

bekannten Lasereigenschaften auszumessen, die dann z. B. zur Verwendung als Dauerstrichlaser herausgeschnitten werden können.

### 5. Weitere Beobachtungen

Beobachtungen des konfokalen YAG:Nd<sup>3+</sup>-Lasers mit dem Bildwandler zeigen, daß je nach Einstrahlung verschiedene Moden des konfokalen Resonators angeregt werden können. Da es möglich ist, die gesamte Pumpenergie auf dem Querschnitt der Moden

niedriger Ordnung zu konzentrieren, ist die erzeugte Leistung pro Mode wesentlich größer als bei Beleuchtung mit inkohärentem Pumplicht.

Bei einer Schwellenergie von  $10^{-4}$  Ws für die Moden niedriger Ordnung und einer Fluoreszenzlebensdauer von 170  $\mu$ s würde die Schwell-Leistung für Dauerstrichbetrieb bei 0,6 W liegen. Damit sollte in Kürze auch Dauerstrichbetrieb von Neodymlasern mit Rubin-Dauerstrichlasern<sup>3</sup> als Pumplichtquelle möglich sein.

<sup>3</sup> D. Röss, Microwaves, April 1965, p. 29.

## Modenselektion und Einschwingverhalten eines konfokalen, kontinuierlichen Rubinlasers

DIETER RÖSS und GÜNTER ZEIDLER

Zentral-Laboratorium der Siemens & Halske A.G., München

(Z. Naturforsch. 21 a, 340—343 [1966]; eingegangen am 13. November 1965)

Ein 2-Zoll-Rubinstab mit an den Enden aufgebrachten, konfokalen Spiegeln wurde bei 300 °K in einem ellipsoiden Pumpsystem im kontinuierlichen Betrieb auf axiale und transversale Modenselektion, Emissionsspektrum und zeitliches Emissionsverhalten untersucht. Entsprechend den Eigenschaften des konfokalen Resonators kommen zwangsläufig mit wachsendem invertierten Querschnitt bei zunehmender Pumpleistung Moden höherer transversaler Ordnung zur Emission. Bei einer Anregung 20% über der Schwelle sind in einem schwingenden Durchmesser von 1,5 mm Moden bis zur sechzigsten transversalen Ordnung koexistent, die einen diffusen Strahl hoher Divergenz bilden.

Solange bei geringer Anregung nur der Grundmode schwingt, ist das Emissionsverhalten gleich dem eines FABRY-PEROT-Lasers. Bei hoher Anregung nimmt mit wachsender Zahl transversaler Moden die Zahl der axialen Moden weniger stark zu als bei FABRY-PEROT-Lasern. In der zeitlichen Emission ist bei impulsförmiger Anregung das Auftreten einer neuen Modenordnung durch das Einsetzen zusätzlicher Einschwingvorgänge erkennbar.

### 1. Problemstellung

Wir hatten gezeigt, daß bei kontinuierlichen Rubinlasern mit FABRY-PEROT-Resonator eine Selektion des Grundmode weitgehend unabhängig vom Querschnitt der schwingenden Kristallzone erreicht werden kann<sup>1</sup>. Dabei trat auch bei beugungsbegrenzter Emission eine komplizierte Modulation der Laserstrahlung als Folge der verkoppelten axialen Eigenschwingungen auf<sup>2</sup>. Der beobachtete kontinuierliche Strahlungsanteil ergab sich aus der Überlagerung der Relaxationsimpulse verschiedener axialer Moden.

Wir haben eine entsprechende Untersuchung an einem kontinuierlichen konfokalen Rubin durchgeführt. Dabei war zu erwarten, daß mit zunehmendem invertierten Querschnitt die transversale Ord-

nung der schwingenden Moden anwachsen würde, da beim konfokalen Resonator ein Mode der transversalen Ordnung  $m$  nur über einen Durchmesser  $D = 2 w_0 \sqrt{2m + 1}$  existenzfähig ist;  $w_0 = \sqrt{l\lambda/(\pi\mu)}$  ist der „Fleckradius“ des Grundmode ( $l$  = Resonatorlänge,  $\mu$  = Brechungsindex).

### 2. Experimentelle Anordnung

Wir hatten den für die Untersuchungen vorgesehenen Rubinstab bereits früher im Impulsbetrieb ausführlich untersucht<sup>3</sup>. Der Stab von 42 mm Länge wurde für den kontinuierlichen Betrieb lediglich auf einen Durchmesser von 3 mm verjüngt. Die konfokalen Endflächen wurden mit dielektrischen Spiegeln von 98,5 und 95% Reflexion belegt.

<sup>1</sup> D. Röss, Z. Naturforsch. 20 a, 1348 [1965].

<sup>2</sup> D. Röss, Z. Naturforsch. 20 a, 1655 [1965].

<sup>3</sup> W. HEINLEIN, G. GEHRER u. D. Röss, Z. Naturforsch. 20 a, 256 [1965].



Der Stab wurde in einem 2-Zoll-Rotationsellipsoidspiegel<sup>4</sup> mit einer 2-Zoll-Quecksilberbogenlampe vom Typ A unter Wasserkühlung gepumpt<sup>5</sup>. Der Stab wurde dabei mit Epoxydharz in ein Halterohr aus Metall eingekittet.

Wie bei<sup>1</sup> und <sup>2</sup> beschrieben, wurde das Nahfeld und Fernfeld des Lasers, sein Emissionsspektrum und sein zeitliches Emissionsverhalten in Abhängigkeit von der Pumpleistung untersucht.

### 3. Versuchsergebnisse

Es erwies sich als relativ schwierig, den konfokalen Rubin optimal einzustellen, da hierzu seine Resonatorachse mit der Linie höchster Beleuchtungsdichte, also der Rotationsachse des Ellipsoids zur Deckung gebracht werden muß. Für planparallele Laser genügt bereits die Ausrichtung der Linie höchster Beleuchtungsdichte senkrecht zu den Endflächen des Stabs.

Die niedrigste gemessene Schwell-Leistung betrug bei optimaler Justierung 1080 W für teilweise geglätteten Lampenstrom, 1200 W für Gleichstromanregung. Der Wert für einen anderen Rubinstab mit FABRY-PEROT-Resonator war mit minimal 1180 W nicht systematisch davon unterschiedlich. (Die Absolutwerte der nötigen Pumpleistung sind stark vom Alter der Lampe abhängig, und zwar *sinken* sie mit zunehmender Abnutzung). Für die Untersuchungen wurde wieder ein Bereich bis 20% oberhalb der Schwell-Leistung gewählt.

Bei genauer Justierung setzt die Emission an der Schwelle im Grundmode  $TEM_{00}$  ein. Bei einer Dejustierung der Resonatorachse gegen die Achse höchster Beleuchtungsdichte entsteht zunächst der  $TEM_{10}$ -Mode, bei stärkerer Unsymmetrie ein Mode höherer transversaler Ordnung. Die Modenbilder in der unmittelbaren Nähe der Schwelle entsprechen in ihrer Geometrie den in<sup>1</sup> wiedergegebenen Aufnahmen.

Solange der Laseroszillator im Grundmode läuft, entsprechen Spektrum und zeitlicher Emissionsverlauf ganz den Beobachtungen am FABRY-PEROT-Laser<sup>1,2</sup>. Es treten etwa 6 axiale Frequenzen im Abstand  $\Delta\nu = c/(2l\mu)$  auf (Abb. 1); die zeitliche Emission ist durch regelmäßige Impulsfolgen mit quasiperiodischen Phasensprüngen gekennzeichnet, die durch Wechselwirkung der axialen Moden zustandekommen. Wie Abb. 2 zeigt, folgt bei Betrieb mit 100 Hz-Halbwellen die Umhüllende der Gesamtemission glatt der Pumpleistung. Der beobachtete

kontinuierliche Strahlungsanteil entsteht durch Addition von Relaxationsschwingungen verschiedener axialer Moden.

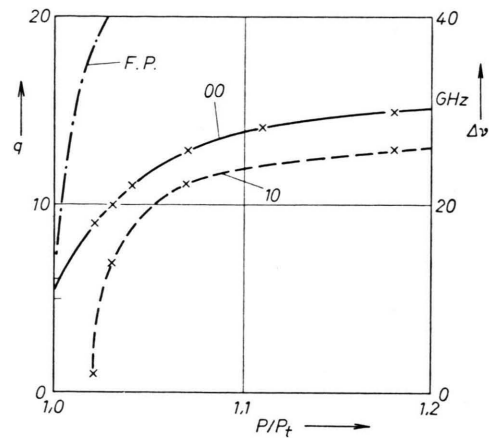


Abb. 1. Emissionsspektrum des kontinuierlichen, konfokalen Rubinlasers in Abhängigkeit von der Pumpleistung. 00: Moden, die mit dem Grundmode entartet sind, 10: Moden, die mit dem 10-Mode entartet sind, q: Zahl der emittierten Frequenzen,  $\Delta\nu$ : Emissionsbandbreite (spontane Bandbreite 250 GHz), F.P.: Verlauf für FABRY-PEROT-Laser.

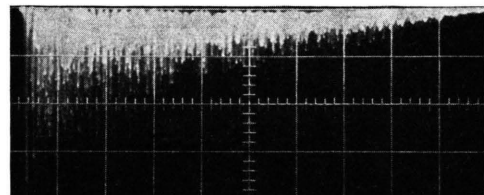


Abb. 2. Zeitliche Emission des konfokalen Rubinlasers bei alleiniger Anregung des Grundmode nahe der Schwelle; 100  $\mu$ s/Einheit. Die Aufnahme zeigt die Emission in der Brummspitze der Pumpleistung.

Eine geringfügige Erhöhung der Pumpleistung führt infolge des zunehmenden invertierten Querschnitts im Gegensatz zum FABRY-PEROT-Laser zur Entstehung transversaler Moden höherer Ordnung. Im allgemeinen treten dabei Modenkombinationen auf, die keine klare Modenstruktur mehr erkennen lassen. Im Spektrum ist das Entstehen von Moden höherer Ordnung daran erkennbar, daß in der Mitte zwischen den FABRY-PEROT-Ringen des Grundmode und der ihm entarteten Moden gerader Indexsumme im Abstand  $\Delta\nu = c/(2l\mu)$  ein zweiter Satz von Ringen mit dem gleichen Abstand entsteht, so daß jetzt der Frequenzabstand der Gesamtheit aller Moden  $\Delta\nu' = c/(4l\mu)$  beträgt. Im Nah- und Fernfeld sind dabei deutlich Bereiche mit Frequenzabständen  $\Delta\nu$

<sup>4</sup> D. Röss, Appl. Opt. 3, 259 [1964].

<sup>5</sup> D. Röss, Microwaves April 1965, p. 29.

und solche mit  $\Delta\nu'$  getrennt. Es werden also Moden mit ungerader Indexsumme in der Nähe der Schwelle nicht an allen Punkten der Spiegeloberfläche und nicht in alle Richtungen im Strahl emittiert. Bei höherer Pumpleistung ist der Frequenzabstand im ganzen Strahl gleich  $c/(4l\mu)$ .

In Abb. 1 ist die Zunahme der axialen Modenzahl mit der Pumpleistung aufgezeichnet. Im Gegensatz zum FABRY-PEROT-Laser wächst die gesamte emittierende Linienbreite nur noch geringfügig an, sobald transversale Moden höherer Ordnung zu schwingen beginnen. In Abb. 3 ist die Zunahme des schwingenden Resonatordurchmessers, und daraus folgend die Zunahme der maximalen transversalen Ordnungszahl gegen die Pumpleistung aufgetragen. Es ist zu beachten, daß die Existenzfähigkeit der Ordnung  $m$

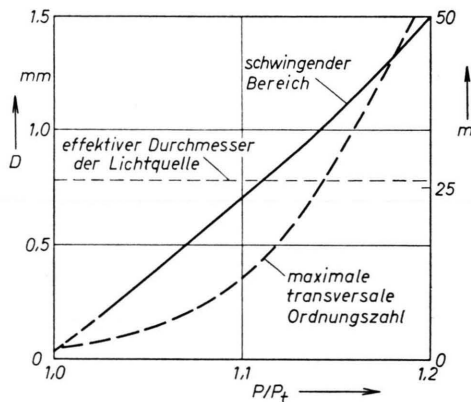


Abb. 3. Schwingender Rubindurchmesser  $D$  und maximale transversale Modenordnung  $m$  in Abhängigkeit von der Pumpleistung.

zur möglichen Koexistenz von  $m$  Moden der Ordnung  $m$  sowie aller Moden niedrigerer Ordnung führt. Offensichtlich kann in diesem Resonator die Inversion bei Koexistenz zahlreicher transversaler Moden bereits mit wenigen entarteten Frequenzen abgebaut werden, während bei dem in einem Transversalmoden schwingenden FABRY-PEROT-Laser dazu eine mit der Pumpleistung stetig anwachsende Zahl von axialen Moden unterschiedlicher Frequenz notwendig ist.

Von konfokalen Impulslasern ist bekannt, daß bei hoher Pumpleistung und großem angeregten Querschnitt transversale Moden hoher Ordnung in einem kontinuierlichen Band oder mit einer einzigen entarteten Frequenz auftreten können<sup>3, 6, 7</sup>, die dann

allerdings infolge der thermischen Effekte nicht zeitlich stabil ist. Dieser Bereich der Pumpleistung wurde in unserem Dauerstrichexperiment nicht untersucht.

Mit der schlechteren Modenselektion bei hoher Pumpleistung ist eine entsprechende Vergrößerung der Strahldivergenz verbunden. Außerdem zeigt der Strahl erhebliche Fluktuationen auch bei Gleichlichtanregung, die darauf zurückzuführen sind, daß die angeregten transversalen Moden wegen der geringen Diskriminierung untereinander zeitlich nicht stabil sind. Ähnliche Beobachtungen hatten wir auch an einem konfokalen YAG:Nd<sup>3+</sup>-Dauerstrichlaser machen können.

Die Überlagerung zahlreicher transversaler Modentypen führt zu einer unübersichtlichen Modulation der Emission. Das Auftreten neuer Modenordnungen läßt sich gut beobachten, wenn der Rubin mit 100 Hz-Halbwellen gepumpt wird. In den Abb. 4, bei denen der Photomultiplier zum besseren Nachweis der Moden hoher Ordnung eine außerhalb des Strahlzentrums justierte Streuscheibe beobachtet, ist das Auftreten neuer Modenordnungen (nicht Moden-

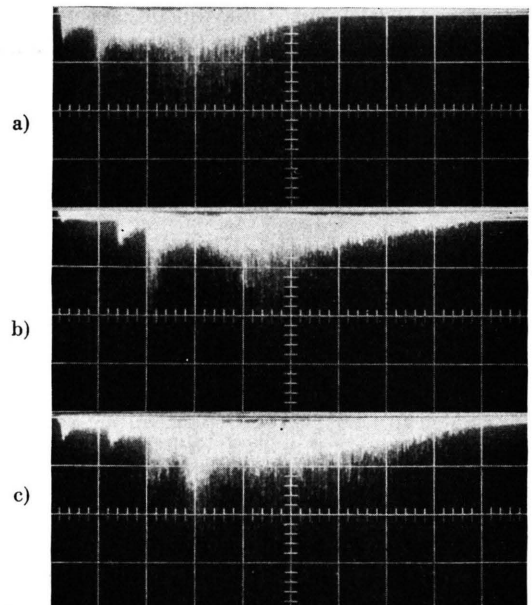


Abb. 4. Zeitliche Emission des quasikontinuierlichen, konfokalen Rubinlasers bei Pumpen mit 100 Hz-Halbwellen. Die Aufnahmen sind über mehrere Perioden gemittelt. Die Pumpleistung wächst von oben nach unten von  $1,01 P_t$  auf  $\sim 1,03 P_t$ . Die Aufnahmen wurden jeweils durch den zuerst anschwingenden Grundmode getriggert, 200  $\mu s$ /Einheit.

<sup>6</sup> C. A. SACCHI u. O. SVELTO, J. Appl. Phys., in Vorbereitung.

<sup>7</sup> V. K. KONJUKHOV, L. A. KULEVSKII, A. M. PROKHOROV u. A. K. SOKOLOV, Soviet Phys.-Doklady 9, 875 [1965].

typen) jeweils an dem Einsatz einer neuen Emissionsumhüllenden erkennbar. In Abb. 4c sind Modentypen bis zur fünften transversalen Ordnung markiert. Das entspricht einem ausgeleuchteten Durchmesser des Rubinresonators von etwa 0,35 mm. Bei höherer Pumpleistung wächst der schwingende Durchmesser auf 1,5 mm (Abb. 3), und der Einsatz der dann auftretenden zahlreichen transversalen Modentypen ist nicht mehr so gut erkennbar.

Es ist bekannt, daß bei Anregung transversaler Moden sehr hoher Ordnung in konfokalen Rubinlasern entweder eine kontinuierliche Gesamtemission oder periodische Relaxationsschwingungen gekoppelter Moden entstehen<sup>3, 6, 7</sup>. Diese Phänomene treten bei den hier verwendeten Pumpleistungen noch nicht auf.

#### 4. Ergänzende Beobachtungen

Bei der hier angewendeten höchsten Pumpleistung 25% oberhalb der Laserschwelle betrug die Ausgangsleistung 70 – 80 mW. Die Strahldivergenz war, entsprechend der Anregung von transversalen Modentypen bis zur sechzigsten Ordnung, rund 50-fach höher als der Beugungsbegrenzung entspricht. Mit einem 2-Zoll-FABRY-PEROT-Resonator konnten unter gleichen Bedingungen dagegen 80 mW im Grundmode beugungsbegrenzt erzeugt werden.

Wie beim 1-Zoll-System ist es möglich, einen Querschnitt im Rubin über die Oszillationsschwelle zu pumpen, der wesentlich größer ist als der effektive Querschnitt der Lichtquelle; hier wurde fast der dreifache Wert erreicht.

#### 5. Schlußfolgerungen

Die Beobachtungen sind im Rahmen der heute bekannten Theorie verständlich, nach der einerseits in konfokalen Resonatoren Moden gegebener transversaler Ordnung  $m$  bei Anregung eines dazu korrespondierenden Kristalldurchmessers existenzfähig sind, andererseits der räumlich konzentrierte Inversionsabbau in den Bäuchen stehender Wellen die Koexistenz mehrerer Moden erzwingt<sup>8</sup>. Sie sind in Übereinstimmung mit den Beobachtungen an diesem Laser im Impulsbetrieb bei niedriger Pumpenergie<sup>3</sup>.

In bezug auf die transversale Modenselektion ist die konfokale Anordnung mit festen Spiegeln bei den gegebenen Abmessungen einem FABRY-PEROT-Laser mit festen Spiegeln unterlegen. Die gesamte Emissionsbreite ist dagegen bei Anregung von Moden hoher Ordnungszahlen kleiner als bei beugungsbegrenzten FABRY-PEROT-Lasern.

<sup>8</sup> C. L. TANG, H. STATZ u. G. DE MARS, J. Appl. Phys. **34**, 2289 [1963].