

Messung der thermischen Resonatorkrümmung nominell plan-paralleler Rubinlaser

DIETER RÖSS

Zentral-Laboratorium der Siemens AG., München

(Z. Naturforsch. 21 a, 1731–1732 [1966]; eingeg. am 16. September 1966)

Die thermische Krümmung nominell plan-paralleler Rubinstäbe von 25 mm Länge wurde im quasikontinuierlichen Betrieb gemessen. In einem nominell ebenen Resonator mit einem äußeren Spiegel wurde dabei der Spiegelabstand gesucht, bei dem der Resonator durch die thermische Krümmung die hemikonzentrische Grenzlage überschreitet und instabil wird. Der Spiegelabstand ist dann gleich der effektiven Brennweite. Die kritische Resonatorlänge lag zwischen 120 und 146 mm; sie nimmt mit wachsender Pumpleistung ab. Die Fokussierung des Resonatormode auf dem ebenen Außen-Spiegel führt zu rascher örtlicher Zerstörung. Die Kenntnis der effektiven Resonatorkrümmung ist wichtig für eine Korrektur dieses störenden Effektes.

In kontinuierlich oder quasikontinuierlich gepumpten Festkörperlasern stellt sich im Querschnitt des Lasermaterials ein thermisches Gleichgewicht ein, dem bei quasikontinuierlichem Betrieb noch kleine periodische Änderungen überlagert sind. Im allgemeinen entsteht dabei ein Temperaturgradient mit einem Maximum der Temperatur in der Stabmitte.

Bei annähernd gleichmäßiger Anregung im Stabquerschnitt ist die Temperaturverteilung parabolisch; sie führt bei rotationssymmetrischer Ausleuchtung über die Änderung der Stablänge und des Brechungsindex zu einer effektiven sphärischen Krümmung eines nominell planparallelen Stabes; der Laserstab wirkt als thermische Linse¹. Die Kenntnis der effektiven Brennweite ist wichtig zur Analyse der transversalen Modenselektion und kann dazu benutzt werden, durch geeignete, negativ brechende Elemente im Resonator die Wirkung der thermischen Effekte zu kompensieren¹.

Meßmethode

Mit einer einfachen Meßmethode wurde die thermische Resonatorkrümmung nominell plan-paralleler Rubinlaser bestimmt. Ein plan-parallel geläpppter Rubinstab von 2 mm \varnothing und 25 mm Länge wurde in einem 1''-Ellipsoid-Pumpsystem als 70 Hz-Puls laser² unter Wasserkühlung betrieben. Die rückseitige, ebene Endfläche des Stabes war 100% reflektierend beschichtet, die ebene Vorderfläche war vergütet. Als zweiter Resonatorspiegel wurde ein ebener Außenspiegel mit 90% Reflexion verwendet, dessen Abstand zum Rubinstab im Bereich 100–200 mm veränderlich war.

Für die gegebenen Resonatordimensionen ergibt sich eine FRESNEL-Zahl von rund $N=10$. Damit ist der Beugungsverlust eines ideal ebenen Resonators nach Fox und Li³ für den Grundmode gleich 0,8%, für den ersten Transversalmodus rund 2%.

Die gemessene Verstärkung des Rubinstabes bei maximaler Pumpleistung betrug $V=1,3$, so daß nach Ab-

zug der Spiegeltransmission von 10% eine überschüssige Verstärkung von 20% zur Verfügung stand. Damit sollte die mittlere Schwellpumpleistung in dem angegebenen Bereich für einen ebenen Resonator von der Resonatorlänge praktisch unabhängig sein.

In Wirklichkeit zeigt sich, daß die Laserfunktion aussetzt, sobald die Resonatorlänge einen kritischen Wert übersteigt und daß die kritische Resonatorlänge mit zunehmender mittlerer Pumpleistung kleiner wird. Diese Beobachtung ist nach Abb. 1 so zu erklären, daß

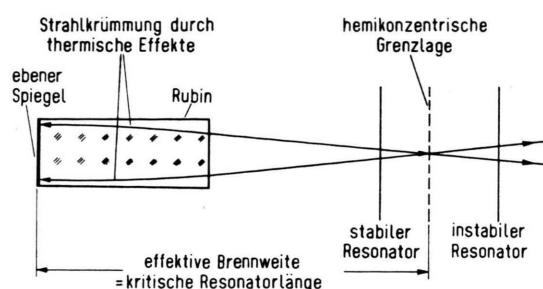


Abb. 1. Meßanordnung (schematisch).

der Rubin als Folge des im Laserbetrieb auftretenden thermischen Gradienten als Sammellinse wirkt, so daß der Grundmode in strahlengeometrischer Näherung einen Fokus bekommt. Solange der Fokus außerhalb des Resonators liegt, ist dieser stabil. Fällt er bei Vergrößerung der Resonatorlänge in den Resonator, dann wird dieser instabil und infolge der hohen Wanderungsverluste setzt die Laserfunktion aus. Wenn der Fokus auf dem äußeren ebenen Spiegel liegt, ist der Resonator hemikonzentrisch. Da die Verluste sich in der Nähe des hemikonzentrischen Grenzfalls sehr stark mit der Resonatorlänge ändern, kann mit dieser Methode die effektive Brennweite des als thermische Linse wirkenden Rubinstabes einfach gemessen werden.

Meßergebnisse

In Abb. 2 ist über der mittleren Pumpleistung die kritische Resonatorlänge aufgetragen. Bei der niedrigsten Pumpleistung hat der Resonator eine kritische

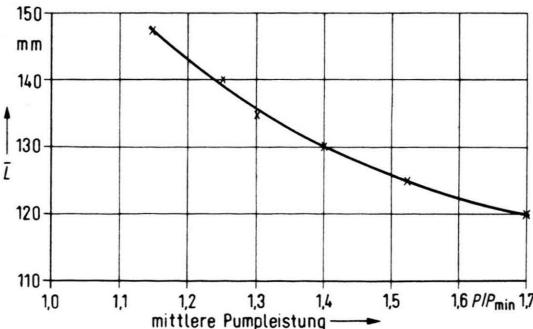


Abb. 2. Kritische Resonatorlänge L .

¹ D. Röss, J. Appl. Phys. 37, 3587 [1966].

² D. Röss u. G. ZEIDLER, Electronics, 115 [5. Sept. 1966].

³ A. G. Fox u. T. Li, Bell Syst. Techn. J. 40, 453 [1961].



Länge von 146 mm. Bei größerem Spiegelabstand ist keine Laserfunktion möglich. Bei höchster mittlerer Pumpleistung schrumpft die kritische Resonatorlänge auf 120 mm zusammen.

In Abb. 3 ist, schematisch vereinfacht, die Abhängigkeit der Ausgangsleistung von der mittleren Pump-leistung für verschiedene Resonatorlängen aufgezeichnet. Sie nimmt zunächst mit der Pumpleistung zu und fällt dann steil ab, sobald die zunehmende Resonatorkrümmung bei Annäherung an den hemikonzentrischen Grenzfall die Verluste ansteigen lässt. Bei gegebener Resonatorlänge setzt die Laserfunktion aus, wenn die Pumpleistung über den kritischen Wert hinaus erhöht wird.

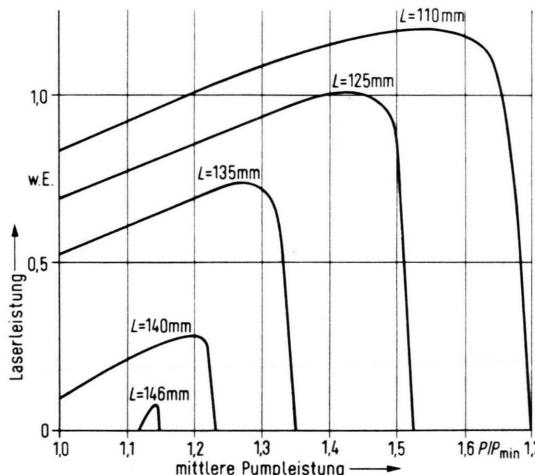


Abb. 3. Laserleistung für verschiedene Resonatorlängen (schematisch).

Die mittlere effektive Brennweite ergibt sich zu rund 130 mm. Dieser Wert ist in vernünftiger Übereinstimmung mit Werten, die wir unter qualitativ vergleichbaren Bedingungen in einem nur 10 mm langen Stab aus der Modenstruktur ermittelt hatten¹.

Die Konzentration der Laserleistung im Fokus führt dazu, daß bereits in der Nähe der Schwelle der Außen-spiegel nach einigen Minuten Betriebsdauer abgetragen wird, wenn der Laser nahe einer kritischen Resonatorstellung ist. Bei Funktion im Grundmode betrug der Strahldurchmesser auf dem rückseitigen festen Spiegel 2 mm, auf dem Außenspiegel rund 50 μm . Nach Abtrag-en des festen Spiegels auf 0,5 mm \varnothing wurde in der kritischen Resonatorstellung ein Strahldurchmesser für den Grundmode von rund 200 μm bestimmt. Beide Werte sind in guter Übereinstimmung mit der theoretischen Erwartung⁴. Die Spiegelzerstörung war jeweils auf den Kern des Strahls begrenzt und erstreckte sich über rund 20% des Strahldurchmessers. In Abb. 4 ist die Spiegelzerstörung in den zwei Maxima des TEM₁₀-Mode gezeigt. Bei Rubinen mit zwei festen Spiegeln haben wir bisher auch bei wesentlich höheren mittleren Leistungen keine entsprechenden Zerstörungen be-

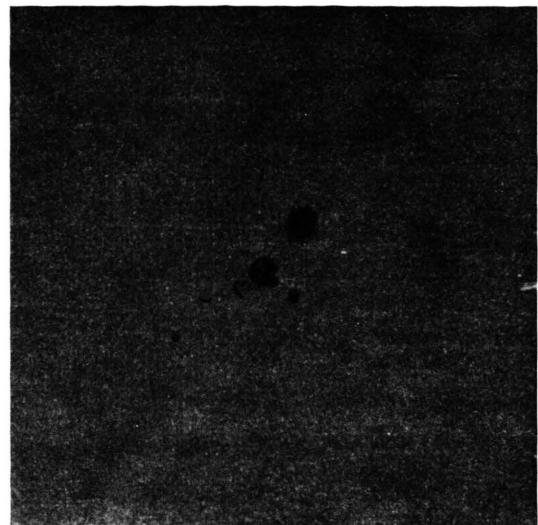


Abb. 4. Spiegelzerstörung in den beiden Maxima des TEM₁₀-Mode; Abstand der Maxima 70 μm ; Betriebsdauer des Lasers 1 Minute.

obachtet, da dort der Strahlquerschnitt auf beiden Spie-geln gleich groß ist.

Einfluß auf Resonatoren mit gekrümmten äußeren Spiegeln

Bei Verwendung eines äußeren gekrümmten Spiegels führt die Eigenkrümmung des Lasermaterials dazu, daß der Resonator seine kritische Länge nicht, wie zu-nächst erwartet, dann erreicht, wenn der optische Spie-gelabstand gleich dem Krümmungsradius des äußeren Spiegels ist, sondern dann, wenn er gleich der Summe des Krümmungsradius und der Brennweite des Laser-stabes ist (Abb. 5). Außerdem hat der Resonator dann die Eigenschaften eines konzentrischen Resonators und nicht, wie zunächst erwartet, die eines hemikonzentri-chen Resonators.

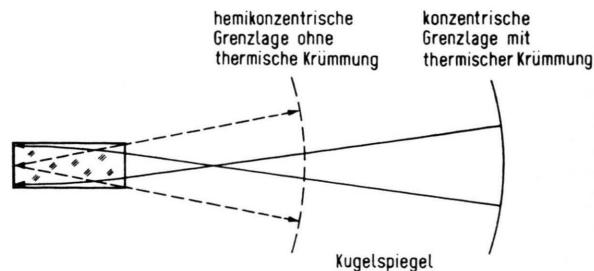


Abb. 5. Erste Grenzlage des Resonators mit sphärischem Außenspiegel.

Weiter ergeben sich je nach dem Verhältnis von Krümmungsradius und Brennweite unterschiedliche stabile und instabile Resonatorbereiche, die ebenfalls zunächst bei der experimentellen Planung ohne Berück-sichtigung der thermischen Krümmung nicht erwartet werden.

⁴ T. Li, Bell Syst. Techn. J. **42**, 2609 [1963].