unifying intensity noise and second-order coherence properties of amplified spontaneous emission sources, *Optics Letters* **36**, 17, 3455-3457 (2011)

Erster Röntgenlaser auf Atom-Basis

Mit Neonatomen erzeugen Forscher ultrakurze Röntgenblitze von einzigartiger Farbreinheit.

Nina Rohringer vom Hamburger Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) und ihre Kollegen vom Lawrence Livermore National Laboratory und der Colorado State University nutzten für ihre Versuche den Freie-Elektronen-Laser LCLS am SLAC. In FELs werden Elektronen per Teilchenbeschleuniger bis nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und mit starken Magneten auf einen gezielten Schlingerkurs gebracht. Dabei erzeugen sie laserartige Röntgenstrahlung. Solche Lichtquellen können wegen ihrer kurzen Wellenlänge atomare Details sichtbar machen und mit ihrer ultrakurzen Pulsdauer Schnappschüsse schneller molekularer Prozesse aufnehmen. So lässt sich etwa der Verlauf chemischer Reaktionen ablichten. Je reiner die Farbe des Lasers und je kürzer der Blitz, desto schärfer wird dabei das Bild.

Im Gegensatz dazu basieren traditionelle optische Laser auf der Strahlung von Atomen, die zum Leuchten angeregt werden. Dieses Leuchten verstärkt sich im Lasermedium selbst. Das war bislang im Röntgenbereich nicht möglich, weil die Anregung der Atome in diesem Bereich sehr intensive Strahlung erfordert. Das Team hat mit Hilfe der LCLS nun den ersten Röntgenlaser auf Atom-Basis realisiert – mehr als 40 Jahre nach der Veröffentlichung der ursprünglichen Idee.

Die Forscher schickten den 40 bis 80 fs kurzen Röntgenpuls durch eine Zelle mit Neongas von hoher Gasdichte. Der Röntgenstrahl fraß sich dabei eine schmale Schneise durch das Gas, entlang derer die Neonatome ionisiert wurden. Das heißt, dass jeweils ein inneres Elektron aus den Neonatomen herausgeschlagen wurde. Von den übrigen äußeren Elektronen der Atome rutschte daraufhin nach kurzer Zeit je eines nach innen und sandte dabei einen Röntgenpuls aus. Nach dem Laser-Prinzip animierte dieser Puls das nächste Atom zu einem Röntgenpuls, so dass sich die zahlreichen Pulse zu einem Röntgen-Laserblitz überlagerten. Dessen Wellenlänge lag bei 1,46 Nanometern. Die meisten angewandten Laser im optischen Bereich haben eine Wellenlänge um 800 Nanometer.

„Unser Röntgenlicht ist etwas schwächer als das des Freie-Elektronen-Lasers, hat jedoch eine stabilere Wellenlänge, ein glatteres Pulsprofil und eine kürzere Pulsdauer“, erläutert Rohringer. Auch Freie-Elektronen-Laser haben bereits eine scharf definierte Farbe. Die Energie ihrer Röntgenstrahlung schwankt um etwa 15 Elektronenvolt, bei einer Energie von rund 1000 Elektronenvolt. Beim Röntgenblitz aus den Neonatomen lag diese Schwankung lediglich bei 0,25 Elektronenvolt – das ist sechzigmal schärfer.

Die Röntgenblitze aus dem Freie-Elektronen-Laser und aus den Neonatomen haben unterschiedliche Wellenlängen. So entsteht ein Zweifarben-Röntgenlaser, bei dem beide Pulse optimal synchronisiert sind. Das lässt sich etwa nutzen, um mit einem Puls einen Prozess zu starten – wie etwa eine chemische Reaktion oder Anregung oder eine Strukturumwandlung in einem Festkörper – und diesen Prozess dann mit dem Puls anderer Farbe nach einer bestimmten Zeit abzulichten. Führt man einen der Pulse über einen fest definierten Umweg, lässt er sich um eine gewünschte kurze Zeitspanne verzögern, um etwa verschiedene Stadien einer chemischen Reaktion abzulichten. Da beide Pulse zeitgleich erzeugt werden, lässt sich diese Zeitspanne genau bestimmen.

Am Hamburger CFEL erforscht Rohringer nun, wie sich diese Technik erweitern lässt. „Wir untersuchen beispielsweise, wie wir zu noch höheren Energien gehen können, und ob es auch möglich ist, Moleküle, etwa Sauerstoff, statt Neonatomen als Lasermedium zu nutzen.“

www.desy.de

Referenzen

- N. Rohringer et al.: Atomic inner-shell x-ray laser at 1.46nm pumped by an x-ray free electron laser, *Nature* **481**, 488 (2012)