

Stabilitätsanalyse einer Laserkavität

Die neue multiphysikalische Strahlverfolgung erlaubt es, Laserhohlräume mit einem thermischem Linseneffekt exakt und geometriegetreu zu simulieren.

Yosuke Mizuyama

Yosuke Mizuyama,
COMSOL, Inc.,
100 District Avenue,
Burlington,
MA 01803, USA,
www.comsol.com

Bei der Laserentwicklung ist eine Stabilitätsanalyse der Laserkavität inklusive des thermischen Linseneffekts eine der wichtigsten Aufgaben, um einen stabilen und leistungskalierbaren Laser auszulegen. Solche Analysen beruhen auf multiphysikalischen Simulationen. COMSOL hat ein Simulationsmodul entwickelt, das mit neuartigen Methoden den Strahl verfolgt (Ray-Tracing-Methode). Dieser Artikel behandelt zunächst die konventionellen Methoden und stellt dann die neuen Simulationen vor.

Femtosekunden-Laser nutzen die bekannten titandotierten Saphirkavitäten (Abb. 1). Der Hohlraum besteht aus einem Paar planarer Endspiegel, fokussierenden Spiegeln, einem Laserkristall im Brewster-Schliff und einem Paar dispersionskompensierender Prismen. Den Laserkristall beleuchtet eine pumpende Lichtquelle von beiden Seiten, sodass die Besetzungsinversion in einer angemessenen Zeit erreicht wird. Über diese Komponenten hinaus können Laserresonatoren im Allgemeinen weitere optische Komponenten enthalten, z. B. sich drehende Spiegel, Linsen, Oberschwingungsgeneratoren, Sät-

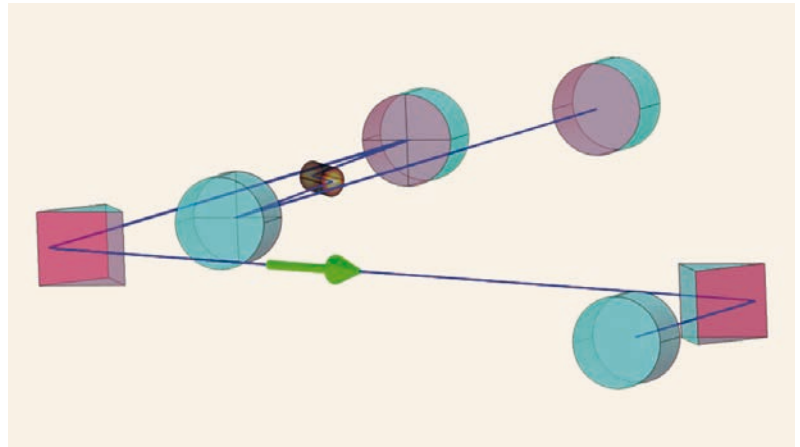


Abb. 1 Ein neues App-Interface verwendet die Software COMSOL Multiphysics® und das Ray Optics Module, um die

Stabilität einer doppelt gepumpten Titan-Saphir-Laserkavität zu simulieren.

tigungsabsorber, Verzögerungsplatten oder Brewster-Fenster.

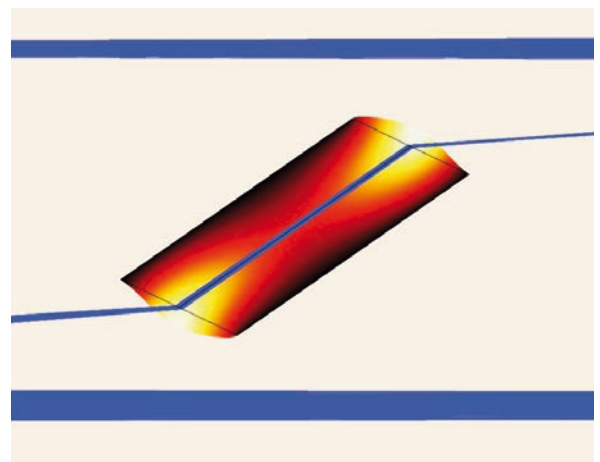
Wenn eine Laserkavität unterhalb einer bestimmten Pumpstärke stabil ist, wird ein Laserstrahl erzeugt. In vollständiger Wellenausbreitungsoptik beschreibt eine elektromagnetische Welle in resonantem Stadium in Form einer stehenden Welle in der Laserkavität diese Situation. In der Approximation der geometrischen Optik lässt sich dies als Strahlen ansehen, die nach verschiedenen Durchgängen mit Transmissionen und Reflexionen innerhalb der Ka-

vität gefangen sind. Alle optischen Komponenten des Systems sind an diesem Prozess beteiligt. Insofern ergibt sich die Stabilität der Laserkavität durch die Überprüfung, ob Strahlen, die im Laserhohlraum erzeugt wurden, diesen nach einer ausreichend großen Anzahl an Durchgängen wieder verlassen.

Thermischer Linseneffekt

Auch in stabilen Laserkavitäten kann die Laserstrahlerzeugung stoppen, wenn die Pumpleistung

Abb. 2 Die multiphysikalische Ray-Tracing-Methode für den Titan-Saphir-Kristall im Brewster-Schliff liefert als Ergebnisse die Strahltrajektorie (blau), die Wärmeverteilung (Farbverlauf) und die Oberflächenwölbung. Die Zeichnung ist nicht maßstabsgetreu. Dadurch entsteht der Eindruck, dass der Lichtstrahl nicht an der richtigen Stelle bricht.



erhöht wird, um die Ausgangsleistung zu steigern. Das Pumpen erhitzt einen Laserkristall stark und ändert den Brechungsindex des Kristalls, weil sich die Kristalloberfläche krümmt. Dieser thermische Linseneffekt kann die Stabilität dramatisch beeinflussen, weil die optische Abweichung, die für diesen Effekt verantwortlich ist, den optischen Pfad der Strahlen – innerhalb des Kristalls in Bezug auf die geometrische Optik – verändert.

Simulationsmethoden

In den 1960er-Jahren haben A. Gardner Fox und Tingye Li eine Methode entwickelt, um den transversalen Modus einer offenen Kavität mit der Beugungstheorie zu analysieren [1]. Herwig Kogelnik untersuchte die Stabilität der Laserkavität sowie die längslaufende Feldverteilung, indem er die Theorie der Wellenoptik und der geometrischen Optik vereinte [2]. Seine Methode, eine ABCD-Transfermatrix und eine parabolische Anpassung zu nutzen, um sich dem thermischen Linseneffekt anzunähern, entwickelte sich zu einem Standardwerkzeug im Laserdesign.

Multiphysikalisches Ray-Tracing

COMSOL hat für die Analyse der Laserkavitätsstabilität neue Modelle und darauf basierende Simulations-Apps mit speziellen Benutzeroberflächen entwickelt. Die Apps simulieren eine Laserkavität mit thermischem Linseneffekt mithilfe einer Kombination von Strahlverfolgung, Wärmetransfer und Festkörpermechanik. Diese Effekte sind in der Software funktionalisiert. Die Apps verwenden keine Näherungen, also weder die ABCD-Transfermatrix für die Stabilitätsanalyse noch die parabolische Annäherung für den thermischen Linseneffekt, sondern exaktes Wellenfront-Ray-Tracing. Reale 3D-Konfigurationen sind Basis der Simulationen und Berechnungsergebnisse.

Im Ray-Tracing-Schritt dieser Methode wird ein Strahl mit einer definierten Strahlrichtung im Laserhohlraum an einem bestimmten Punkt freigesetzt und dessen Ausbreitung für eine festgelegte Berechnungszeit verfolgt. Wenn die Kavität stabil ist, lässt sich der Strahl bis zum Ende der Berechnungszeit verfolgen. Für eine instabile Kavität verlässt der Strahl im Laufe der Berechnungen die Kavität. Dann stoppt die Berechnung. Als Stabilitätskriterium gilt daher, dass tatsächliche und vorher einge-

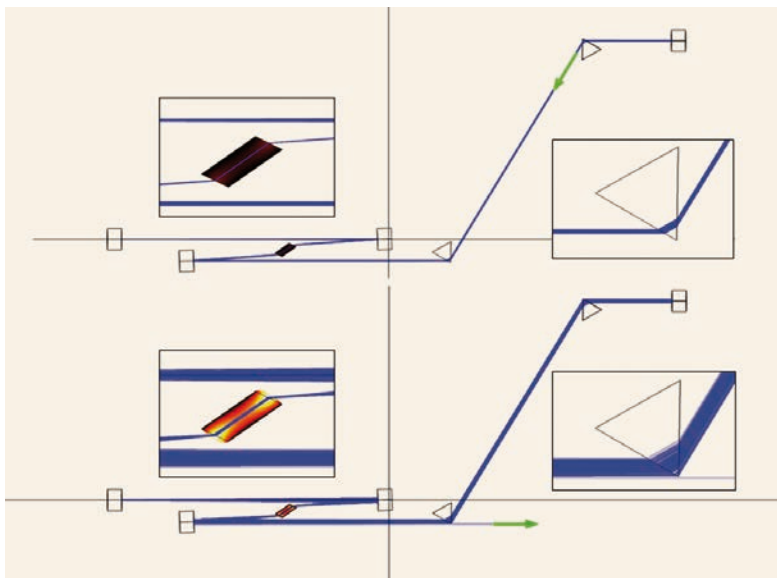


Abb. 3 Ein Vergleich der Stabilitätssimulation für Pumpleistungen von 10 W (oben) und 100 W (unten) zeigt, dass der

Lichtstrahl bei 100 W Pumpleistung nach 92 Durchgängen die Prismenspitze verfehlt und den Hohlraum verlässt.

Best of

stellte Berechnungszeit gleich sind bzw. dass also das Verhältnis gerade 1 ergibt. Die Strahlverfolgung von COMSOL basiert auf einer zeitabhängigen, nicht sequenziellen Wellenfrontverfolgungsmethode, im Gegensatz zur typischen Fläche-zu-Fläche-Ausbreitungsmethode oder der statischen, nicht sequenziellen Verfolgungsmethode.

Um den thermischen Linseneffekt zu berücksichtigen, beschreibt ein analytischer Ausdruck die Wärme, die im Kristall durch das Pumpen entsteht. Daher geben Wärmetransfer- und Festkörperanalysen Aufschluss über die Temperaturverteilung und Strukturänderungen. Im Ray-Tracing-Schritt der Methode basieren die Aktualisierungen der Brechungsindexverteilungsfunktion in einer Näherung erster Ordnung auf der Indexänderung abhängig von der Temperatur, z. B. $n = n_0 + \Delta T(dn/dT)$. Dabei stellen n_0 und n den ersten Brechungsindex ohne den Temperaturunterschied und den neuen Brechungsindex nach dem Pumpen dar. Entsprechend sind ΔT der Temperaturunterschied zur Referenztemperatur und dn/dT die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex. Da die Kristalloberflächen gekrümmt sind, ändern sich die Brechungswinkel auf ihnen ebenfalls (Abb. 2).

Ein Vergleich zwischen 10 W und 100 W Pumpleistung zeigt, dass bei der niedrigen Pumpleistung die Kavität während der gesamten, mit 120 Durchgängen vorgegebenen Rechenzeit stabil bleibt (Abb. 3). Bei einer Pumpleistung von 100 W weicht der Strahl aufgrund des thermischen Linseneffekts sukzessive vom anfänglichen Pfad ab, verfehlt nach 92 Durchgängen die Prismenspitze und verlässt die Kavität: Die Kavität ist instabil.

Mehr Funktionalität

Die Abbildungen belegen, dass optische Komponenten mit Neigung sowie schräge Flächen keine zusätzlichen Anforderungen für die neuen Stabilitätsanalyse-Modelle des Laserhohlraums mit sich bringen,

Vergleich von ABCD-Matrix-Methode und Ray-Tracing-Methode

	ABCD-Transfermatrix	COMSOL Multiphysics
räumlicher Aufbau	reduziert in 1D	real in 3D
Strahlverfolgung	paraxiale Approximation	keine Approximation
Stabilitätskriterium	$-1 < (A + D) / 2 < 1$	tatsächliche = voreingestellte Berechnungszeit
Neigungsanalyse	nein	ja
erlaubte opt. Elemente	Spiegel, Linsen, Platten	beliebige Elemente
thermischer Linseneffekt	approximiert durch imaginäre Linse mit effektiver Fokallänge abgeschätzt aus Parabelfit	echte Strahlverfolgung durch veränderte Indexverteilung berechnet mit FEM-heat-transfer-Programm

Tab. 1 Zwischen der multiphysikalischen Ray-Tracing-Methode von COMSOL und der konventionellen ABCD-Transfermatrix-Methode gibt es grundlegende Unterschiede.

da diese beliebige dreidimensionale Designs verarbeiten können. Bei konventionellen Strahltransfermethoden ist das entweder nicht möglich oder sehr aufwändig und schwierig. Diese Funktionalität macht es erheblich einfacher, Neigungsanalysen für die Laserstabilität durchzuführen.

Bis hierhin haben wir uns auf die Diskussion linearer Kavitäten beschränkt. Mit dieser Methode ist es jedoch ebenso einfach, Ringresonatoren zu modellieren. Zudem lässt sich das Hohlraummodell mühelos um weitere Hohlraumssysteme erweitern, z. B. eine Strahlführung und Fokussieroptik. Die Ausbildung einer thermischen Linse kann nicht nur innerhalb, sondern auch außerhalb eines Hohlraums erfolgen, wenn die Ausgangsleistung hoch genug ist. Ein vollständiges Lasersystem einschließlich Kavität und Strahlerzeugungssystem bzw. einem multiplen Hohlraumssystem wie einem Oszillator-Verstärker-System (MOPA-System: Master Oscillator Power Amplifier) und einem externen gitterstabilisierten External Cavity Diode Laser (ECDL) lässt sich modellieren, um sämtliche thermischen Linseneffekte in einem Durchlauf zu untersuchen. Erreicht wird das durch die Möglichkeit, das Freisetzen von Sekundärstrahlen zu aktivieren.

Zusammenfassung

Tab. 1 gibt einen Überblick zu den Funktionalitäten der neuen multiphysikalischen Ray-Tracing-Me-

thode für die Stabilitätsanalyse des Laserhohlraums im Vergleich zum konventionellen ABCD-Transfermatrix-Verfahren. Für die Entwicklung der Modelle und die Anwendungen selbst kamen die Software COMSOL Multiphysics® und das Ray Optics Module zum Einsatz. Das Basispaket von COMSOL Multiphysics® enthält die grundlegenden Funktionen für Wärmeübertragung und Festkörpermechanik, die für das Ausführen der Modelle und Programme notwendig sind. Die Software ermöglicht es dem Anwender, die Modelle und Anwendungen zu modifizieren und zu erweitern. Darüber hinaus lassen sich mit dem COMSOL Server®, Simulationsanwendungen in Standard-Webbrowsern auf Computern, Mobiltelefonen und Tablets auch ohne eine Vollversion der Software durchführen.

- [1] H. Kogelnik und T. Li, Applied Optics 5, 1550 (1966)
- [2] A. G. Fox und T. Li, The Bell System Technical Journal 40, 2 (1961)