

Dipl.-Ing. Stephan Neuschaefer-Rube, Kassel

# **Resonatorinterne Transmissionsellipsometrie zur Vermessung optischer Komponenten**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Nr. **544**

## Inhalt

1	Zusammenfassung .....	1
2	Einleitung .....	3
2.1	Stand der ellipsometrischen Meßtechnik und resonatorinterner Meßverfahren .....	3
2.2	Abgrenzung und Begründung der Aufgabenstellung.....	7
3	Theorie des Laserresonators mit resonatorinternen optisch anisotropen Komponenten.....	9
3.1	Beschreibung ellipsometrischer Kenngrößen mit Hilfe des Jones- Matrix-Formalismus.....	9
3.1.1	Definition der ellipsometrischen Kenngrößen .....	9
3.1.2	Resultierende ellipsometrische Kenngrößen bei der Zusammenschaltung mehrerer optischer Komponenten.....	12
3.2	Eigenfrequenzen und Eigenpolarisationen eines Laserresonators mit resonatorinternen optisch anisotropen Komponenten .....	14
4	Aufbau und Funktionsweise des resonatorinternen Ellipsometers .....	18
4.1	Prüfung der Eignung der Nd:YAG-Festkörperlasertechnologie für das resonatorinterne Ellipsometer .....	18
4.1.1	Bilanzgleichungen einer 4-Niveau-Verstärkungsstrecke .....	18
4.1.2	Stationärer Zwei-Moden-Oszillatorbetrieb eines 4-Niveau-Lasers.....	20
4.1.3	Vergleich unterschiedlicher Lasertechnologien .....	24
4.2	Aufbau des Ellipsometers .....	26
4.3	Der Meßalgorithmus des Ellipsometers.....	28
4.3.1	Algorithmus zur Frequenzstabilisierung des Meßresonators .....	28
4.3.2	Messung der Faraday-Rotation $\rho_F$ .....	29
4.3.3	Bestimmung der Phasendifferenz $\Delta$ und der Hauptachsenlage $\varphi$ .....	34
4.3.4	Bestimmung der reziproken Rotation $\rho_R$ .....	36
4.3.5	Messung des polarisationsabhängigen Verlustwinkels $\Psi$ .....	38
4.3.6	Signalfluß im resonatorinternen Ellipsometer .....	40
5	Beschreibung wichtiger Ellipsometerkomponenten .....	41
5.1	Der Faraday-Modulator.....	41
5.2	Der vektorielle Phasenmodulator .....	45
5.2.1	Vektorieller elektrooptischer Modulator mit LiNbO <sub>3</sub> -Kristall.....	46
5.2.2	Vektorieller photoelastischer Phasenmodulator .....	58
5.2.3	Auswahl des am besten geeigneten Phasenmodulators.....	66

6 Fehlerrechnung und Fehlerminimierung .....	67	67
6.1 Unterschied zwischen Hintereinander- und Ineinanderschaltung zweier Verzögerer .....	67	...67
6.2 Differenzfrequenzänderung durch das Anschwingen mehrerer longitudinaler Lasermoden im Meßresonator .....	71	
6.3 Die thermisch bedingte Phasenanisotropie im Laserkristall.....	72	
6.4 Fehlereinfluß durch zufällige Meßfehler bei der Differenzfrequenzmessung .....	77	...77
6.4.1 Reproduzierbarkeit bei der Bestimmung der Phasendifferenz $\Delta$ .....	77	
6.4.2 Reproduzierbarkeit bei der Bestimmung der Hauptachsenlage $\varphi$ .....	81	
6.4.3 Arbeitspunktverschiebung des Phasenmodulators bei kleinen Phasendifferenzen $\Delta$ des Meßobjektes .....	84	4
6.5 Fehlereinfluß durch polarisationsabhängige Dämpfung .....	88	
6.5.1 Modifiziertes Modell des Laserresonators.....	88	3
6.5.2 Einfluß der polarisationsabhängigen Dämpfung auf den Algorithmus zur Bestimmung der Faraday-Rotation $\rho_F$ .....	89	
6.5.3 Einfluß der polarisationsabhängigen Dämpfung auf die Bestim- mung der Phasendifferenz $\Delta$ und der reziproken Rotation $\rho_R$ .....	90	
6.5.4 Meßfehler und Fehlerkompensation bei der Bestimmung der Hauptachsenlage $\varphi$ .....	92	...92
7 Experimentelle Untersuchungen zum resonatorinternen Ellipsometer .....	100	
7.1 Experimentelle Überprüfung der Theorie der Eigenfrequenzen und Eigenpolarisationen.....	100	
7.2 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Faraday- Rotation $\rho_F$ .....	104	...104
7.3 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Phasendifferenz $\Delta$ und der Hauptachsenlage $\varphi$ .....	108	108
7.3.1 Verhalten des elektrooptischen Modulators im Meßresonator .....	109	
7.3.2 Messungen von $\Delta$ und $\varphi$ mit dem elektrooptischen Modulator und zyklischer Modulatoransteuerung.....	110	0
7.4 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der reziproken Rotation $\rho_R$ .....	115	...115
7.5 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des polarisations- abhängigen Verlustwinkels $\Psi$ .....	120	120
7.6 Diskussion der experimentellen Ergebnisse.....	125	5

8	Schlußfolgerungen und Ausblick .....	127	
8.1	Weitere Erprobung des resonatorinternen Ellipsometers .....	127	
8.2	Erweiterung des Meßumfangs auf optische Systeme .....	128	
9	Anhang.....	130	.130
9.1	Anhang 1: Berechnung der Kenngrößen des resultierenden Rotators und Verzögerers einer Reihenschaltung von Verzögerern (Gl. (3.7)).....	130	
9.2	Anhang 2: Rechnungen zur Ineinanderschaltung von zwei Phasendifferenzen innerhalb einer Komponente (Gl. (3.8), Gl. (3.9)).....	133	
9.3	Anhang 3: Eigenwertrechnung des optisch anisotropen Laserresonators (Gl. (3.12), Gl. (3.14)).....	135	
9.4	Anhang 4: Herleitung der Intensitätsgleichungen zur ZMOLV- Frequenzstabilisierung (Gl. (4.17), Gl. (4.18)) und zum Algorithmus zur Bestimmung der reziproken Rotation $\rho_R$ (Gl. (4.30), Gl. (4.35)).....	137	
9.5	Anhang 5: Herleitung der Gleichung zur Bestimmung der Mischsignal- amplitude hinter einem zirkularen Polarisator (Gl. (4.20)) .....	139	
9.6	Anhang 6: Herleitung der Phasendifferenz $\Delta\varphi_E$ und der Hauptachsen- lage $\varphi_{PE}$ im photoelastischen Modulator (Gl. (5.16), Bild 5.14).....	142	
9.7	Anhang 7: Herleitungen zur thermisch bedingten Phasenanisotropie im Laserkristall.....	149	49
9.8	Anhang 8: Herleitung der Störempfindlichkeiten $S_\Delta$ und $S_\varphi$ bei der Bestimmung von $\Delta$ und $\varphi$ (Gl. (6.21), Gl. (6.24)).....	151	
10	Verwendete Formelzeichen .....	155	5
11	Literaturverzeichnis .....	165	65
11.1	Vorveröffentlichungen.....	165	55
11.2	Literatur zu Kapitel 2 .....	165	5
11.3	Literatur zu Kapitel 3 .....	170	)
11.4	Literatur zu Kapitel 4 .....	170	)
11.5	Literatur zu Kapitel 5 .....	172	2
11.6	Literatur zu Kapitel 6 .....	174	4
11.7	Literatur zu Kapitel 7 .....	174	4
11.8	Literatur zu Kapitel 8 .....	175	5
11.9	Literatur zu Kapitel 9 .....	175	5