

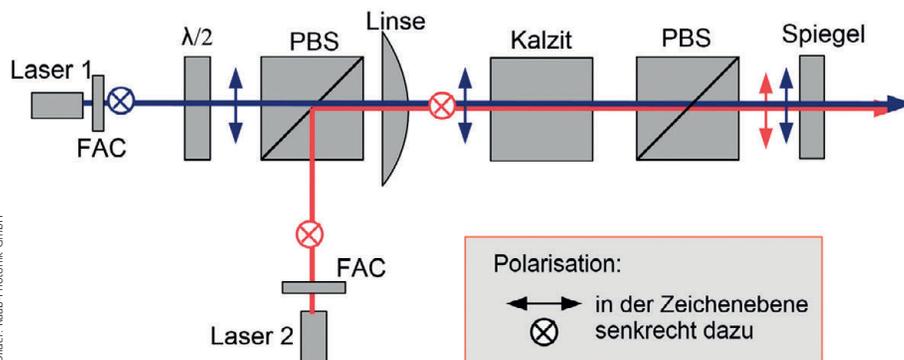
# Mehrstufige Polarisationskopplung

Volker Raab und Corinna Raab, Raab-Photonik GmbH, Potsdam

**Verdoppelte Leistungsdichten lassen sich bei Lasern in der Regel einfach mittels einer Polarisations-Strahlkopplung erzielen. Leider ist diese Kopplung nur ein Mal anwendbar, da der Strahl danach unpolarisiert ist. Wir stellen hier eine Variante vor, mit der sich die Polarisation wieder gleichrichten lässt, so dass die Kopplung mehrstufig zu einer weiteren Leistungserhöhung führen kann. Das Verfahren beruht im Kern auf einem spektralen Multiplexen und bietet einige Vorteile gegenüber möglichen Alternativen wie dichroitischen Spiegeln oder Strahlkopplung mittels Gittern. Im Folgenden werden die grundlegenden Prinzipien erläutert und der aktuelle Stand der Erprobung anhand von Messungen dargelegt.**

Um Laserquellen neue Anwendungen in der Produktion zu öffnen, sind innovative Techniken zur Erhöhung der Leistung bei unverändert hoher Strahlqualität wünschenswert. Gleichzeitig soll möglichst die Energieeffizienz steigen und direkte elektrische Modulierbarkeit höherfrequent werden. Effizienz und Modulierbarkeit sind für Halbleiterlaser gut erfüllt, aber gerade für diese ist die Absolutleistung und Leis-

ter sich unter variierenden Betriebsbedingungen wie Strom- oder Temperaturänderung stark verschieben kann. Das hier vorgestellte Verfahren besitzt einen ganz wesentlichen Vorteil gegenüber allen bisherigen Varianten der aktiven Kopplung: Anstatt jedem Laser sein eigenes Wellenlängenintervall zuzuordnen, wird jeder Einzellaser auf einen eigenen spektralen Kamm eingeschränkt. Diese individuellen Kämmen sind ineinander verschränkt und sehr breit, so dass jeder Laser auch bei stark driftender Verstärkungskurve immer Linien findet, auf die er „locken“ kann. Dadurch lassen sich wellenlängenselektive Polarisationskoppler einsetzen, die in der Lage sind, mehrere polarisierte Strahlen unter Erhalt der linearen Polarisation zu überlagern.



**Bild 1: Schema der spektralen Kopplung: Zwei Laser werden mittels eines Polarisations-Strahlteilers überlagert. Durch die Kombination eines dispersiven doppelbrechenden Kristalls wie Kalzit mit einem weiteren Polarisator und einem Rückkoppelspiegel emittieren beide Laser auf spektralen Kämmen, die ineinander verschränkt sind**

tungsdichte vielfach noch wesentlich zu gering, um attraktive Märkte der Materialbearbeitung bedienen zu können. Deshalb gibt es seit langem Bestrebungen, mehrere solche Laser zu Arrays zusammenschalten. Eine simple Bündelung erhöht dabei zwar die Leistung, dies aber zulasten der Strahlqualität. Will man dagegen mehrere Strahlen so überlagern, dass sie identische Querschnitte und Ausbreitungsrichtung besitzen, müssen sie kohärent gekoppelt werden [1,2], oder es bedarf weiterer physikalischer Freiheitsgrade, die die Einzelstrahlen unterscheidbar machen. Im einfachsten Fall koppelt man zwei Strahlen

le, trägt aber die Leistung aller Quellen gemeinsam, abzüglich Koppelverlusten. Wesentlich dabei ist, die Wellenlängen der Einzellaser zu kontrollieren. Relativ aufwendig kann jeder Laser einzeln aktiv justiert werden, um die anschließende Kopplung passiv durchführen zu können. Alternativ kann mittels externer Resonatoren dafür gesorgt werden, dass sich aufgrund einer aktiven Rückkopplung durch das wellenlängenselektive Element hindurch jeder Laser sein eigenes Optimum „sucht“. Die technische Herausforderung besteht dann darin, den Suchbereich (locking-range) des Lasers möglichst groß zu wählen, obwohl

er sich unter variierenden Betriebsbedingungen wie Strom- oder Temperaturänderung stark verschieben kann.

Das hier vorgestellte Verfahren besitzt einen ganz wesentlichen Vorteil gegenüber allen bisherigen Varianten der aktiven Kopplung: Anstatt jedem Laser sein eigenes Wellenlängenintervall zuzuordnen, wird jeder Einzellaser auf einen eigenen spektralen Kamm eingeschränkt. Diese individuellen Kämmen sind ineinander verschränkt und sehr breit, so dass jeder Laser auch bei stark driftender Verstärkungskurve immer Linien findet, auf die er „locken“ kann. Dadurch lassen sich wellenlängenselektive Polarisationskoppler einsetzen, die in der Lage sind, mehrere polarisierte Strahlen unter Erhalt der linearen Polarisation zu überlagern.

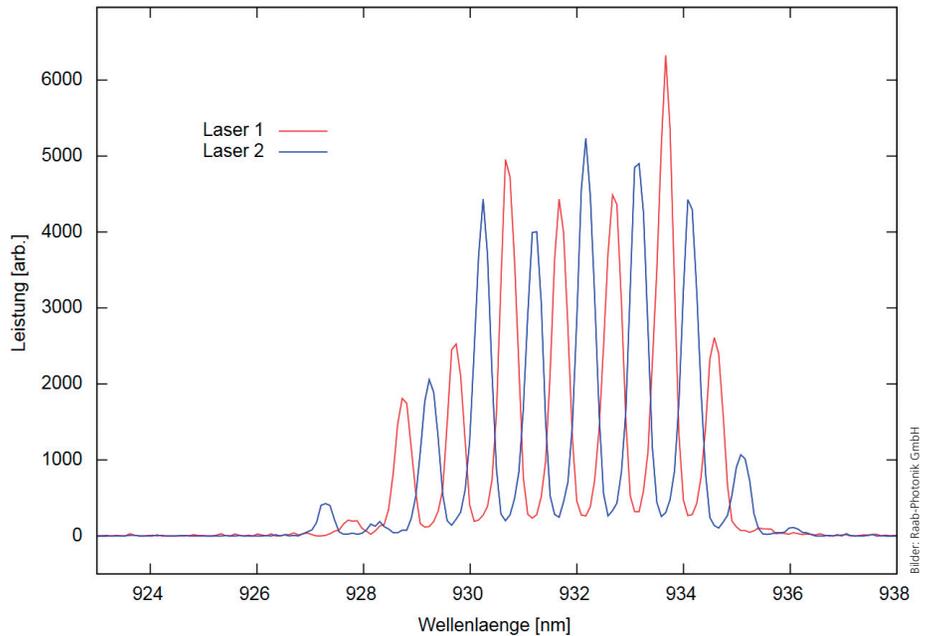
## Lösungsprinzip

Mehrstufige Polarisationskopplung als Lösungsansatz scheint zunächst den physikalischen Grundprinzipien zu widersprechen, da eine (verlustfreie) Polarisationskopplung eigentlich nur ein Mal durchgeführt werden kann und sich die Polarisation danach nicht wieder herstellen lässt, ohne die Hälfte des Lichts zu verlieren. Bei dem hier beschriebenen Verfahren werden jedoch den Lichtstrahlen jeweils individuelle Wellenlängen aufgeprägt, wodurch sich die einzelnen Strahlen unterscheiden lassen und in geeigneter Weise manipuliert werden können.

Eine graphische Darstellung des Verfahrens [5] ist in **Bild 1** für die Kopplung von zwei Lasern dargestellt. Die Strahlen zweier als gleichartig angenommener Laser (Laser1 und Laser2) werden mit je einer Linse (FAC) kollimiert. Ein Strahl durchläuft eine Phasenplatte ( $\lambda/2$ ) unter  $45^\circ$ , so dass seine Polarisation um  $90^\circ$  gedreht wird. Danach werden beide Strahlen in einem Polarisations-Strahlteiler (PBS) zu einem gemeinsamen Strahl vereinigt und

erneut kollimiert (SAC). Bis hier handelt es sich um herkömmliche Vereinigung zweier polarisierter Laserstrahlen – das Licht ist an dieser Stelle unpolarisiert. Das wesentliche optische Element ist der dann durchlaufene dispersiv doppelbrechende Kristall. Doppelbrechend heißt hierbei, dass er je nach einfallender Polarisation unterschiedliche Brechungsindizes besitzt und dispersiv bedeutet, dass sich diese Brechungsindex-Differenz mit der Wellenlänge ändert. Ein solcher Kristall, z.B. Kalzit der Dicke 1 cm, wirkt wie eine Retarderplatte unter  $45^\circ$  Einfallswinkel. Im Gegensatz zu einer  $\lambda/2$ -Platte wirkt der Kristall aber aufgrund seiner Dispersion mit variierender Wellenlänge abwechselnd als Halbwellenplatte und als phasenneutral. Es handelt sich gewissermaßen um das Gegenteil einer zero-order Phasenplatte. Dadurch kann dieser Kristall Wellenlängen und Polarisierungen unterscheiden: gekreuzt polarisiert einfallendes Licht geeigneter Wellenlängen tritt als linear polarisiertes Licht wieder aus. Bei einem 1 cm dicken Kalzit-Kristall und Licht mit 640 nm Wellenlänge beträgt der Unterschied beider Polarisierungen lediglich etwa 80 pm. Ein solcher Filter kann also zwei Laser mit einem spektralen Abstand von 0,08 nm polarisationserhaltend spektral überlagern – eine Trennschärfe, die mit dichroitischen Spiegeln völlig undenkbar ist und mit einem Gitter äußerst schwierig zu erzielen.

Damit bleibt die Frage zu klären, wie garantiert werden kann, dass beide Laser so präzise auf der jeweils günstigsten Wellenlänge emittieren. Dazu wird mittels eines Rückkoppelspiegels jeweils das Licht zu den Laserdioden rückgekoppelt, welches den Filter am besten passieren kann: der dispersive Kristall zwischen zwei Polarisatoren wirkt dabei als sogenanntes Lyot-Filter [6]. Als vorteilhaft erweist sich hierbei, dass diese Wellenlängen nicht eindeutig definiert sind, sondern eine spektrale Periodizität besitzen, die dem Doppelten der o.g. 80 pm entspricht: Jeder Laser kann also auf einem spektralen Kamm emittieren, dessen „Zinken“ einen Abstand von 0,16 nm haben. Die Laser werden somit jeweils auf einen oder mehrere dieser Spektrallinien locken, falls ihre Verstärkungsbandbreite breit genug ist. Für Halbleiterlaser stellt das in der Regel kein Problem dar. Selbst wenn die Verstärkung driftet, können neue Spektrallinien anschwingen, während andere erlöschen. Hier liegt der große Vorteil des Verfahrens gegenüber einem spektralen Locking mittels eines Beugungsgitters oder eines Volumen-Bragg-Gitters, welches jedem Laser eine eindeutige Wellenlänge zuordnet, die einer Änderung der äußeren Umstände nicht folgen kann.



**Bild 2: Die beiden Laser emittieren auf mehreren Spektrallinien innerhalb ihrer Verstärkungsbandbreite, beide Emissionen sind ineinander verzahnt**

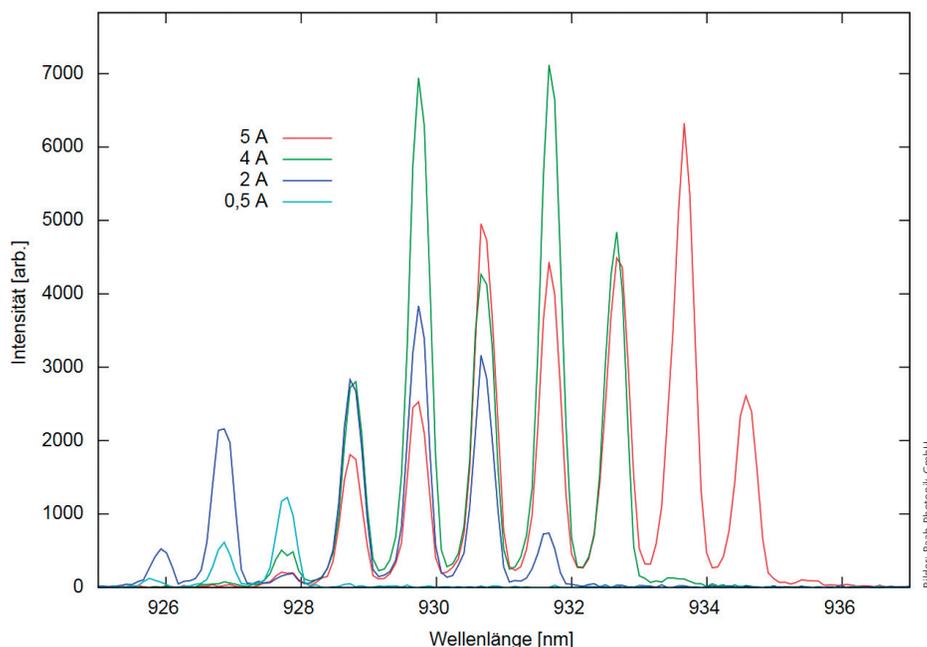
Das Verfahren kann kaskadiert werden, indem weitere Polarisations-Strahlteiler und Kristalle hinzugefügt werden. Die Kristalle einer höheren Stufe sind dabei doppelt so dick wie die einer tieferen, so dass sich die Wellenlängen-Separation halbiert.

### Bisherige Messungen

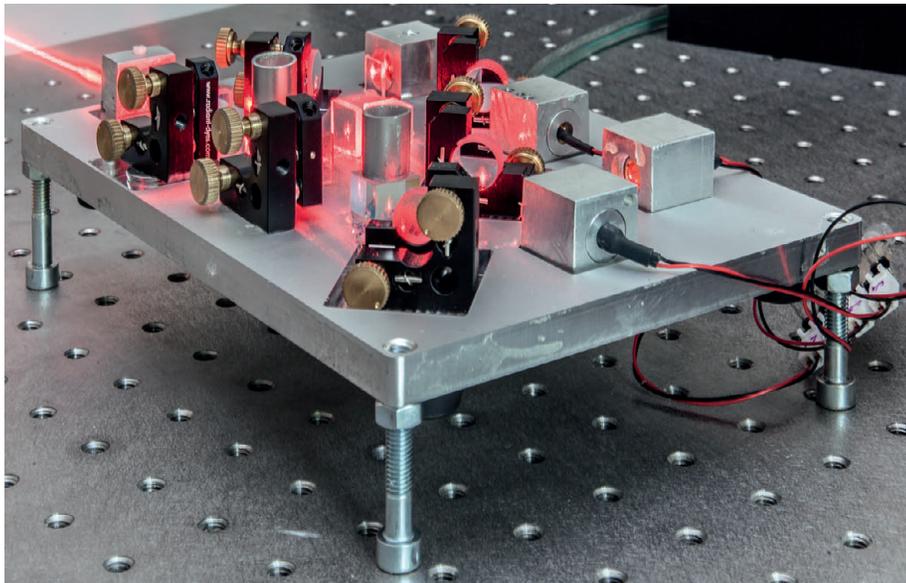
Das Verfahren wurde bereits ein-, zwei- und dreistufig bei Wellenlängen von 640 nm und 940 nm an diversen Laser-

chips getestet, darunter ridge-Emitter, Breitstreifenlaser mit und ohne spezielle Antireflex-Beschichtung, tapered Laser und Barren aus mehreren Emittieren. Außerdem wurde ein Demonstrator aufgebaut, der vier handelsübliche rote Laserdioden polarisationserhaltend koppelt. Eine Auswahl besonders markanter Messungen soll im Folgenden präsentiert werden.

Zunächst wurden an Hochleistungslasern im Infraroten diverse spektrale Messungen durchgeführt, die in **Bild 2** dargestellt sind.



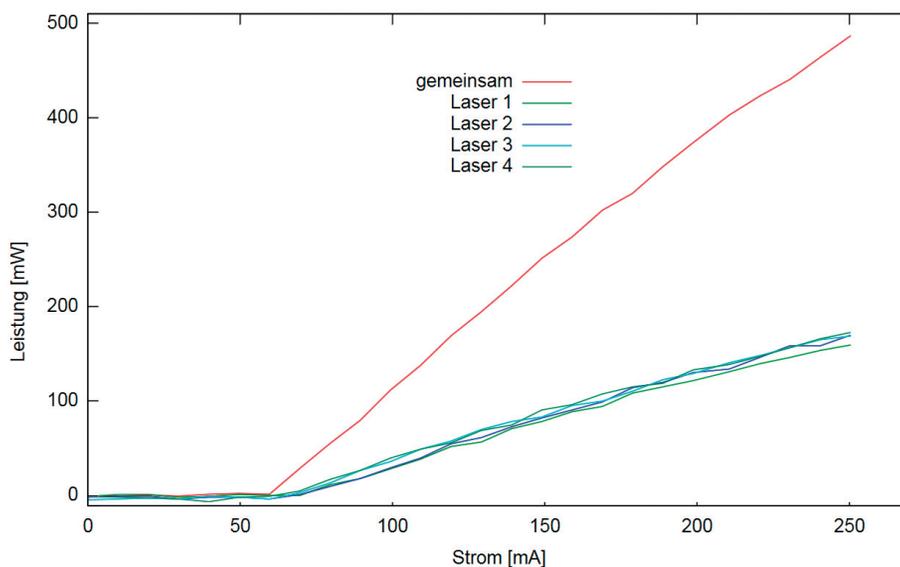
**Bild 3: Ändert sich das Verstärkungsprofil des Lasers, beispielsweise durch Leistungs- und Temperaturerhöhung, so kann der spektrale Kamm dieser Drift folgen**



**Bild 4:** Ein Labordemonstrator des Kopplungsschemas, der das Licht aus vier roten Diodenlasern von je 170 mW zu einem praktisch beugungsbegrenzten polarisierten Strahl von etwa 440 mW vereinigt

Es handelt sich um die ineinander verwobenen Spektren von zwei Lasern (rot, blau). Man erkennt zum einen, dass beide Laser multimodal emittieren, also mehrere Emissionslinien zeigen und zum anderen, dass die beiden spektralen Kämmen ineinander verzahnt sind: Linien des einen Lasers liegen in den Lücken des anderen. Betreibt man die Laser bei Strömen zwischen 0,5

und 5 A, so erwärmt sich das Halbleitermaterial, was zu einer Verschiebung zu längeren Wellenlängen führt. Beide Laser folgen dieser Verschiebung, indem sie zu anderen Emissionslinien wechseln **Bild 3**. Dabei verharrt jeder Laser auf seinem Raster, auch wenn die mittlere Wellenlänge und die Ausgangsleistung zunehmen. Koppelt man vier handelsübliche rote



**Bild 5:** Vier Einzellaser emittieren stromabhängig jeweils etwa bis zu 170 mW, die Leistung des gekoppelten Strahls beträgt knapp 500 mW bei unveränderter Strahlqualität

Laserdioden (OpNext, Typ HL63133DG-A) in einem Aufbau wie in **Bild 4**, so ergibt sich eine stromabhängige Ausgangsleistung gemäß **Bild 5**. Am Ausgang des Lasers steht ein praktisch beugungsbegrenzter Strahl mit bis zu 490 mW rotem Licht bei etwa 637 nm zur Verfügung. Aus den ebenfalls dargestellten jeweiligen Primärleistungen der vier ungekoppelten Einzellaser (172, 169, 169 und 161 mW) errechnet sich eine opto-optische Koppel-effizienz von 73%. Man erhält also eine nahezu verdreifachte Ausgangsleistung gegenüber dem originalen Diodenlaser. Dieses Licht ist unpolarisiert. Die zweite Polarisationsgleichrichtung arbeitet mit etwa 90% Effizienz, so dass ein polarisierter Strahl von 440 mW entsteht.

**Grenzen des Verfahrens**

Wie bei allen Aufbauten, in denen Diodenlaser in externen Resonatoren betrieben werden, hat die innere Strukturierung und die Auskoppelreflektivität des Halbleiterchips deutlichen Einfluss auf das Ausmaß – die sogenannte Locking-range – mit dem die emittierte Strahlung den äußeren spektralen und räumlichen Vorgaben folgt. Sehr lange Laserchips neigen generell dazu, der Strahlung ihr eigenes transversales Profil aufzuprägen. Für das spektrale Verhalten ist insbesondere die Reflektivität der Auskoppel-facetten von großem Einfluss. Sie bestimmt ganz wesentlich die locking-range, also den spektralen Bereich, in dem der Laserchip den äußeren Vorgaben folgt. Das gilt für dieses Verfahren genau so wie für alle anderen Verfahren, die durch spektrales Multiplexen die Leistung erhöhen. Vorteilhaft ist hier jedoch die bereits oben erwähnte Rasterung der spektralen Filterung: die locking-range ist nicht wirklich ein begrenzter Bereich sondern eine Vielzahl benachbarter Bereiche, die sich bei korrekter Konfiguration gegenseitig überlappen. Dadurch entschärft sich das Problem des lockings: es gibt immer eine spektrale Beeinflussung, lediglich deren Effizienz kann periodisch schwanken. In der Praxis zeigte sich, dass die bei kommerziellen Lasern übliche Auskoppelreflektivität niedrig genug ist, um auch mit geringer externer Reflektivität zwischen 4 und 10% gute Ergebnisse zu erzielen. Bei der technischen Umsetzung sind allerdings auch einige Aspekte zu berücksichtigen, die verhindern, dass es beliebig viele Verdopplungsstufen geben kann. Dazu ist zu betrachten, welche Linienbreite und Trennschärfe das Lyot-Filter selbst für ideale Laserquellen überhaupt

www.photonik.de

© AT-Fachverlag GmbH

erzielen kann. Da jeder Laserstrahl eine Restdivergenz besitzt, gibt es immer Anteile des Strahls, die das Filter nicht perfekt senkrecht durchlaufen und deshalb auf minimal benachbarten Wellenlängen oszillieren. Diese spektrale Breite ist umso größer, je länger der doppelbrechende Kristall ist. Da für höhere Kopplungsstufen zunehmend längere Kristalle benötigt werden, stößt man hier unweigerlich irgendwann an Grenzen. Dies lässt sich analytisch, experimentell und simulativ recht genau vorhersagen, so dass sich bereits vor einer praktischen Realisierung ein Optimum zwischen Laserkollimation, Kristalllänge und spektraler Staffelung finden lässt. Eine dreistufige Kopplung wurde bereits erfolgreich aufgebaut und auch eine vierte Stufe scheint bei geeigneten Diodenlasern durchaus realisierbar.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ein neuartiges Verfahren zum spektralen Multiplexen von Halbleiterlasern ermöglicht eine sehr enge Wellenlängenstaffelung deutlich unterhalb von 1 nm. Sie beruht auf dispersiv doppelbrechenden Kristallen, die eine Stabilisierung nicht auf einzelne Wellenlängen durchführt, sondern auf Kämme, die ineinander verzahnt sind. Dadurch besitzt jeder Einzellaser Flexibilität und Stabilität gegenüber thermischer Drift. Das Verfahren ist kaskadierbar und kann auf handelsübliche Laserdioden angewendet werden. Pro Stufe erhält man eine Erhöhung der Ausgangsleistung um etwa das

1,8-fache. Da jeder Laser unabhängig von allen anderen arbeitet, ermöglicht es bei geeigneter Auslegung Redundanzen gegen den Ausfall einzelner Komponenten. Die benötigten dispersiv doppelbrechenden Kristalle sind sehr leistungsfest, sie werden schon seit langem in optischen Aufbauten eingesetzt.

Bislang konnte mit dem hier vorgestellten Verfahren die Laserleistung und Leistungsdichte auf das 6-fache einer einzelnen Einheit gesteigert werden. Im aktuell präsentierten Aufbau wurden vier Laser gekoppelt und erreichten bei 640 nm annähernd 500 mW Leistung bei nahezu perfekter Strahlqualität. Für Infrarotlicht wurden acht Diodenlaserbarren zu einem Strahl mit 180 W Gesamtleistung gekoppelt. Im IR-Bereich ließ sich bisher bei maximalem Pumpstrom ein elektro-optischer Wirkungsgrad von 39,5% erzielen.

## Literaturhinweise:

- [1] A. A. Ishaaya et al., *Passive laser beam combining with intracavity interferometric combiners*, IEEE Sel. Top. Quantum Electron. 15 (2), 301 (2009)
- [2] V. Raab, R. Menzel, *Phase-locked array of 25 broad-area lasers*, Proc. SPIE 4629, Laser Resonators and Beam Control V, 24 (June 5, 2002); doi:10.1117/12.469500, ()
- [3] [http://www.rp-photonics.com/spectral\\_beam\\_combining.html](http://www.rp-photonics.com/spectral_beam_combining.html) und Referenzen darin
- [4] A. Jechow, V. Raab, R. Menzel, *High cw power using an external cavity for spectral beam combining of diode laser-bar emission*, Applied Optics, Vol. 45, Issue 15, pp. 3545-3547 (2006) [<http://dx.doi.org/10.1364/AO.45.003545>]
- [5] Patent DE102008052475A1
- [6] <https://de.wikipedia.org/wiki/Lyot-Filter>

Die Arbeiten wurden gefördert durch:



## Ansprechpartner:

Dr. Volker Raab  
Dr. Corinna Raab  
Raab-Photonik GmbH  
Amundsenstr. 10  
14469 Potsdam  
Tel.: 0331 / 588 78 16  
eMail:  
kontakt@raab-photonik.de  
Internet:  
www.raab-photonik.de



[www.photonik.de](http://www.photonik.de) ▶ Webcode 5005