



Doctoral Thesis

Study on the waveguide modes of distributed and helical feedback gas lasers and their application in laser-driven particle accelerators

Author(s):

Arnesson, Jörgen P.-G.

Publication Date:

1989

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000507956> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 8753

**STUDY ON THE WAVEGUIDE MODES OF
DISTRIBUTED AND HELICAL FEEDBACK
GAS LASERS AND THEIR APPLICATION IN
LASER-DRIVEN PARTICLE ACCELERATORS**

A DISSERTATION

submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE
of
TECHNOLOGY ZURICH
ETH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
JÖRGEN P.-G. ARNESSON
Civilingenjör LTH, Lund, Sweden

born July 28, 1957
Swedish citizen

Prof. Dr. Fritz K. Kneubühl
Institute of Quantum Electronics
Physics Department ETH
HPF, Hoenggerberg
CH-8093 Zurich, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. F.K. Kneubühl, ETH Zurich, referee
Prof. Dr. R. Dändliker, Univ. Neuchâtel, co-referee

Zurich 1989

20.4.89
F. Kneubühl

Summary

The most characteristic feature of lasers involving distributed feedback (DFB) is the absence of external resonator mirrors. Instead, the optical feedback is caused by the Bragg effect of a spatial periodic modulation of either the cross section of the waveguide for gas lasers or of the active medium for semiconductor and dye lasers. In the DFB semiconductor lasers, the modulation of the refractive index of the medium is achieved by a periodic doping, whilst in the DFB dye lasers, the modulation is achieved by a periodic transverse pumping resulting in a periodic gain in the dye solution. The cross-section modulation of the waveguides in DFB gas lasers essentially corresponds to the modulation of the refractive index in DFB semiconductor lasers. In this thesis we present theoretical as well as experimental studies on optically pumped DFB 496 μm CH_3F gas lasers with various geometries and symmetries of the corrugated waveguides.

For the first time, we have realized and investigated DFB laser action in circular waveguides with periodic corrugations. Moreover, we have continued the experiments leading to the first realization of a helical feedback HFB gas laser with waveguides of the symmetry of the single helix and succeeded in increasing the number of detected resonances. Subsequently, we demonstrated for the first time HFB laser action in waveguides of the symmetry of the double helix. Finally, we verified experimentally the effect of nonlinear gain saturation on the intensity distribution of DFB and HFB modes.

In order to explain the observed resonances in the waveguides with different modulations, we have used the coupled-mode theory in an extended form which permits a simultaneous coupling between more than two counter-running modes. With the aid of a general perturbation theory, we derived the coupling coefficients for the different types of DFB and HFB couplings possible in hollow circular cylindrical metallic waveguides. Together with the coupling coefficients, the derivation also yielded a selection rule for the coupling modes valid for all investigated corrugation symmetries. Furthermore, we have derived a modified dispersion relation for the coupled modes relevant for our experimental conditions together with the resonance conditions for finite structures for the two-mode as well as for the multi-mode coupling. Numerical examinations of these resonance conditions have revealed that the threshold gains for multi-mode resonances are usually considerably higher than those found for the two-mode couplings. As a consequence, the oscillation in a multi-mode resonance is scarce although our waveguides are strongly over-

sized. This was verified also experimentally. Thus, almost all of the detected resonances have been identified as different DFB and HFB modes of various two-mode couplings. The good agreement between our theoretical predictions and the experiment is considered as an evidence for the validity of the perturbation theory applied. The few measured resonances that could not be assigned to a two-mode coupling were found to coincide with theoretically predicted multi-mode resonances. This confirms our generalized extended theory. Based on an approximate theory of nonlinear gain saturation, we have also succeeded in explaining qualitatively the measured relative output powers of consecutive DFB modes. In investigations on the output power as a function of the polarization state of the pump beam, we did not find a general rule valid for all DFB and HFB couplings. Instead, we found an output dependency characterized by the actual mode-coupling as well as by the waveguide symmetry.

Our calculations based on the coupled-mode theory presented also show that oversized periodically and helically corrugated waveguides are feasible as slow-wave structures for laser-driven particle acceleration. The fields of selected DFB and HFB modes together with a phase velocity below the speed of light render an energy transfer between the electromagnetic field and the particle. Consequently, we propose a new concept of a particle accelerator driven by far-infrared free-electron lasers. Within the frames of this project, we have derived the accelerating fields for different pumping conditions. The most convenient, the one-sided pumping, yields a resonance-sensitive field amplitude which in case of low-loss waveguide walls can be utilized to optimize the acceleration gradient. In order to meet the requirements of velocity matching, we have derived a method to determine the waveguide parameters to match a desired initial particle speed. Although these parameters can be calculated, only a precise manufacturing technique guarantees a feasible accelerator waveguide. Another problem which has to be studied carefully is material destruction by laser radiation. Since this destruction is related to the field absorption of the waveguide material, an important aim is to find materials characterized by low losses at the considered laser wavelengths. In this study, we have investigated the attenuation of normal metals at room as well as at cryogenic temperatures by considering the normal and the anomalous skin effect. As a consequence of this investigation, we propose waveguide walls covered by thin films of the new high- T_c superconductors. The energy gaps of these superconductors are considerably larger than the photon energy of far-infrared radiation, which might imply a strong reduction of the surface resistance for temperatures sufficiently below the transition temperature T_c .

Zusammenfassung

Typisches Merkmal der "distributed feedback" (DFB) Laser ist das Fehlen der üblichen Resonatorspiegel. Statt dessen wird die optische Rückkopplung durch den Bragg-Effekt an räumlich periodischen Modulationen des Wellenleiterquerschnitts oder des aktiven Lasermediums bewerkstelligt. Während bei einem DFB Halbleiterlaser die Modulation der Brechzahl des Lasermediums durch eine periodische Dotierung erzielt wird, erfolgt sie für einen DFB Farbstofflaser kontinuierlich durch räumlich periodisches Pumpen des Farbstoffes. Die Querschnittsmodulation in einem DFB Gaslaser entspricht im wesentlichen derjenigen der Brechzahl eines DFB Halbleiterlasers. In dieser Dissertation werden sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen an optisch gepumpten DFB 496 μm CH_3F Gaslasern mit verschiedenen Geometrien und Symmetrien der Wellenleiterstruktur präsentiert.

Erstmals konnten kreiszylindrische Wellenleiter mit periodischen Wandmodulationen erstellt und untersucht werden. Ferner haben wir die früheren Untersuchungen an "helical feedback" (HFB) Gaslasern mit der Symmetrie der einfachen Helix weiterverfolgt, und dabei ist es uns gelungen, die Anzahl der beobachteten Resonanzen zu erhöhen. Anschliessend haben wir auch zum ersten Mal erfolgreich Laseremission aus Wellenleitern mit der Symmetrie der zweifachen Helix beobachtet. Durch diese Untersuchungen konnte der Effekt der nichtlinearen Sättigung der Verstärkung auf die Intensitätsverteilung der DFB und HFB Moden experimentell bestätigt werden.

Die Erklärung der beobachteten Resonanzen in den Wellenleitern verschiedener Modulationen erfolgt anhand der Theorie der gekoppelten Wellen. Diese wurde erweitert, um die Kopplung einer unbeschränkten Anzahl einander entgegen laufender Moden zu erlauben. Die Kopplungskoeffizienten der verschiedenen Typen von DFB und HFB Kopplungen wurden zusammen mit der Auswahlregel für die koppelnden Moden aus einer allgemeinen Störungstheorie ermittelt. Darüber hinaus haben wir eine an das Experiment angepasste Dispersionsrelation sowie Resonanzbedingungen hergeleitet, die sowohl für Zwei-Moden- als auch für Mehr-Modenkopplungen gültig sind. Numerische Auswertungen der Resonanzbedingungen haben ergeben, dass die Schwellenverstärkungen der Resonanzen der Mehr-Modenkopplungen im allgemeinen bedeutend höher sind als die entsprechenden der Zwei-Modenkopplungen. Aufgrund dessen sind Schwingungen in einer Mehr-Modenresonanz rarer, obwohl unsere Wellenleiter stark überdimensioniert sind. Dies wurde auch experimentell bestätigt, was bedeutet, dass fast alle detektierten Resonanzen als DFB oder HFB Moden von Zwei-Modenkopplungen identifiziert werden konnten. Die

gute Übereinstimmung zwischen theoretischen Vorhersagen und dem Experiment beweist die Gültigkeit der verwendeten Theorie. Die wenigen gemessenen Resonanzen, die nicht einer Zwei-Modenkopplung zugeordnet werden konnten, stimmten indessen mit den theoretisch vorhergesagten Mehr-Modenresonanzen überein. Dies bestätigt unsere verallgemeinerte erweiterte Theorie. Mit Hilfe einer Näherungstheorie der nichtlinearen Sättigung der Verstärkung gelang es uns ebenfalls, die gemessene Intensitätsverteilung aufeinanderfolgender Moden qualitativ zu erklären. Bei Untersuchungen der Intensität als Funktion der Polarisierung des Pumpstrahls konnte kein allgemeingültiges Gesetz für alle DFB und HFB Moden festgelegt werden. Statt dessen stießen wir auf Verhältnisse, die sowohl durch die Modenkopplung als auch durch die Wellenleitersymmetrie gekennzeichnet sind.

Unsere auf der Theorie der gekoppelten Moden gestützten Berechnungen ergeben, dass sich überdimensionierte periodisch und helixförmig modulierte Wellenleiter als Verzögerungsstrukturen für laserangetriebene Teilchenbeschleuniger eignen. Die Felder ausgewählter DFB und HFB Moden mit einer Phasengeschwindigkeit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit ermöglichen eine Energieübertragung vom elektromagnetischen Feld auf die Teilchen. Folglich stellen wir ein neues Beschleunigungskonzept vor, das auf "free-electron"-Lasern als Strahlungsquellen beruht. In diesem Projekt haben wir Felder für verschiedene Pumpbedingungen berechnet. Diejenigen des einseitigen Pumpens ergeben eine resonanzempfindliche Feldamplitude, was im Falle eines verlustarmen Wellenleitermaterials zur Optimierung des Beschleunigungsgradienten genutzt werden kann. Um die notwendige Anpassung der Phasengeschwindigkeit an die Teilchengeschwindigkeit zu gewährleisten, haben wir eine Methode zur Bestimmung der Wellenleiterparameter unter Berücksichtigung der gewünschten Anfangsgeschwindigkeit der Teilchen hergeleitet. Die Einhaltung der schmalen Toleranzen stellt ein Problem bei der Anfertigung brauchbarer Wellenleiter dar. Ein weiteres Problem, das genauestens studiert werden muss, ist die Materialzerstörung durch die Laserstrahlung. Da diese mit der Absorption des Materials verbunden ist, besteht eine wichtige Aufgabe darin, verlustarme Materialien zu finden. Wir haben die Dämpfung normaler Metalle sowohl bei Zimmertemperatur als auch bei tiefen Temperaturen unter Berücksichtigung des normalen und des anomalen Skineffekts untersucht. Ausgehend von dieser Untersuchung schlagen wir Wellenleiter vor, die mit einer dünnen Schicht eines der neuen Hochtemperatursupraleiter beschichtet sind. Die Energielücke dieser Supraleiter ist bedeutend kleiner als die Photonenenergie der Ferninfrarotstrahlung, was eine starke Reduktion des Oberflächenwiderstandes bei Temperaturen unterhalb der Übergangstemperatur T_c bewirkt.