

X-Ray Emission and Particle Acceleration
from a Liquid Jet Target
Using a 1-kHz Ultrafast Laser System

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum naturalium

(Dr. rer. nat.)

im Fach Physik

eingereicht am

Fachbereich Physik der Freien Universität Berlin

von

Diplom-Physiker Andreas Thoß

aus Jena

Gutachter: 1. Prof. Dr. I.V. Hertel
 2. Prof. Dr. L. Wöste

Die öffentliche Disputation der Arbeit fand am 12. Mai 2003 um 17.00 Uhr c.t. statt.

Zusammenfassung

Bei der Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse gab es in den letzten zwei Jahrzehnten erhebliche Fortschritte, was zu immer höheren Pulsleistungen führte während gleichzeitig Größe und Preis der entsprechenden Lasersysteme deutlich zurückgingen. Dadurch wurde die Erforschung und Anwendung intensiver ultrakurzer Laserimpulse vereinfacht und einem breiteren Nutzerkreis zugänglich. Ein Beispiel ist die Erzeugung ultrakurzer Impulse harter Röntgenstrahlung in laserinduzierten Plasmen. Hierzu wird ein intensiver Laserimpuls auf ein geeignetes Target fokussiert und dadurch sowohl Linien- als auch Bremsstrahlung im Bereich von einigen keV bis zu einigen MeV erzeugt. Ursprünglich wurden solche Experimente mit Einzelschuß- oder 10 Hz - Lasern durchgeführt, in den letzten Jahren wurden sie aber auch für neue Lasersysteme mit hoher Repetitionsrate zugänglich. Die Anwendung solcher kHz - Lasersysteme in der Laserplasmaphysik ermöglicht einerseits eine Vereinfachung vieler Messtechniken, andererseits stellt es erhöhte Anforderungen an das Target: Es muss nicht nur im Mikrometerbereich räumlich fixiert bleiben, sondern auch sehr schnell erneuert werden. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, neben dem Aufbau eines 1 kHz-Lasersystem zur Erzeugung von Röntgenimpulsen ein geeignetes, neues Targetsystem zu entwickeln. Das wurde mit einem dünnen ($d=30\ \mu\text{m}$) Strahl aus flüssigem Gallium realisiert, mit dem bei Laser-Repetitionsraten von 1 kHz –10 kHz harte Röntgenstrahlung generiert wurde. Mit einer fokussierten Laserintensität von über $10^{16}\ \text{W}/\text{cm}^2$ wurde Ga Linienstrahlung bei etwa 10 keV erzeugt und breitbandige Bremsstrahlung mit Energien von bis zu 55 keV gemessen. Mittels einer zeitaufgelösten Untersuchung des Targets nach dem Auftreffen des Laserimpulses konnte seine hohe Stabilität nachgewiesen werden. Aus dieser Untersuchung ergab sich außerdem, dass das Targetsystem noch bei Repetitionsraten von mehr als 100 kHz benutzt werden kann. Neben Gallium werden verschiedene andere Targetmaterialien vorgestellt und diskutiert.

In einem ersten Anwendungsexperiment wurde die Beugung von Gallium K_{α} Linienstrahlung an einem GaAs Kristall untersucht. Das entsprechende Beugungsbild zeigt die $K_{\alpha 1}$ und $K_{\alpha 2}$ Linien hochaufgelöst mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von etwa 100:1. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit Experimenten an 10 Hz-Systemen und zeigt, dass das System mit Galliumtarget für zukünftige zeitaufgelöste Beugungsexperimente, z.B. an Festkörpern, gut geeignet ist.

Neben der Untersuchung der Röntgenemission wurden verschiedene Experimente durchgeführt, um die Vorgänge in Laserplasmen genauer zu charakterisieren. Dazu gehört die

direkte Messung von Elektronen, die im laserinduzierten Plasma an einem Wasserstrahltarget auf Energien von über 60 keV beschleunigt wurden. Durch die spektrale Analyse sichtbarer Strahlung des Laserplasmas konnten verschiedene zum Teil resonante Wechselwirkungen zwischen akustischen Elektronenwellen (Plasmonen) und der Laserstrahlung nachgewiesen werden. Die Kenntnis dieser Wechselwirkungen ermöglicht ein besseres Verständnis von Elektronen-Beschleunigungsprozessen im Plasma. Neben „heißen“ Elektronen werden in der Laserplasmaphysik in den letzten Jahren auch hochenergetische Protonen untersucht. Um die Eignung des Strahltargets zur Erzeugung solcher Protonenpulse zu untersuchen, wurde ein 20 μm -Wassertarget untersucht. Protonen mit Energien von bis zu 400 keV konnten gemessen werden. Eine weitere Erhöhung der Laserintensität in den Bereich von $>10^{17}$ W/cm² (bei kHz Repetitionsrate) in naher Zukunft lässt die Steigerung der Protonenenergien in den MeV-Bereich erwarten. Die zeitliche Charakteristik dieser Teilchenpakete ist eng an die Länge des Laserimpulses gebunden, so dass man sowohl für die Elektronen als auch für die Protonen von sub-ps Pulsen ausgehen kann. Am Ende der Arbeit werden in einem Ausblick mögliche Anwendungen dieser Teilchenstrahlen diskutiert.

Abstract

The generation of ultrashort laser pulses underwent a rapid progress in the last two decades which led to a strong increase in laser power accompanied by a decrease in complexity and costs of the systems. Hence, applications grew in number and quality. One example is the laser-based generation of hard X-rays pulses which found applications in a number of different fields of physics. This method involves focusing of an intense laser pulse onto a dense target which leads to the generation of characteristic line radiation as well as broadband bremsstrahlung in the keV to MeV range. Originally, such experiments were done with single shot devices, but in recent years they also became accessible to laser systems with high repetition rate. Repetition rates in the kilo-Hertz range require rapidly refreshing targets, with a spatial stability of a few μm . Together with a 1 kHz ultrashort laser system, a new target for the generation of X-ray pulses at rates of 1 and 10 kHz is presented in this work. Based on a microscopic liquid gallium jet, line radiation at about 10 keV and bremsstrahlung between 20 and 55 keV was generated using laser intensities exceeding 10^{16} W/cm² at 1 kHz. Time-resolved analysis of the microscopic behavior of the jet-target after laser illumination shows that the target is stable and capable of providing a pristine surface for X-ray generation at repetition rates up to 100 kHz. Different target materials were investigated and compared to gallium. This X-ray source was applied for an initial diffraction experiment, where the gallium K_{α} line radiation was diffracted on a [111] GaAs surface. The result is a highly resolved diffraction pattern of the $K_{\alpha 1}$ and $K_{\alpha 2}$ lines with a signal-to-noise ratio of about 100:1. This is comparable to those obtained with 10 Hz systems and recommends the setup for time resolved diffraction at kHz rates.

In addition to X-ray emission, the underlying plasma physics was investigated. Energetic electrons ejected from the plasma (water-jet target) into a small cone were detected directly. Electron energies of more than 60 keV were found. Using spectroscopic data of the visible radiation emitted by the plasma, photon-plasmon interactions were identified and their role in the electron acceleration process is discussed. Finally, accelerated protons from the water-jet target were detected. Their maximum energy was about 400 keV. The collimated electrons and energetic protons are demonstrated (to the authors knowledge) for the first time at kHz repetition rates. This offers not only unique possibilities for plasma physics with a table-top setup but also permits a number of new applications. An outlook addresses the implications of future increases in laser energy and intensity.

Contents

1	Introduction	1
2	Interaction of Intense Electromagnetic Fields with Hot Dense Plasma	3
2.1	Introduction to Plasma Physics	3
2.1.1	Basic Parameters	4
2.1.2	Microscopic, Kinetic, and Fluid Descriptions of a Plasma	7
2.1.3	Numerical Simulation Techniques	12
2.2	Light Absorption Effects in Dense Plasma	14
2.2.1	Absorption in Strong Laser Fields	15
2.2.2	Absorption in Ultra-Strong Laser Fields	17
2.3	X-Ray Emission	19
2.4	Electron Acceleration in Laser-Induced Plasma Waves	22
2.4.1	Waves in Plasma	22
2.4.2	Parametric Effects, Wave Mixing and Electron Acceleration	25
2.5	Ion Acceleration in Ultra-Strong Laser Fields	30
3	Laser and Target Setup	33
3.1	Generation of High-Repetition Rate fs-Laser Pulses in the Millijoule Range	33
3.1.1	The Oscillator	34
3.1.2	High-Repetition Rate Amplification of fs-Laser Pulses	36
3.1.3	Adaptive Modification of Ultrashort Laser Pulses	42
3.2	The Liquid Jet Target	44
3.2.1	Fluid Dynamics of Microscopic Liquid Jets	45
3.2.2	Jet apparatus	48
3.2.3	Jet-gap measurements	49
4	High Repetition Rate X-Ray Generation Using Liquid Jet Targets.....	53
4.1	Spectral Measurements of Hard X-Rays Using a Dispersive Silicon Detector	53
4.2	Generation of Gallium Line Radiation	57

4.2.1	Experimental Setup	57
4.2.2	Generation of Gallium Line Radiation at kHz Repetition Rate	59
4.2.3	X-Ray Generation at 10 kHz Repetition Rate	63
4.2.4	Discussion of the Energy Transfer Process and Optimal Parameters	64
4.2.5	Some Technical Aspects of Gallium X-ray Generation.....	69
4.3	Generation of Continuous Radiation (Bremsstrahlung).....	72
4.3.1	Estimation of the Hot-Electron Energy	72
4.3.2	Discussion of Absorption and Re-Absorption Processes.....	73
4.3.3	Continuous Spectra from Different Targets	75
5	Application of High Repetition Rate X-Rays in Diffraction Experiments.....	78
5.1	X-Ray Detection Using a Back Illuminated CCD Camera	78
5.1.1	CCD Types and Detection Principles.....	79
5.1.2	X-Ray Detection with ANDOR DO434 BN	81
5.2	Experimental Setup	83
5.3	Diffraction on a GaAs Crystal.....	85
5.3.1	Diffraction Theory.....	85
5.3.2	Experimental Results.....	89
6	Particle Acceleration Experiments	92
6.1	Electron Acceleration.....	92
6.1.1	Target and Experimental Setup	92
6.1.2	Direct Electron Detection.....	93
6.1.3	Discussion of Electron Energies	95
6.1.4	Spatial Electron Distribution.....	96
6.1.5	Spectral Observations.....	98
6.2	Proton Acceleration.....	102
6.2.1	Proton Energy.....	103
6.2.2	Angular Distribution	105
7	Summary and Conclusions	108
	Appendix A : AMPTEK CR100XR Efficiency Data.....	111

Appendix B : CCD Camera Data Processing	113
B1 Band Pass Filtering.....	113
B2 Data Correction for Camera Tilt Angle.....	113
B3 Integration Along CCD Columns.....	113
B4 Subtraction of Noise and Normalization.....	114
B5 Drawing of the Experimental Setup.....	115
Appendix C : RCF Image-Processing.....	117
C1 The Radiochromic Film.....	117
C2 Image Processing.....	117
Appendix D : Proton Detection with CR39/TASTRAK.....	119
D1 Detection and Processing.....	119
D2 Microscopic Evaluation.....	120
References	121
Publications.....	132
Curriculum Vitae.....	133
Acknowledgements.....	135