

FAR-INFRARED SPECTROSCOPIC ELLIPSOMETRY  
ON  $A^{III} B^V$  SEMICONDUCTOR  
HETEROSTRUCTURES

Von der Fakultät für Physik und Geowissenschaften  
der Universität Leipzig  
genehmigte  
DISSERTATION  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum naturalium  
Dr. rer. nat.  
vorgelegt

von Diplom-Physiker Tino Hofmann  
geboren am 12.05.1976 in Grimma

Gutachter:

Prof. Dr. B. Keimer, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung Stuttgart  
Prof. Dr. W. Grill, Universität Leipzig  
Prof. Dr. H. Arwin, University Linköping

Datum der Einreichung: 29.03.2004

Datum der Beschlussfassung: 25.10.2004



## Bibliographische Beschreibung

Hofmann, Tino

„Far-infrared spectroscopic ellipsometry on A<sup>III</sup> B<sup>V</sup> semiconductor heterostructures“

Universität Leipzig, Dissertation

140 S., 211 Lit., 55 Abb., 18 Tab.

### Referat:

Der Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die spektralellipsometrische Bestimmung des Tensors der dielektrischen Funktion von kubischen, ternären und quaternären Gruppe-III Gruppe-V (B, Al, Ga, In)(P, As) Halbleiter-Schichtstrukturen im ferninfraroten Spektralbereich. Zur kontakt- und zerstörungsfreien Untersuchung der Eigenschaften freier Ladungsträger (FLT) in dotierten Schichten wird ferner erstmalig die Methode der magnetooptischen generalisierten spektroskopischen Ellipsometrie (MOGE) im fern-infraroten Spektralbereich eingesetzt. Hierbei wird ausgenutzt, dass externe magnetische Felder eine anisotrop optische Antwort des an sich in kubischen Kristallen isotropen Beitrags der freien Ladungsträger zur dielektrischen Funktion hervorrufen, die ellipsometrisch präzise messbar ist. Die Ergebnisse aus Analysen der generalisierten spektroskopischen Ellipsometrie (GSE) Messungen werden mit Mikro-Raman-Streuexperimenten und Hall-Effekt-Messungen verglichen.

Quantitative Informationen über Materialparameter, z.B. die Resonanzfrequenzen polarer Phononen und die Konzentration, die Beweglichkeit und die effektive Masse freier Ladungsträger in dotierten Schichten, werden mit Hilfe parametrisierter Linienform-Modelle und Regressionsanalysen gewonnen. Das Phänomen transversal elektrisch und transversal magnetisch polarisierter Grenzflächenwellen und deren Auswirkung auf die GSE-Messdaten wird ausführlich diskutiert. Dabei wird gefunden, dass die Sensitivität der GSE auf kleine Änderungen der dielektrischen Funktion dünner Schichten in der spektralen Umgebung dieser Moden besonders hoch ist.

Die mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) gewachsenen quaternären Verbindungen  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) und  $\text{B}_{0.03}\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  werden experimentell untersucht. In den ternären Verbindungen  $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  und  $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  bildet sich unter MOVPE-Bedingungen die  $\text{CuPt}_B$ -Überstruktur aus und führt zur Aufspaltung der infrarot aktiven Phononen in Moden mit E- und  $A_1$ -Symmetrie. Für  $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  und  $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  wird das Modenverhalten der E(TO,LO)- und  $A_1$ (TO,LO)-Phononen in Abhängigkeit des Ordnungsgrades bestimmt und mit demjenigen von hochgradig ungeordnetem  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  verglichen.

Das Prinzip der MOGE wird anhand von Untersuchungen an dotiertem und undotiertem GaAs demonstriert und desweiteren auf  $\text{Al}_{0.19}\text{Ga}_{0.33}\text{In}_{0.48}\text{P}$  und  $\text{B}_{0.03}\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  angewendet. Die FLT-Parameter effektive Masse, optische Beweglichkeit und Konzentration werden unabhängig voneinander bestimmt. Dabei wird ausserdem gezeigt, dass diese FLT-Parameter mittels MOGE in Probenschichten bestimmt werden können, die durch undotiertes hochohmiges Material überdeckt und damit konventionellen elektrischen Messungen nicht zugänglich sind.



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Spectroscopic ellipsometry</b>	<b>5</b>
2.1	Jones and Mueller matrix formalism . . . . .	6
2.2	Standard ellipsometry . . . . .	7
2.3	Generalized ellipsometry . . . . .	7
2.4	4×4 Matrix formalism . . . . .	8
2.5	Experimental Setup . . . . .	8
2.5.1	Infrared ellipsometry . . . . .	9
2.5.1.1	Far-infrared ellipsometry (setup $\mathcal{A}$ ) . . . . .	9
2.5.1.2	Far-infrared ellipsometry (setup $\mathcal{B}$ ) . . . . .	13
2.5.1.3	Mid-infrared ellipsometry . . . . .	14
2.5.2	Near-infrared to ultraviolet ellipsometry . . . . .	14
2.5.3	Magneto-optic ellipsometry . . . . .	15
2.6	Data analysis . . . . .	18
2.7	Far-infrared model dielectric function . . . . .	21
2.7.1	Polar lattice vibrations . . . . .	21
2.7.2	Free-charge-carrier contribution . . . . .	22
2.7.3	Low-polarity lattice vibrations . . . . .	24
2.7.4	The dielectric function tensor . . . . .	25
2.7.5	Free-charge-carrier magneto-optical contribution . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Raman scattering spectroscopy</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Phonons in zinc-blende structure <math>A^{\text{III}} B^{\text{V}}</math> semiconductors</b>	<b>31</b>
4.1	Phonons in multinary alloys . . . . .	32
4.1.1	Ternary alloys . . . . .	32
4.1.2	Quaternary alloys . . . . .	35
4.2	Effect of strain on phonons . . . . .	36
4.3	Atomic ordering . . . . .	38
4.3.1	The origin of atomic ordering . . . . .	38
4.3.2	The consequences of atomic ordering . . . . .	40
4.3.3	Determination of the ordering degree . . . . .	42
4.3.4	Phonons in superlattices . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Polaritons in layered media</b>	<b>47</b>
5.1	Bulk polaritons . . . . .	48
5.1.1	Dispersion relation . . . . .	48

5.1.2	Properties of bulk polaritons . . . . .	49
5.1.3	Polaritons in external magnetic fields . . . . .	50
5.2	Surface polaritons and surface guided waves . . . . .	52
5.2.1	Dispersion relation . . . . .	53
5.2.1.1	Surface polaritons at a single interface . . . . .	53
5.2.1.2	Surface polaritons in a double interface system . . . . .	54
5.2.1.3	Example: <i>i</i> -GaAs film on <i>n</i> -GaAs substrate . . . . .	55
5.2.2	Experiment . . . . .	59
5.3	Discussion . . . . .	61
5.4	Summary . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Highly disordered <math>(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}</math></b>	<b>65</b>
6.1	Experiment . . . . .	66
6.2	Data analysis . . . . .	67
6.3	Results and discussion . . . . .	68
6.3.1	Far-infrared spectroscopic ellipsometry . . . . .	68
6.3.2	Raman scattering spectroscopy . . . . .	71
6.3.3	Lattice modes in $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ . . . . .	72
6.4	Summary . . . . .	77
<b>7</b>	<b>Spontaneous <math>\text{CuPt}_B</math> ordering in <math>\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}</math> and <math>\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}</math></b>	<b>79</b>
7.1	Uniaxial dielectric tensor . . . . .	79
7.2	$\text{CuPt}_B$ -ordered $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ . . . . .	80
7.2.1	Experiment . . . . .	80
7.2.2	Data analysis . . . . .	82
7.2.3	Results and discussion . . . . .	83
7.2.4	Lattice modes in $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ . . . . .	86
7.2.5	Summary . . . . .	91
7.3	$\text{CuPt}_B$ -ordered $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ . . . . .	92
7.3.1	Experiment . . . . .	92
7.3.2	Data analysis . . . . .	92
7.3.3	Results and discussion . . . . .	94
7.3.4	Lattice modes in $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ . . . . .	97
7.3.5	Summary . . . . .	98
<b>8</b>	<b>Magneto-optical free-charge-carrier effects</b>	<b>101</b>
8.1	<i>i</i> -GaAs/ <i>n</i> -GaAs . . . . .	103
8.1.1	Experiment . . . . .	103
8.1.2	Data analysis . . . . .	104
8.1.3	Results and discussion . . . . .	104
8.1.4	Summary . . . . .	111
8.2	<i>n</i> - $\text{Al}_{0.19}\text{Ga}_{0.33}\text{In}_{0.48}\text{P}$ / <i>n</i> -GaAs . . . . .	112
8.2.1	Experiment and data analysis . . . . .	112
8.2.2	Results and Discussion . . . . .	113
8.2.3	Summary . . . . .	115
8.3	<i>n</i> - $\text{B}_{0.03}\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$ / <i>i</i> -GaAs . . . . .	116
8.3.1	Experiment . . . . .	116
8.3.2	Data analysis . . . . .	117

8.3.3	Results and Discussion . . . . .	117
8.3.4	Summary . . . . .	120
<b>9</b>	<b>Summary and outlook</b>	<b>121</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>123</b>
	<b>List of own publications</b>	<b>133</b>
	<b>Index</b>	<b>135</b>
	<b>List of abbreviations</b>	<b>137</b>
	<b>Acknowledgment</b>	<b>138</b>
	<b>Curriculum vitae</b>	<b>139</b>