

Berichte aus der Physik

Frank Klopf

**(Ga)InAs/Ga(In)As-Quantenpunktlaserdioden
für Hochleistungs- und
Telekommunikationsanwendungen**

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Würzburg, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4089-6

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

(Ga)InAs/Ga(In)As-Quantenpunktlaserdioden für Hochleistungs- und Telekommunikationsanwendungen

Inhalt dieser Arbeit ist die Entwicklung und die Herstellung leistungsfähiger (Ga)InAs/Ga(In)As-Quantenpunktlaserdioden für Anwendungen im Bereich der Telekommunikation und der Hochleistungslaser. In beiden Gebieten konnten mit diesem neuartigen Typ von Halbleiterlaser bereits erste Erfolge erzielt werden, doch keines der bisher publizierten Bauteile genügt den hohen Anforderungen industrieller Anwendungen. Dies ist vor allem auf ihre ungenügende Temperaturstabilität und die begrenzte optische Verstärkung von Quantenpunktschichten zurückzuführen. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die intrinsischen Eigenschaften von Quantenpunktlasern bilden die Basis für das Design und die Fertigung außerordentlich leistungsfähiger Laserdioden. Sowohl die hergestellten Hochleistungslaser mit einer Emissionswellenlänge von 980 nm als auch die bei einer Wellenlänge von 1,3 μm arbeitenden Telekommunikationslaser stellen in ihren Bereichen die weltweit ersten Quantenpunktlaser mit anwendungsrelevanten Eigenschaften dar.

Der erste Abschnitt dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Herstellung von (Ga)InAs/GaAs-Quantenpunktschichten mittels Molekularstrahlepitaxie und deren Charakterisierung. Die einzige bisher erfolgreich praktizierte Methode zur Herstellung von Quantenpunktschichten hoher Qualität bietet das sogenannte selbstorganisierte Wachstum. Mittels dieses Verfahrens ist es möglich, Quantenpunkte hoher Qualität mit einer relativ geringen Größenfluktuation herzustellen. Hiervon zeugen die geringen Halbwertsbreiten der Photolumineszenzsignale der untersuchten Strukturen. Für die zum Einsatz in Hochleistungslasern bestimmten GaInAs/GaAs-Quantenpunktschichten mit einer Emissionswellenlänge von 980 nm ergeben sich typischerweise Werte von weniger als 40 meV. Die geringe Größenfluktuation und die relativ hohe Quantenpunktdichte sind ideale Voraussetzungen für den Einsatz dieser Strukturen als aktive Schichten in Halbleiterlasern. Neben der potenziellen Verbesserung vieler Lasereigenschaften bietet die Verwendung von Quantenpunktschichten aber auch völlig neue Möglichkeiten. Durch die Kontrolle der Materie auf der Nanometer-Skala wird es möglich, viele der bekannten Einschränkungen der gängigen Halbleitermaterialien zu überwinden. So blieb zum Beispiel der für die optische Datenübertragung auf kurzen und mittellangen Strecken enorm wichtige Wellenlängenbereich um 1,3 μm dem GaAs-Materialsystem lange Zeit verschlossen, da die Emissionswellenlänge von hochverspannten GaInAs/GaAs-Quantenfilmen auf etwa 1,2 μm beschränkt ist. Eine Möglichkeit, diese Beschränkung zu umgehen bieten InAs/GaInAs-Quantenpunktschichten. Bei dem hier verfolgten Ansatz, der sich weitgehend an Arbeiten von Liu et al. orientiert, erreicht man die gewünschte Wellenlänge von 1,3 μm durch die Einbettung von InAs-Quantenpunkten in einen GaInAs-Quantenfilm mit relativ geringem In-Gehalt. Hierdurch lässt sich die Emissionswellenlänge der Quantenpunkte um bis zu 100 nm hin zu höheren Wellenlängen verschieben. Die hergestellten Quantenpunktschichten besitzen eine sehr hohe Qualität, was sich in der relativ geringen Halbwertsbreite ihres Photolumineszenzsignals von etwa 40 meV bemerkbar macht.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von GaInAs-Quantenpunktschichten in Hochleistungslasern. Leistungsstarke Laserdioden mit einer Emissionswellenlänge von 980 nm spielen als Pump Laser für Erbium-dotierte Glasfaserverstärker eine bedeutende Rolle in der modernen Nachrichtentechnik. Daneben kommen sie auch zunehmend in der Medizintechnik und der Materialbearbeitung zum Einsatz. Durch eine gezielte Optimierung des Schichtaufbaus und der Materialqualität des Wellenleiters konnten Quantenpunktlaser mit sehr hohen internen Quanteneffizienzen ($\eta_i > 90\%$), vergleichsweise niedrigen internen Absorptionsverlusten ($\alpha_i = 2,6\text{ cm}^{-1}$) und extrem niedrigen Transparenzstromdichten ($j_{tr} = 35\text{ A/cm}^2$) realisiert werden. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten GaInAs/GaAs-Quantenpunktlaserstrukturen eignen sich in hervorragender Weise zur Herstellung von Hochleistungslaserdioden. Hiervon zeugen vor allem die hohen realisierten Ausgangsleistungen von bis zu 5 W, differentielle Effizienzen von über 1 W/A und Wirkungsgrade von bis zu 50%. Bezüglich ihrer guten Temperatureigenschaften, die auf den Einsatz der AlGaAs/GaAs-Übergitterstrukturen zurückzuführen sind, unterscheiden sich die hier vorgestellten Dioden gravierend von allen bisher publizierten Hochleistungsquantenpunktlasern. So konnte selbst bei einer Temperatur von 110 °C noch eine Ausgangsleistung von 1 W realisiert werden. Insgesamt besitzen die hergestellten Quantenpunktlaserdioden Eigenschaften, die sie zu ebenbürtigen Konkurrenten kommerzieller Hochleistungsquantenfilmlaser machen.

Der dritte und letzte Teil dieser Arbeit behandelt die Entwicklung von InAs/GaInAs-Quantenpunktlasern für Telekommunikationsanwendungen bei einer Wellenlänge von 1,3 μm . Basierend auf dieser Technologie konnten bereits erste Laserdioden realisiert werden, doch diese können schon wegen ihrer Abmessungen nicht mit den in diesem Spektralbereich dominierenden, InP-basierenden Bauteilen konkurrieren. Denn aufgrund der relativ begrenzten optischen Maximalverstärkung einer einzelnen InAs/GaInAs-Quantenpunktschicht benötigt man Resonatorlängen von einigen Millimetern, um die Spiegelverluste der Spaltkanten auszugleichen und somit Lasertätigkeit zu erreichen. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, bietet die Verwendung von mehreren aktiven Schichten. Als bester Kompromiss zwischen einer möglichst hohen optischen Verstärkung und einer geringen Schwellenstromdichte haben sich bei den hier durchgeführten Untersuchungen Laserstrukturen mit 6 aktiven InAs/GaInAs-Quantenpunktschichten bewährt. Aus solchen Strukturen gefertigte Rippenwellenleiterlaser mit einer Stegbreite von 4 μm , Resonatorlängen von 400 μm und einer asymmetrischen Verspiegelung zeigen stabile Laseremission auf dem Grundzustandsübergang mit einer Emissionswellenlänge von 1,3 μm und maximalen Ausgangsleistungen von über 10 mW. Ihre Effizienzen von bis zu 0,22 W/A sind vergleichbar mit denen kommerzieller, InP-basierender Laserdioden. Bezüglich ihrer konkurrenzlos niedrigen Schwellenströme von nur etwa 4 mA sind sie diesen sogar deutlich überlegen. Ähnliches gilt auch für die aus den Strukturen hergestellten Laserdioden mit verteilter Rückkopplung mit einer Stegbreite von 3,5 μm und Resonatorlängen von 800 μm . Die Bauteile zeigen eine stabile, monomodige Laseremission mit Seitenmodenunterdrückungsverhältnissen von bis zu 50 dB und Ausgangsleistungen von bis zu 8 mW.