

Laser in Atomphysik und Astronomie

Von der Atomphysik bis hin zur Beobachtung von Galaxien – Laser spielen als hochpräzise Lichtquellen eine Schlüsselrolle. Wir beschreiben Anwendungen von der Quantenoptik bis zur Astronomie und ihre Anforderungen an die eingesetzten Laser.

Laserschweißen, Laserschneiden, Materialbearbeitung – aus diesen Anwendungen ist der Laser nicht wegzudenken. Hierbei werden Laser mit hohen Intensitäten benötigt, z. B. Nd:YAG-Laser, Faserlaser oder CO₂-Laser. Und auch viele Errungenschaften der modernen Physik wären ohne den Laser nicht denkbar. Der Laser fungiert dabei als hochpräzise Lichtquelle mit speziellen Eigenschaften. In diesen Anwendungen ist zwar auch die Ausgangsleistung wichtig, entscheidend sind aber die weiteren Parameter des Lasers wie die Wellenlänge, die Linienbreite bzw. die Kohärenzlänge. Im Folgenden werden Beispiele für Laseranwendungen aus der Atomphysik/Quantenoptik und der Astronomie betrachtet und ihre speziellen Anforderungen an die verwendeten Laser beschrieben. Diese Anforderungen lassen sich erfolgreich mit durchstimmbaren Diodenlasern erfüllen.

Lasieranforderungen

Die Autorin



Dr. Marion Lang, ist Technische Marketing Managerin bei Toptica Photonics AG, Gräfelfing bei München.

In der Atomphysik wird der Laser eingesetzt, um einen atomaren Übergang anzuregen. Die Wellenlänge muss dazu genau auf den Energieunterschied der beiden beteiligten Zustände eingestellt werden können. Mit Dioden-

lasern, basierend auf Laserdioden, kann ein breiter Wellenlängenbereich direkt abgedeckt werden. Des Weiteren können viele weitere Wellenlängen durch resonante Frequenzverdopplung bzw. Frequenzvervierfachung der Ausgangswellenlängen erzeugt werden. Beispielsweise wird zum Kühlen von Natrium ein Laser mit einer Wellenlänge von 589 nm benötigt – dieser ist mit einem Übergang im Natriumatom resonant und erlaubt es so, die Natriumatome abzubremesen und in geeigneten Magnetfeldern zu fangen. Die benötigte Wellenlänge wird durch Frequenzverdopplung eines Diodenlasers mit der Ausgangswellenlänge 1178 nm erzeugt. Die Linienbreite des Lasers muss schmaler als die Linienbreite des atomaren Übergangs sein. Ohne spezielle Maßnahmen beträgt die Linienbreite eines Diodenlasers jedoch typisch mehrere hundert GHz. Wird eine Laserdiode in einen externen Resonator zusammen mit einem frequenzselektiven Element eingebaut, z. B. einem Gitter, so lässt sich die Linienbreite auf unter 100 kHz reduzieren. Dies ist ein Gewinn um mehr als sechs Größenordnungen in der Kohärenzlänge, die anschließend mehrere km beträgt. Das frequenzselektive Element ermöglicht es zudem, die Wellenlänge des Lasers über einen gewissen Bereich frei einzustellen. Damit lässt sich die Laserfrequenz präzise auf den atomaren Übergang abstimmen. In der Quantenoptik bewegen sich die erforderlichen Ausgangsleistungen im Bereich von mW bis W, je nachdem, ob der Laser verwendet wird, um wenige



Ein 20 W starker Laser regt die Natriumatome in der Atmosphäre an und erzeugt einen künstlichen »Stern«, der als Referenz für die adaptive Optik eines Großteleskops dient.

Atome zu beobachten oder um Milliarden von Atomen zu fangen und zu kühlen. Die Ausgangsleistung eines nicht nachverstärkten, gitterstabilisierten Diodenlasers ist abhängig von seiner Wellenlänge, beträgt aber typischerweise bis zu 100 mW. Diese Ausgangsleistungen können mit Trapezverstärkern erhöht werden. Aktuell können hiermit Ausgangsleistungen bis zu 3 W (z. B. bei 970 nm) erzeugt werden. Dies ist für die meisten atomphysikalischen Anwendungen ausreichend. Durch spezielle Raman-Faserverstärker ist es Toptica zudem gelungen, schmalbandige Diodenlaser auf bis zu 20 W zu verstärken. Experimente in der Quantenoptik sind meist hochkomplexe Aufbauten mit mehreren Lasern, Regelelektronik und vielen weiteren Messgeräten, sowie optischen und mechanischen Komponenten. Daher sollen selbst die komplexesten Lasersysteme möglichst einfach zu bedienen sein.

Toptica's »pro«-Technologie gewährleistet Spitzenspezifikationen, höchste Stabilität und einfache Bedienung und trägt damit zum Erfolg eines so komplexen Experiments maßgeblich bei. Führende Wissenschaftler aus aller Welt

sowie ein Dutzend Nobelpreisträger verwenden daher »pro«-Laser in ihren Experimenten.

Laseranwendungen in der Atomphysik/Quantenoptik

In den letzten 100 Jahren haben viele Experimente und theoretische Studien über die Wechselwirkung von Licht und Materie den Weg zur modernen Atomphysik geebnet. Sie findet inzwischen nicht nur Verwendung im Labor, sondern auch in Industrieanwendungen und im Alltag. Die Laserkühlung von neutralen Atomen wurde um 1985 erstmalig demonstriert und zwölf Jahre später mit dem Nobelpreis ausgezeichnet (Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji und William D. Phillips). Seitdem wurden

wiederholte Prozess von Absorption und Emission zu einer Abbremsung, d. h. zum Abkühlen der Atome. Verwendet wird hierfür ein speziell ausgesuchter Übergang im Atomspektrum. Laserphotonen, die mit diesem Übergang resonant sind, werden absorbiert und übertragen dabei ihren in Laserstrahlausbreitung gerichteten Impuls auf die Atome.

Die spontane Emission findet in allen Raumrichtungen statt. Der dabei entstehende Rückstoß mittelt sich bei vielen Absorptions-Emissions-Zyklen weg, so dass die Atome letztlich in Laserstrahlrichtung abgebremst werden. Werden jeweils gegengerichtete Laserstrahlenpaare aus allen drei Raumrichtungen eingestrahlt, so lassen sich damit die Atome kühlen.

tiefen Temperaturen übergehen: das Bose-Einstein Kondensat. Alle Atome befinden sich dann im selben quantenmechanischen Zustand, d. h. sie haben dieselben physikalischen Eigenschaften, bewegen sich im Gleichklang und sind völlig ununterscheidbar. Experimentell konnte ein solcher Zustand erst 71 Jahre später beobachtet werden. 2001 ging dafür der Nobelpreis an E. A. Cornell, W. Ketterle und C. E. Wieman.

Die Bose-Einstein Kondensation findet bei Temperaturen von etwa $0,1 \mu\text{K}$ statt. Mit Temperaturen bis unter ein nK sind Bose-Einstein Kondensate die kältesten Objekte im Universum und besitzen einzigartige Eigenschaften. Die Atome aus einer MOT werden dazu in eine rein magnetische oder optische Falle umgeladen und dort weiter abge-



Von der Laserdiode zum Diodenlaser (Links: Laserdioden; Mitte: Resonator, optischer Isolator und Faserkoppler; Rechts: gitterstabilisierter Diodenlaser DL pro).

viele Methoden zur Laserkühlung und zum Fangen von Atomen experimentell realisiert. Die dadurch erreichten Temperaturen liegen im μK -Bereich und sind nur noch ein paar Millionstel Grad vom absoluten Nullpunkt entfernt. Lasergekühlte Atome bilden die Grundlage von Bose-Einstein Kondensation, dem künstlich erzeugten Übergang zu einem neuartigen Quanten-Materiezustand, sowie von Atominterferometrie und weiteren hochpräzisen Messmethoden. Sie erlauben beispielsweise genaueste Messungen von Zeit und Frequenz, Beschleunigung, Rotation, Isotopenverhältnissen, Magnetfeldern oder Naturkonstanten und spielen auch im Alltag eine bedeutende Rolle, z. B. beim GPS. Zur Kühlung werden die Atome mit einem Laser bestrahlt. Hierbei führt der

Atome lassen sich aber nicht nur kühlen, sondern auch fangen. Dazu wird in einer magneto-optischen Falle (Magneto-Optical Trap, MOT) die Laserkühlung mit einem Magnetfeld kombiniert. Dieses Magnetfeld übt zusammen mit den Lasern zusätzlich zur Kühlkraft eine ortsabhängige Rückstellkraft auf die Atome aus, so dass die Atome im Zentrum der MOT gefangen und gekühlt werden. In einer MOT können typisch ein paar Tausend bis einige Milliarden Atome mit Temperaturen im mK-Bereich gefangen werden.

Bose Einstein Kondensation (BEC)

Bereits 1924 beschrieben Bose und Einstein theoretisch einen Zustand, in dem Atome (mit ganzzahligem Spin) bei sehr

kühlt. Die dazu eingesetzte Technik ist einfach aber genial. Wie bei einer heißen Tasse Kaffee oder Tee werden beim sogenannten »Verdampfungskühlen« die wärmsten Atome entfernt, während die zurückgebliebenen miteinander thermalisieren und so immer weiter abkühlen.

Bose-Einstein Kondensate sind nicht »nur« als neuer Materiezustand interessant, sondern dienen auch als Modellsysteme für Fragestellungen der Festkörperphysik, z. B. die Hochtemperatur-Supraleitung oder niederdimensionale, entartete Fermigase. Während Bose-Einstein Kondensate in der Natur nicht vorkommen, existieren entartete Fermigase beispielsweise in Neutronensternen. Somit verknüpfen sich hierbei die Quanten- und die Astrophysik...

Laserleitsterne für moderne Großteleskope

Bei der Beobachtung von astronomischen Objekten spiegelt sich ebenfalls eine Verbindung von Atom- und Quantenphysik mit der Astrophysik wider. Auch wenn hier – am anderen Ende der Größenskala – »ganze Galaxien« stehen, so werden auch in der Astronomie hochpräzise Laserquellen benötigt. Sie werden eingesetzt, um eine Referenz für die adaptive Optik erdbasierter Großteleskope zu erzeugen.

Das größte Problem erdgebundener Teleskope ist das »Funkeln der Sterne«, in der Fachsprache »Seeing« genannt. Die-

geben beim Übergang in den Grundzustand gelbes Fluoreszenzlicht ab. Somit stehen für die adaptive Optik des Teleskops punktförmige Referenzobjekte für zur Verfügung. Mit der adaptiven Optik, bestehend aus einem Wellenfrontdetektor, einem deformierbarem Spiegel und einer aktiven Regelung, lassen sich die, durch atmosphärische Störungen veränderten, Wellenfronten extrem schnell korrigieren. Auf diese Weise lassen sich »ganze Galaxien« mit nie dagewesener Auflösung abbilden.

Ein für diese Aufgabe geeigneter Laser muss bei der Resonanzwellenlänge von Natrium (589 nm) ausreichend Leistung besitzen und zugleich möglichst schmal-

neue, patentierte Technik erlaubt es jedoch, den Seedlaser schmalbandig auf hohe Ausgangsleistungen zu verstärken. Diese Technik wurde in den letzten Jahren von der Lasergruppe der ESO entwickelt und nun von Toptica lizenziert und mit Partnern weiter optimiert. Im Anschluss an die Verstärkung wird der Laser in einem nichtlinearen Kristall auf 589 nm frequenzverdoppelt. Das Ergebnis sind 20 W Ausgangsleistung bei der Resonanzwellenlänge von Natrium mit einer Linienbreite von unter 5 MHz.

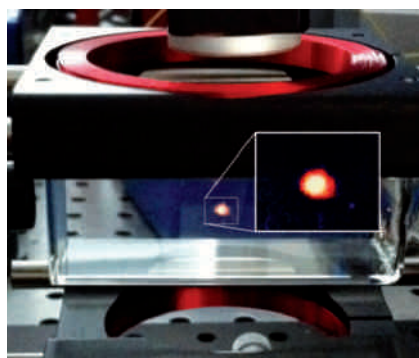
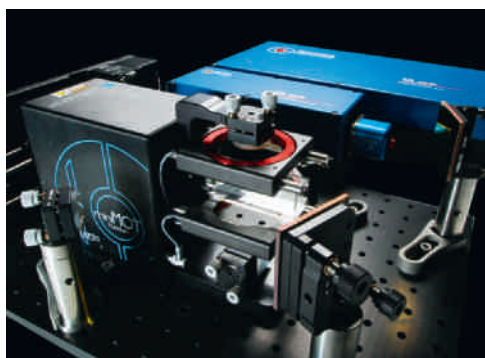
Test auf Herz und Nieren

Im Juni 2011 nahm ein Demonstrator-system seinen ersten Testbetrieb an der öffentlichen Sternwarte in Ottobeuren auf. Dort wurde er eingesetzt, um atmosphärische Messungen zur Natriumverteilung in der Mesosphäre durchzuführen und gleichzeitig den Laser im praktischen Einsatz zu testen.

Der erste Laser der Vorserie muss sich aktuell umfangreichen Tests unterziehen (Hoch- und Tieftemperatur Klimatests, Unterdrucktests, EMV, Transport-, Schock- und Vibrationstests) und beweisen, dass er den Bedingungen am Zielstandort gewachsen ist, bevor er seine Reise nach Chile antreten kann. Am zukünftigen Standort am Cerro Paranal in 2.600 m Höhe herrscht ein Luftdruck von nur 750 mbar (d. h. reduzierte Konvektionskühlung, um die anfallende Abwärme abzuführen), Temperaturschwankungen von 0 bis +15 °C und zudem handelt es sich um eine Erdbebenregion. Der Laser muss so ausgelegt sein, dass er auch Erdbeben mit einer Stärke von bis zu 7,5 auf der Richterskala unbeschadet überstehen kann. Nach erfolgreichem Abschluss dieser Tests steht seiner Reise nach Chile nichts mehr im Weg. Er wird dort mit drei weiteren Guide Star Lasern desselben Typs im nächsten Jahr den Betrieb aufnehmen und als Referenzquelle für die adaptive Optik des VLT dienen.

KONTAKT

Toptica Photonics AG
www.toptica.com



Links: Kompakte Rubidium-MOT von ColdQuanta mit Spiegeln, Magnetspulen und Vakuumeinheit, sowie Kühl- und Rückpump-Laser. Rechts: Rubidium-MOT mit einer Wolke aus gefangenen Rb-Atomen.

ser Effekt wird durch Turbulenzen in der Erdatmosphäre hervorgerufen, die die Abbildung stören – ähnlich wie bei einer Fata Morgana. Dieser Effekt lässt sich durch adaptive Optik korrigieren, sofern es ein geeignetes Referenzobjekt gibt. Allerdings gibt es nur in wenigen Fällen einen geeigneten, natürlichen Stern in der Nähe des Beobachtungsobjekts. Steht ein solcher Referenzstern nicht zur Verfügung, werden »künstliche Sterne«, so genannte Laserleitsterne, erzeugt. In großer Höhe (etwa 90 km von der Erdoberfläche entfernt), in der Mesosphäre, gibt es ein erhöhtes Vorkommen von Natrium und anderen schweren Atomen. Die Resonanzlinie von Natrium (D2) eignet sich besonders gut zur Erzeugung eines Laserleitsterns. Der Laser regt – wie bei der zuvor vorgestellten Laserkühlung – die Natrium-atome dieser Schicht an, und die Atome

bandig sein. Eine weitere Herausforderung ist der Einsatzort am Very Large Telescope (VLT) der ESO in Paranal (Chile): der Laser muss auch unter den widrigen Umgebungsbedingungen in über 2.000 m Höhe einwandfrei funktionieren. Im Juli 2010 hat Toptica die Ausschreibung der ESO zur Entwicklung und Installation von vier Natrium Laserleitsternen gewinnen können. Das Ergebnis dieser Entwicklung ist der »SodiumStar«. Er basiert auf einem nachverstärkten und frequenzverdoppelten Diodenlasersystem. Als Seedlaser dient ein abstimmbarer, gitterstabilisierter Diodenlaser bei 1178 nm. Dieser wird auf Leistungen von über 35 W verstärkt, bevor er resonant frequenzverdoppelt wird. Normalerweise ist die verwendete Raman-Verstärkung breitbandig und der Laser damit ungeeignet für die resonante Anregung von Atomen. Eine