

Akusto-optische Modulatoren im Hochleistungslaserbereich

Bernhard Wondra, AMS Technologies AG, Martinsried

Weiterentwicklungen im Bereich akusto-optischer Modulatoren (AOM) reduzieren Schaltzeiten und verbessern die Beugungseffizienz. AOM sind Schlüsselkomponenten für Hochleistungslaser, speziell im Hinblick auf Anwendungen der Materialbearbeitung. Immer kürzere Schaltzeiten, kompaktere Bauweise und höhere Laserleistungen sind die Ansprüche, welche Modulatoren in den neuesten Lasersystemen erfüllen müssen.

Eine der Voraussetzungen für Materialbearbeitung per Laserstrahl ist die Erzeugung sehr hoher Intensitäten direkt auf der Werkstoffoberfläche. Material soll geschmolzen oder sogar instantan verdampft werden, wofür auf kleinster Fläche hohe Laserleistung zu bündeln ist. Der CW-Betrieb vieler Festkörperlaser ist nicht ausreichend, um



Bild 1: Aufbau eines AOM

das benötigte Leistungsniveau zu erzielen. Anders der gepulste Betrieb: Die im Laserresonator über längere Zeit angehäufte Energie wird in wenigen Nano- bis Mikrosekunden als Laserpuls mit Pulsspitzenleistungen von mehreren Watt oder Kilowatt emittiert. Für den gepulsten Betrieb schaltet man aktiv die Verluste im Resonator bzw. die Resonatorgüte. Bei niedriger Güte, d.h. hohen

Verlusten, stoppt die Laseremission und die im Laserkristall gespeicherte Energie (die Besetzungsinversion) steigt; bei hoher Güte bzw. niedrigen Verlusten setzt die Laseremission ein und leert die im Kristall gespeicherte Energie. Akusto-optische Schalter, unter anderem sogenannte Güteschalter, erfüllen diese Funktion: Sie beugen den Laserstrahl bei Bedarf von der Resonatorachse weg und erhöhen die Verluste. Bei Einbau innerhalb des Resonators spricht man von einem Güteschalter oder Q-Switch, bei Verwendung des fast gleichen Produktes außerhalb des Resonators von einem AOM.

Prinzipieller Aufbau

Ein AOM besteht aus einem transparenten optischem Medium, z.B. Quarzglas oder Kristall, einem daran befestigtem Piezoelement sowie einem Schallabsorber (**Bild 1**). Falls kein externes Spannungssignal auf das Piezoelement gegeben wird, ist das optische Medium transparent und hat keine optische Wirkung. Legt man aber ein Hochfrequenz-Spannungssignal an das Piezoelement an, werden im Medium Vibrationen und damit Ultraschallwellen erzeugt. Beim Durchlauf der Schallwelle durch das Medium entstehen periodische Dichteänderungen und damit eine Brechzahländerung; ein bewegtes, optisches Gitter wird generiert. Die Gitterkonstante berechnet sich aus dem Verhältnis von Schallgeschwindigkeit im Medium und der Ultraschallfrequenz; typische Werte für die Gitterkonstante liegen im Bereich von 20 bis 100 μm . Auf der gegenüberliegenden Seite des Mediums verhindert der Schallabsorber Reflexionen der Schallwelle oder stehende Wellen.

Trifft ein Laserstrahl nahezu senkrecht auf dieses Gitter, wird es gemäß der Bragg-Bedingung gebeugt (**Bild 2**). Der Ablenkwinkel zwischen der nullten und der ersten Beugungsordnung entspricht dem doppelten Braggwinkel; bei 1064 nm und 80 MHz ergibt sich z.B. ein Ablenkwinkel in der Größenordnung von 20 mrad. Dies genügt, um die Verluste hinreichend zu erhöhen und die Laseremission zu stoppen. Die Geschwindigkeit des Schaltens ist festgelegt durch die Schallgeschwindigkeit im Medium einerseits und den Laserstrahldurchmesser am Ort des Gitters andererseits. Kleine Schaltzeiten von 10 ns sind durch passende Fokussierung des Laserstrahls (unter 100 μm) in den AOM erreichbar, sofern die Leistungsdichte im Fokus nicht die maximal zulässigen Werte des optischen Mediums überschreitet. Wie viel Laserleistung gebeugt wird, hängt von der HF-Leistung ab. Neueste AOM-Modelle lenken bis zu 95% der eingestrahlenen Laserleistung in die erste Beugungsordnung. Viele Festkörperlaser stoppen die Laseremission bereits bei deutlich niedrigeren Verlusten und benutzen daher die nullte Beugungsordnung des Güteschalters für die Pulserzeugung. Hingegen besitzen Faserlaser eine sehr hohe Verstärkung. In diesem Fall reichen die durch den Güteschalter erzeugten Verluste nicht aus, um die Laseremission vollständig zu stoppen. Selbst bei maximal erlaubter HF-Leistung befindet sich noch etwas optische Leistung im ungebogenen Strahl und führt zu Laseraktivität zwischen den geplanten Pulsen; die maximal erzielbare Pulsspitzenleistung sinkt. Deswegen verwendet man bei Faserlasern für den Resonatorbetrieb die erste Beugungsordnung des Modulators und koppelt diese in die Resonatormode ein. Liegt keine HF-Leistung an, so befindet sich praktisch kein Laserlicht im gebeugten Strahl, die Emission stoppt. Erst beim Anlegen von HF-Leistung ist Laserleistung im gebeugten

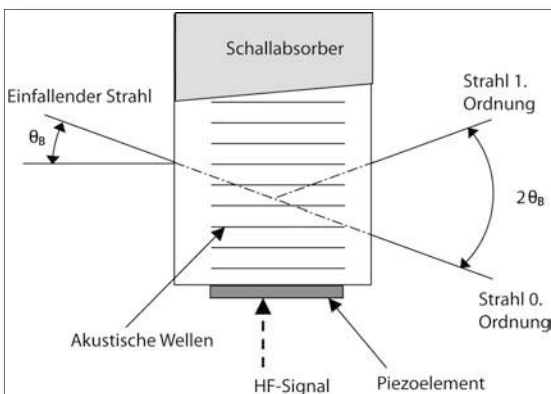


Bild 2: Funktionsweise

Strahl vorhanden; die Laseraktivität startet und ein Laserpuls wird erzeugt.

Alternativ kann der AOM extern, d.h. als stufenloser Schalter, ohne Einfluss auf den Resonator benützt werden. Die analoge Modulation der HF-Leistung führt direkt zur Modulation der Laserleistung im gebeugten Strahl. Schnelle Regelungen der Laserleistung können so bequem realisiert werden.

Pulsanpassung durch AOM

In vielen Fällen der Materialbearbeitung, wie z.B. Beschriften oder Gravieren, soll grundsätzlich die Pulsspitzenleistung konstant gehalten werden, damit auch der Materialabtrag gleichbleibend ist. Wurde jedoch längere Zeit kein Puls emittiert, so herrscht volle Besetzungsinversion im Resonator vor und der erste Puls ist entsprechend stärker als die nachfolgenden. Lösungen bieten die Verfahren First Pulse Suppression und Pre-Pulse-Kill (**Bild 3**).

Bei First Pulse Suppression wird die am Güteschalter anliegende HF-Leistung nicht schlagartig auf Null gesetzt, sondern in Form einer Rampe auf Nullleistung gefahren. Diesem Rampensignal wird ein digitales Pulssignal überlagert; die HF-Leistung schaltet somit zwischen einem maximalen und einem allmählich sinkenden Niveau hin und her. Der erste emittierte Laserpuls besitzt nun nicht mehr die volle im Resonator gespeicherte Energie, sondern nur einen Teil davon.

Bei Pre-Pulse-Kill wird nur die HF-Leistung entlang einer Rampe auf Nullleistung gefahren, ohne ein digitales Signal zu überlagern. Somit sinken die Resonatorverluste allmählich; es werden keine Laserpulse emittiert, sondern der Laser wird quasi im CW-Betrieb „entladen“. Ist die HF-Leistung bei Null angekommen, wird die HF-Leistung mit einem Digitalsignal moduliert, was zu Laserpulsen führt.

Je nach Leistung des Lasersystems kann ein Güteschalter allein nicht ausreichen, um genügend Verluste zu generieren und den Laser zu „sperren“. Zudem spielt die Polarisation eine Rolle, welche durch unterschiedliche Schwingungsarten im AOM oder Güteschalter berücksichtigt wird. Bei den typischen in Güteschaltern eingesetzten AO-Materialien verwendet man eine longitudinale akustische Schwingung für linear polarisierte Laser; hier schwingt das Piezoelement senkrecht zur Fläche des optischen Mediums, an der es befestigt ist (sogenannter Compressional Mode). Für unpolarisierte Laser setzt man eine transversale akustische Schwingung ein; dabei schwingt das Piezoelement parallel zur Oberfläche des optischen Mediums (sogenannter Shear Mode). Compressional Mode schaltet am effizientesten die Polarisationsebene ab,

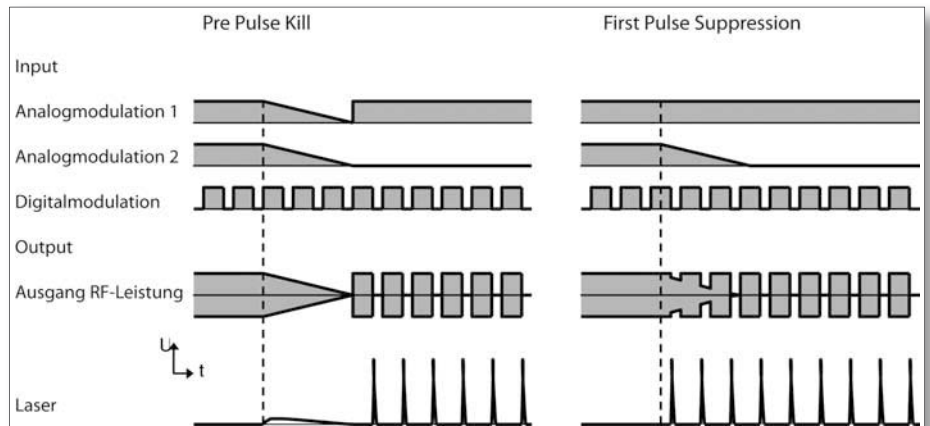


Bild 3: Pre Pulse Kill, First Pulse Suppression

welche senkrecht auf der Richtung des akustischen Phasengeschwindigkeitsvektors steht; die andere Polarisationsebene wird je nach Material weniger effizient unterdrückt. Shear Mode hingegen schaltet beide Polarisationsrichtungen eines unpolarisierten Laserstrahls mit gleicher Effizienz ab. Dabei gelten Richtwerte von maximal 50 W Laserleistung für linear polarisierte Laser bzw. 100 W für unpolarisierte Laser, wenn nur ein Güteschalter eingesetzt wird.

Als optisches Medium für Hochleistungslaser kommen die Materialien kristallines Quarz und Quarzglas (FS) in Betracht, wobei kristallines Quarz nur im Compressional Mode eingesetzt wird. Quarzglas hingegen kann sowohl im Compressional Mode als auch Shear Mode eingesetzt werden; die Beugungseffizienzen sind jedoch unterschiedlich: Die akusto-optische Wechselwirkung in Compressional Mode ist viel effizienter als in Shear Mode. Als Richtwerte bei 50 W HF-Leistung und gleicher Aperturgröße dienen 70% für Compressional Mode und 30 bis 40% im Shear Mode. Soll hohe Leistung eines unpolarisierten Lasers gesperrt werden, so setzt man im Resonator zwei Güteschalter der Sorte Compressional Mode ein, und zwar um 90° zueinander verdreht (jeder Güteschalter für eine der senkrechten Polarisationsebenen). Diese Anordnung sperrt deutlich besser bei gleicher Gesamt-

HF-Leistung als z.B. eine Kombination zweier Güteschalter in Shear Mode.

Eine Sonderbauform von Güteschaltern (Super-QS) benützt zwei Piezoelemente im Compressional Mode, welche an zwei senkrecht zueinander stehenden Flächen des optischen Mediums angebracht sind. Hier werden Schallwellen in zwei zueinander senkrechten Richtungen auf das optische Medium appliziert, wodurch ein unpolarisierter Laserstrahl mit nur einem statt zwei Güteschaltern gesperrt werden kann.

Fazit

In Zukunft werden AOM noch kompakter, schneller und beständiger sein müssen, um die industriellen Anforderungen zu erfüllen. Einsätze in portablen Geräten oder auf Robotern bedingen kleine Bauform und niedriges Gewicht, höhere Laserleistungen zum schnelleren Materialabtrag benötigen hochbeständige AR-Beschichtungen und perfekte optische Materialien. Bessere Faserkopplungen (**Bild 4**) werden ihren Beitrag leisten, um die Integration zu vereinfachen und die Stabilität im Betrieb zu erhöhen. Auch in den HF-Spannungsquellen steckt noch einiges an Potential, um Regelungen zu optimieren und die Herausforderung der nächsten Lasergenerationen zu meistern.

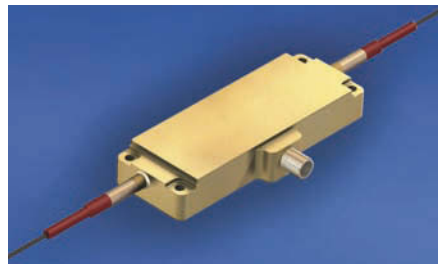


Bild 4: Neue Generation faser-gekoppelter AOM

sional Mode eingesetzt wird. Quarzglas hingegen kann sowohl im Compressional Mode als auch Shear Mode eingesetzt werden; die Beugungseffizienzen sind jedoch unterschiedlich: Die akusto-optische Wechselwirkung in Compressional Mode ist viel effizienter als in Shear Mode. Als Richtwerte bei 50 W HF-Leistung und gleicher Aperturgröße dienen 70% für Compressional Mode und 30 bis 40% im Shear Mode. Soll hohe Leistung eines unpolarisierten Lasers gesperrt werden, so setzt man im Resonator zwei Güteschalter der Sorte Compressional Mode ein, und zwar um 90° zueinander verdreht (jeder Güteschalter für eine der senkrechten Polarisationsebenen). Diese Anordnung sperrt deutlich besser bei gleicher Gesamt-

Kontakt

Bernhard Wondra
Sales Manager
OptoTech Division
AMS Technologies AG
Fraunhoferstr. 22
D-82152 Martinsried
Tel.: 089/89577-548
Fax: 089/89577-199
bwondra@ams.de
www.ams.de



www.photonik.de **Webcode 1004**