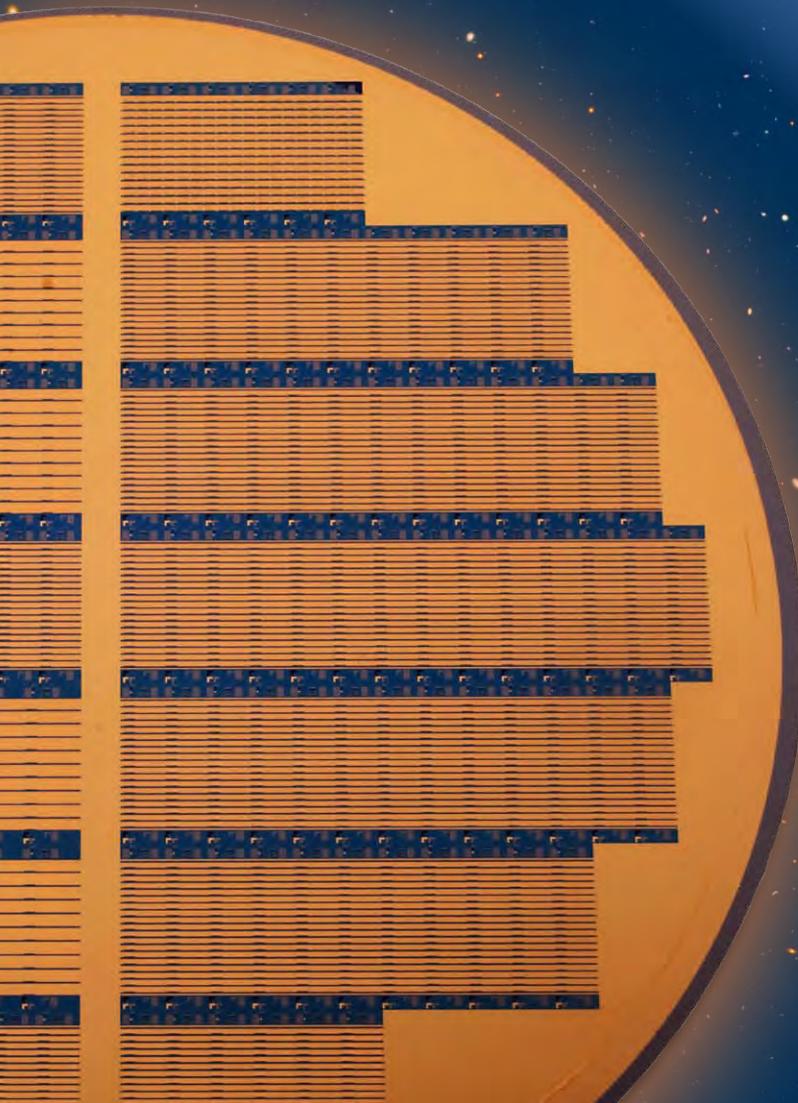
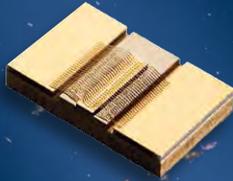


frequent

Forschungsnews aus dem
Ferdinand-Braun-Institut



Thema: Hochleistungsdiodenlaser

- ▶ Schlüsselbauelemente für leistungsstarke Systeme
- ▶ Diodenlaser mit hohem Konversionswirkungsgrad
- ▶ Spektral schmalbandige Laser
- ▷ Produkte im Fokus
- ▷ Forschung im Fokus

Hochleistungsdiolenlaser

Schlüsselbauelemente für Lasermaterialbearbeitung und Petawatt-Lasersysteme in der Forschung

Hochleistungsdiolenlaser wandeln in sehr effizienter Weise elektrischen Strom in Laserlicht um; der Leistungsbereich reicht von einigen Watt bis in den Kilowatt-Bereich. Ihr hoher Wirkungsgrad und ihre kompakte Bauweise machen sie zu Schlüsselbauelementen für moderne Laserstrahlquellen im Hochleistungsbe- reich; zudem erlaubt die Halbleitertechnologie die Fertigung hoher Stückzahlen. In den Optischen Technologien machen sie diese Eigenschaften vergleichbar mit der Bedeutung von Schaltkreisen für die Computertechnik.

Ein boomender Markt für Laserstrahl- quellen ist die Lasermaterialbearbeitung mit einem geschätzten Jahresumsatz von 1,5 Milliarden Dollar für das Jahr 2010. Im Maschinenbau, der Autoindustrie und bei der Herstellung von Solarmodulen sind Laser als Werkzeuge unverzichtbar. Seitdem kompakte Hochleistungsdiolen- laser eingesetzt werden, rechnet sich auch die lange Zeit „unbezahlbare“

Lichtenergie für viele bestehende An- wendungen und ermöglicht immer neue Applikationen.

In der Materialbearbeitung werden Hochleistungsdiolenlaser meist als Pumpquellen für Lasermedien (Kristalle oder Fasern) eingesetzt. Bei relativ ge- ringem Leistungsverlust kann so die Brillanz der Strahlquellen wesentlich erhöht werden; für einige Anwendungen reicht bereits die Brillanz der Hochleistungs- diolenlaser selbst aus. Entscheidend sind zudem Leistung und Wirkungsgrad. Anhand dieser drei Kenngrößen wird die Leistungsfähigkeit von Lasern bewert- et – bei Computerchips entspricht dies den Taktfrequenzen bzw. Speicherkapa- zitäten. Das FBH erforscht die physikali- schen Grundlagen, um diese Parameter weiter zu verbessern und setzt neue Er- kenntnisse mittels der hochmodernen und erprobten Halbleitertechnologie am FBH um. Für die Bewertung der komple- xen Zusammenhänge und den schnellen

Technologietransfer in die Industrie ist diese experimentelle Verifikation bis hin zum Demonstrator unerlässlich.

Neben der Lasermaterialbearbeitung werden Lasersysteme mit enormen Spitzenleistungen derzeit in Großpro- jekten der Forschung realisiert wie etwa neuartige Table-top-Röntgenlaser und Petawatt-Lasersysteme. Der Bedarf an maßgeschneiderten Hochleistungs- diolenlasern für diese Einsatzzwecke nimmt kontinuierlich zu. Eine erhebliche Steigerung wird insbesondere von An- wendungen wie der laserinduzierten Kernfusion erwartet, die bei der künftigen Energieerzeugung eine Rolle spielen könnte. Dann werden alleine für einen einzigen Reaktor Hochleistungsdiolen- laser in der Größenordnung der gegen- wärtigen Weltjahresproduktion benötigt.



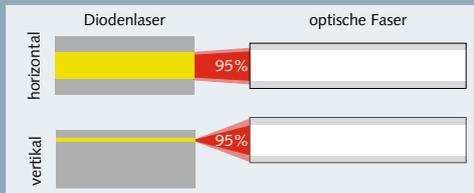
WAS SIND HOCHLEISTUNGSDIODENLASER?

Hochleistungsdiolenlaser bestehen aus kristallinen Schichten von Ver- bindungshalbleitern der III. und V. Hauptgruppe. Für den gegenwärtig wichtigsten Wellenlängenbereich im nahen Infrarot (0,8 - 1,1 μm) werden diese auf Galliumarsenid (GaAs)-Substraten mittels Epitaxie in hoher Perfektion abgeschieden. Die Kristallschichten bilden eine pn-Diode, die bei Stromfluss Licht erzeugt; Kristallfacetten formen den optischen Resonator.

Der optische Gewinn wird in nur wenige Nanometer dünnen Schichten erzielt, sogenannten Quantenfilmen, in denen Ladungs- träger strahlend rekombinieren. Auf diese Weise entstehen in der Halbleiterfabrikation parallel tausende Laser. Diese Chips werden auf Wärmesenken montiert, in die die elektrische Stromzufuhr integriert ist.

STANDARDTYP: 100 µm-BREITSTREIFEN-DIODENLASER

Hochleistungsdiodenlaser versorgen moderne, leistungsstarke Industrielasersysteme mit der benötigten optischen Energie. Einzelemitter mit 100 µm Streifenbreite (Ausgangsapertur) im Wellenlängenbereich zwischen 900 und 1000 nm haben sich dabei weltweit zum Standardtyp entwickelt. Als Grundbausteine von Diodenlasermodulen werden sie sowohl zum Pumpen von Faserlasern genutzt als auch in direkten Anwendungen eingesetzt. Das macht diese 100 µm-Einzelemitter auf dem Markt für Hochleistungslaser zu einem kommerziell erfolgreichen Massenprodukt mit steigender Nachfrage. Daraus resultiert ein scharfer Wettbewerb bei den entscheidenden Kenngrößen: Leistung, Effizienz, Brillanz und Kosten pro Watt Ausgangsleistung.



▲ Erzeugen hochbrillanter Laserstrahlung aus Hochleistungsdiodenlasern mit Standardgeometrie

Das FBH erreicht aktuell bei 100 µm-Breitstreifen-Diodenlasern die folgenden internationalen Spitzenwerte:

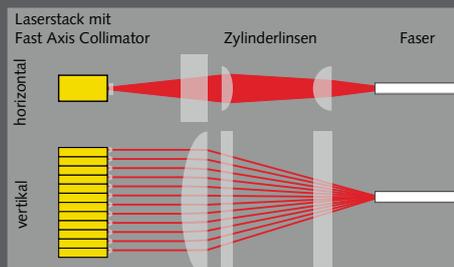
- ▶ bis 20 Watt zuverlässige Ausgangsleistung
- ▶ 10 Watt zuverlässige Ausgangsleistung mit 65% Effizienz
- ▶ 7 Watt zuverlässige Ausgangsleistung mit 60% Effizienz bei geringer spektraler Breite < 1 nm durch integriertes Gitter

DIODENLASER-STACKS: GEPULSTE SYSTEME IM KILOWATTBEREICH

Für Hochleistungslasersysteme hat das FBH spezielle Diodenlaser-Stacks entwickelt, die eine Faserkopplung mit einfachen optischen Mitteln ermöglichen. Diese Stacks sind in Reihe geschaltet und ermöglichen QCW-Lichtleistungen im kW-Bereich. Die Laserchips haben eine maßgeschneiderte „Super Large Optical Cavity“, die die Facettenbelastung reduziert und die vertikale Divergenz des Laserlichts verringert. Dank der kleinen lateralen Apertur von nur 1,6 mm sind die Diodenlaser-Stacks für die Faserkopplung besonders gut geeignet.

Chipdaten im montierten Zustand:

- ▶ Spektrale Breite @ 100 W, 1 ms (95% optische Leistung): 7 nm
- ▶ Konversionseffizienz @ 100 W: 55%
- ▶ Maximale optische Impulsleistung (20 Hz, 1 ms): 200 W
- ▶ Vertikaler Fernfeldwinkel (95% optische Leistung): 24°



EDITORIAL



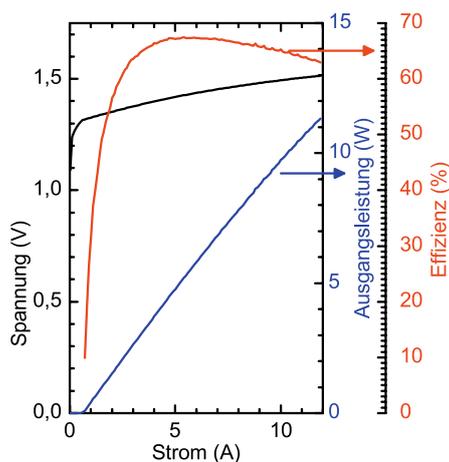
Mehr Leistung, höhere Wirkungsgrade und eine bessere Strahlqualität – die Leistungsfähigkeit von Hochleistungsdiodenlasern ist in den vergangenen Jahren immer weiter gestiegen. Ihre Eigenschaften haben sie zu Schlüsselbauelementen für Lasersysteme gemacht, die Ausgangsleistungen im Spitzenbereich benötigen. Diodenlaser kommen als Pump Laser sowohl in industriellen Systemen – etwa der Lasermaterialbearbeitung – wie auch in Großprojekten der Forschung zum Einsatz. Da ihre Leistungsfähigkeit inzwischen so hoch ist, können sie nun auch direkt eingesetzt werden. Dies wiederum ermöglicht noch kompaktere Lösungen. Die aktuelle **frequent** bietet Ihnen einen Überblick über verschiedene leistungsstarke Lichtquellen, die das Ferdinand-Braun-Institut vom Chip bis zur Pilotserie entwickelt. Außerdem halten wir Sie mit Kurznachrichten zu unseren aktuellen Forschungsergebnissen und Produktentwicklungen auf dem Laufenden. Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre der zweiten Ausgabe.

Ihr


Günther Tränkle

▶ www.fbh-berlin.de/frequent

Diodenlaser mit hohem Konversionswirkungsgrad



▲ Kennlinien eines 100 µm-Breitstreifenlasers mit 980 nm Wellenlänge (Dauerstrichbetrieb bei Raumtemperatur)

Der Konversionswirkungsgrad charakterisiert die Effizienz der Wandlung von elektrischer Energie in nutzbare Laserstrahlung. Bei Diodenlasern liegt dieser Wert derzeit zwischen 50 und 60%. Neben der Zuverlässigkeit ist er die entscheidende Kenngröße für den industriellen Einsatz von Hochleistungslasersystemen im kW-Bereich. So steigert der Einsatz von Diodenlasern in Materialbearbeitungslasern die nutzbare Lichtleistung bereits von circa 5% auf 20 bis 30%. Jede weitere Verbesserung lohnt sich, da die Leistung, die nicht in Laserlicht umgewandelt wird, als Wärme im System verbleibt und abgeführt werden muss. Steigert man beispielsweise die Effizienz von 50 auf 70%, muss nur noch halb so viel Wärme abgeleitet werden – für Lasersysteme im kW-Bereich bedeutet dies substanzielle Energieeinsparungen. Der höhere Wirkungsgrad führt außerdem zu geringeren Betriebstemperaturen im Diodenlaser selbst und erhöht damit dessen Zuverlässigkeit.

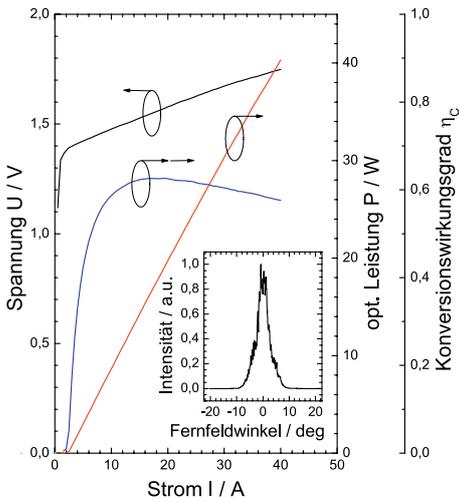
Der Konversionswirkungsgrad von Diodenlasern wird von vielen Parametern beeinflusst. Sein Optimum liegt nahe der Laserschwelle; bei den hohen Ausgangsleistungen am Arbeitspunkt sinkt er in der Regel relativ stark. Den Wirkungsgrad zu steigern ist daher eine sehr komplexe Herausforderung und beruht im Wesentlichen auf der aufwändigen Optimierung der Kristallschichten im Laser. Diese müssen nahezu hundert Prozent des Stromes in Laserlicht umwandeln, zugleich dürfen der elektrische Widerstand und die optischen Absorptionsverluste nur sehr gering sein. Dafür sind anspruchsvolle und eng vernetzte Forschungsarbeiten notwendig – von der Materialwissenschaft bis zum Design des Laserresonators.

Besondere Bedeutung kommt dabei 100 µm-Breitstreifenlasern zu, die sich als Standardstruktur für viele Lasersysteme durchgesetzt haben – entsprechend scharf ist der weltweite Wettbewerb beim Benchmarking dieses Lasertyps. Das FBH hat hier mit einem maximalen Konversionswirkungsgrad von über 70% bei Leistungen von 4 Watt internationale Spitzenwerte erzielt. Neuere Ergebnisse zeigen trotz eines Arbeitspunktes von über 10 Watt einen Wirkungsgrad, der bei 65% verbleibt. Dieser soll nun auf über 70% bei noch höheren Leistungen gesteigert werden. ■



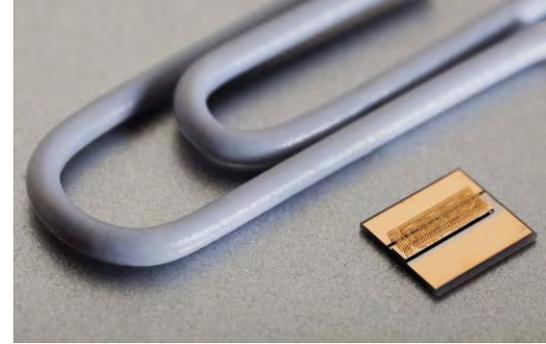
◀ 100 µm-Breitstreifenlaser mit 65% Effizienz bei 10 Watt Ausgangsleistung

Pumpquellen für KurzpulsLasersysteme höchster Leistung



▲ PUI-Kennlinie und laterales Fernfeld bei $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ und QCW-Betrieb (Pulsdauer 1 ms, $f = 200\text{ Hz}$)

UltrakurzpulsLasersysteme im Piko- und Femtosekundenbereich werden unter anderem als PumpLasersysteme für laserbasierte Röntgenquellen und Plasma-RöntgenLasersysteme benötigt. Diese kommen als leistungsstarke kohärente Laborquellen in der Materialanalytik zum Einsatz. Kernstück solcher kompakter Table-top-RöntgenLasersysteme ist ein FestkörperLasersystem, das durch DiodenLasersysteme gepumpt wird und derzeit am Max-Born-Institut entsteht. Dafür hat das FBH 937 nm-DiodenLasersysteme entwickelt, die in Kooperation mit Jenoptik zu hocheffizienten Pumpmodulen aufgebaut werden. Ein einzelnes Modul soll bei einer Pulsbreite von 1 ns und einer Repetitionsrate von 200 Hz eine Pulsennergie von 2 J aus einer optischen Faser mit 1 mm Kerndurchmesser bereitstellen. Gefordert ist zudem ein elektrooptischer Gesamtwirkungsgrad von mehr als 50%.

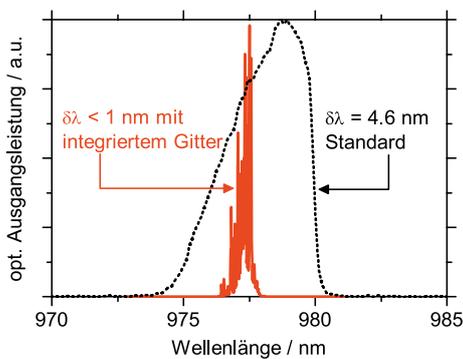


▲ Laserchip als Pumpquelle für kompakte RöntgenLasersysteme

Die Halbleiterstruktur wurde daher so optimiert, dass ein Laserchip eine optische Leistung von 30 bis 40 W bei einem Konversionswirkungsgrad von 60% erreicht. Circa 70 solcher Halbleiterchips bilden ein Pumpmodul – erste Prototypen sollen Ende 2010 zur Verfügung stehen. Laufende Forschungsarbeiten zielen auf die weitere Verbesserung der Strahlqualität, der Leistung und des Konversionswirkungsgrades der Chips. Damit hat das FBH eine grundlegende Technologie entwickelt, die Basis für industriell gefertigte und kostengünstige Pumpmodule für HochleistungsLasersysteme ist. ■

Spektral schmalbandige Laser

Die aktiven Zentren von Festkörper- und FaserLasersystemen der neuesten Generation haben sehr oft schmale Absorptionslinien für die Pumpstrahlung – beispielsweise Ytterbium in Glas bei 976 nm. Zum Pumpen werden spektral schmalbandige und stabilisierte Hochleistungsdioden benötigt, ebenso wie in Lasersystemen, in denen eine hohe Strahlqualität mittels Wellenlängenmultiplex durch die optimale räumliche Überlagerung von Laserlicht verschiedener Wellenlängen erreicht

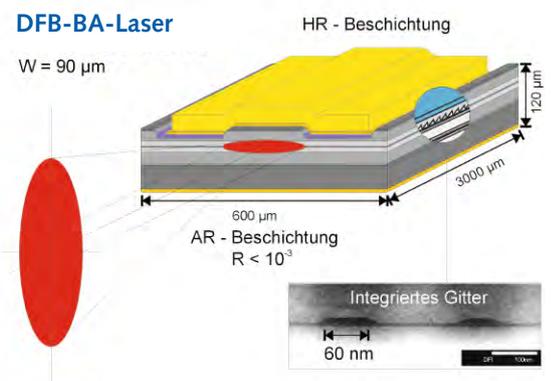


▲ Spektren von Standard- und spektral stabilisierten DiodenLasern

wird. Für beide Lasersysteme, die insbesondere für die Materialbearbeitung wichtig sind, fehlten bisher monolithische DiodenLasersysteme mit der entsprechenden Leistungsfähigkeit. Ihr Emissionsspektrum war für viele Anwendungen zu breit und hat sich bei Temperaturschwankungen zu stark verändert.

Forschungsarbeiten am FBH haben nun zu einem Durchbruch bei Ausgangsleistung, Effizienz und Zuverlässigkeit von stabilisierten HochleistungsdiodenLasern geführt. Die Emissionswellenlänge der neuartigen DiodenLasersysteme aus dem FBH wird durch periodische Gitterstrukturen stabilisiert, die epitaktisch in den Halbleiter eingebettet werden. Dieser Technologieschritt ist sehr anspruchsvoll und führte bislang zu erheblichen Einbußen bei Leistung und Zuverlässigkeit. Das FBH hat Design und Chiptechnologie so entwickelt, dass 100 μm -BreitstreifenLasersysteme einen Wirkungsgrad von über 60% und eine spektrale Linienbreite

von weniger als 1 nm bei Ausgangsleistungen bis 10 Watt erreichen. Viele tausend Stunden Betriebszeit zeigen die Zuverlässigkeit bei 7 Watt Dauerstrichbetrieb. Die Werte belegen, dass die zusätzlichen Strukturänderungen nur noch zu geringen Abstrichen in der Ausgangsleistung gegenüber den spektral breiteren StandardLasern führen. Dies macht diese Laser hoch attraktiv für die genannten Anwendungen. ■



▲ Bragg-Gitter in der Wellenleiterstruktur

PRODUKTE IM FOKUS

Kompakte, leistungsstarke Lasermodule für den sichtbaren Spektralbereich

Laserstrahlung mit hoher Leistung und guter Strahlqualität im blauen und grünen Spektralbereich von 450 bis 560 nm wird in der Displaytechnologie, Medizin und Messtechnik benötigt. Die Frequenzverdopplung von Halbleiterlasern eignet sich besonders, um diesen Wellenlängenbereich abzudecken. Aufgrund ihrer kleinen Abmessungen, hohen Effizienz, einstellbaren Emissionswellenlänge und langen Lebensdauer eröffnen derartige Strahlquellen eine kompakte und preisgünstige Alternative zu gängigen Gaslasern. Dem FBH ist es gelungen, hochbrillante Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich mit hohen Ausgangsleistungen aus einem Modul von der Größe einer Streichholzschachtel zu erzeugen. Die kompakten Module emittieren 1 Watt bei 490 nm bzw. 532 nm mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlung und zeigen eine hohe Leistungsstabilität mit Schwankungen < 2%. Als Basis dafür wurden leistungsstarke hochbrillante Pump Laser (DBR-Trapez Laser) entwickelt. Deren Ausgangsleistung $P > 10$ W, Strahlqualität $M^2 < 3$ und Emissionsbandbreite < 20 nm wurde an die Anforderungen der nichtlinearen optischen Kristalle für die effiziente Umwandlung in sichtbares Licht angepasst.

Hocheffiziente Mikrowellen-Leistungstransistoren

GaN-Leistungs-Mikrowellentransistoren werden in der Kommunikationstechnik, der Radartechnik und im Bereich der industriellen Hochfrequenzerzeugung vielfältig eingesetzt. Das FBH entwickelt derartige Leistungstransistoren für verschiedene Frequenzbereiche und Leistungsklassen und vermarktet diese über seine Ausgründung BeMiTec. Wichtiger Bestandteil der Produktpalette sind 30 W Leistungstransistoren für Leistungsverstärker im Bereich des L- und S-Bands. Diese erreichen bei 2 GHz eine lineare Verstärkung von 18 dB und bei Leistungssättigung einen Wirkungsgrad (Power Added Efficiency, PAE) von über 60% im Klasse-B-Betrieb. Damit eignen sie sich hervorragend für hocheffiziente Leistungsverstärker. Die Transistoren sind in einem Kyocera A191 Mikrowellengehäuse aufgebaut und im Frequenzbereich von 1 GHz bis etwa 4 GHz einsetzbar.

▼ GaN-Leistungstransistor für die Kommunikationstechnik



FORSCHUNG IM FOKUS

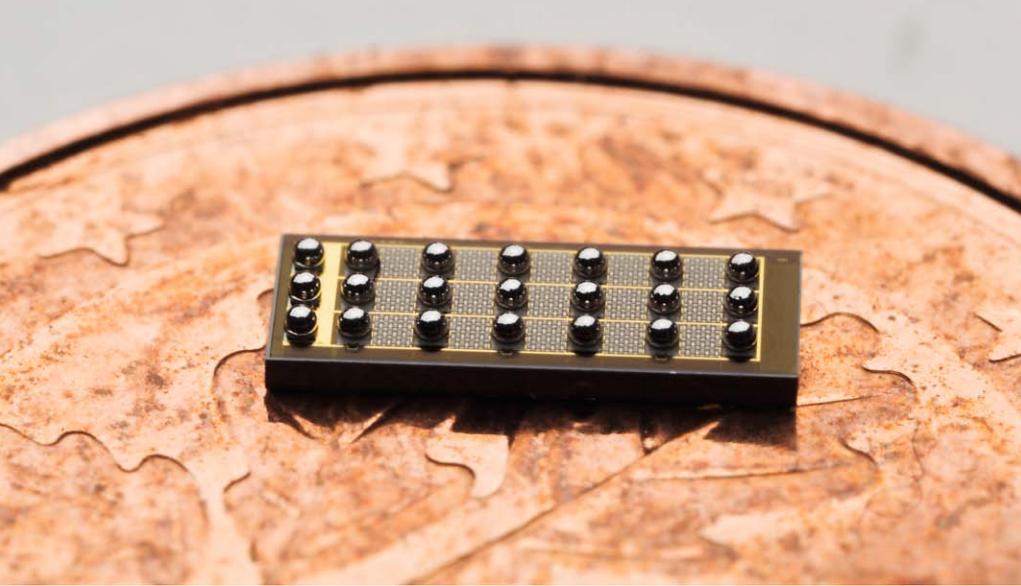
GaN-Kristalle hoher Qualität

Zur Herstellung effizienter und langlebiger, blau-violetter Laserdioden werden möglichst kostengünstige Galliumnitrid (GaN)-Substrate in hoher Materialqualität benötigt. Diese werden von der Industrie meist individuell auf Fremdsubstrat durch Wachstum und Ablösen hergestellt. Als Alternative dazu entwickelt das FBH eine Technologie zur Herstellung dicker GaN-Kristalle, aus denen mehrere GaN-Substrate von höherer Qualität herausgesägt werden sollen. GaN-Kristalle von zwei Zoll Durchmesser und einer Länge von über 6 mm mit sehr hohen und damit produktiven Wachstumsraten von 0,45 mm/h werden damit bereits erreicht. Niedrige Versetzungsdichten bis weit unter 10^6 cm⁻², hohe Materialreinheit und hervorragende Wärmeleitfähigkeit von nahezu 300 W/mK zeigen die sehr gute Materialqualität dieser Kristalle.



▲ am FBH gewachsener GaN-Kristall

Ziel ist es, Durchmesser und Schichtdicke weiter zu vergrößern und aus den Kristallen GaN-Substrate bei einem Industriepartner herzustellen. Zudem sollen durch die Dotierung mit Silizium bzw. Eisen n-leitende und semiisolierende GaN-Substrate möglich werden. Dies erschließt neue Anwendungsbereiche bei ultrahellen LEDs und schnellen Leistungsschalttransistoren.



◀ *selbstsperrender GaN-Transistor mit hoher Spannungsfestigkeit*

GaN-Leistungstransistoren für effiziente Energiekonverter

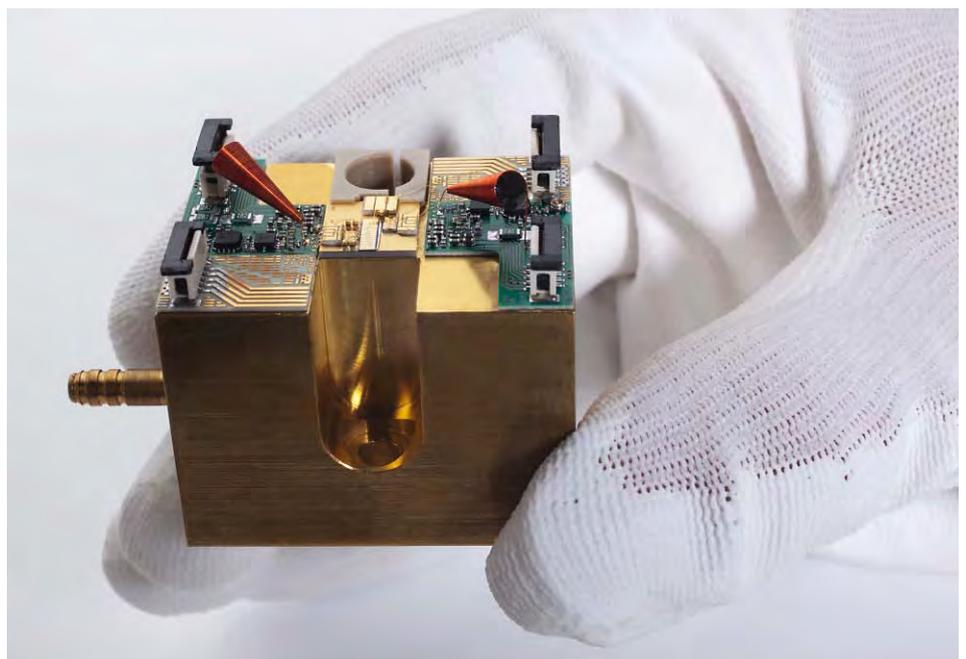
Steigender Energiebedarf und knapper werdende Ressourcen machen die Energieeffizienz zu einem der zentralen Zukunftsthemen. Neuartige Bauelemente, die beispielsweise Wind- oder Solarenergie möglichst verlustarm in nutzbare Energie für Endverbraucher umwandeln, gewinnen daher an Bedeutung. Künftig sollen mit Leistungstransistoren auf Basis von Galliumnitrid (GaN) elektrische Konversionsverluste deutlich reduziert werden. GaN-Transistoren bieten dank ihrer hohen Sperrspannungen und geringen Einschaltwiderstände ideale Voraussetzungen für verlustarme elektronische Schalter. Dem FBH ist es gelungen, die Spannungsfestigkeit auf über 1000 V zu erhöhen und dabei den elektrischen Widerstand im eingeschalteten Zustand stark zu minimieren. Gleichzeitig sind die Transistoren selbstsperrend und leiten Strom bis zu 150 A pro Bauelement – dies sind weltweite Spitzenergebnisse. Möglich werden diese Werte durch technische Optimierungen, die gezielt aufeinander abgestimmt sind: von den Halbleiterschichten, dem Transistordesign, der Herstellungstechnologie bis hin zur Aufbautechnik.

Kompakte ps-Lichtquelle mit integriertem Pulspicker

Für Anwendungen, etwa in der Material- und Bioanalytik oder Materialbearbeitung, entwickelt das FBH leistungsfähige ps-Lichtquellen mit integriertem Pulspicker. Mit einer solchen Quelle können Einzelpulse aus den hochfrequenten Pulsfolgen modengekoppelter Diodenlaser präzise selektiert werden. Herzstück des etwa faustgroßen Moduls ist ein 1 cm langer 4-Sektions-DBR-Laser (Masteroszillator). Dieser erzeugt mittels Modenkopplung sehr kurze optische Pulse mit einer Halbwertsbreite von 10 ps und einer Folgefrequenz von 4,3 GHz. Ein optisch nachgeschalteter, aus zwei Sektionen bestehender Diodenlaserverstärker dient zur Pulsselektion und Verstärkung.

Ultraschnelle GaN-Transistoren schalten dabei durch Strommodulation die erste Sektion, den Pulspicker, in nur 200 ps transparent bzw. absorbierend. In der zweiten Sektion, dem Verstärker, wird die Spitzenleistung von 1 auf 50 Watt erhöht. Dafür werden ebenfalls GaN-Transistoren genutzt, die innerhalb weniger Nanosekunden einen hohen Strom einspeisen können. Durch den Aufbau auf einer optischen Mikrobank und das umfassende Schaltungs-Know-how ist eine kompakte Quelle entstanden, mit der maßgeschneiderte Impulsfolgen im Bereich von 100 MHz bis zu einigen kHz erzeugt werden können.

▼ *ps-Lichtquelle verbindet Laser- und HF-Know-how des FBH*





Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom sichtbaren bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme und Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Kompakte atmosphärische Mikrowellenplasmaquellen mit

Niederspannungsversorgung entwickelt es für medizinische Anwendungen, etwa zur Behandlung von Hauterkrankungen.

Das FBH ist ein international anerkanntes Zentrum für III/V-Verbindungshalbleiter mit allen Kompetenzen: vom Entwurf, über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung von Bauelementen.

Seine Forschungsergebnisse setzt das FBH in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen und Technologien erfolgreich durch Spin-offs. In strategischen Partnerschaften mit der Industrie sichert es in der Höchstfrequenztechnik die technologische Kompetenz Deutschlands.

Für Partner aus Forschung und Industrie entwickelt das FBH hochwertige Produkte und Services, die exakt auf individuelle Anforderungen zugeschnitten sind. Seinem internationalen Kundenstamm bietet es Know-how und Komplettlösungen aus einer Hand: vom Entwurf bis zum lieferfähigen Modul. ■



IMPRESSUM

Herausgeber:

Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Straße 4
12489 Berlin, Tel: 030-63 92 26 26

Redaktion:

Gisela Gurr, Petra Immerz

Layout:

vitamin-a-design

Fotos:

Hintergrundbild Umschlag: STScI (NASA, ESA, R. Massey (Caltech)), S. 2: TRUMPF, Diagramme/Grafiken S. 3, 4, 5: FBH, Porträt G. Tränkle S. 3: M. Schönenberger, alle weiteren: schurian.com

02_2010

www.fbh-berlin.de/frequent