

Brillante Zukunft

Mit PEARL™ setzt nLIGHT neue Maßstäbe mit fasergekoppelten Hochleistungslasermodul

Brillanz, Leistung, Zuverlässigkeit, und Flexibilität – und dies bei größtmöglicher Lebensdauer – das sind die Dinge mit denen sich Diodenlaserhersteller beschäftigen. Wenn darüber hinaus diese Eigenschaften auch im Pulsbetrieb realisierbar sind, umso besser. Die von nLight vorgestellte neue Leistungsklasse eröffnet erweiterte Möglichkeiten für zusätzliche Systemdifferenzierungen bei Industrieanwendungen. Die patentierte „nLIGHT Extended Life Technology“ definiert die Zuverlässigkeit von industriellen fasergekoppelten Diodenlasern neu.

Die Grundkonfigurationen sind optimiert für eine Vielzahl von Einsatzbereichen: Pumpen von DPSS-, Faser- und Scheibenlasern, direkte Materialbearbeitung, medizinische Anwendungen sowie Lasershow- und Displayanwendungen. Die Einzelemitter-Architektur (SE) erlaubt die spezifische Anpassung auf die jeweilige Aufgabenstellung – bei gleichzeitiger Optimierung des Preis-/Leistungsverhältnisses. Damit wird die Zukunft der Lasertechnik noch brillanter.

nLIGHT führt weiterhin die technologische Entwicklung bei Diodenlasern an, und zwar sowohl in der Materialwissenschaft bei den Halbleiterschichten als auch bei Diodenlasermodulen. Für die nächste innovative Generation industrieller Laseranwendungen sind diese beiden Komponenten unerlässlich. Das bahnbrechende Ergebnis einer langen Entwicklungsserie ist ein fasergekoppeltes Hochleistungslasermodul, das auf der Verwendung einer Einzelemitter-Architektur aufbaut. Dieser Artikel beschreibt den technologischen Hintergrund für das neue fasergekoppelte PEARL-Modul.

Mit der revolutionären Einzelemitter-Technologie ergeben sich gegenüber der Barren-Technologie entscheidende Vorteile in Bezug auf Brillanz, Leistungsskalierung, Zuverlässigkeit, Effizienz, Kostenreduktion und Flexibilität. Damit eröffnen sich neue Anwendungen, die bisher nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisiert werden konnten. PEARL wurde bereits von namhaften Industriekunden getestet, welche ihrerseits die neue Technologie für innovative Systemleistungen umsetzen konnten, um sich gegenüber ihrem Wettbewerb zu differenzieren. Die Integration des Moduls zur Systemoptimierung der jeweiligen Kundenanwendungen ist folglich der nächste logische Schritt.

Bevor wir auf die Einzelheiten dieser neuen Architektur eingehen, betrachten wir zunächst die Anforderungen und Rahmenbedingungen seitens des Marktes. Diese dienten als Anstoß für das neuartige Konzept.

Der gesamte Markt für fasergekoppelte Diodenlaser ist in hohem Maße segmentiert und beinhaltet die unterschiedlichsten Anwen-



dungen. Klassische Beispiele für den Einsatz von Diodenlasern sind das Pumpen von Lasermedien in DPSS, Scheiben und Faserlasern. Aber auch direkte Interaktionen zwischen Dioden und Materialien bilden ein großes Marktsegment. Diese Anwendungen umfassen die Oberflächenvergütung, das Schweißen, Schneiden und die Chirurgie. Hinzu kommen laserbasierte Anzeigen, Lightshows und aufwändige Laserprojektionen. Dabei stehen einige Anforderungen an die Diodenmodule allerdings auch in einem erheblichen Konflikt mit denen aus anderen Anwendungen. Aus diesen oft grundsätzlichen Unterschieden wurden über die Zeit fünf klare Trends bei fasergekoppelten Hochleistungsmodulen erkennbar:

1. Der Trend nach höherer Brillanz,
2. Der Wunsch nach immer höherer Leistung.
3. Die Notwendigkeit nach gesteigerter Zuverlässigkeit und Lebensdauer.
4. Die Forderung nach einem erhöhten Wirkungsgrad.



5. Und wie von jeher: die Forderung nach sinkenden Preisen.

Um erfolgreich in den äußerst umkämpften Marktsegmenten auch im Hinblick auf die endgültige Anwendung bestehen zu können, muss ein neues Produkt flexibel sein und möglichst alle diese Trends berücksichtigen. Die daraus resultierende Zielsetzung ist also idealerweise eine Produktplattform welche auf die verschiedensten Märkte einfach zu adaptieren ist. Die bislang eingesetzte Barrentechnologie kann alle diese Forderungen in keinem Fall gleichzeitig erfüllen. Höchste Zeit, intensiv nach einer innovativen Lösung zu suchen. Der folgerichtige Schritt: die Verwendung von Einzelemittlern! Nicht größer und komplexer, sondern kleiner und effizienter ist das Motto bei nLIGHT (Grafik1).

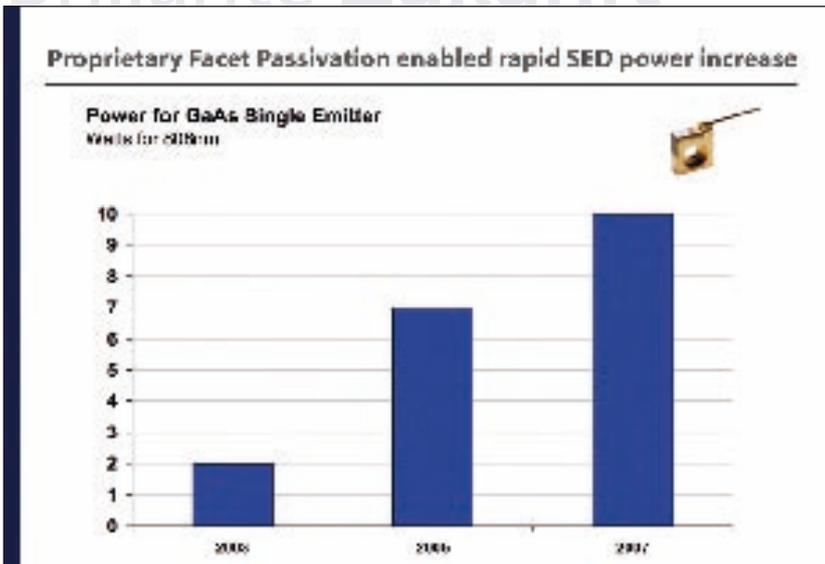
Das Außergewöhnliche bei der neuen nLIGHT-Architektur ist die Verwendung von, mittels Gold-Zinn verlöteten, Einzelemittlern mit spezieller Facettenpassivierung. Zuerst räumlich kombiniert, werden sie im Anschluss mit einem speziellen Verfahren annähernd verlustfrei in den Kern einer Einzelfaser eingekoppelt.

Dabei handelt es sich um einen grundlegend anderen technischen Ansatz als bei der bislang eingesetzten Barrentechnologie. Hier wird entweder ein Barrenarray mit einem Fiberarray verknüpft und die Ausgangsleistung in einem Faserbündel zusammengefasst, oder die Einzelemitter eines Barrens, mittels einer Kombination von Mikro-Optik und Mikro-Spiegel, räumlich überlagert und in eine Einzelfaser eingekoppelt.

Obgleich eine grundlegende Veränderung, handelt es sich bei der neuen Technologie um keine wirklich radikale Neuerung. Die Einzel-emitter-Technologie ist aber bezüglich der Zuverlässigkeit und der Fertigung von großen Stückzahlen klar im Vorteil. Allerdings haben auch Hersteller von Barrenmaterialien in der Vergangenheit neue Prozesse und Verfahren entwickelt, und diese erfolgreich im Markt etabliert. Damit kann man auch eine größere Anzahl von Barren-Einzelemittlern in Fasern einkoppeln. Auf diesem Umweg wurde – zumindest als Zwischenschritt – die benötigte, höhere Ausgangsleistung erzeugt.

nLIGHT hat das enorme Marktpotential erkannt und mit PEARL-kurzfristig Realität werden lassen. Das OEM-Modul vereint innovative Lasertechnologie mit herausragender Produktarchitektur und verkörpert gleichzeitig die Evolution von industriellen FC-Modulen. Bei intensiver Auseinandersetzung mit dieser einzigartigen SE-Architektur offenbart sich sofort die hohe Wertschöpfung dieses Designs.

Die Verwendung von Einzelemittlern führt in erster Linie zu einer unvergleichbar hohen Zuverlässigkeit und einer signifikanten Kostenreduktion. Zur Erinnerung: barrenbasierende Lösungen benötigen typischerweise 19-elementige Barren. Um die von der Industrie geforderte Zuverlässigkeit sicher zu stellen, muss das Halbleitermaterial aggressiv selektiert werden, denn nur so können potenzielle Ausfälle im späteren Betrieb verhindert werden. Fundamental betrachtet, ist das Halbleitermaterial für Barren und Einzelemitter allerdings gleich. Deshalb kann das Einzelelement eines Barrens mit dem eines Einzelemitters gleichgesetzt werden, zumindest aus Sicht der Fehlerwahrscheinlichkeit bei diesem rigorosen Auswahlprozess. Nehmen wir zur Verdeutlichung an, dass die Ausbeute bei diesem Prozess pro Emitter 95 % beträgt (willkürlich). Für einen Barren, mit einer Gesamtausbeute aller 19 Emitter, ergibt sich dann eine rein rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit von ca. 38 %. Es überrascht nicht, dass Hersteller von fasergekoppelten Barren-Modulen den Ausfall von ein bis zwei Einzelemittlern zulassen, um so den Ertrag zu verbessern. Natürlich wird dadurch die ursprüngliche Gesamtleistung eines solchen Faserarray-Elements um zirka 5 % reduziert und



die Modenstruktur des Nahfelds am Ende der Faser stark beeinflusst. Letztlich aber stellt das eine außerordentlich hohe Ausschussrate dar, die als Folge in Form erhöhter Fertigungskosten zu Buche schlagen. Im Vergleich ist die Ausbeute bei Einzelemittlern ganz erheblich höher. Auch wenn bei PEARL 19 Einzelemitter benötigt werden – um es mit dem entsprechenden Barrenprodukt vergleichen zu können – werden zwei Vorteile sofort klar: zum einen sind diese 19 Emitter immer alle gut und zum zweiten generiert das Ausschussmaterial niedrigere Kosten.

Unglücklicherweise ist das für die Barrentechnologie nicht der alleinige, prinzipielle Unterschied. Einzelemitter sind naturgemäß, wie der Name sagt, individuelle Elemente. Deshalb können sie auch körperlich voneinander getrennt verarbeitet werden. Das ist sehr wichtig, weil das Einzelelement des Barrens in eine komplexe Gesamtstruktur eingebettet ist und es deshalb beim Betrieb durch das direkt benachbarte Element belastet wird. Im Gegensatz hierzu kann ein Einzelemitter wärmeisoliert montiert und mit einem höheren Strom gefahren werden. Folge ist eine höhere Ausgangsleistung, und zwar bei gleicher Sperrschichttemperatur. Logische Konsequenz: es werden weniger Einzelemitter in einem solchen Modul benötigt, um die gleiche Ausgangsleistung zu erzeugen. Wie tatsächlich gezeigt werden konnte, sind nur 10 Einzelemitter nötig, bei sogar höherer Ausgangsleistung. Eine Erhöhung der Ausbeute auf > 60 %, bei gleichzeitiger Sicherung der Qualität, führt zu einer signifikanten Kostenreduktion. Sie ist ein wesentliches Entscheidungskriterium für den Einsatz neuer Technologien und ein weiterer Pluspunkt für wichtige Beurteilungskriterien auf der Liste von Vorteil und Nutzen der Einzelemitter-Technologie. Einzelemitter sind die ultimativen Basis-komponenten des neuen Produktes.

Die hohe Flexibilität bei der Verwendung von Einzelemittlern wird durch die Vielzahl von individuellen Konfigurationsmöglichkeiten innerhalb eines Moduls sofort erkennbar. Bei Barren hingegen muss der Betrieb aller Elemente parallel erfolgen. Die typische Strom-/Spannungs-Charakteristik eines fasergekoppelten 50-Watt-Moduls auf Barrentechnologie mit 52 Ampere und 2 Volt erfordert eine Hochstromquelle. Solche Quellen sind relativ groß, teuer und in Bezug auf den Ausgangsstrom nicht besonders stabil. Bislang wurde dies aber von der Industrie als notwendiges Übel in Kauf genommen. Mit PEARL ändert sich das nun. Bei Bedarf können Einzelemit-

ter vorzugsweise parallel oder auch seriell konfiguriert werden. Das Modul weist bei gleicher Ausgangsleistung eine völlig veränderte Strom-/Spannungs-Charakteristik auf. Bei einer Betriebsspannung von 20 Volt wird dann nur noch ein Strom von 6 Ampere benötigt. Jetzt können kompakte, effiziente, kostengünstige und rauscharme Niederstromquellen eingesetzt werden, was sich positiv auf die gesamte Betriebskostenrechnung und Systemauslegung für den Endkunden auswirkt. Die neue Architektur beseitigt also bestehende Hemmnisse bzw. Einschränkungen und liefert gleichzeitig eine größere Systemflexibilität für den industriellen Anwender.

Von jeher galt zwei Bereichen bei nLIGHT das Hauptaugenmerk: Zuverlässigkeit und Effizienz. Generell erlangt man Zuverlässigkeit durch strikte Prozesskontrolle und konstante Wachsamkeit in der Produktion. Was nLIGHT dennoch unterscheidet, ist die innovative Prozessentwicklung. Ein wesentlicher Bestandteil der patentierten nXLT-Technologie ist unter anderem die spezielle Facettenpassivierung, welche in der Laserindustrie einzigartig ist. Sie findet Verwendung bei allen Einzelemitter-Produkten, die in den fasergekoppelten Modulen integriert werden. Viele Firmen setzen alternative Techniken ein, die zwar bei Wellenlängen im Bereich von 900 nm gut arbeiten und sogar bis 800 nm effektiv angewandt werden können. Es gestaltet sich jedoch sehr schwierig, diese Passivierung über den gesamten nXLT-Bereich zu erweitern, welcher sich von 630 nm bis 2050 nm erstreckt. Mit der nXLT-Technologie wurde das „Catastrophic Optical Mirror Damage“ (COMD) praktisch eliminiert. (Grafik2).

COMD ist eine häufig auftretende und allseits bekannte Ausfallursache bei unpassivierten Komponenten. Er schränkt sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Lebensdauer in hohem Maße ein. Allerdings erfordert die Facettenpassivierung hohe Investitionen für die Entwicklung und signifikante Betriebsausgaben zur Unterhaltung des Prozesses. Deshalb ist die Amortisierung stark abhängig von der Anzahl an Einzelemittlern, die mit einem Wafer gefertigt werden (im Gegensatz zur Anzahl Barren pro Wafer). Der damit verbundene Faktor beträgt etwa 20 und favorisiert klar die Verwendung von Einzelemittlern. Grundsätzlich ist diese Passivierung jedoch auch bei Barren anwendbar. nLIGHT entwickelt hierzu ebenfalls die erforderliche Prozesstechnologie. Der tatsächliche Einsatz rechnet sich aber auch dort nur über

einen sorgfältigen Kosten-/Nutzenvergleich und nur bei hohen Stückzahlen.

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Facettenpassivierung ist die Leistungssteigerung der Einzelemittler über das übliche COMD-Limit hinaus. Dies soll bei gleichbleibend hoher Zuverlässigkeit und erweiterter nutzbarer Lebensdauer erreicht werden. Bei typischen barrenbasierenden Produkten wird die Lebensdauer mit mehr als 10.000 Stunden angegeben. Bei Einzelemittlerdioden werden von Herstellern mehr als 100.000 Stunden genannt. Bei den 7-Watt-Dioden bei 808 nm von nLIGHT wurden mehr als 300.000 h MTF (Mean Time To Failure) demonstriert. Dies ist natürlich ein außerordentlicher Vorteil bei der Verwendung von Einzelemittlerdioden und eine Steigerung der Lebensdauer um mehr als das 10-fache.

Effizienz ist der zweite Bereich, durch den sich nLIGHT ausgezeichnet hat. Eine spezielle Firmeninitiative hat zum Ziel, den elektrischen-zu-optischen Wirkungsgrad (E-O) bei allen Wellenlängen beträchtlich zu erhöhen, und zwar im gesamten Bereich von 630 nm bis 2050 nm. Finanziell unterstützt wurde dies durch das amerikanische SHEDs (Super High Efficiency Diodes) Programm, an dem nLIGHT viele Jahre aktiv teilgenommen hat. Als Ergebnis wurden kürzlich >70 % E-O-Effizienz bei 976 nm unter Raumtemperatur demonstriert (Grafik3). Obwohl das Hauptinteresse von SHEDs Materialien um 980 nm galt, konnte nLIGHT das erworbene Wissen auf den gesamten Wellenlängenbereich von 630 nm bis 2050 nm übertragen und anwenden. Die Effizienz bei fasergekoppelten Modulen wird nicht nur durch die elektrisch-zu-optische Effizienz des Halbleitermaterials bestimmt, sondern auch durch die Funktion der optisch-zu-optischen (O-O) Effizienz, die man in einem solchen Bauteil realisieren kann. Dies beschreibt das Verhältnis der Summe des Lichts aus den Facetten der Einzelemittler, zum Licht aus dem distalen Ende der Faser.

Beim 50-Watt-Modul von nLIGHT bei 808 nm beträgt die E-O Effizienz typisch > 55 %. Im Vergleich dazu erreicht die E-O Effizienz eines barrenbasierenden Produktes in herkömmlicher Bauweise typischerweise 40 %. Zu beachten ist, dass bei Verwendung eines PEARL-Moduls die Verlustwärme um > 50% reduziert wird. (Grafik 4).

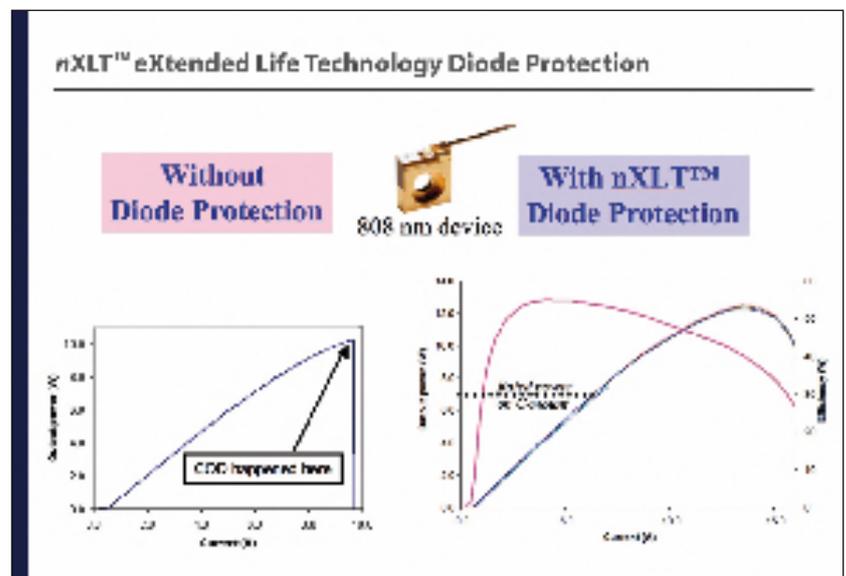
Einen letzten wichtigen Grund bei der Betrachtung der Systemeffizienz – gerade für Kunden, die Verstärkungsmedien pumpen – gibt es noch: die Verschiebung der Pumpwellenlänge näher zur Laserwellenlänge hin.

Damit können Quantendefekte reduziert, thermische Linsenbildung im Verstärkungsmedium reduziert, und als Folge die O-O Effizienz beim Konvertieren von Pumpphotonen in Laserphotonen erhöht werden. Beispiele hierzu sind 880 nm bei Vanadat (Nd:YVO4), bzw. 885 nm bei Neodym-YAG (Nd:YAG), oder 1,9 µm bei Holmium-YAG (Ho:YAG). Alle diese Wellenlängen sind bei nLIGHT erhältlich und wurden bereits eindrucksvoll in fasergekoppelten Hochleistungslasermodulem demonstriert. nLIGHT bietet damit den Kunden eine weitere Option mit weniger Zwängen und Einschränkungen, wie sie bei der traditionellen Barrentechnologie vorherrschen.

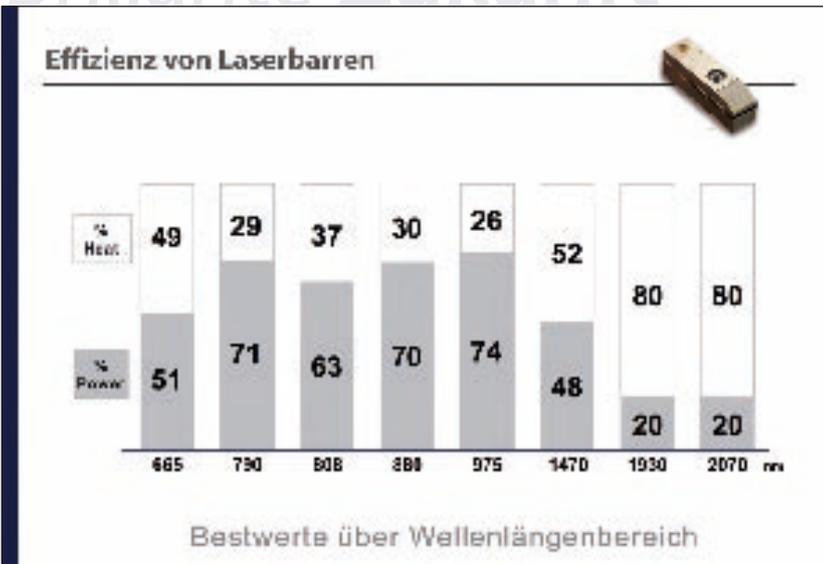
Verbindungstechnik mit Gold-Zinn-Hartlot-Anwendungen fordern einen flexibleren Laserbetrieb. Ein entscheidender Aspekt des nLIGHT-Designs ist die Verwendung von Gold/Zinn (AuSn-Bonding) als Verbindungsmaterial. Das ist zwar keine wirkliche Neuerung in der Diodenlaserindustrie, denn Hersteller von Breitstreifen-Einzelemittlern verwenden diese Technik seit Jahren mit Erfolg. Auch Barrenhersteller ziehen neuerdings nach und machen sich die höhere Stabilität und Zuverlässigkeit des Bondings über die Zeit zu Nutze. Traditionell wurde Indium als Bondmaterial verwendet. Dies führte jedoch dazu, dass sich die Barreneigenschaften über die Zeit nachteilig veränderten (smile, etc.) und das Indium in benachbarte Materialien abwanderte. Einige Barrenhersteller setzen nach wie vor Indium ein, da es sich relativ einfach verarbeiten lässt.

Die generelle Einführung des Gold-Zinn-Lötens bei der Barrentechnologie gestaltet sich immer noch schwierig. Ein Grund hierfür ist die Barrenbreite, die in der Regel 100 mm beträgt. Beim Einschalten einer Diode erwärmt sie sich und die Wärmesenke. Sobald unterschiedliche Materialien zueinander in direktem Kontakt stehen und eine relative Temperaturänderung erfahren, führen deren unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten zu Spannungen und Stress im Material, und damit zu einem Ausdehnen oder Zusammenziehen. Dabei ist die Größenordnung des stress- bzw. spannungsbedingten Verzugs materialbedingt sehr unterschiedlich.

Gutmütige Lötmittel wie Indium sind in der Lage diesen Verzug vollständig zu absorbieren. Hartlote hingegen, wie zum Beispiel Gold-Zinn, besitzen diese verträgliche Eigenschaft nicht. Wenn der Verzug zu groß wird, muss etwas nachgeben – und das ist in der Regel der Barren selbst: er bricht. Mit < 0,5 mm besitzen Einzelemittler eine geringere Breite (verglichen mit Barren etwa 200 mal



Brillante Zukunft



kleiner) und sind deshalb effizienter mittels Hartlot zu verbinden. Ganz wesentlich und noch wichtiger ist allerdings, dass durch diese Verbindungsart die Fähigkeit des Pulsbetriebes optimiert wird. Dies stellt einen überzeugenden Vorteil gegenüber barrenbasierenden Produkten dar.

Repetierendes Pulsieren heizt und kühlt das Material in Folge auf und ab und führt zu wiederholtem Stress im Material. Die Einzelemittler-Architektur von nLIGHT übersteht diese Betriebsart nachweislich ohne Probleme. Mehr noch: Wie nLIGHT zeigen konnte, sind Leistungsfähigkeit und Lebensdauer im gepulsten Betrieb identisch mit denen des Dauerstrichbetriebs. Damit liegt es erstmalig in der Hand des Anwenders zu entscheiden, was die beste Betriebsart für die jeweilige Anwendung ist (und nicht was besser für die eingesetzte Laserquelle ist).

Über die hier aufgeführten Vorteile hinaus können jetzt bezüglich Systemflexibilität noch zusätzliche Konfigurationen realisiert werden, die vorher überhaupt nicht denkbar waren. Zum Beispiel ist es nun möglich, ein einzelnes Lasermodul mit verschiedenen Wellenlängen zu bestücken.

Die weiteren Konfigurationen sind vielfältig:

1. eine fundamentale Wellenlänge mit zusätzlichem Pilotstrahl,
2. zwei unterschiedliche Wellenlängen,
3. zwei fundamentale Wellenlängen mit Pilotstrahl,
3. zehn verschiedene Wellenlängen, oder
4. eine beliebige Anzahl dazwischen.

Zehn fundamentale Wellenlängen in einem einzelnen Modul unterzubringen, könnte zu interessanten Anwendungen in der Spektroskopie oder Bio-Instrumentierung führen. Darüber hinaus könnten alle Wellenlängen einzeln adressiert werden, was die Flexibilität noch weiter steigert.

Eine andere Möglichkeit ist die genaue Abstufung der Ausgangsleistung, entsprechend den Schritten der Leistung des verwendeten Einzelemitters. So kann die genaue Leistungsanforderung seitens der jeweiligen Anwendung innerhalb von wenigen Watt frei gewählt und festgelegt werden. Damit erzielt man eine sehr kostengünstige und effiziente Lösung, bei der die signifikante Leistungs-drosselung – dem so genannten „Derating“ – des Moduls entfällt. Nachteilig beim „Derating“ ist, dass die E-O Effizienz wesentlich schlechter ausfällt und die Kosten hierfür vom Kunden getragen werden.

Mit der Vorstellung des neuen Produktes von nLIGHT weisen alle hier ausführlich besprochenen Gründe auf eine Veränderung des Marktes für fasergekoppelte Hochleistungsdiodenlasermodule hin. Darüber hinaus werden – aufgrund der unvergleichlich hohen Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit, Kosten und Flexibilität – viele neue Anwendungen erkennbar. Diese sind: Rückprojektions-TV (RP-TV), Hochleistungsdisplays, Photodynamische Therapie (PDT), sowie das optische Pumpen von Scheibenlasern, Hochleistungs-Faserlasern, das ultrakompakte Pumpen von Festkörperlasern allgemein sowie die direkte Materialbearbeitung mit Diodenlasern.

Die Produktarchitektur ermöglicht maßgeschneiderte Kundenlösungen bei gleichzeitiger, äußerst rationaler Fertigung und liefert damit wesentliche Wettbewerbsvorteile für den Endkunden. Letztlich ausschlaggebend für den Einsatz in modernen Industrieanwendungen ist jedoch das Verhältnis von hoher Leistungsfähigkeit zu einem extrem günstigen Preis.

Autoren: Ingolf Dückminor, Keith Kennedy, nLIGHT Corporation

www.nlight.net

