

Zerstörmechanismen in optischen Materialien bei Anregung mit ultrakurzen Laserpulsen

Am Fachbereich Physik
der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation

von

Sven Martin

Dezember, 2004

1. Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Kautek
2. Gutachter: Prof. Dr. Ludger Wöste
3. Gutachter: Prof. Dr. Martin Wolf

Termin der Disputation: 1. Februar 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Gauß'sche Laserpulse	3
2.1.1	Räumliche Abhängigkeiten — Energie und Fluenz	3
2.1.2	Zeitliche Zusammenhänge — Intensität	4
2.2	Absorption von Laserstrahlung	5
2.2.1	Lineare Absorption	5
2.2.2	Mehrphotonen-Absorption	5
2.3	Laserinduzierte Ablation	6
2.3.1	Energetische Betrachtung	6
2.3.2	Mehrphotonen- und Avalanche-Ionisation	8
2.3.3	Coulomb-Explosion	11
2.3.4	Schwelle der laserinduzierten Ablation (LIDT)	11
2.3.5	Ablationstiefe	14
2.3.6	Einfluß von Defekten	15
2.4	Ablation mit Pulszügen — Inkubation	18
2.4.1	Mechanische Ermüdung	19
2.4.2	Laserinduzierte Defekte	19
2.4.3	Akkumulation von Wärme	21
2.4.4	Ablationsrate	22
2.5	Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen	22
3	Experimentelle Methoden	23
3.1	Meßaufbau	23
3.2	Lasersystem	24
3.3	Fokussierung	27
3.4	Messung der Strahlradien und Schwellfluenzen	31
3.5	Zusammenfassung der experimentellen Verfahren	32
4	Spektroskopische Untersuchungen	34
4.1	Vorstellung der Proben	34
4.2	Bildung von Farbzentren	36
4.2.1	Farbzentren in Phosphatglas	39
4.2.2	Farbzentren in BBS-Glas	41
4.3	Langzeitverhalten der Farbzentren	42

4.4	Zusammenfassung	45
5	Laserinduzierte Ablation	46
5.1	Ablation von Dielektrika mit 30-fs-Laserpulsen	46
5.1.1	Inkubation	47
5.1.2	Ablationsschwellen von dünnen Schichten	52
5.1.3	Abhängigkeit der Ablationstiefe von der Pulsanzahl	54
5.1.4	Abhängigkeit der Ablationsrate von der Fluenz	55
5.1.5	Einfluß der Repetitionsrate auf die laserinduzierte Ablation	55
5.2	Abhängigkeit der Ablation von der Strahlgröße	60
5.2.1	Ablationsschwelle in ionendotiertem Phosphatglas	61
5.2.2	Ablationsschwelle transparenter Gläser	62
5.3	Pulsdauerabhängigkeit der Ablationsschwelle	65
5.3.1	Ionendotiertes Phosphatglas	66
5.3.2	Vergleich mit transparentem Phosphatglas	70
5.3.3	Abhängigkeit der Ablationsrate von der Pulsdauer	73
5.4	Zusammenfassung der Ablationsuntersuchungen	74
6	Zusammenfassung	77
A	Berechnungen und Datenblätter	79
A.1	Verwendete Formelzeichen	79
A.2	Einige Umrechnungen	80
A.2.1	Kenngrößen der Gauß-Funktion	80
A.2.2	Absorptionsquerschnitte und -koeffizienten	80
A.3	Datenblätter	81
	Literaturverzeichnis	90
	Publikationen aus dieser Arbeit	98
	Lebenslauf	100
	Danksagung	101

Abbildungsverzeichnis

2.1	Temperaturanstieg in BBS-Glas	8
2.2	Schmelzschwelle in BBS-Glas	12
2.3	MPI bei 800 nm für Quarzglas	14
2.4	Fluenzverteilung (schematisch)	17
3.1	Schema des Ablationsmeßplatzes	24
3.2	Spektren der Laserstrahlung	26
3.3	Autokorrelationssignal der Laserstrahlung	26
3.4	Strahlprofil nach Parabolspiegel	28
3.5	Dispersion bei der Fokussierung	29
3.6	Strahldurchmesser über Probenebene	30
3.7	Abtrag mit Gauß'förmigen Laserpulsen	31
4.1	Transmissionsspektren der untersuchten Proben	35
4.2	Farbzentren in PK 50	37
4.3	Transmission von BBS-Glas nach Bestrahlung	38
4.4	Defekt-OD von PK 50-Glas nach Bestrahlung	39
4.5	Optische Dichte von BG 18 mit Farbzentren	40
4.6	Defekt-OD von BBS-Glas nach Bestrahlung	41
4.7	Defekt-OD von BBS-Glas vs. Bestrahlungsdosis	42
4.8	Defekt-OD über der Wellenlänge	43
4.9	Ausheilung der Defekte	44
5.1	Mikroskopbild einer zerstörten Stelle (PK 50)	47
5.2	Quadrierter Lochdurchmesser über der Fluenz (BG 18)	48
5.3	Ablationsschwelle über der Pulszahl (BG 18)	49
5.4	Akkumulierte Ablationsschwelle (BG 18)	50
5.5	Akkumulierte Ablationsschwelle (PK 50)	51
5.6	Akkumulierte Ablationsschwelle (BBS-Glas)	52
5.7	Ablationsschwellen der Einzelschichten	53
5.8	Ablationstiefe über der Pulszahl (BG 18)	54
5.9	Ablationsrate über der Fluenz (BG 18)	56
5.10	Ablationsschwelle über der Repetitionsrate (BG 18)	57
5.11	Mehrpuls-Ablationsschwellen über der Repetitionsrate (Einzelschichten)	57
5.12	Ablationsrate über der Fluenz, Repetitionsrate (BG 18)	58
5.13	Mikroskopaufnahme zur Spülung mit Stickstoff (BG 18)	59
5.14	Ablationsrate über der Fluenz, Spülung (BG 18)	60

5.15	Quadrierter Lochdurchmesser über der Fluenz (BG 18)	61
5.16	Ablationsschwelle über der Fokusgröße (BG 18)	62
5.17	Ablationsschwelle über der Fokusgröße (PK 50)	63
5.18	Ablationsschwelle über der Fokusgröße (BBS-Glas)	63
5.19	Inkubationskoeffizienten über der Strahlgröße (PK 50)	65
5.20	Temperaturanstieg in BG 18	66
5.21	Ablationsschwelle über der Pulsdauer (BG 18)	67
5.22	Ablationsschwelle über der Pulsdauer (BG 18)	69
5.23	Inkubationskoeffizienten über der Pulsdauer (BG 18)	69
5.24	Ablationsschwelle über der Pulsdauer (BG 18, PK 50)	71
5.25	Ablationsschwelle über der Pulsdauer (BG 18, PK 50)	71
5.26	Ablationsschwelle über der Pulsdauer (PK 50)	72
5.27	Inkubationskoeffizienten über der Pulsdauer (PK 50)	73
5.28	Ablationskoeffizient über Pulsdauer (BG 18)	74