

Intensive Lichtpulse nach Maß

GÜTEGESCHALTETE LASER: TYPEN UND EIGENSCHAFTEN

Gütegeschaltete Laser erzeugen Lichtpulse hoher Intensität. Es gibt sie in den verschiedensten Versionen, die in sehr unterschiedlichen Parameterbereichen arbeiten können. Entsprechend vielfältig sind die Anwendungsmöglichkeiten.

RÜDIGER PASCHOTTA

Das Güteschalten (>Q switching<) ist eine häufig verwendete Technik zum Erzeugen intensiver kurzer Lichtpulse mit Lasern. Bei manchen Anwendungen (etwa »range finding<) steht die kurze Pulsdauer im Vordergrund, bei anderen (etwa im Zusammenhang mit der Materialbearbeitung) eher die hohe Pulsenergie und die Spitzenleistung – mitunter auch die durchschnittliche Leistung. Während die erzeugten Pulse typischerweise einige bis einige hundert Nanosekunden dauern, variiert die Pulsenergie zwischen einigen Nanojoule und vielen Millijoule; im Extremfall ist sie noch höher. Je nach Anforderungen können unterschiedlichste Arten von gütegeschalteten Lasern zur Anwendung kommen.

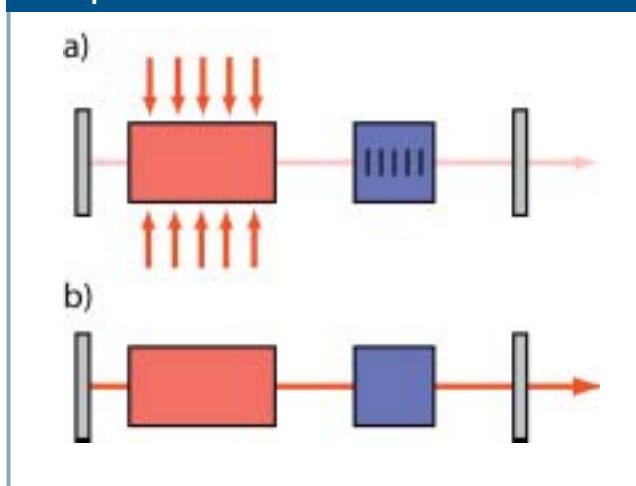
Aktives und passives Güteschalten

Das Prinzip des Güteschaltens besteht darin, in einer ersten Phase eine gewisse Energiemenge in einem Lasermedium zu speichern und diese Energie in einer zweiten Phase dann in Form eines kurzen Pulses abzurufen. Beim aktiven Güteschalten (siehe **Bild 1**) werden diese beiden Phasen dadurch definiert, dass anfangs die Lasertätigkeit durch einen Modulator (optischen Schalter) im Laserresonator unterbunden wird, welcher zunächst hohe optische Verluste verursacht. Dann werden diese Verluste – von außen gesteuert –

schlagartig reduziert. Ein wenig Fluoreszenzlicht vom Lasermedium, welches zufällig in Richtung der Strahlachse emittiert wurde, wird nun bei jedem Resonatorumlauf deutlich verstärkt, weil die Verstärkung pro Umlauf deutlich höher ist als die Verluste. Hierbei steigt die optische Leistung im Resonator, und demen-

Das Lasermedium muss die Fähigkeit besitzen, eine nennenswerte Energiemenge über eine gewisse Zeit (wenigstens einige Mikrosekunden, besser Millisekunden) zu speichern, weswegen für das Güteschalten weder Halbleiter noch Gase wie CO_2 , sondern praktisch immer Festkörper als Lasermedien verwendet werden. Als

Prinzip des aktiven Güteschaltens



1 a) Pumpphase: Das Lasermedium (rot) wird gepumpt, während die Lasertätigkeit durch hohe Verluste am Modulator (blau) unterbunden wird. **b) Pulsphase:** Nachdem die Modulatorverluste stark reduziert wurden, wird ein kurzer Lichtpuls erzeugt, welcher einen erheblichen Teil der gespeicherten Energie extrahieren kann

sprechend die ausgekoppelte Leistung, exponentiell über viele (typischerweise Hunderte) Umläufe an, bis der inzwischen sehr stark gewordene Puls dem Lasermedium einen erheblichen Teil der dort gespeicherten Energie entnommen hat. Danach fällt die Laserleistung wieder steil ab, und ein neuer Zyklus kann beginnen.

Die Pumpquelle kann entweder selbst gepulst betrieben werden (etwa als Blitzlampe) oder auch kontinuierlich, was bei Diodenlasern oft (aber nicht immer) der Fall ist.

Güteschalter verwendet man häufig akustooptische Modulatoren (AOM), die im eingeschalteten Zustand hohe Verluste durch Beugung in den Strahl erster Ordnung verursachen, der aus dem Resonator gelenkt wird.

Elektrooptische Modulatoren (EOM) kommen ebenfalls infrage; sie benötigen keine Hochfrequenz-Anregung, dafür aber recht hohe elektrische Spannungen. Sie sind potenziell schneller als die AOM.

Die Schaltzeit darf erheblich größer sein als die Pulsdauer, da der Pulsaufbau

viele Resonatorumläufe benötigt; zu langsame optische Schalter können allerdings die Effizienz und Stabilität der Pulserzeugung beeinträchtigen.

Beim passiven Güteschalten wird der Modulator durch einen sättigbaren Absorber ersetzt. Dieser erzeugt zunächst ebenfalls hohe Verluste, die allerdings durch die Laserverstärkung überkompensiert werden können, sobald ausreichend Energie im Lasermedium gespeichert ist. Sobald die Laserleistung einen gewissen Wert erreicht, wird die Absorption stark gesättigt, sodass nun plötzlich die Differenz von Verstärkung und Verlusten stark zunimmt und die Leistung sehr schnell ansteigt, bis dem Lasermedium wiederum ein Großteil der gespeicherten Energie entzogen ist und die Leistung wieder abfällt. Da der sättigbare Absorber als ein quasi automatisch betätigter Schalter fungiert, vereinfacht sich der Aufbau erheblich: Ein elektronischer Treiber, wie er etwa für einen AOM oder EOM benötigt wird, entfällt, und der Aufbau kann auch kompakter werden. Allerdings können die Pulse nun nicht mehr nach Bedarf abgeru-

fen werden. Die Pulswiederholrate wird bestimmt durch die Pumpleistung, die sättigbare Absorption und andere Parameter.

Als sättigbare Verstärker dienen oft dotierte Kristalle – für 1- μm -Laser (etwa Nd:YAG bei 1064 nm) häufig Cr:YAG, in dem Chrom-Ionen die Absorption verursachen und im angeregten Zustand nicht mehr absorbieren. Für kleinere Leistungen können auch sättigbare Halbleiterspiegel (SESAMs, semiconductor saturable absorber mirrors) eingesetzt werden.

Wie kurz, wie intensiv?

Durch eine geeignete Auswahl des Lasermediums und die Einstellung diverser Laserparameter können die Pulsparameter von gütegeschalteten Lasern, insbesondere Pulsdauer und Pulsenergie, in sehr großen Bereichen variiert werden.

Die Pulsdauer ergibt sich als ein kleines Vielfaches der Resonator-Umlaufdauer, dividiert durch die Nettoverstärkung vor dem Pulsmaximum. (Der Leistungsabfall nach dem Maximum kann auch langsamer sein als der Pulsaufbau, wenn die Resona-

KONTAKT

RP Photonics Consulting GmbH,
CH-8002 Zürich,
Tel. 00 41 /44 /2 01 02 60,
Fax 00 41 /44 /2 01 02 59,
www.rp-photonics.com

torverluste gering sind; aber meist entstehen in etwa symmetrische Pulse, und die genannte Regel gilt.) Für Resonatorlängen von 5 bis 50 cm und Nettoverstärkungen von 5 bis 20 Prozent pro Umlauf erhält man Pulsdauern von zirka 6 bis 300 ns. Mit sehr kurzen Resonatoren (Mikrochip-Lasern, siehe unten) können Pulsdauern deutlich unterhalb einer Nanosekunde erreicht werden. Bemerkenswerterweise hängt die Pulsdauer praktisch nur von Resonatorlänge und Verstärkung ab, nicht dagegen von den Eigenschaften des Lasermediums wie dem Sättigungsverhalten.

Die Pulsenergie entspricht (abgesehen von einem gewissen Prozentsatz von ▶

► Verlusten) der dem Verstärkungsmedium entnommenen Energie. Bei aktivem Güteschalten kann in der Regel ein erheblicher Teil der vor dem Pulsaufbau im Lasermedium gespeicherten Energie entnommen werden und ist dann einfach abschätzbar. Bei passivem Güteschalten kann die extrahierte Energie je nach Absorber auch deutlich geringer sein. Man erhält diese Abnahme der gespeicherten Energie dann am einfachsten als die Abnahme der Verstärkung multipliziert mit der Sättigungsenergie des Lasermediums. Letztere ergibt sich als Produkt von Sättigungsfluenz und Modenfläche im Lasermedium. Die Sättigungsfluenz wiederum ist eine Materialkonstante und errechnet sich aus der Photonenenergie des Laserübergangs dividiert durch den Emissionswirkungsquerschnitt (bei Drei-Niveau-Lasermedien dividiert durch die Summe von Emissions- und Absorptionsquerschnitt). Deswegen erhält man bei passivem Güteschalten hohe Pulsenergien für kleine (nicht etwa große) Wirkungsquerschnitte, für große Modenflächen im Lasermedium und für eine starke Verstärkungsreduktion. Letztere ist bei passivem Güteschalten meist zirka doppelt so groß wie die Verlustreduktion (Modulationstiefe) des Absorbers, wächst also mit zunehmender sättigbarer Absorption. Das Maximum wird von der erreichbaren Verstärkung limitiert, und die Pulsenergie ist dann ähnlich wie beim aktiven Güteschalten.

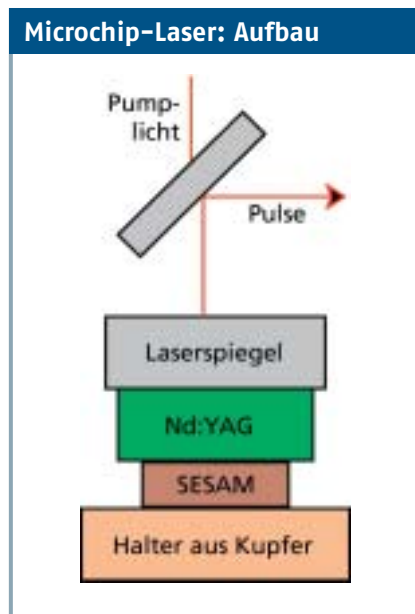
Die Pumpleistung beeinflusst die Pulsparameter (Dauer und Energie) oft nur marginal und bestimmt im Wesentlichen nur die Pulswiederholrate.

Güteschaltete Laser: die Typen

Die oben genannten Abhängigkeiten erklären, warum unterschiedliche Arten güteschalteter Laser so unterschiedliche Pulse erzeugen. Für konventionelle Laserresonatoren mit Nd:YAG-Laserkristallen oder ähnlichen erhält man Pulsdauern von typisch 2 bis 200 ns und Pulsenergien meist zwischen 0,1 und 10 mJ – mit großen Modenflächen und hoher Pumpleistung auch mehr. Mit dem ebenfalls gebräuchlichen Nd:YVO₄ mit seinem extrem hohen Emissionswirkungsquerschnitt werden die Pulsenergien bei aktivem Güteschalten sehr ähnlich (falls die Verstärkung für den Modulator nicht zu hoch wird), bei passivem Güteschalten mit glei-

chem Absorber dagegen erheblich kleiner.

Soll die Pulsenergie noch größer werden, ist kontinuierliches Pumpen oft nicht mehr praktikabel, da die nötige Pumpleistung in etwa der Pulsenergie dividiert durch die Fluoreszenzlebensdauer ent-



2 Mikrochip-Laser mit Halbleiterabsorber (SESAM). Das Verstärkungsmaterial kann beispielsweise auch Er:Yb:Glas sein (für 1535 nm Wellenlänge). Die erzeugten Pulse werden mit einem dichroischen Spiegel vom Pumplicht abgetrennt

sprechen würde. Gepulste Pumpquellen wie Quasi-cw-Diodenstacks oder Blitzlampen erlauben dagegen hohe Pulsenergien bei niedrigen Repetitionsraten und deswegen noch moderaten Durchschnittsleistungen.

Wesentlich kürzere Pulsdauern, zum Teil weit unterhalb einer Nanosekunde, erhält man mit Mikrochip-Lasern (Bild 2), die sich durch sehr kurze Resonatoren ohne Luftstrecken auszeichnen. Dies ermöglicht beispielsweise Anwendungen beim hochauflösenden »range finding« mittels Laufzeitmessungen. Mit passivem Güteschalten wird der Aufbau recht kostengünstig und kompakt. Relativ augensicher werden solche Laser, wenn sie etwa mit Erbium-dotiertem Glas im 1,5-µm-Bereich betrieben werden, obwohl selbst hier die Pulsenergien für das Auge schnell problematisch werden. Im Allgemeinen liefern Mikrochip-Laser eher kleine Pulsenergien, da ihre Resonatoren nicht mit zu großen Modenflächen arbeiten. Dies ermöglicht andererseits den Einsatz von Laserdioden mit relativ geringen Leistun-

gen als Pumpquellen.

Auch Faserlaser können güteschaltet werden. Hier führen die langen Resonatoren jedoch zu relativ langen Pulsen, und die Pulsenergie wird durch verschiedene Umstände stark limitiert: Die Modenfläche ist recht klein (selbst mit »Large Mode Area Fibers«), und die Pulsfluenz (Energie pro Fläche) wird häufig durch die Standfestigkeit der Faser begrenzt, in anderen Fällen durch die große Verstärkung, die selbst bei gutem Modulator (oder starkem sättigbaren Absorber) zu Energieverlust wegen parasitärer frühzeitiger Lasertätigkeit oder durch ASE (Amplified Spontaneous Emission) führen kann.

Bei schmalbandigem Betrieb drohen zusätzlich Effekte von Nichtlinearitäten der Faser. Also sind Faserlaser nicht die am besten geeignete Technologie für höchste Pulsenergien, obwohl mehrere Millijoule mit optimierten Fasern erreicht werden, im Extremfall sogar deutlich über 10 mJ (allerdings mit reduzierter Strahlqualität und großer Linienbreite). Andererseits können Faserlaser sehr effizient hohe Durchschnittsleistungen erzeugen. Bei limitierter Pulsenergie bedeutet dies eben sehr hohe Repetitionsraten (zum Beispiel 100 kHz), was für Anwendungen in der Materialbearbeitung gewünscht sein kann.

Geometrisch gesehen quasi das extreme Gegenstück zu Faserlasern sind Scheibenlaser (thin disk lasers) mit einem sehr dünnen Lasermedium. Weder hohe Durchschnittsleistungen noch Multi-Millijoule-Pulsenergien mit bester Strahlqualität sind hier ein Problem. Dagegen führt die relativ geringe Verstärkung zu eher langen Pulsen, und die Auswahl an Wellenlängen ist im Wesentlichen auf den 1-mm-Bereich festgelegt. ■

Fazit: Die Vielfalt zählt

Die Anwendungen güteschalteter Laser stellen verschiedene Forderungen an Pulsenergie und -dauer, Wellenlänge und Strahlqualität. Aktives oder passives Güteschalten, eine große Auswahl an Lasermedien sowie unterschiedliche Resonatorbeschaffenheit sorgen für eine Technologie-Vielfalt, die diese Forderungen erfüllen kann.

AUTOR

Dr. RÜDIGER PASCHOTTA ist Gründer und Geschäftsführer von RP Photonics Consulting in Zürich.