

Abschlußbericht über das F+E-Vorhaben

**Erforschung eines diodengepumpten (Multi-core) M-Profil-
Faserlasers im Ultrakurzpulsbetrieb
BMBF-Kennzeichen 13 N 7088/0**

**Unterauftrag:
Entwicklung eines Halbleiter-Bauelementes aus Bragg-
Reflektoren, sättigbarem Absorber und 2-Photonen-Absorber**

für den Zeitraum 01.06.1997 bis 31.05.2000

Dr. Lutz Däweritz, Dr. Rudolf Hey und Dr. Jens Herfort
Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik
Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin

Abschlußbericht zum F+E-Vorhaben: 13N7088/0

„Erforschung eines diodengepumpten (Multi-core) M-Profil-Faserlasers im Ultrakurz- pulsbetrieb“

Arbeiten zur „Entwicklung eines Halbleiter-Bauelementes aus Bragg-Reflektoren, sättigbarem Absorber und 2-Photonen-Absorber“

Berichtszeitraum: 01.01.2000 – 31.05.2000 und Abschluß

1. Überblick

Für die Zielstellung, kurze Impulse in einem diodengepumpten Nd:Glas-Faserlaser (Arbeitswellenlänge 1.06 μm) unter Nutzung von Halbleiterbauelementen durch Phasensynchronisation (Modelocking) zu erzeugen, wurden für zwei unterschiedliche Typen von Halbleiterstrukturen Grundlagen ihrer Herstellung mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) erarbeitet, entsprechende Bauelemente-Strukturen hergestellt und dem Max-Born-Institut zur Untersuchung übergeben. Hierbei handelt es sich um:

- (a) ein SESAM (semiconductor saturable absorber mirror)-Bauelement bestehend aus $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -Übergitter (sättigbarer Absorber) und GaAs/AlAs -Übergitter (Bragg-Reflektor)
- (b) Strukturen bestehend aus bei niedriger Temperatur gewachsenem GaAs (LT-GaAs) mit kurzer Rekombinationszeit der Ladungsträger und hohem Zwei-Photonen-Absorptionskoeffizient und einem Spiegel (Goldschicht bzw. Bragg-Reflektor).

Der Einsatz von SESAMs zur Phasensynchronisation ist etabliert. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten haben jedoch gezeigt, dass für die Herstellung der Absorberstruktur mittels MBE ein extrem hoher Aufwand erforderlich ist, um die geforderte Genauigkeit der Arbeitswellenlänge von 0,5% zu erreichen. Die hierbei zu lösenden Probleme

sind im Zwischenbericht vom 23.02.1999 (Anlage) dargestellt. Insbesondere mußten geeignete Kompromisslösungen gefunden werden, welche die gegenläufigen Abhängigkeiten der geforderten kurzen Ladungsträgerlebensdauer und der erforderlichen strukturellen Perfektion von der Wachstumstemperatur berücksichtigen. Nachdem in den vorausgegangenen Berichtszeiträumen das prinzipielle Design der SESAM-Struktur festgelegt werden konnte, erfolgte in der letzten Phase des Projektes die im ersten Teil dieses Bericht dargelegte Optimierung der Wachstumsparameter.

Unter Berücksichtigung der mit der aufwendigen SESAM-Struktur verbundenen Probleme und patentrechtlicher Aspekte erschien die Entwicklung eines neuartigen Modelocking-mechanismus auf der Basis von LT-GaAs-Strukturen vorteilhaft. Die hierbei zu lösenden Probleme betreffen insbesondere das Wachstum von sehr dicken (einige μm) LT-GaAs-Schichten mit der geforderten Nichtstöchiometrie und deren Kombination mit einem geeigneten Spiegel. Hierfür wurden systematische Wachstumsuntersuchungen vorgenommen und eine Methode zur *in situ*-Kontrolle der Nichtstöchiometrie entwickelt. Hinsichtlich der Kombination mit einem Spiegel fanden drei Herstellungsverfahren Anwendung:

- epitaxial Lift Off: Die LT-GaAs-Schicht wird vom Substrat gelöst und auf einen mit Gold beschichteten Quarzglasträger gebondet.
- Rückätzen des Substrates: Die LT-GaAs-Schicht auf GaAs-Substrat wird mit Gold beschichtet, das gesamte Schichtsystem auf ein Glassubstrat geklebt und anschließend das GaAs-Substrat weggeätzt (Freiätzen des LT-GaAs).
- direktes Wachstum der LT-GaAs-Schicht auf einem Bragg-Reflektor.

Die mit den Methoden des Epitaxial Lift off und des Rückätzens erzielten Ergebnisse sind im Zwischenbericht vom 31.05.2000 sowie dem Bericht anlässlich des Treffens des BMBF-Teilverbundes 4 am 03.09.1999 in Braunschweig dargestellt. Mit dem Ziel einer Vereinfachung der Technologie wurde in der letzten Phase des Projektes die komplette Herstellung der Struktur (Zwei-Photonen-Absorber auf Bragg-Spiegel) mittels MBE verfolgt. Mit allen oben genannten Varianten konnte Modelocking demonstriert werden. Die letztere ist jedoch die für Anwendungen die Aussichtsreichste. Die für ihre Realisierung erarbeiteten Kenntnisse zum MBE-Wachstum und zu den Eigenschaften des Schichtsystems aus Zwei-Photonen-

Absorber (TPA) und Bragg-Reflektor sind im zweiten Teil dieses Berichtes zusammengefasst.

2. Arbeiten zum Halbleiterbauelement aus sättigbarem Absorber und Bragg-Spiegel (SESAM)

Das in früheren Berichtszeiträumen erarbeitete Design der SESAM-Struktur für eine Arbeitswellenlänge von zunächst 1055 nm und später 1065 nm (siehe Zwischenberichte vom 23.02.1999 und 14.01.2000) wurde prinzipiell beibehalten. Die Untersuchungen in der letzten Phase des Projektes dienen einer abschließender Beurteilung optimaler Wachstumsparameter der Struktur.

Hierfür wurden verspannte (In,Ga)As/GaAs multi quantum wells (MQW), distributed Bragg-Reflektoren (DBR) und eine Kombination von beiden separat mittels MBE auf GaAs(001)-Substraten gewachsen. Die Optimierung basiert auf der Untersuchung optischer Eigenschaften (Absorption, Reflexion) und struktureller Eigenschaften (Oberflächenrauigkeit, Relaxation) mittels Rasterkraftmikroskopie (AFM) und Röntgenbeugung. Der DBR besteht aus 16 AlAs/GaAs Paaren, die bei 550°C gewachsen wurden. Die Wachstumsbedingungen für den (In,Ga)As MQW aus 50 Perioden von 6 nm GaAs und 6,2 nm $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$ wur-

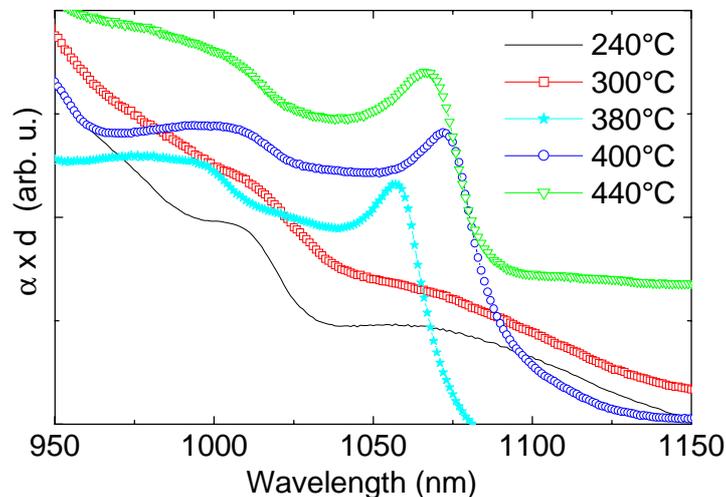


Abb. 1: Absorption als Funktion der Wellenlänge für sättigbare $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$ MQW Absorber, gewachsen bei Temperaturen zwischen 240°C und 440°C.

den so gewählt, dass glatte Oberflächen erzielt werden und sowohl die geforderte exzitonische Resonanz bei 1065 nm als auch die optische Dicke von $n_{\text{eff}} \times d = 2\lambda$ gegeben sind.

Um glatte Oberflächen und gleichzeitig geeignete kurze Ladungsträgerlebensdauern zu erhalten, wurden Teststrukturen des sättigbaren Absorbers (SA) bei Temperaturen zwi-

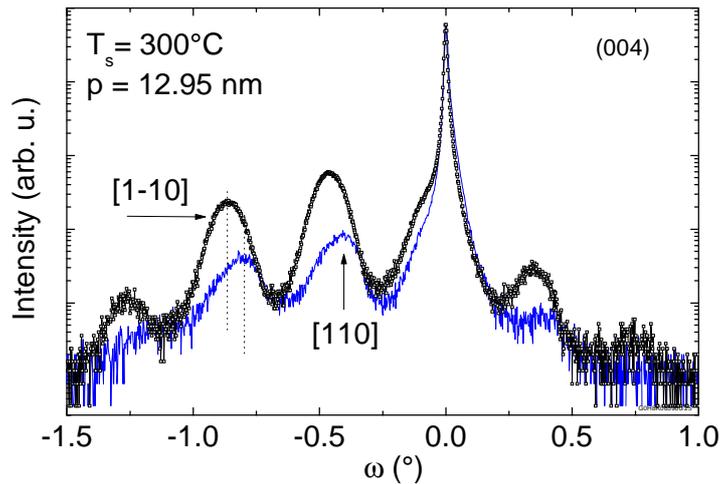


Abb. 2: Röntgenbeugungskurven eines sättigbaren $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW Absorbers ((004) Reflex), gemessen in den beiden orthogonalen $\langle 110 \rangle$ -Richtungen.

schen 200°C und 460°C abgeschieden. Sowohl bei höheren als auch bei niedrigeren Wachstumstemperaturen können keine spiegelnden Oberflächen mehr erhalten werden. Außerdem verschmiert mit abnehmender Wachstumstemperatur das Absorptionsmerkmal zunehmend, so daß die Zusammensetzung des MQW schwer zu kontrollieren ist (vgl. Abb. 1). Eine nachfolgende Temperung (15 min bei 620°C in As_4 -Atmosphäre) verbessert nicht diese optische Eigenschaft.

Für Wachstumstemperaturen zwischen 200°C und 400°C erfolgt eine anisotrope Relaxation der verspannten SA-Struktur in den beiden nicht äquivalenten $\langle 110 \rangle$ -Richtungen, wie aus den in Abb. 2 gezeigten Röntgenbeugungskurven zu entnehmen ist. Sie äußert sich in einer Verschiebung der Satellitenpeaks und in einer unterschiedlichen Reflektivität. Diese Anisotropie resultiert daraus, daß α - und β -Misfitversetzungen (MD) unterschiedlich zur Re-

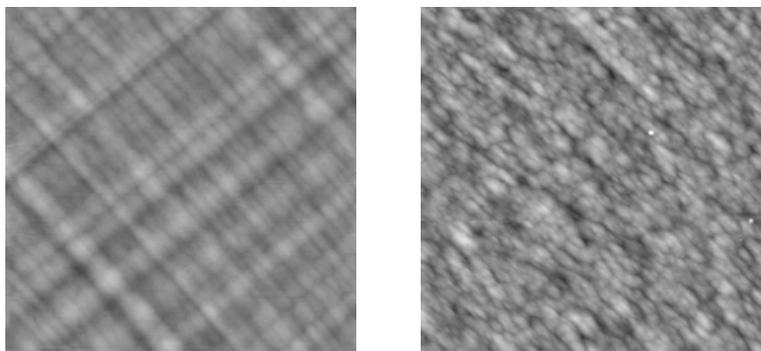


Abb. 3: AFM-Aufnahmen ($10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, Grauskalierung 20 nm) eines MQW sättigbaren Absorbers (links) und einer MQW sättigbarer Absorber-Bragg-Spiegel-Struktur (rechts), gewachsen bei 440°C .

laxation des verspannten Schichtsystems beitragen. Diese Schlußfolgerungen zu den strukturellen Besonderheiten werden durch das in AFM-Aufnahmen von SA-Oberflächen (Abb. 3, links) beobachtete cross hatching infolge von MD-Versetzungen bestätigt. Die entweder durch Misfitversetzungen oder durch den dreidimensionalen Wachstumsmodus verursachte Oberflächenrauigkeit hängt von der Wachstumstemperatur ab. Die Werte für die rms-Rauigkeit des SA liegen bei optimaler Wachstumstemperatur bei etwa 1,5 nm im Vergleich zu 0,4 nm für den DBR. Die rms-Oberflächenrauigkeit der kompletten SA-DBR-Struktur beträgt 2,5 nm und damit etwa $2 \times 10^{-3} \lambda$ (Abb. 3, rechts).

Für ein stabiles Modelocking ist eine exzitonische Resonanz in der Reflektivitätscharakteristik der SA-DBR-Struktur unverzichtbar, und zwar an der spektralen Position des Gain-Maximums des Faserlasers bei 1065 nm. Da die Luft-SA-DBR-Folge einen asymmetrischen Resonator bildet, führen Abweichungen von der Bedingung $n_{\text{eff}} \times d_{\text{MQW}} = 2\lambda$ zu einem zu-

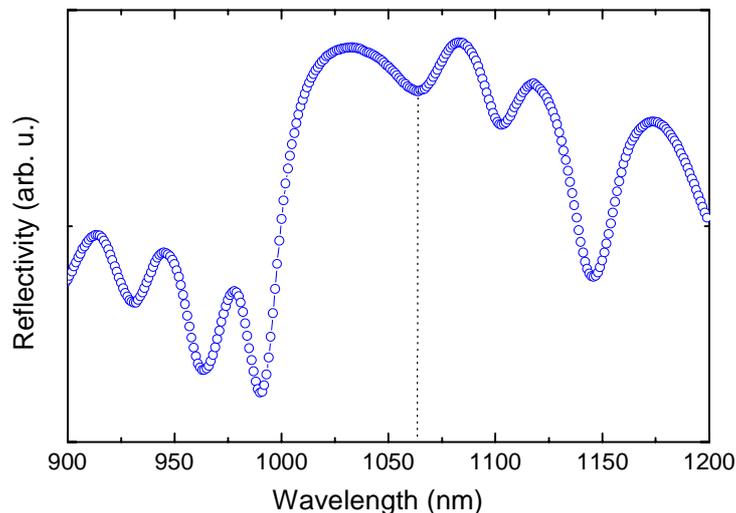


Abb. 4: Reflektivität als Funktion der Wellenlänge für eine Kombination von sättigbarem Absorber und Bragg-Reflektor. Die Senkung bei 1110 nm ist durch eine Abweichung von der Bedingung $n_{\text{eff}} \times d = 2\lambda$ gegeben. Das Stoppband des DBR liegt zwischen 990 nm und 1140 nm.

sätzlichen Merkmal in der Reflektivitätskurve bei 1100 nm, wie in Abb. 4 gezeigt ist. Diese Resonatormode, die zu einem Peak im Transmissionsspektrum führt, beeinträchtigt jedoch nicht die Leistung des Bauelementes. Glatte Oberflächen und ein stabiles Modelocking mit schmalen Pulsbreiten werden für ein SA-DBR-Bauelement erzielt, das bei optimalen Wachstumstemperaturen im Bereich von 400°C bis 460°C hergestellt wird.

3. Arbeiten zum 2-Photonen-Absorber auf der Basis von LT-GaAs

Der gezielte Einbau von überschüssigen As während des Wachstums von GaAs bei niedrigen Temperaturen (LT-GaAs) spielt eine Schlüsselrolle einerseits zum physikalischen Verständnis der besonderen elektrischen und optischen Eigenschaften des Materials LT-GaAs und andererseits zum optimalen Design von Bauelementen auf der Basis von LT-GaAs. In den vorangegangenen Berichtszeiträumen wurde deshalb schwerpunktmäßig die Methode der *in situ*-Charakterisierung mittels Reflexionsdifferenzspektroskopie [1] entwickelt, die es ermöglicht, wesentliche Eigenschaften der LT-GaAs-Schicht, wie z. B. die Nichtstoichiometrie ausgedrückt in Form der Dichte neutraler Antisite-Defekte [As_{Ga}^0], bereits während des Wachstums zu bestimmen (siehe Zwischenbericht vom 23.02.1999).

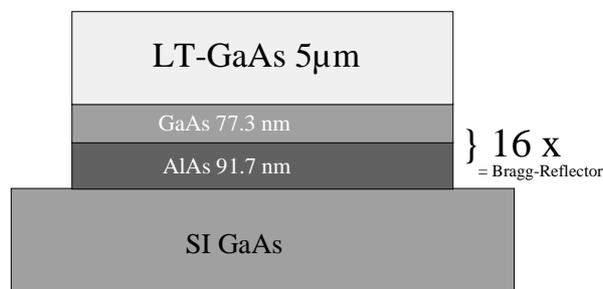


Abb. 5: Schichtaufbau einer LT-GaAs-Schicht mit Bragg-Spiegel.

Wie bereits im vergangenen Berichtszeitraum dargelegt, wurde das *in situ* kontrollierte Wachstum von dicken LT-GaAs-Schichten (bis 14 µm) erfolgreich für die Herstellung eines 2-Photonen-Absorbers (TPA) eingesetzt [2,3]. Hierbei wurden die LT-GaAs-Schichten mittels Waferbonding auf einem Goldspiegel aufgebracht bzw. die Technik der Substratrückätzung genutzt. Mit dem Ziel einer Vereinfachung der Technologie wurde als zusätzliche Variante die komplette Herstellung der 2-Photonen-Absorber-Struktur mittels Molekularstrahlepitaxie durchgeführt. Hierfür wurde auf dem GaAs(001)-Substrat nach Abscheidung einer Pufferschicht ein reflektierender Bragg-Spiegel gewachsen und anschließend mit einer 5 µm dicken LT-GaAs-Schicht überwachsen. Die Schichtstruktur ist schematisch in Abb. 5 dargestellt. Ziel der Untersuchungen im vorliegenden Berichtszeitraum war es, durch eine gezielte Änderung der Schichteigenschaften herauszufinden, inwiefern z. B. eine Änderung der Punktdefektdichte Einfluß auf das Modelocking-Verhalten des Faserlasers hat. Dazu wurde eine Serie von 5 µm dicken LT-GaAs-Schichten auf Bragg-Spiegel hergestellt. Die Punktdefektdichte wurde durch eine Variation der Wachstumstemperatur im Bereich zwischen 270

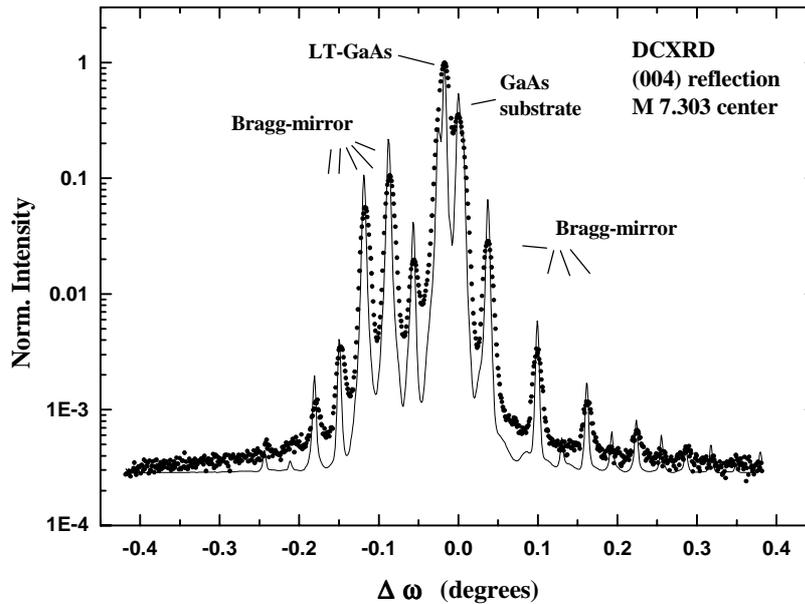


Abb. 6: Röntgenbeugungsmessung (gepunktet) einer LT-GaAs-Schicht auf Bragg-Spiegel (M 7.303) und ihre Anpassung (durchgezogen).

und 350 °C geändert, wobei die Punktdefektdichte mit steigender Wachstumstemperatur abnimmt.

Sämtliche Schichten wurden strukturell mittels Röntgendiffraktometrie und optisch mittels Reflexionsmessungen charakterisiert. Ein typisches Röntgendiffraktometer-Spektrum für die Probe M 7.303 ist in Abb. 6 gezeigt. Neben den Maxima die dem Bragg-Spiegel zuzu-

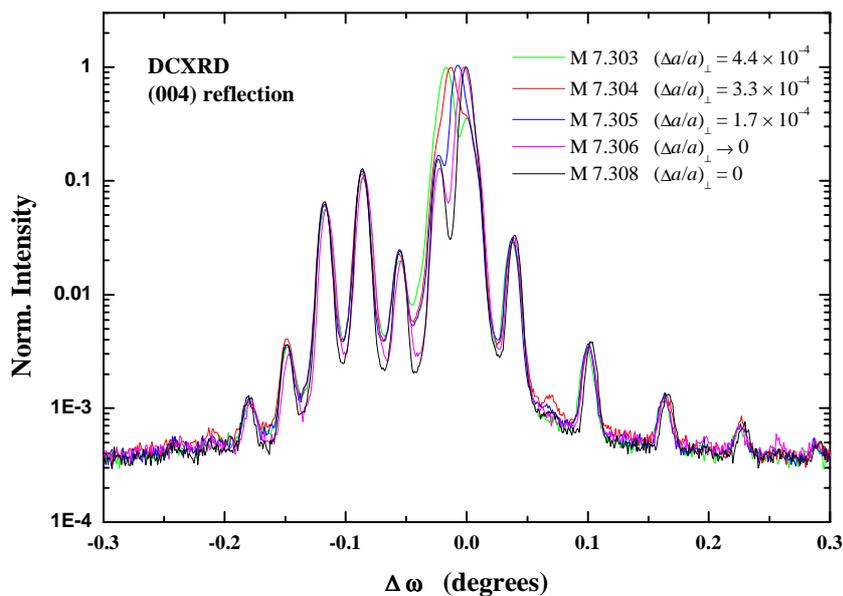


Abb. 7: Röntgenbeugungsmessungen des (004) Reflexes der LT-GaAs-Schichten auf Bragg-Spiegel.

ordnen sind, treten 2 weitere Maxima auf. Das Maximum bei 0° ist der Substratreflex und das Maximum mit der höchsten Intensität ist der Reflex der LT-GaAs-Schicht. Aus der Anpassung der experimentellen Spektren können die Gitterverspannung der LT-GaAs-Schicht in Bezug auf das GaAs-Substrat sowie die Schichtdicken und die Komposition des Bragg-Spiegels bestimmt werden. Die Anpassung der Spektren erfolgte auf Basis der dynamischen Takagi-Taupin-Theorie. Abbildung 7 zeigt die experimentellen Spektren der LT-GaAs-Schichten auf Bragg-Spiegel mit den aus der Anpassung bestimmten Werten für die Gitterverspannung $(\Delta a/a)_\perp$ der Schichten.

Abbildung 8 zeigt das Reflexionsspektrum eines Bragg-Spiegels (M 7.303) einerseits vor dem Wachstum der LT-GaAs-Schicht und andererseits nach deren Wachstum. Gemessen

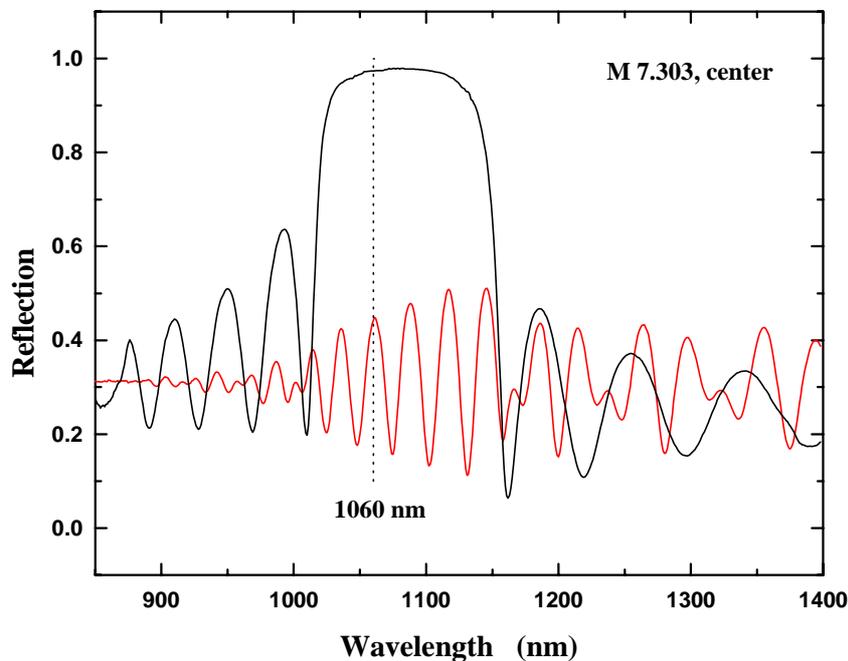


Abb. 8: Reflexionsspektrum eines Bragg-Spiegel vor (schwarz) und nach (rot) dem Wachstum einer $5 \mu\text{m}$ dicken LT-GaAs-Schicht.

wurde in der Mitte des Wafers. Der blanke Bragg-Spiegel erreicht im Bereich des Stoppbandes eine Reflektivität, die im Rahmen der experimentellen Genauigkeit dicht bei eins liegt. Der Bragg-Spiegel wurde so entworfen, daß trotz der Dickenabnahme in Richtung des Waferandes die relevante Wellenlänge (1060 nm) im Bereich des Stoppbandes liegt. Das Reflexionsspektrum der kompletten Schicht zeigt eine deutlich geringere Reflektivität und zusätzlich Reflexionsmodulationen infolge vom Fabry-Perot-Resonanzen der $5 \mu\text{m}$ dicken LT-GaAs-Schicht. Die Schichtdicke der LT-GaAs-Schicht wurde dahingehend optimiert, daß die relevante Wellenlänge des Faserlasers auf dem Reflexionsplateau des Fabry-Perot-Spektrums

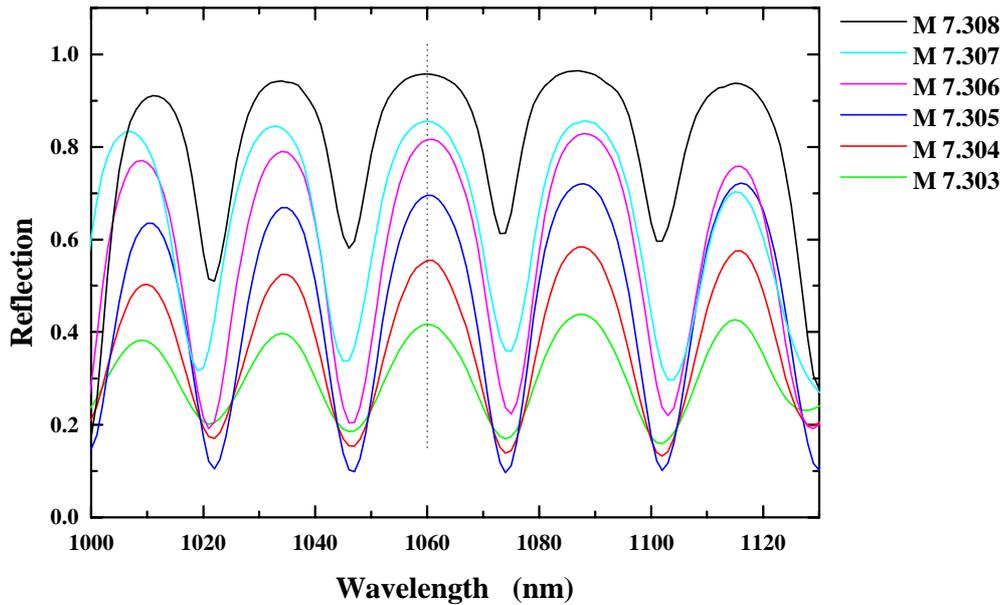


Abb. 9: Reflexionsspektren verschiedener LT-GaAs-Schichten auf Bragg-Spiegel.

liegt. Zur Unterdrückung der Reflexionsmodulationen kann eine Entspiegelung der Oberfläche erfolgen. Die verringerte Reflektivität ist auf eine erhöhte Absorption in der LT-GaAs-Schicht infolge der hohen Punktdefektdichte [As_{Ga}^0] zurückzuführen. Die stärkere Verringerung der Reflektivität für kleinere Wellenlängen im Bereich des Stopbandes des Bragg-Spiegels kann hauptsächlich auf die spektrale Abhängigkeit des EL2-artigen Absorptionsspektrums der Punktdefekte zurückgeführt werden. Abbildung 9 zeigt die Reflexionsspektren der verschiedenen LT-GaAs-Schichten auf Bragg-Spiegel. Mit Erhöhung der Wachstumstemperatur nimmt dabei die Reflektivität der Schichten wie erwartet kontinuierlich zu, da sich infolge der geringeren Punktdefektdichte die lineare Absorption der LT-GaAs-Schicht verringert. Eine direkte Bestimmung der Punktdefektdichte der LT-GaAs-Schichten mittels Absorptionsspektroskopie im nahen Infrarotbereich ist extrem schwierig und mit sehr großen Fehlern behaftet, da einerseits bei Wachstumstemperaturen oberhalb 300 °C die Punktdefekte zu klein ist, um eine meßbare Änderung des Absorptionskoeffizienten zu bestimmen, und andererseits das Stopband des Bragg-Spiegels gerade im spektralen Bereich des Absorptionsspektrums EL2-artiger Defekte liegt.

Da die Reflexionsspektren aber eine starke Abhängigkeit von der Wachstumstemperatur zeigen (Abb. 9) kann die Punktdefektdichte mittels einer Simulation der Reflexionsspektren quantitativ abgeschätzt werden. Die Simulation der Reflexionsspektren erfolgt mit der Transfermatrixmethode unter Verwendung der optischen Konstanten für GaAs und AlAs und der Schichtdicken. Für die LT-GaAs-Schicht wurde zusätzlich das Absorptions-

spektrum der EL2-Zentren berücksichtigt, wobei die Punktdefektdichte Parameter der Simulation ist. Die Ergebnisse der Simulation $[\text{As}_{\text{Ga}}^0]_{\text{Sim}}$ sind in Tab. 1 zusammengefaßt. Zum Vergleich sind die Werte $[\text{As}_{\text{Ga}}^0]_{\text{XRD}}$ hinzugezogen, die man aus der empirischen, linearen Beziehung zwischen $[\text{As}_{\text{Ga}}^0]$ und $(\Delta a/a)_{\perp}$ erhält (Liu *et al.* Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 279). Obwohl die angegebenen Werte aus der Simulation nur eine erste, grobe Abschätzung darstellen können, geben sie doch den erwarteten Trend wider, daß die Punktdefektdichte in den LT-GaAs-Schichten auf Bragg-Spiegel um mehr als eine Größenordnung variiert wurde.

Probe	$(\Delta a/a)_{\perp}$	$[\text{As}_{\text{Ga}}^0]_{\text{XRD}}$	$[\text{As}_{\text{Ga}}^0]_{\text{Sim}}$
M 7.303	4.4×10^{-4}	3.5×10^{19}	4×10^{19}
M 7.304	3.3×10^{-4}	2.6×10^{19}	3×10^{19}
M 7.305	1.7×10^{-4}	1.3×10^{19}	1.5×10^{19}
M 7.306	$\rightarrow 0$	–	6×10^{18}
M 7.307	0	–	3×10^{18}
M 7.308	0	–	1×10^{18}

Tab. 1: Probencharakteristik der LT-GaAs-Schichten auf Bragg-Spiegel.

Alle Schichten wurden sowohl am Max-Born-Institut hinsichtlich der Eignung zum Modelocking des Faserlasers als auch an der Universität Potsdam hinsichtlich der Bestimmung der nichtlinearen Brechungsindexänderung und des 2-Photonen-Absorptionskoeffizienten untersucht. Die Ergebnisse sind in den jeweiligen Berichten dargestellt.

Abgeschlossen und veröffentlicht [4,13,17] wurden auch die Untersuchungen zur Wachstumskinetik und Oberflächenmorphologie von LT-GaAs mittels AFM. Die wesentlichen Ergebnisse werden an dieser Stelle kurz zusammengefaßt, da sie sowohl für das optimierte Wachstum als auch für das Design von LT-GaAs-Schichten mit extremer Schichtdicke relevant sind.

In einer Reihe von Untersuchungen zum epitaktischen Wachstum konnte gezeigt werden, daß für eine Vielzahl von Materialien während des Wachstums eine nahezu reguläre Anordnung von 3-dimensionalen Wachstumshügeln (mounds) auf anfänglich glatten Oberflächen entsteht. Ursache dafür ist eine intrinsische Wachstumsinstabilität singulärer Oberflächen infolge von sogenannten Ehrlich-Schwöbel-Diffusionsbarrieren (ES-Barrieren). Physikalisch können die ES-Barrieren dadurch beschrieben werden, daß sie Adatome daran hindern, an Stufenkanten herunterzufallen. Obwohl der Einbau des Adatoms an der Stufenkante

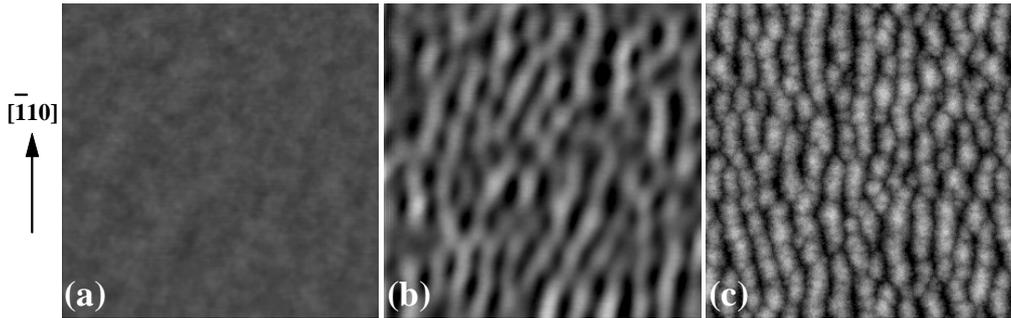


Abb. 10: AFM-Aufnahmen einer 1 μm dicken LT-GaAs-Schicht für $T_G = 280\text{ }^\circ\text{C}$ (a) und $T_G = 210\text{ }^\circ\text{C}$ (b). Die Flächen betragen $1 \times 1\ \mu\text{m}^2$ (a) bzw. $0.5 \times 0.5\ \mu\text{m}^2$ (b). Die Grauskalierung ist in beiden Fällen gleich und zeigt eine Höhendifferenz von 8 nm. (c) Graustufenbild einer simulierten Oberfläche einer 1 μm dicken LT-GaAs-Schicht. Die Diffusionslänge entlang $[110]$ beträgt 13.6 nm. Die ES-Barriere beträgt 0.1 eV. Die Grauskalierung zeigt eine Höhendifferenz von 4 nm und die Fläche beträgt $0.5 \times 0.5\ \mu\text{m}^2$.

energetisch günstiger wäre, führt dies zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit der Bildung neuer 2-dimensionalen Inseln auf bereits existierenden Inseln. Die Wiederholung dieses Prozesses führt zur Ausbildung von Strukturen, die mehrere Monolagen umfassen (Wachstumshügel).

Der Einfluß der Wachstumstemperatur auf die Oberflächenmorphologie ist in typischen AFM-Aufnahmen in Abbn. 10(a) und (b) dargestellt. Für Wachstumstemperaturen $T_G > 260\text{ }^\circ\text{C}$ ist die Oberfläche sehr glatt (Rauhigkeit $\leq 1.5\text{ nm}$). Bei einer Absenkung der Wachstumstemperatur unter $260\text{ }^\circ\text{C}$ erscheint eine typische Anordnung von Wachstumshügeln (Abb. 10(b)). Diese Wachstumshügel haben eine Höhe von 8 nm und eine laterale Ausdehnung von ca. 50 nm. Die Wachstumshügel sind asymmetrisch, wobei die längere Seite entlang $[\bar{1}10]$ orientiert ist. Eine Verringerung der Wachstumstemperatur führt zu höheren Wachstumshügeln und zu einer stärkeren Anisotropie. Ähnlich verhält es sich in Abhängigkeit vom As_4 -Hintergrunddruck während des Wachstums. Hier beobachten wir im Besonderen, dass für $T_G = 210\text{ }^\circ\text{C}$ die Wachstumshügel bei sehr geringen As_4 :Ga-Einfallsratenverhältnis verschwinden und eine Oberflächenmorphologie ähnlich der in Abb. 10(a) gezeigten beobachtet wird.

Wir vermuten, dass das Auftreten von Wachstumshügeln bei tiefen Wachstumstemperaturen auf einen neuen Adatom-Diffusionsmechanismus zurückzuführen ist, der nur bei tiefen Temperaturen ($< 300\text{ }^\circ\text{C}$) auftritt. Die Schlüsselrolle hierbei spielt überschüssiges Arsen, daß auf der Oberfläche kondensiert und dabei als Surfactant wirkt und somit die Beweglichkeit der Ga-Adatome erhöht [4]. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit einer numeri-

schen Simulation des Wachstumsprozesses (Abb. 10(c)) unter Berücksichtigung des Vorhandenseins von ES-Barrieren überein [4,17].

Die Existenz derartiger Wachstumshügel kann durch den möglicherweise bevorzugten Einbau von Überschuß-Arsen auf diesen Wachstumshügeln zur Ausbildung von pyramidenförmigen Defekten führen. Pyramidenförmige Defekte sind verantwortlich für den Zusammenbruch des einkristallinen Wachstums von LT-GaAs bei Überschreiten einer von den Wachstumsparametern abhängigen kritischen Schichtdicke. Obwohl der Zusammenhang zwischen Wachstumshügeln und pyramidenförmiger Defekte noch nicht zweifelsfrei geklärt ist, liegt es nahe, die Parameter für das Wachstum extrem dicker LT-GaAs-Schichten so zu wählen, daß Wachstumshügel nicht auftreten.

4. Veröffentlichungen

Zeitschriften

- [1] G. Apostolopoulos, J. Herfort, W. Ulrici, L. Däweritz, and K. H. Ploog
In situ reflectance difference spectroscopy of GaAs grown at low temperatures
Phys. Rev. B **60**, R5145 (1999).
- [2] M. Leitner, P. Glas, T. Sandrock, M. Wrage, G. Apostolopoulos, H. Kostial, A. Riedel, J. Herfort, K.-J. Friedland, and L. Däweritz
Self-starting mode-locked Nd:glass fiber laser using the third order nonlinearity of low-temperature-grown GaAs
Optics Lett. **24**, 1567 (1999).
- [3] J. Herfort, G. Apostolopoulos, W. Ulrici, K.-J. Friedland, H. Kostial, L. Däweritz, M. Leitner, P. Glas, and K. H. Ploog
In situ controlled growth of low-temperature GaAs and its application for mode-locking devices
Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 2452 (2000).
- [4] G. Apostolopoulos, J. Herfort, L. Däweritz, K. H. Ploog, and M. Luysberg
Reentrant mound formation during GaAs(001) homoepitaxy observed by ex situ atomic force microscopy
Phys. Rev. Lett. **84**, 3358 (2000).

Internationale Konferenzen

- [5] J. Herfort, G. Apostolopoulos, L. Däweritz and K. Ploog
Reflectance-Difference Spectroscopy of Low Temperature Grown (001) GaAs
Proceedings of the 1st Symposium on Non-Stoichiometric III-V Compounds,
Erlangen (Germany), October 5 - 7 (1998), in Physik Mikrostrukturierter Halbleiter **6**
(1998), p. 53-58.
- [6] G. Apostolopoulos, J. Herfort, L. Däweritz, W. Ulrici, and K. H. Ploog
In situ control of electronic properties of low temperature grown (Al,Ga)As by reflectance difference spectroscopy
Extended Abstracts of the 10th European Molecular Beam Epitaxy Workshop (Euro-MBE-10), Les Arc (France), March 28 – April 1 (1999).
- [7] M. Leitner, P. Glas, G. Apostolopoulos, A. Riedel, H. Kostial, J. Herfort, K.-J. Friedland, and L. Däweritz
Self-starting mode locked Nd:glass fiber laser using low-temperature-grown GaAs
Proceeding of the 19th Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'99), Baltimore (USA), May 23 - 28 (1999), in OSA Technical Digest (Optical Society of America, Washington(DC), 1999), p. 109-110.

- [8] J. Herfort, G. Apostolopoulos, W. Ulrici, L. Däweritz, K. Ploog, M. Leitner, and P. Glas
In situ controlled electronic properties of low temperature GaAs(001) for two-photon absorbers
Extended Abstracts of 41st Electronic Materials Conference (EMC'99), Santa Barbara (USA), June 30 – July 2 (1999), in J. Electron. Mat. **28** no. 7, 77 (1999).
- [9] G. Apostolopoulos, J. Herfort, W. Ulrici, and L. Däweritz
Reflectance difference spectroscopy for growth control and characterization of low-temperature grown (Al,Ga)As materials
Proceedings of the 26th International Conference on Compound Semiconductors (ICCS'99), Berlin (Germany), August 22 - 26 (1999), in Inst. Phys. Conf. Ser. No. **166**, edited by G. Tränkle and K. H. Ploog (IOP Publishing, Bristol, 2000), pp. 31-34.
- [10] J. Herfort, G. Apostolopoulos, W. Ulrici, K.J. Friedland, H. Kostial, L. Däweritz, M. Leitner, P. Glas, and K. H. Ploog (**invited**)
Low-temperature-grown GaAs – in situ characterization and application
Proceeding of the International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM'99), Tokyo (Japan), September 21- 24 (1999), p. 556-557.
- [11] J. Herfort, G. Apostolopoulos, W. Ulrici, L. Däweritz, and K. H. Ploog
Role of the Excess As Concentration on the Optical Transitions E_1 and $E_1 + \Delta_1$ in Low-Temperature Grown GaAs
Proceedings of the 2nd Symposium on Non-Stoichiometric III-V Compounds, Erlangen (Germany), October 4 - 6 (1999), in Physik Mikrostrukturierter Halbleiter **10** edited by T. Marek, S. Malzer, and P. Kiesel, (Verlag Lehrstuhl für Mikrocharakterisierung, Erlangen, 1999), pp. 65-70.
- [12] J. Herfort, G. Apostolopoulos, W. Ulrici, L. Däweritz, and K. H. Ploog
Control of non-stoichiometry of low-temperature-grown III-V compounds using in situ reflectance difference spectroscopy
Proceedings of the 11th Internat. Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XI), Canberra (Australien), July 3 – 7 (2000), accepted for publication in IEEE Conf. Proc. (2001).
- [13] G. Apostolopoulos, J. Herfort, L. Däweritz, and K. H. Ploog
Mound formation during GaAs(001) homoepitaxy at low substrate temperatures
Proceedings of the 11th Internat. Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XI), Canberra (Australien), July 3 – 7 (2000), accepted for publication in IEEE Conf. Proc. (2001).
- [14] M. Leitner, P. Glas, M. Wrage, T. Sandrock, H. Legall, A. Heuer, G. Apostolopoulos, J. Herfort, L. Däweritz
Mode locked Nd:glass fiber laser using intensity dependent defocussing by low-temperature-grown GaAs
European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Europe 2000), Nice (France), September 10 – 15 (2000), CMB4.

Nationale Konferenzen

- [15] G. Apostolopoulos, J. Herfort, L. Däweritz and K. H. Ploog
Surface Morphology of as Grown and Annealed Low Temperature Molecular Beam Epitaxial GaAs Layers on (001) Oriented Substrates
Proceedings of the 14th Panhellenic Conference on Solid State Physics, Ioannina (Greece), September 15 - 18 (1998).
- [16] G. Apostolopoulos, J. Herfort, H. Kostial, K.-J. Friedland, and L. Däweritz
LT-GaAs: Eigenschaften und Lift-off Technik
Molecular Beam Epitaxy Workshop 1998, Hamburg (Germany), September 21 – 22 (1998).
- [17] G. Apostolopoulos, J. Herfort, L. Däweritz, and K. H. Ploog
Mound formation during GaAs(001) homoepitaxy at low substrate temperatures: a Monte-Carlo simulation study
Proceedings of the 16th Panhellenic Conference on Solid State Physics, Nafplion (Greece), September 17 – 20 (2000).

Eingeladene Seminarvorträge

- [18] J. Herfort
In Situ Reflectance Difference Spectroscopy of Low-Temperature GaAs
Department of Physics of the University of Tokyo, Tokyo (Japan), September 16 (1999).
- [19] J. Herfort
In Situ Controlled Growth of LT-GaAs and its Application for Mode-Locking Devices
NTT Basic Research Laboratories, Atsugi (Japan), September 17 (1999).
- [20] J. Herfort
In Situ Controlled Growth of LT-GaAs and its Application for Mode-Locking Devices
Department of Electrical Engineering of the Waseda-University, Tokyo (Japan), September 20 (1999).

Ausstellungen

- [21] *In Situ Characterization of LT-GaAs by Reflectance-Difference Spectroscopy*
Forum – Die Messe der Hauptstadtregion, Europarteneriat Brandenburg 1999, Potsdam (Germany), October 30 (1999).

5. Anlagen

Zwischenbericht vom 26.02.1998 zum Berichtszeitraum 01.06.1997-31.12.1997

Zwischenbericht vom 23.02.1999 zum Berichtszeitraum 01.01.1998-31.12.1998

Zwischenbericht vom 14.01.2000 zum Berichtszeitraum 01.01.1999-31.12.1999

Bericht zum Treffen des BMBF-Teilverbundes 4, Braunschweig 03.09.1999

8 Veröffentlichungen ([1], [2], [3], [4], [5], [11], [12], [13] entsprechend Abschnitt 4, nur in der gedruckten Fassung)

Zwischenbericht zum F+E-Vorhaben: 13N7088/0

„Erforschung eines diodengepumpten (Multi-core) M-Profil-Faserlasers im Ultrakurz-pulsbetrieb“

Arbeiten zur „Entwicklung eines Halbleiter-Bauelementes aus Bragg-Reflektoren, sättigbarem Absorber und 2-Photonen-Absorber“

Berichtszeitraum: 01.06.1997 – 31.12.1997

Der sättigbare Absorber des Bauelementes für die Wellenlänge $1,055\mu\text{m}$ wurde mittels Molekularstrahlepitaxie auf der Basis von $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ realisiert. Die Struktur ist aufgebaut aus einem Übergitter mit 50 Perioden von 6 nm GaAs und $6,2\text{ nm In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ auf einem Bragg-Reflektor bestehend aus 16 Perioden von 75 nm GaAs und 89 nm AlAs . Nach Abscheidung einer Pufferschicht von 100 nm Dicke auf semiisolierendem $\text{GaAs}(001)$ -Substrat bei 550 °C wurden der Bragg-Reflektor bei 580 °C und der Absorber bei 380 °C gewachsen. Die niedrige Substrattemperatur für das Wachstum des hochverspannten $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -Übergitters ist optimiert, um die infolge der Verspannung unvermeidliche Aufrauung der Wachstumsfläche gering zu halten. Dies ist erforderlich für die Realisierung einer möglichst geringen Rauigkeit der Grenzfläche zum nachfolgenden Schichtsystem. Mittels Röntgen-diffraktometrie wurden die Periode des $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ -Übergitters mit $12,6\text{ nm}$ und die des Bragg-Reflektors mit 165 nm bestimmt.

Im Hinblick auf den 2-Photonen-Absorber wurde das Wachstum von GaAs mittels MBE bei niedrigen Temperaturen (LT-GaAs) untersucht. Ziel der Untersuchungen sind einerseits der kontrollierte Einbau von überschüssigem As, um die angestrebten Eigenschaften des LT-Materials (Ladungsträgerlebensdauer) zu erreichen, und andererseits die Realisierung einer möglichst glatten Oberfläche, um unter Anwendung des Waferbondings komplexere Strukturen aufbauen zu können. Bisher wurden Schichten von $1\mu\text{m}$ Dicke untersucht, die im Temperaturintervall von 210 °C bis 256 °C auf semiisolierendem $\text{GaAs}(001)$ -Substrat abgeschieden wurden. Die Wachstumsrate lag bei $1\mu\text{m h}^{-1}$, das $\text{As}_4 : \text{Ga}$ -Einfallsratenverhältnis entsprach einem BEP (beam equivalent pressure) $\text{As}_4 : \text{Ga}$ -Verhältnis von 15. Die durch den Einbau von überschüssigem As bedingte Verzerrung des Gitters wurde mittels Röntgenbeugung unter Verwendung des (004)-Reflexes und unter Berücksichtigung der tetragonalen Verzerrung der Epitaxieschicht ermittelt. Für das untersuchte Temperaturintervall wurde

eine nahezu lineare Variation der Verzerrung $\Delta a/a$ zwischen $3,2 \times 10^{-4}$ und $7,3 \times 10^{-4}$ gefunden (Abb.1). Für die Wachstumstemperatur von 220 °C wurde das BEP As_4 : Ga-Verhältnis zwischen 8 und 25 variiert. Damit verbunden ist eine Zunahme des $\Delta a/a$ -Wertes von $4,2 \times 10^{-4}$ auf $6,5 \times 10^{-4}$, wobei oberhalb von 15 bereits der Sättigungsbereich beginnt. Die vorliegenden Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit kürzlich publizierten Ergebnissen anderer Autoren und erlauben die Schlußfolgerung, daß in einem gut definierten Parameterbereich die Gitterverzerrung mit der Menge von nichtstöchiometrisch eingebautem As korreliert [1,2]. Das im Überschuß eingebaute As wird durch eine Temperung zu As-Clustern in der GaAs-Matrix umverteilt, wobei die Gitterverzerrung fast vollständig aufgehoben wird. Erst nach dieser Temperung weist LT-GaAs die angestrebten kurzen Ladungsträgerlebensdauern auf.

Es wurde eine Temperung von 20 min Dauer bei einer Temperatur von 610 °C und einem As_4 -BEP-Wert von $9,8 \times 10^{-6}$ Torr vorgenommen. Die Aufhebung der Gitterverzerrung wurde röntgendiffraktometrisch nachgewiesen. Die Oberflächenausbildung von ungetemperten und getemperten Proben wurde mittels Rasterelektronenmikroskopie und Kraftmikroskopie untersucht. Im Rasterelektronenmikroskop erscheinen die Oberflächen homogen mit einem relativ geringen Kontrast infolge von Strukturen von einigen 10-bis 100 nm Längenausdehnung (Abb.2). Mit dem Kraftmikroskop werden inselähnliche Strukturen aufgelöst (Abb.3a), wobei eine systematische Variation der Rauigkeit mit den Abscheidungsparametern beobachtet wird. Für die Versuchsreihe mit konstantem As_4 :Ga-BEP-Verhältnis von 15 wurde bei einer Erhöhung der Wachstumstemperatur von 210 °C auf 256 °C eine nahezu lineare Abnahme der rms-Rauigkeit (ermittelt für eine Bildgröße von $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$) von 1,5 auf 0,12 nm gefunden (Abb.4). Getemperte Proben sind deutlich glatter (rms-Rauigkeit von 0,3 nm gegenüber 0,9 nm für die ungetemperte Probe bei einer Wachstumstemperatur von 220 °C) und weisen eine Terrassen-Stufen-Struktur auf (Abb.3b), wie sie für eine (001)-Oberfläche mit unbeabsichtigter (lokaler) Fehlorientierung erwartet wird. Die bisher für 1 μm dicke Schichten erreichten Rauigkeiten erscheinen ausreichend, um Untersuchungen zum Waferbonding aufzunehmen.

[1] M. Missous and S. O'Hagan, J. Appl. Phys. 75,3396 (1994).

[2] M. Luysberg, H. Sohn, A. Prasad, P. Specht, Z. Liliental-Weber, E.R. Weber, J. Gebauer, and R.Krause-Rehberg, J. Appl. Phys. 83,561 (1998).

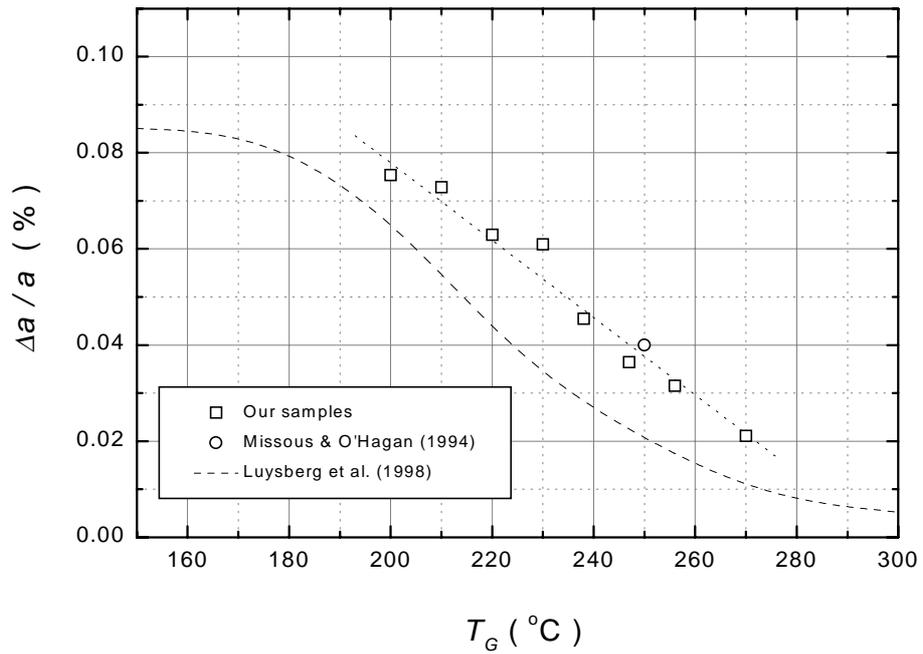


Abb. 1. Gitterverzerrung $\Delta a/a$ für LT - GaAs in Abhängigkeit von der Wachstumstemperatur T_G . Substrat GaAs(001), BEP As₄:Ga = 15, Wachstumsrate 1 $\mu\text{m h}^{-1}$, Schichtdicke 1 μm . Pufferschicht: 250 nm, abgeschieden bei 580°C, BEP As₄:Ga = 15.

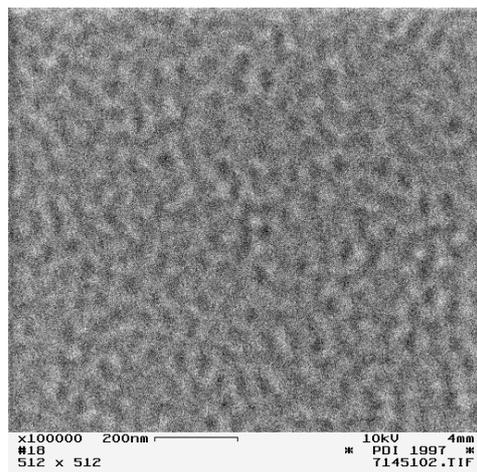


Abb. 2. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer bei 230°C abgeschiedenen GaAs(001) - Schicht.

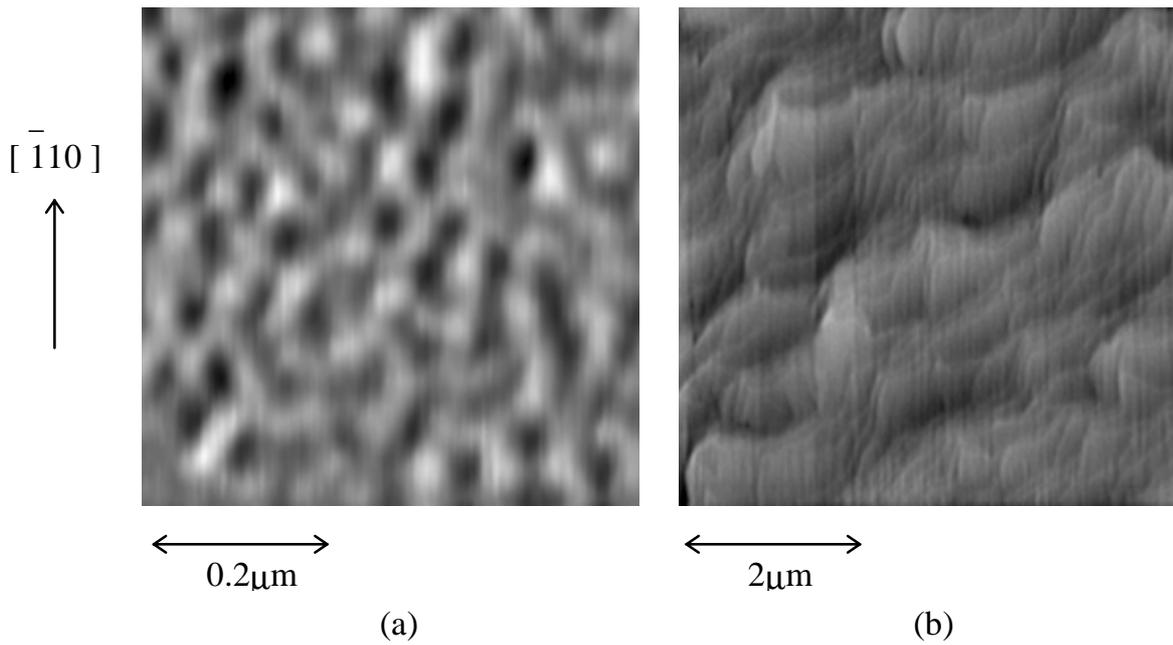


Abb. 3. AFM - Aufnahmen von bei 220°C abgeschiedenen GaAs(001)-Schichten ohne Temperung (a) und mit anschließender Temperung bei 610°C (b). Temperzeit 20 min, BEP $As_4 = 9.8 \times 10^{-6}$ mbar.

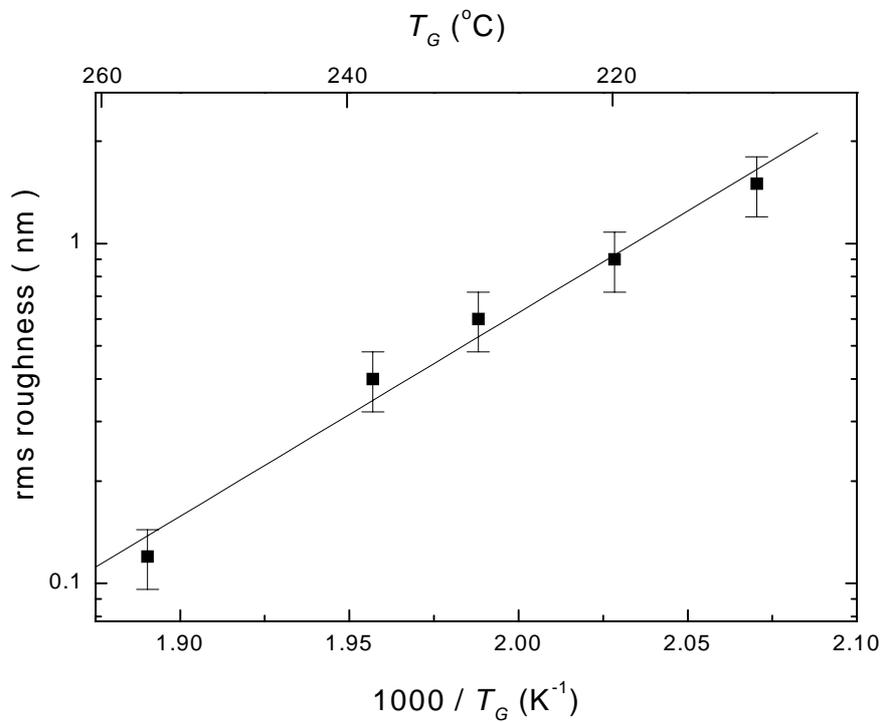


Abb. 4. Oberflächenrauigkeit (rms für $0.5\mu m \times 0.5\mu m$) von LT - GaAs(001) in Abhängigkeit von der Wachstumstemperatur.

Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik

Dr. L. Däweritz
Hausvogteiplatz 5-7
10117 Berlin

23.02.1999

Zwischenbericht zum F+E-Vorhaben: 13N7088/0

„Erforschung eines diodengepumpten (Multi-core) M-Profil-Faserlasers im Ultrakurz-pulsbetrieb“

Arbeiten zur „Entwicklung eines Halbleiter-Bauelementes aus Bragg-Reflektoren, sättigbarem Absorber und 2-Photonen-Absorber“

Berichtszeitraum: 01.01.1998 - 31.12.1998

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeiten zum Wachstum und zur Optimierung des Halbleiterbauelementes aus sättigbarem Absorber und Bragg-Reflektor für eine variierte Arbeitswellenlänge fortgeführt. Außerdem wurde als Alternativvariante die Herstellung eines Zwei-Photonen-Absorbers auf der Basis von LT-GaAs mit großer Intensität bearbeitet.

Halbleiterbauelement aus sättigbarem Absorber und Bragg- Spiegel (SESAM)

Ausgangspunkt war die SESAM-Struktur für die Arbeitswellenlänge $1,055 \mu\text{m}$ aus dem vorangehenden Berichtszeitraum (01.06.1997-31.12.1997) mit folgendem Schichtaufbau: Übergitter aus 50 Perioden von 6 nm GaAs und $6,2 \text{ nm In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ auf einem Bragg-Reflektor bestehend aus 16 Perioden von 75 nm GaAs und 89 nm AlAs . Das $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -Übergitter des Absorbers wurde als LT (Tieftemperatur)-Material bei $380 \text{ }^\circ\text{C}$ abgeschieden. Diese Parameter orientierten sich an in der Literatur von Keller [1] angegebenen Daten. Während des Bearbeitungszeitraums dieses Berichtes änderte sich die Vorgabe der Arbeitswellenlänge von $1,055 \mu\text{m}$ auf $1,065 \mu\text{m}$. Außerdem stellte sich heraus, daß die Literaturdaten sowohl zur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - Zusammensetzung als auch zur Wachstumstemperatur ungenau sind und sorgfältiger Korrekturen bedürfen, um die gewünschten Eigenschaften der SESAM-Struktur zu gewährleisten. Unter Beibehaltung der Schichtdicken wurde der In-Gehalt auf $x = 0,24$ korrigiert.

Was die Absorbereigenschaften betrifft, so sind weitere Arbeiten zu deren Beeinflussung durch die Wachstumstemperatur, welche die Nichtstöchiometrie und Ladungsträgerlebensdauer bestimmt, erforderlich. Problematisch sind sowohl die Messung der Lebensdauer als auch eine exakte Vorgabe zu den angestrebten Werten. An einer Serie von Absorberstrukturen, die bei unterschiedlichen Wachstumstemperaturen hergestellt wurden, werden zur Zeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Halbleitertechnik der RWTH Aachen Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt. Aus den bereits vorliegenden Ergebnissen ist ersichtlich, daß die bisher verwendete Wachstumstemperatur von $380 \text{ }^\circ\text{C}$ reduziert werden muß.

Die durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, daß für die Herstellung der Absorberstruktur mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) ein extrem hoher Aufwand erforderlich ist [2]. Das belegen die folgenden Abschätzungen. Die Wellenlänge darf nur eine Abweichung von $0,5\%$ aufweisen. Auf der anderen Seite ist eine anlagenbedingte Variation der Schichtdicke über den 2"-Wafer (Zentrum - Rand) von 4% in Rechnung zu stellen. Die Genauigkeit der Flußratenmessung der Molekularstrahlen beträgt 1% . Die Variation der Wellenlänge λ ist möglich über die Schichtdicke oder die Zusammensetzung des $(\text{In,Ga})\text{As}$. Das bedeutet eine Änderung der Dicke von $6,2 \text{ nm}$ um $0,06 \text{ nm}$ bzw. eine Änderung der Blendenöffnungszeit der Effusionszelle von 40 s um $0,2 \text{ s}$. Die Bestimmung des In-Gehaltes ist nur unter hohem Zeit- und Meßaufwand möglich, da es sich um ein hochverspanntes System handelt. Die übli-

che Messung von RHEED-Intensitätsschwankungen ist stark eingeschränkt. Die Photolumineszenz ist nicht einsetzbar, weil vorliegende Versetzungen zur nichtstrahlenden Rekombination führen.

Die geforderte Genauigkeit der Probenparameter liegt also innerhalb der Toleranzen der MBE. Um dennoch geeignete Proben zu erhalten, sind Versuchsreihen erforderlich, bei denen eine unmittelbar anschließende Charakterisierung innerhalb von 1-2h die notwendige Korrekturgröße für den daran anschließenden Wachstumsversuch liefert. Hierfür wurde ein separater Meßplatz mit permanentem Zugriff aufgebaut. Die bei der Anpassung der Struktur auf die geforderte Arbeitswellenlänge erzielten Ergebnisse und auftretenden Probleme sind ausführlicher in [2] dargelegt. Die gegenwärtigen Arbeiten konzentrieren sich auf die Optimierung der SESAM-Struktur unter Berücksichtigung von Ergebnissen zu den Ladungsträgerlebensdauern.

Zwei-Photonen-Absorber auf der Basis von LT-GaAs

Um die mit der aufwendigen SESAM-Struktur verbundenen Probleme zu vermeiden, wurde Arbeiten zur Entwicklung eines Halbleiterbauelementes, das auf einem Zwei-Photonen-Absorptionsprozeß in LT-GaAs basiert, besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Das Wachstum von GaAs mittels MBE bei niedrigen Temperaturen wurde mit spezieller Sicht auf diesen Zwei-Photonen-Absorber untersucht. Weiterhin war eine optimale Methode für das Aufbringen der epitaktisch gewachsenen LT-GaAs-Schicht auf eine als Spiegel dienende Goldschicht zu entwickeln.

Für die Eigenschaften des Zwei-Photonen-Absorbers sind die Wachstumsbedingungen des bei niedrigen Temperaturen abgeschiedenen GaAs entscheidend. Im Hinblick auf eine Optimierung der Wachstumsparameter arbeiten wir an einer *in situ*-Charakterisierungsmethode, die es erlaubt, wesentliche Materialeigenschaften des LT-GaAs bereits während des Wachstums zu bestimmen. Eingesetzt wird die Reflexionsdifferenz-Spektroskopie (RDS), da standardmäßig durchgeführte RHEED-Untersuchungen bei den verwendeten niedrigen Wachstumstemperaturen nur bedingt Aussagen über die Materialeigenschaften zulassen. Dabei wird die Anisotropie der Reflexion von linear polarisiertem Licht entlang der kristallographischen Hauptachsen genutzt, die durch das oberflächennahe elektrische Feld bedingt ist. Letzteres entsteht infolge der hohen Konzentration von nichtstöchiometrisch eingebautem Arsen auf Gallium-Gitterplätzen. Abb. 1 zeigt typische RD-Spektren für eine undotierte GaAs-Schicht, eine *n*-dotierte (Si) GaAs-Schicht und eine *p*-dotierte (C) GaAs-Schicht, jeweils abgeschieden bei einer konventionellen Wachstumstemperatur T_G von 580 °C, sowie das RD Spektrum einer LT-GaAs-Schicht ($T_G = 300$ °C). Während die optische Anisotropie der undotierten GaAs-Schicht typisch für eine $c(4 \times 4)/d(4 \times 4)$ -rekonstruierte GaAs(001)-Oberfläche ist, resultieren die für die *n*- und *p*-dotierten Schichten zusätzlich beobachteten Anisotropien in der Nähe der kritischen Punkte in der Interbandzustandsdichte E_1 und $E_1 + \Delta_1$ aus dem linear-elektrooptischen Effekt (LEO) [3]. Im Fall der LT-GaAs-Schicht wird eine ähnliche LEO-Struktur beobachtet wie bei einer *n*-dotierten Schicht, woraus geschlossen werden kann, daß auch das Oberflächenfeld der LT-GaAs-Schicht ähnlich dem der *n*-dotierten Schicht ist.

Abb. 2 zeigt für eine LT-GaAs-Schicht ($T_G = 300$ °C) RD-Spektren, wie sie während einer Wachstumsunterbrechung bzw. während des Wachstums erhalten werden. Für beide Fälle ist die LEO-Struktur nahezu gleich. Das demonstriert, daß die verwendete Methode bereits während des Wachstums *in situ* einsetzbar ist. Es sei angemerkt, daß eine ähnliche Beobachtung der LEO-Struktur sowohl während des Wachstums als auch nach Wachstumsunterbrechung bei konventionellen Wachstumstemperaturen (500 - 600 °C) nicht möglich ist, da der LEO-Effekt bei höheren Temperaturen stark abgeschwächt wird.

Wie in den Abbildungen 3-5 dargestellt ist, hängt die Peak-to-Valley-Amplitude der LEO-Struktur A_{PV} deutlich von der Wachstumstemperatur (Abb. 3), der Wachstumsrate (Abb. 4) und dem $As_4:Ga$ -Einfallsratenverhältnis, ausgedrückt als Verhältnis der äquivalenten Strahldrucke (BEP), (Abb. 5) ab.

Um eine Korrelation der experimentell bestimmten A_{PV} -Werte mit den elektronischen Eigenschaften der LT-GaAs-Schichten herzustellen, wurde der Einbau des überschüssigen As mittels Röntgenbeugung und optischer Absorptionsspektroskopie untersucht. Bei der Röntgenbeugung wird unter Verwendung des (004)-Rflexes die tetragonale Verzerrung des Gitters $\Delta a/a$ bestimmt. Frühere Untersuchungen [4] haben gezeigt, daß zwischen $\Delta a/a$ und der Wachstumstemperatur im Intervall 200 bis 280 °C ein nahezu linearer Zusammenhang besteht. Abb. 6 zeigt, daß auch zwischen dem A_{PV} -Wert und $\Delta a/a$ eine nahezu lineare Abhängigkeit in diesem Wachstumstemperaturintervall existiert. Weiterhin besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der mittels optischer Absorptionsspektroskopie ermittelten Konzentration neutraler Defekte $n_{[As]}^0$ (As auf Ga-Gitterplätzen) und dem A_{PV} -Wert (Abb. 6).

Ausgehend von den oben dargelegten Ergebnissen ist die Anwendung der RDS für eine Optimierung des Wachstums von LT-Material sehr attraktiv, da diese in situ-Analysenmethode als Monitor nicht nur der Oberflächenstruktur sondern auch der elektronischen Eigenschaften geeignet ist. Dies ermöglicht den kontrollierten Einbau von überschüssigem As als Voraussetzung für die Erzielung der angestrebten Eigenschaften des LT-Materials.

Für die erfolgreiche Realisierung des Zwei-Photonen-Absorbers auf der Basis von LT-GaAs wird davon ausgegangen, daß die erforderliche Schichtdicke im Bereich zwischen 10 und 20 μm liegt. Desweiteren sollte die Lebensdauer der Ladungsträger vergleichbar zur Breite des generierenden Pulses sein. Mit dieser Zielstellung wurden LT-GaAs-Schichten bei einer Wachstumstemperatur von 300 °C, einer Wachstumsrate von 1 $\mu m/h$ und einem BEP-Verhältnis von 20 hergestellt. Die Schichtdicken betragen 9 μm und 14 μm . Die Wachstumstemperatur von 300 °C ist für LT-GaAs relativ hoch, stellt jedoch einen Kompromiß dar, um einerseits eine hohe kristalline Qualität der Schichten zu erreichen und andererseits eine ausreichende optische Nichtlinearität sowie geringe Ladungsträger-lebensdauer zu gewährleisten. Aufgrund der inherenten Gitterverspannung (bis zu 0.15%, Abb. 6) ist für bei 200 °C abgeschiedenes LT-GaAs oberhalb einer Schichtdicke von 1 μm der Umschlag von einkristallinem zu polykristallinem Wachstum zu verzeichnen. Bei einer Wachstumstemperatur von 300 °C hingegen wächst das LT-Material nahezu spannungsfrei ($\Delta a/a \rightarrow 0$). Aus zeitaufgelösten Photolumineszenzmessungen erhielten wir für diese Schichten eine Lebensdauer von 60 ps. Diese mit einer Streak-Kamera ausgeführten Messungen erlauben eine maximale Zeitauflösung von 2 ps. Da bei niedrigeren Wachstumstemperaturen mit wesentlich geringeren Ladungsträgerlebensdauern gerechnet werden kann, beabsichtigen wir für deren Messung eine Kooperation mit dem Institut für Halbleitertechnik der RWTH Aachen.

Für die Übertragung der LT-GaAs-Schichten auf einen Goldspiegel wurden zwei Verfahren entwickelt und eingesetzt. Hierbei handelt es sich einerseits um das Waferbonding und andererseits um eine Methode, bei der das Substrat rückgeätzt wird. Beim Waferbonding werden die MBE-Schichten mittels einer epitaktischen Lift-off (ELO)-Technik vom Substrat gelöst und anschließend auf einen mit Gold beschichteten Quarzglassträger gebondet. Bisher wurden von uns Bond-Flächen von 10 - 50 mm^2 erreicht, wobei nach optischer Inspektion ca. 60 - 70% der Fläche brauchbar waren (Abb. 7). Die Technologie des ELO ist für Schichtdicken im Submikrometer-Bereich seit langem bekannt und ausgereift [5]. Innerhalb dieses Projektes bestand jedoch die Aufgabe, LT-GaAs-Schichten mit Dicken von 14 bzw. 9 μm zu übertragen. Für derartig dicke Schichten ist das bisher angewandte Verfahren mit seinen Parametern Opferschichtdicke, Dicke der zu übertragenden Schicht sowie Behandlungstemperatur infolge veränderter Verspannungsverhältnisse nicht direkt anwendbar.

Die Parameter konnten jedoch derart adaptiert werden, daß die aufgebauten Verspannungsverhältnisse eine Ablösung dicker Schichten ermöglichten. Es sind noch weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich, um die Defektdichte der Bond-Flächen zu reduzieren und die Qualität der übertragenen Schichten zu verbessern. Um die gebondeten Schichten charakterisieren zu können wurde vorgeschlagen, durch die Untersuchung der lateralen Verteilung der Laser-Eigenschaften des Systems aus Faserlaser und Absorber eine Abbildung der relevanten Defekte zu erzielen.

Mit der Zielstellung der Verbesserung der optisch relevanten Grenzfläche zwischen LT-GaAs und Gold-Schicht wurde eine alternative Technologie unter Anwendung des Rückätzens des Substrates erprobt. Hierbei wurde Gold-beschichtetes LT-GaAs/GaAs-Substrat auf einen Quarzglassträger aufgeklebt. Danach wurde das Substrat mittels Naß- und Trockenätzverfahren (NTÄ) von der Rückseite selektiv bis zur LT-GaAs-Schicht abgelöst. Es stellte sich heraus, daß die Spannungsverhältnisse zwischen dem verwendeten Kleber und der LT-GaAs-Schicht nach Freilegung der Schicht mittels NTÄ bedeutsam werden. Durch Unterschiede in den Wärmeausdehnungskoeffizienten kommt es leicht zu Deformationsprozessen mit Verwerfungen, welche die Schichten für den Laserbetrieb unbrauchbar machen. Auch diese Arbeiten zu einer alternativen Technologie befinden sich noch im Entwicklungsstadium, so daß eine abschließende Beurteilung der Erfolgsaussichten zur Zeit nicht möglich ist. Die mittels Waferbonding erhaltene Struktur erwies sich als geeignet für das mode-locking eines Nd-Glasfaser-Lasers.

Literatur

- [1] U. Keller, Ultrafast all-solid-state laser technology. Appl. Phys. B 58, 347 (1994).
- [2] vgl. Darlegungen zum Status-Report zur Meilensteinpräsentation 8.10.1998, Düsseldorf.
- [3] H. Tanaka, E. Colas, I. Kamiya, D.E. Aspness and R. Bhat, *In situ* determination of free-carrier concentrations by reflectance difference spectroscopy. Appl. Phys. Lett. 59, 3443 (1991).
- [4] Zwischenbericht vom 26.02.1998.
- [5] J. Maeda, Y. Sasaki, N. Dietz, K. Shibahara, S. Yokoyama and M. Hirose, High-rate GaAs epitaxial lift-off technique for optoelectronic integrated circuits. Jpn. Appl. Phys. 36, 1554 (1997).

Publikationen

G. Apostolopoulos, J. Herfort, L. Däweritz, K.H. Ploog, Surface morphology of as grown and annealed low temperature molecular beam epitaxial GaAs layers on (001) oriented substrates, XIV Panhellenic Solid State Phys. Conf., 15-18 September 1998, Ionnina, Greece.

G. Apostolopoulos et al., LT-GaAs: Eigenschaften und Lift-off Technik, MBE-Workshop 98, 21./22.9.1998, Hamburg.

J. Herfort, G. Apostolopoulos, L. Däweritz, K. Ploog, Reflectance-difference spectroscopy study of low temperature grown (001)GaAs, Symposium on non-stoichiometric III-V compounds, 5-7 October 1998, Erlangen. Proc. *Symp. on non-stoichiometric III-V compounds*, in: Physik mikrostrukturierter Halbleiter Bd. 6 (Hg. T. Marek, S. Malzer, P. Kiesel), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1998, pp. 53-58.

eingereichte Tagungsbeiträge: 2 Anlagen

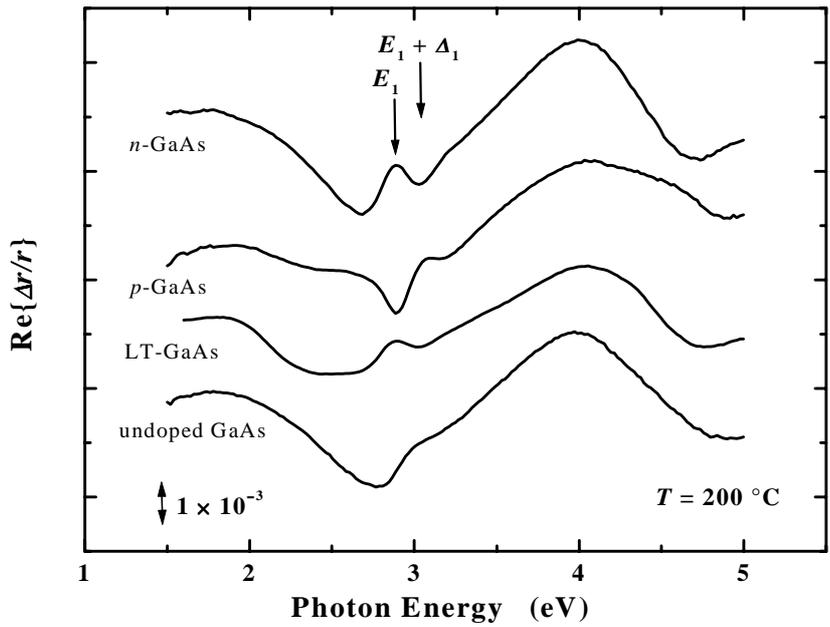


Abb. 1. Typische RD-Spektren für eine undotierte GaAs-Schicht, eine n-dotierte (Si) GaAs-Schicht, eine p-dotierte (C) GaAs-Schicht, sowie eine LT-GaAs-Schicht. Die Spektren wurden in situ bei einer Meßtemperatur von 200 °C aufgenommen.

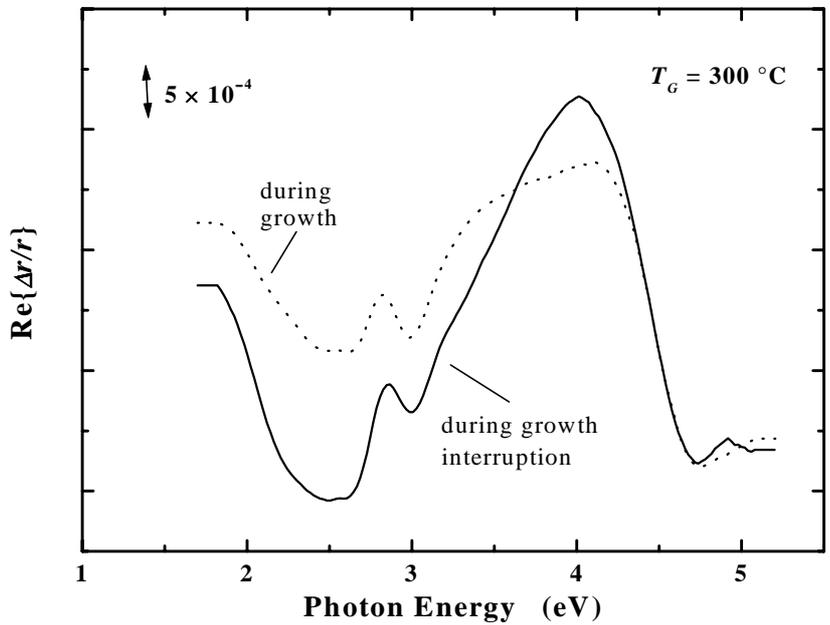


Abb. 2. Vergleich von RD-Spektren, die während einer Wachstumsunterbrechung und während des Wachstums aufgenommen wurden.

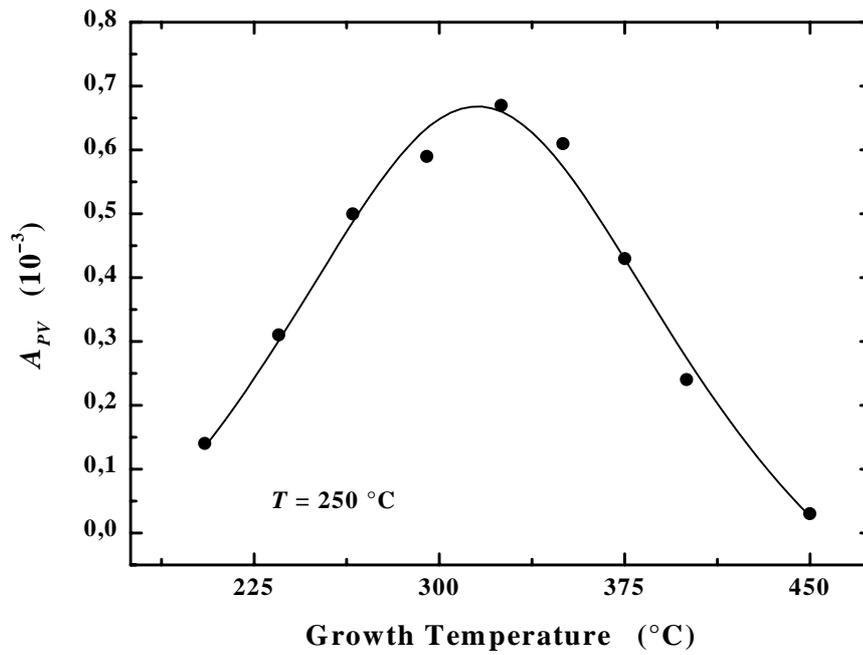


Abb. 3. Abhängigkeit der Amplitude der LEO-Struktur von der Wachstumstemperatur.

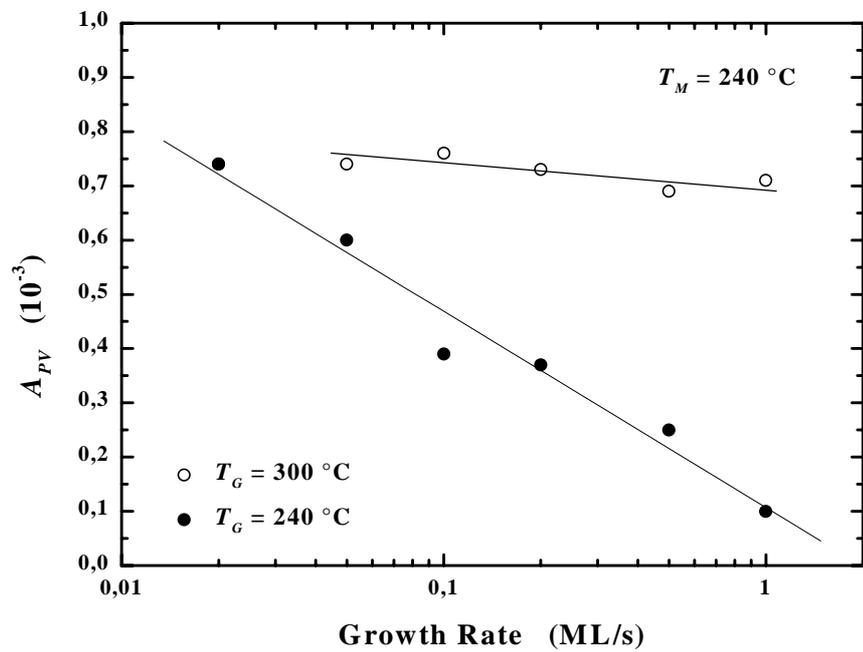


Abb. 4. Abhängigkeit der Amplitude der LEO-Struktur von der Wachstumsrate.

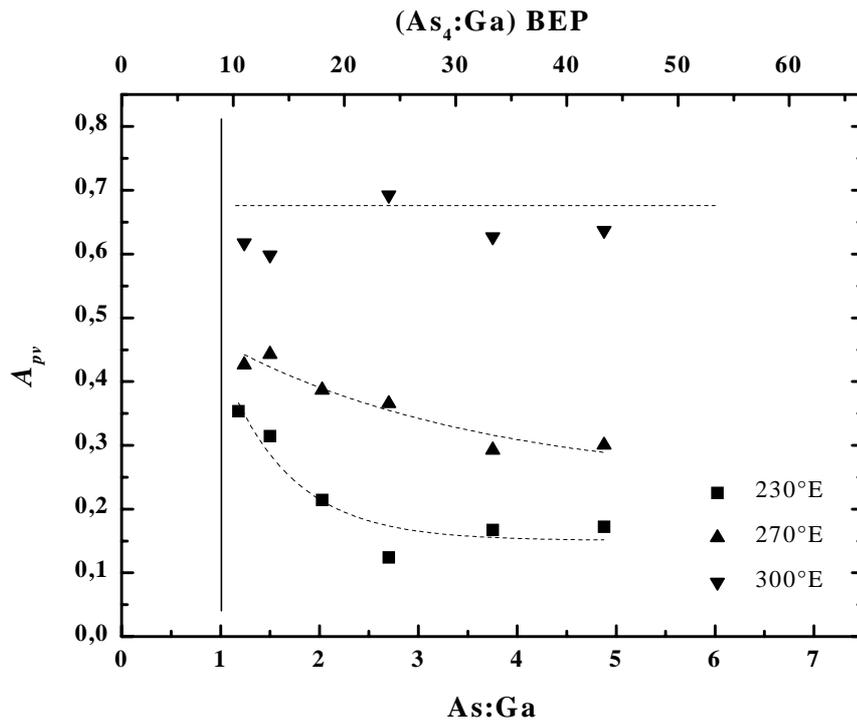


Abb. 5. Abhängigkeit der Amplitude der LEO-Struktur vom $As_4:Ga$ Einfallsratenverhältnis, ausgedrückt als Verhältnis der äquivalenten Strahldrucke (BEP).

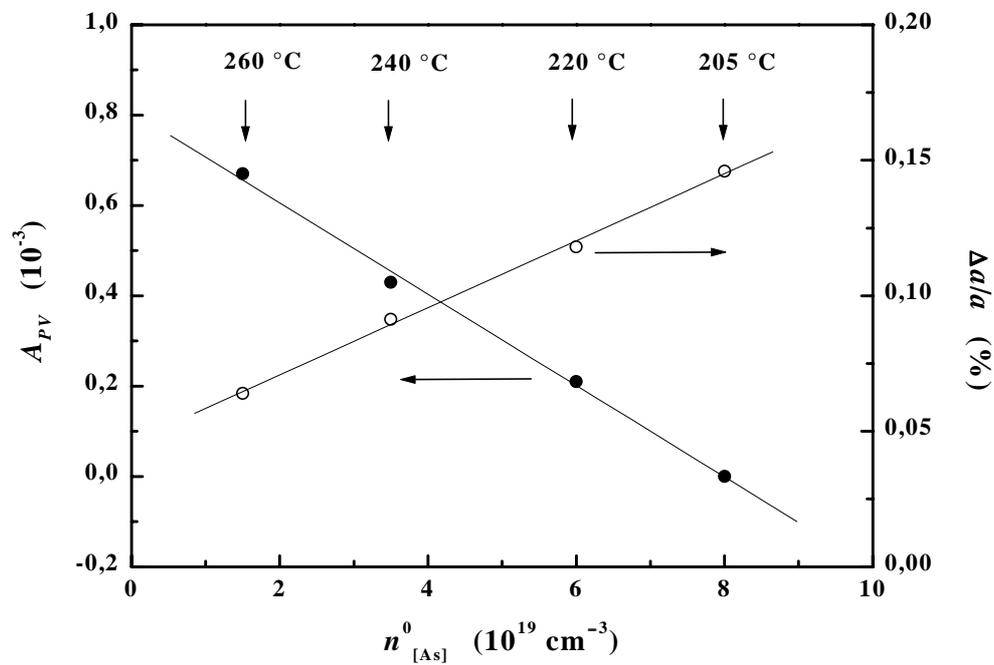


Abb. 6. Zusammenhang zwischen der Amplitude der LEO-Struktur, der tetragonalen Verzerrung des Gitters $\Delta a/a$, und der Konzentration der neutralen Defekte $n_{[As]}^0$.

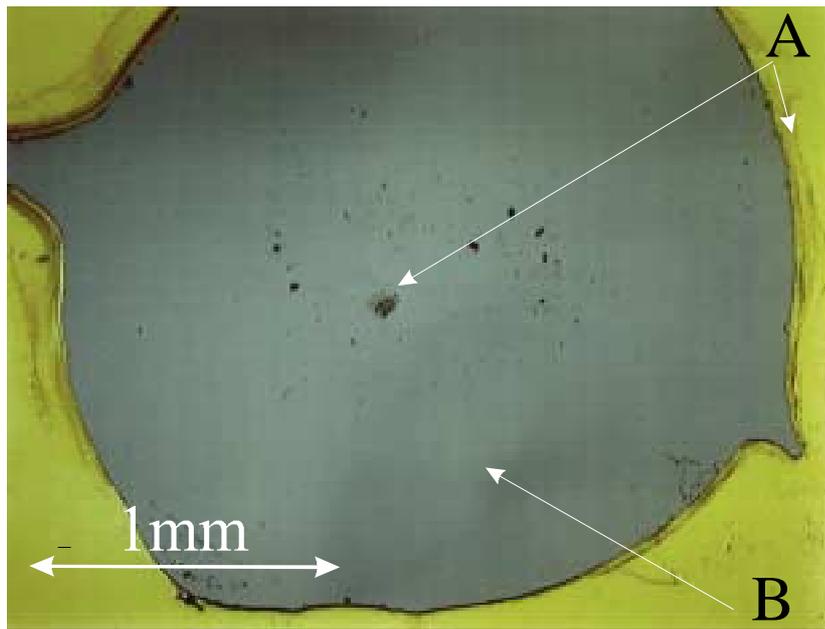


Abb. 7. Optische Abbildung einer 14 μm dicken LT-GaAs-Epitaxieschicht, die auf einem mit Gold beschichteten Quarzglassträger übertragen wurde. Typische Defekte sind: A) Rückstände der Übertragungswachsschicht, und B) Abhebungen, die durch Restpartikel an der Bond-Grenzfläche entstehen.

Zwischenbericht zum F+E-Vorhaben: 13N7088/0

„Erforschung eines diodengepumpten (Multi-core) M-Profil-Faserlasers im Ultrakurz-
pulsbetrieb“

Arbeiten zur „Entwicklung eines Halbleiter-Bauelementes aus Bragg-Reflektoren, sättigbarem Absorber und 2-Photonen-Absorber“

Berichtszeitraum: 01.01.1999-31.12.1999

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeiten zum Wachstum und zur Optimierung des Halbleiterbauelementes aus sättigbarem Absorber und Bragg-Reflektor für die Arbeitswellenlänge 1,065 μm fortgeführt, wobei speziell der Einfluß der Wachstumstemperatur auf die Eigenschaften des sättigbaren Absorbers untersucht wurde. Als alternative Variante wurden Arbeiten zu ein Halbleiterbauelement auf der Basis von LT (low temperature)-GaAs als Zwei-Photonen-Absorber (TPA) ausgeführt. Dabei standen die Vervollkommenung der in situ Charakterisierung des LT-GaAs sowie die technologische Variante einer kompletten Herstellung der TPA-Struktur mittels Molekularstrahlepitaxie im Vordergrund.

Halbleiterbauelement aus sättigbarem Absorber und Bragg-Spiegel (SESAM)

Das im vorausgehenden Berichtszeitraum erarbeitete Design der SESAM-Struktur für die Arbeitswellenlänge von 1,065 μm wurde prinzipiell beibehalten und entspricht nach geringfügigen Korrekturen folgendem Schichtausbau:

Übergitter aus 50 Perioden von 6,0 nm GaAs und 6,2 nm $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ auf einem Bragg-Reflektor bestehend aus 15 Perioden von 77.3 nm GaAs und 91.7 nm AlAs.

Das $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -Übergitter wurde bei unterschiedlichen Temperaturen abgeschlossen, wodurch sowohl die Ladungsträgerlebensdauer als auch die kristalline Perfektion im komplexer Weise beeinflußt werden. Im Hinblick auf eine Optimierung der Absorber-Struktur hinsichtlich der Ladungsträgerlebensdauer in Abhängigkeit von der Wachstumstemperatur haben wir am Institut für Halbleitertechnik/RWTH Aachen Lebensdauermessungen

(in Transmission) vornehmen lassen. Die untersuchten $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -MQW-Strukturen wurden bei 200, 240, 300 und 380 °C präpariert. Die in Transmission erhaltenen Daten sind untereinander und mit CW-Absorptionsspektren konsistent. Die Kurven zeigen ein Ausbleichen der Transmission, wobei der Abfall mit einer schnellen Zeitkonstante (300-450 fs) und einer langsamen Zeitkonstante erfolgt. Letztere hängt stark von der Wachstumstemperatur ab. Die Abfallzeiten wurden mit einem doppel-exponentiellen Zerfall angefitet. Mit der Exzitonthermalisierung verbunden ist die Zeitkonstante von ca. 300 fs. Die Zeitkonstante des Ladungsträgereinfangs liegt bei ca. 1,5-3 ps und ist mit 1,5 ps für die bei 200 °C präparierte Probe am kleinsten.

Die Herabsetzung der Wachstumstemperatur mit dem Ziel der Reduzierung der Ladungsträgerlebensdauer ist zwangsläufig mit einer Verminderung der Kristallperfektion der Schichten verbunden, wahrscheinlich infolge Erhöhung der Punktdefektkonzentration. Die Reflektivität der SESAM-Strukturen zeigt ein Stoppband mit einer Senkung. Diese Absorptionsstruktur liegt idealerweise bei der angestrebten Arbeitwellenlänge der SESAM-Struktur im Zentrum des Stoppbandes. Die Abnahme der kristallinen Perfektion bei Herabsetzung der Wachstumstemperatur geht mit einem zunehmendem Verlust (Verflachung) der Absorptionsstruktur im Reflexionsspektrum einher und verursacht Schwierigkeiten bei der Charakterisierung der SESAM-Struktur. Die Einstellung der Wachstumsparameter hinsichtlich der Inkonzentration und der Schichtdicken wird daher zunächst bei höherer Wachstumstemperatur an Teststrukturen vorgenommen und nach unmittelbar anschließender Charakterisierung und gegebenenfalls vorgenommener Parameterkorrektur auf das Wachstum bei niedrigerer Substrattemperatur übertragen. Die Teststruktur enthält nur den sättigbaren Absorber, so dass die Absorption aus Reflexion und Transmission bestimmt werden kann.

Neben der optischen erfolgte auch eine strukturelle Charakterisierung mittels Röntgendiffraktometrie. Dabei wird deutlich, dass die Relaxation des hochverspannten Systems in Abhängigkeit von den Wachstumstemperaturen anisotrop ist. Die relative Lage der dem MQW zugeordneten Reflexion ist in den Azimuten, in denen die α - und β -Misfitversetzungen liegen, verschieden. Oberhalb von $T_S \approx 400$ °C und unterhalb von $T_S \approx 200$ °C werden diese Differenzen gering.

Die im Berichtszeitraum vorliegenden Ergebnisse zum (selbststartendem) Modelocking des Nd-Glas-Faserlasers erlaubten bisher keine eindeutige Schlußfolgerung, ob die Ladungsträgerlebensdauer oder die kristalline Perfektion oder ein Kompromiß zwischen beiden zu optimalen Eigenschaften des Halbleiterbauelementes führen. Deshalb wurden beide Wege - die Optimierung hinsichtlich Ladungsträgerlebensdauer sowie hinsichtlich kristalliner Per-

fektion - verfolgt, wobei für letztere die Ausbildung der Absorptionsstruktur im Reflexionsspektrum als Kriterium herangezogen wird. Abb. 1(a) zeigt typische Reflektivitätskurven für bei unterschiedlichen Wachstumparametern erhaltene SESAM-Strukturen. Der Einfluß einer Abweichung der optischen Dicke des Absorbers von 2λ auf das Reflexionsspektrum ist aus Abb. 1(b) ersichtlich. Für einige der SESAM-Strukturen sind die entsprechenden Röntgendiffraktometer-Kurven in Abb. 2 gezeigt.

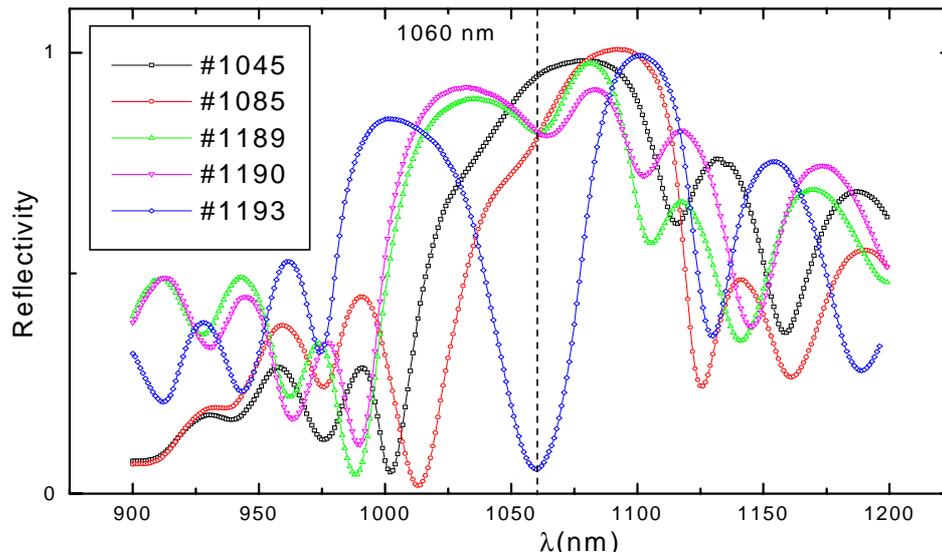


Abb.1(a): Reflexionsspektren verschiedener SESAM Strukturen. Die Wachstumstemperaturen der sättigbaren Absorber waren #1045 und #1085 320°C, #1189 400°C, #1190 420°C und #1193 440°C.

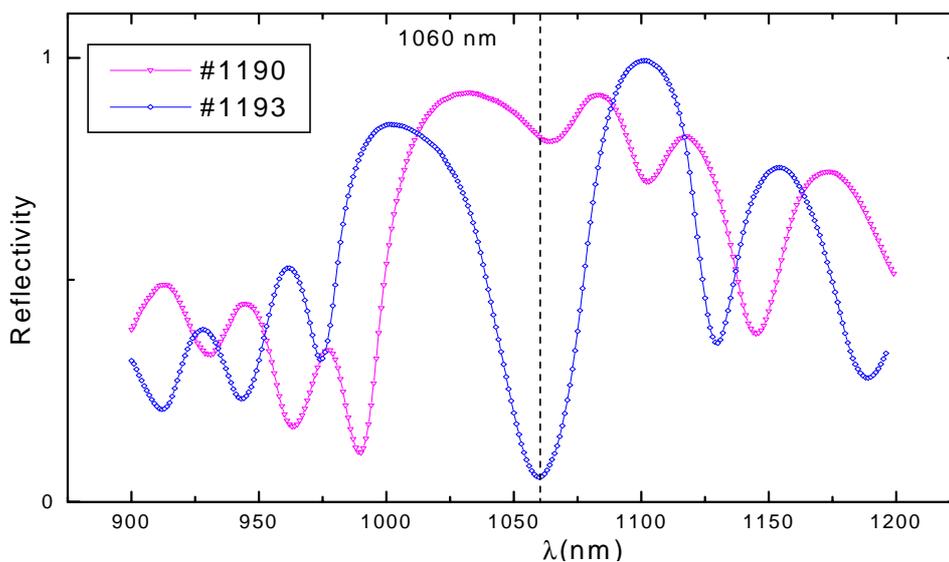


Abb.1(b): Reflexionsspektren von SESAM-Strukturen. Das Minimum bei 1100 nm in #1190 (im Gegensatz zu #1193) ist eine Resonatormode, die durch eine Abweichung der optischen Dicke des Absorbers von 2λ entstanden ist.

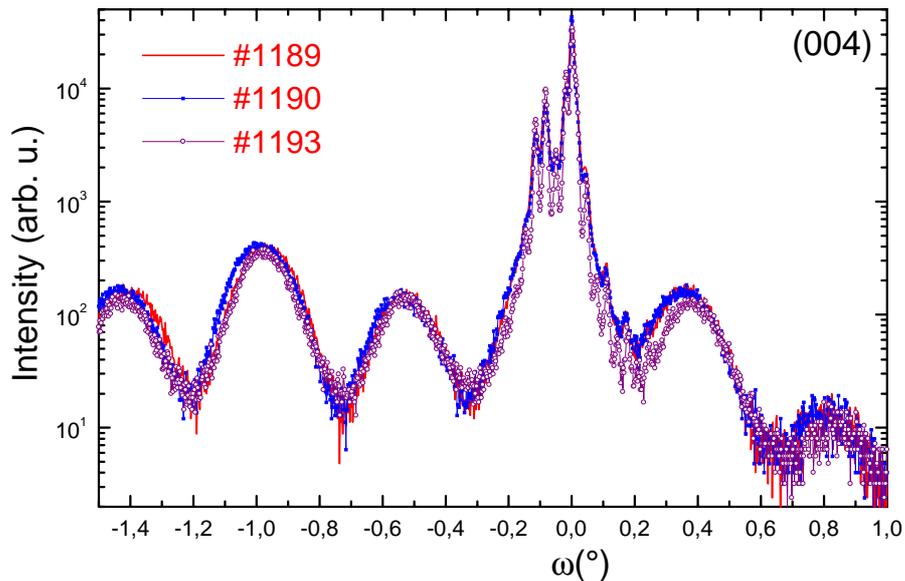


Abb2: Röntgendiffraktometer-Kurven des (004) Reflexes von SESAM-Strukturen. Die Maxima zwischen -0.2° und 0.2° sind auf den Bragg-Reflektor zurück zu führen, das Maximum bei 0° ist der Substratreflex. Die breiten Maxima gehören zum MQW des sättigbaren Absorbers. Deren Breite ist durch die Relaxation bedingt.

Die Ausbildung einer erkennbaren Struktur im Reflexionsspektrum (bei ca. 1060 nm) ist von der Wachstumstemperatur abhängig (Abb. 1(a)). Mit steigender Temperatur wird das Minimum ausgeprägter. Nach vorläufigen Ergebnissen des Max-Born-Instituts zeigt #1193 Modelocking mit kurzen Pulsen.

Ein zweites Minimum bei ca. 1100 nm (Abb. 1(b), #1190) ist auf eine Abweichung des Absorbers von der optischen Dicke 2λ zurückzuführen. Aus röntgenografisch bestimmter MQW-Periode (Abb. 2) und Simulation der optischen Reflektivität konnte eine Korrektur ermittelt werden, die angewandt auf #1193, zum Verschwinden dieser Mode führte. Die Korrektur bestand in der Erhöhung der MQW-Periodenzahl von 50 auf 51.

Eine endgültige Beurteilung optimaler Wachstumsparameter für ein Modelocking der Anordnung von Faserlaser und Halbleiterbauelement steht noch aus.

Zwei-Photonen-Absorber (TPA) auf der Basis von LT-GaAs

Der Einbau von überschüssigem As während des Wachstums von GaAs bei niedrigen Temperaturen (LT-GaAs) spielt eine Schlüsselrolle für das Verständnis der besonderen elektrischen und optischen Eigenschaften dieses Materials. Die im vergangenen Berichtszeitraum erarbeitete *in situ*-Charakterisierungsmethode mittels Reflexionsdifferenz-spektroskopie (RDS) für eine Bestimmung wesentlicher Materialeigenschaften des LT-GaAs bereits während des Wachstums wurde weiter verfolgt. Die Ergebnisse zur Echtzeitermittlung der Nichtstöchiometrie ($[As_{Ga}^0]$) von LT-GaAs anhand der LEO (Linear electro-optic)-Amplitude wurden zusammengefaßt und publiziert [1,2]. Unter Einsatz der spektroskopischen Ellipsometrie wurden zusätzliche Informationen zum Einfluß der Nichtstöchiometrie auf die optischen Eigenschaften gewonnen [3]. Ein zunehmender Einbau von überschüssigem Arsen hat beträchtliche Auswirkungen auf die Verbreiterung der kritischen optischen Übergänge E_1 und $E_1 + \Delta_1$, was zu verwaschenen Peaks der Übergänge in den optischen Spektren führt.

Wie bereits im vergangenen Berichtszeitraum dargelegt, wurde das *in situ* kontrollierte Wachstum von dicken LT-GaAs-Schichten (bis 14 μm) erfolgreich für die Herstellung eines Zwei-Photonen-Absorbers (TPA) eingesetzt [4]. Hierbei wurden die LT-GaAs-Schichten mittels Waferbonding auf einen Goldspiegel aufgebracht bzw. die Technik der Substratrückätzung genutzt. Mit dem Ziel einer Vereinfachung der Technologie wurde im vorliegenden Berichtszeitraum als weitere Variante die komplette Herstellung der TPA-Struktur mittels Molekularstrahlepitaxie erprobt. Hierfür wurde auf dem GaAs(001)-Substrat nach Abscheidung einer GaAs-Pufferschicht ein reflektierender Bragg-Spiegel gewachsen und anschließend mit einer 5 μm dicken LT-GaAs-Schicht überwachsen. Unter Einhaltung der mittels RDS optimierten Wachstumsparameter, die zu einem Kompromiß zwischen Nichtstöchiometrie, Verspannung und Schichtdicke führen, konnte eine TPA-Struktur realisiert werden, die ebenso wie die nach den anderen Technologien erhaltenen Strukturen in Kombination mit dem Faserlaser Modelocking zeigte.

Publikationen

- [1] J. Herfort, G. Apostolopoulou, L. Däweritz, and K.H. Ploog, *Reflectance-difference spectroscopy study of low temperature grown (001)GaAs*, Proceedings of the 1st Symposium on Non-Stoichiometric III-V Compounds, Erlangen (Germany), October 5-7 (1998), p.53.

- [2] G. Apostolopoulos, J. Herfort, W. Ulrici, L. Däweritz, and K.H. Ploog, *In situ reflectance difference spectroscopy of GaAs grown at low temperatures*, Phys. Rev. B **60**, R5145 (1999).
- [3] J. Herfort, G. Apostolopoulos, W. Ulrici, L. Däweritz, and K.H. Ploog, *Role of the excess As concentration on the optical transitions E_1 and $E_1 + \Delta_1$ in low-temperature grown GaAs*, Proceedings of the 2nd Symposium on non-stoichiometric III-V compounds, Erlangen (Germany), October 4-6 (1999), p. 53.
- [4] J. Herfort, G. Apostolopoulos, W. Ulrici, K.-J. Friedland, H. Kostial, L. Däweritz, M. Leitner, P. Glas, and K.H. Ploog, *Low-temperature-grown GaAs – in situ characterization and application*, Proceedings of the International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, September 21-24 (1999), special issue Jpn. J. Appl. Phys., accepted for publication.

„Entwicklung eines Halbleiterbauelementes aus Bragg-Reflektor, sättigbarem Absorber und Zwei-Photonen-Absorber“

für mode-locking Betrieb eines sub-ps Nd:Glasfaser-Lasers bei $\lambda=1.06 \mu\text{m}$

L. Däweritz, R. Hey, G. Apostolopoulos, J. Herfort, A. Riedel und R. Hey

Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlin

Im Rahmen des Unterauftrags „Entwicklung eines Halbleiterbauelementes aus Bragg-Reflektor, sättigbarem Absorber und Zwei-Photonen-Absorber“ werden am PDI Arbeiten zu SESAM-Strukturen und zu einem Zwei-Photonen-Absorber-Bauelement, das auf low-temperature (LT) GaAs basiert, durchgeführt.

Die geforderte Arbeitswellenlänge für den Absorber der SESAM-Struktur liegt bei $1.065 \mu\text{m}$ mit einer Toleranz von $\pm 0.5\%$. Damit müssen Schichtdicken und In-Gehalt mit einer Genauigkeit kontrolliert werden, die innerhalb der Toleranzgrenze für die MBE liegt. In letzter Zeit wurden Fortschritte bezüglich einer verbesserten Kontrolle des Absorbers durch Einstellung der In-Konzentration und Herabsetzung der Ladungsträgerrekombinationszeit erzielt. Bei den TPA-Strukturen ist keine spektrale Abstimmung auf die Emissionswellenlänge erforderlich, weshalb diesen Strukturen besondere Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Die Schwierigkeit besteht hier im Wachstum und Prozessieren von extrem dicken Schichten mit den geforderten Eigenschaften. Das Wachstum von LT-GaAs mittels MBE wurde mit spezieller Sicht auf den Zwei-Photonen-Absorber untersucht. Es wurde gezeigt, daß die elektronischen Eigenschaften von LT-Material mittels Reflexionsdifferenzspektroskopie in situ charakterisiert werden können. Weiterhin war eine optimale Methode für das Aufbringen der epitaktisch gewachsenen LT-GaAs-Schicht auf einen hochreflektierenden Spiegel zu entwickeln. Hierfür wurden das Waferbonding, die Substratrückätzung sowie das Wachstum von LT-GaAs auf einem Bragg-Spiegel eingesetzt.

Die zu nutzenden Eigenschaften des LT-GaAs, der hohe Zwei-Photonen-Absorptionskoeffizient, die erhöhte nichtlineare Änderung des Brechungsindex und ultrakurze Ladungsträgerrekombinationszeiten, ergeben sich aus der hohen Konzentration von As-Antisite-Defekten.

Für die Realisierung des Zwei-Photonen-Absorbers mittels LT-GaAs wird davon ausgegangen, daß die erforderliche Schichtdicke zwischen 5 und 20 μm liegt. Die Lebensdauer der Ladungsträger sollte vergleichbar zur Breite des generierten Pulses sein. Bei einer üblichen Wachstumstemperatur von 200°C wird die Schicht aufgrund der Gitterverspannung bei einer Schichtdicke von ca. 1 μm polykristallin. Erhöht man aber die kritische Schichtdicke durch Erniedrigung der Verspannung bei höherer Substrattemperatur, so erhöht sich auch die Rekombinationszeit. Wir konnten einen Kompromiß finden. Bei 300°C wächst das Material nahezu spannungsfrei auf, weist noch typische LT-Eigenschaften auf, und es sind Schichtdicken bis 14 μm erreicht worden.

Wir arbeiten an einer in situ-Charakterisierungsmethode, die es erlaubt, wesentliche Materialeigenschaften bereits während des Wachstums zu kontrollieren. Bei der Reflexionsdifferenzspektroskopie wird die Anisotropie der Reflexion von linear polarisiertem Licht entlang der prinzipiellen kristallographischen Achsen genutzt. Sie entsteht in unserem Fall durch das oberflächennahe elektrische Feld infolge der hohen Konzentration von nichtstöchiometrisch eingebautem Arsen auf Ga-Platz. Die linear elektrooptische Resonanz ist von den Wachstumsbedingungen abhängig. Unter Einsatz der Röntgenbeugung und der Fern-Infrarot-Spektroskopie konnten wir zeigen, daß die LEO-Amplitude invers proportional zur As-Antisite Defektdichte ist.

Für die Übertragung der LT-GaAs-Schichten auf einen Goldspiegel mittels Waferbonding erfolgte zunächst ein Ablösen der Schicht mittels der epitaxial lift-off -Technik unter Verwendung einer AlAs-Opferschicht zwischen LT-GaAs und Substrat. Nach Übertragung auf das goldbeschichtete Glas bei 80°C bildet sich eine Van der Waals-Bindung aus. Das Verfahren ist für Schichtdicken im Sub-Mikrometerbereich seit langem bekannt, jedoch infolge der veränderten Spannungsverhältnisse nicht direkt auf extrem dicke Schichten anwendbar. Die Parameter konnten jedoch derart adaptiert werden, daß die aufgebaute Verspannung das Ablösen dicker Schichten ermöglichte.

Die Technik der Substratrückätzung hat zum Ziel, die optisch relevante Grenzfläche zwischen LT-GaAs und Goldschicht zu verbessern. Die goldbedampfte LT-GaAs/AlAs/GaAs-Schicht wird auf einen Glasträger geklebt. Danach wird mittels Naß- und Trockenätzverfahren das Substrat von der Rückseite selektiv bis zur LT-GaAs-Schicht abgelöst. Die Qualität der optisch relevanten Grenzfläche konnte wesentlich verbessert werden.

Der Mode-locking-Betrieb eines Nd-Glas-LASERS konnte für alle von uns hergestellten Typen von SESAM- und TPA-Strukturen - mit nahezu gleichen Pulsbreiten - nachgewiesen werden.

Entwicklung eines Halbleiterbauelementes aus Bragg-Reflektor, sättigbarem Absorber und Zwei-Photonen-Absorber

für mode-locking-Betrieb eines sup-ps Nd-Glasfaser-
Lasers bei $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$

*L. Däweritz, R. Hey, G. Apostolopoulos, J. Herfort,
A. Riedel und K.-J. Friedland*

Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik Berlin

- SESAM
 - Optimierung des sättigbaren Absorbers
 - $\lambda = 1.065 \mu\text{m}$, Toleranz $\pm 0.5 \%$
 - $x_{\text{In}} = 0.24$, $\tau = 1 \text{ ps}$
- Zwei-Photonen-Absorber (TPA)-Strukturen
 - Wachstum von LT-GaAs – **extreme dicke** Schichten
 - *in situ* Charakterisierung mittels RDS
 - Aufbringen der LT-Schicht auf hochreflektierenden Spiegel
 - Waferbonding
 - Substratrückätzung
 - Wachstum von LT-GaAs auf Bragg-Spiegel

Schlüssel-Material

Low-Temperature GaAs (LT-GaAs)

Physikalische Eigenschaften:

- Hoher Zwei-Photonen-Absorptionskoeffizient
- Erhöhte nichtlineare Änderung des Brechungsindex
- Ultrakurze Ladungsträgerrekombinationszeiten

Ursache:

- hohe Konzentration von As-Antisite-Defekten

Materialanforderungen

- LT-GaAs-Schichtdicke für ausreichende Defokussierung: 5 - 20 μm

✓ Problem: Misfit ($T_G = 200^\circ\text{C}$) $\sim 0.1\%$

\Rightarrow kritische Schichtdicke $1\mu\text{m}$

- Ladungsträgerrekombinationszeit \leq Pulsbreite
(möglichst im sub-ps-Bereich)

✓ Problem: kurze Rekombinationszeit \Rightarrow große Ver-
spannung \Rightarrow kleine kritische Schichtdicke

Lösung: $T_G = 300^\circ\text{C}$ $(\Delta a / a) \rightarrow 0$

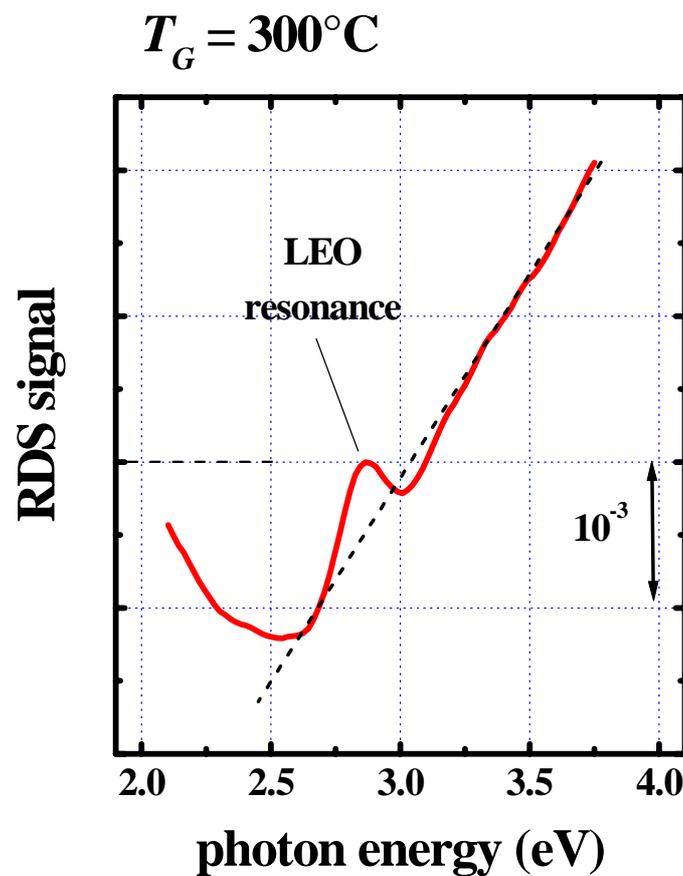
BEP $\text{As}_4\text{:Ga} = 20$

$d = 1 - 14 \mu\text{m}$

In situ Wachstumskontrolle

- Kontrolle der Wachstumsbedingungen und hohe Reproduzierbarkeit

→ *in situ* Reflexionsdifferenzspektroskopie (RDS)



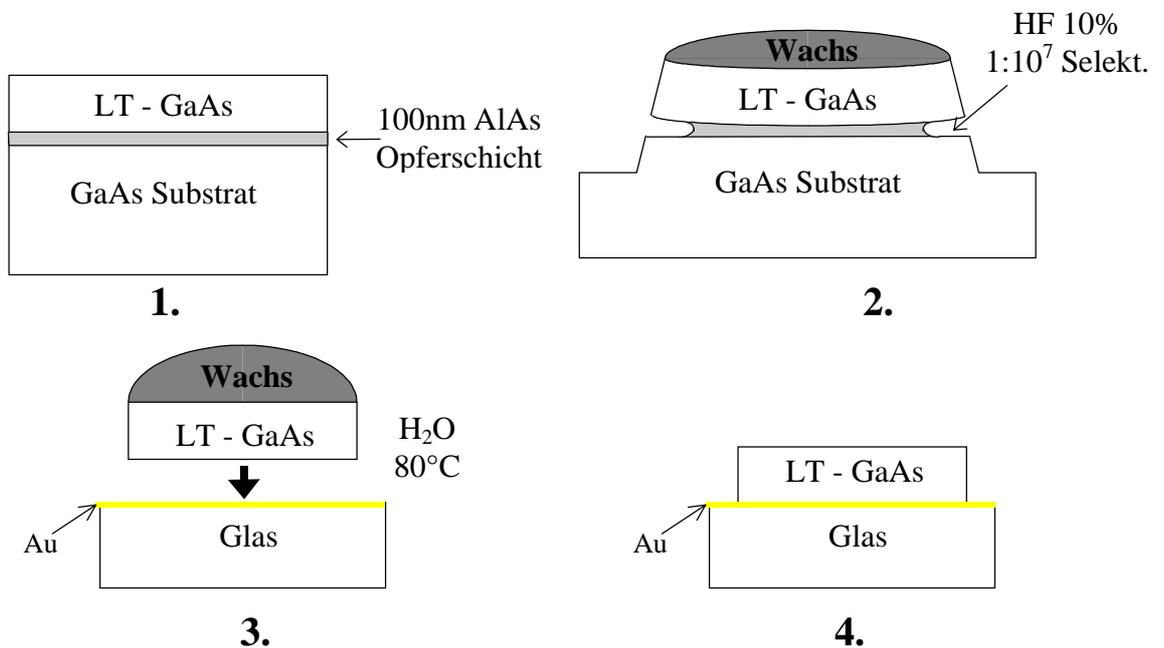
- ✓ Lineare elektro-optische (LEO) Resonanz in LT-GaAs abhängig von Wachstumsbedingungen
- ✓ LEO-Amplitude invers proportional zur As-Antisite-Defektdichte

⇒ *real-time*-Abschätzung phys. Eigenschaften

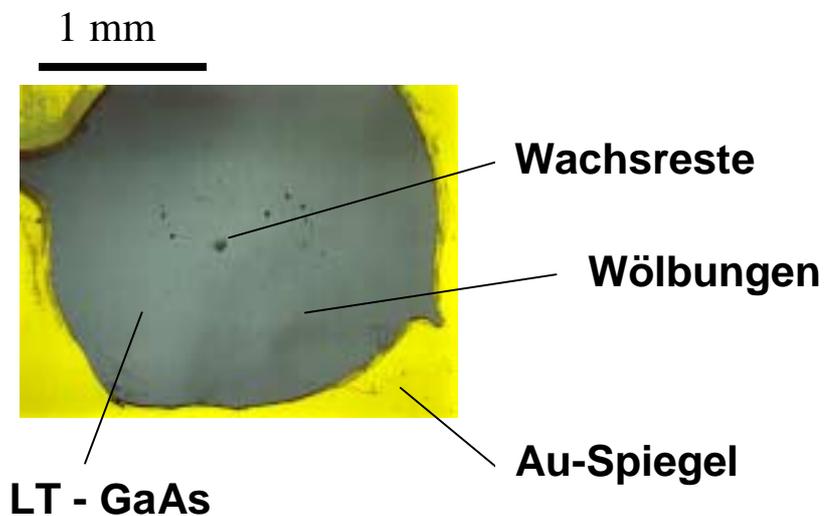
Waferbonding

Ablösen der LT-GaAs-Schicht (Epitaxial Lift-Off)
- 100 nm AlAs-Opferschicht

- Übertragung der LT-GaAs-Schicht auf Au-bedampften Glasträger
- Van der Waals-Bindung

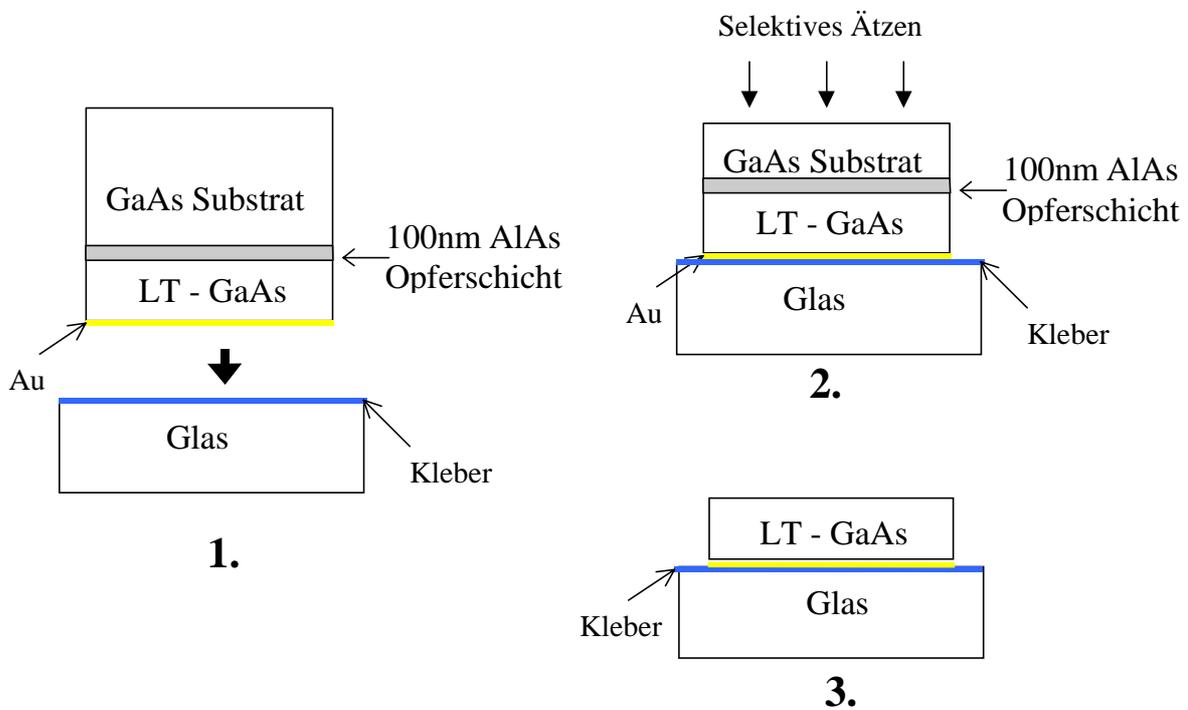


Draufsicht:



Substratrückätzung

- Aufkleben der goldbedampften LT-GaAs/AlAs/GaAs-Schicht auf Glasträger
- Selektives Rückätzen des GaAs-Substrates (naß- und trockenchem.)
- Selektives Rückätzen der AlAs-Opferschicht



Draufsicht:

1 mm



Mode-Locking-Betrieb

Mode-Locking-Betrieb eines Nd-Glasfaser-Lasers

Nachgewiesen für alle hergestellten Typen von Strukturen

SESAM

TPA-Strukturen

gebondet auf Au-Spiegel

Substratrückätzung

Wachstum auf Bragg-Spiegel