

# Überblick über die wissenschaftlichen Arbeiten des Kandidaten

## Kurze Zusammenfassung der Promotionsarbeit des Kandidaten mit dem Titel "Direkte Messung der Lebensdauer optischer Phononen mit Pikosekunden- Laserpulsen"

Während meiner Promotion arbeitete ich von 1982 bis 1986 auf dem Gebiet der Laserentwicklung und der zeitaufgelösten Spektroskopie am Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität in Budapest. Zunächst baute ich einen Nd:Glass-Laser mit Verstärker auf. Mit diesem Laser wurden kohärente Phononen in einem Calcit-Kristall angeregt. Die Dynamik dieser kohärenten Phononen wurde mittels der zeitaufgelösten kohärenten Anti-Stokes-Raman-Spektroskopie (TR-CARS) untersucht. Die Experimente ergaben einen exponentiellen Abfall der Kohärenz der Phononen und eine Zeitkonstante entsprechend der Linienbreite des Phononenzweigs  $A_{1g}$  mit einem Lorentz-Profil. Dies hat zwei wichtige Konsequenzen: der Zerfall der kohärenten Phononen wird überwiegend durch die Relaxation von angeregten Phononenzuständen verursacht und die hohe Besetzungszahl der Phononenzustände hat, zumindest in dem mit den verfügbaren Laserpulsen erreichbaren Bereich, keinen Einfluß auf die Zerfalldynamik der angeregten Phononenzustände. Die Ergebnisse der Laserentwicklung und der TR-CARS Messungen sind in meiner Doktorarbeit mit dem Titel "Direkte Messung der Lebensdauer optischer Phononen mit Pikosekunden-Laserpulsen" dokumentiert. 1985 hielt ich meinen Promotionsvortrag an der JATE Universität in Szeged; die Promotion wurde mit der Auszeichnung "summa cum laude" bewertet. Die Ergebnisse wurden außerdem in Zeitschriften und Konferenzbänden veröffentlicht. [*Physica Status Solidi* (b) 135, K99 (1986); *Journal of Physics* E19, 1027 (1986)]

## Kurze Zusammenfassung der wissenschaftlichen Arbeiten des Kandidaten nach der Promotion

1. Forschung auf dem Gebiet der Pikosekunden Laser gesteuerten optischen Hochspannungsschalter

Nach meiner Doktorarbeit erhielt ich ein Stipendium am "Laboratory for Laser Energetics" an der Universität in Rochester. Hier konnte ich Erfahrungen auf dem Gebiet der

neu entwickelten "chirped pulse amplification" Technik (CPA) und der optischen Hochspannungsschalter erwerben. Ich entwickelte einen kreisförmigen optischen Schalter aus GaAs, mit dem Hochspannungspulse mit Amplituden von bis zu 10 kV und Anstiegszeiten im Bereich von 10 ps erzeugt werden konnten. Die Technik des elektro-optischen "sampling" wurde angewandt, um die zeitlichen Eigenschaften der Pulse zu charakterisieren. Die Beschleunigung von Elektronen wurde mit den Hochspannungspulsen untersucht. [*Journal of Particle Accelerators* 23, 255 (1988)]

## 2. Dynamik von Nicht-Gleichgewichts-Phononen

Im Anschluß an die Zeit in Rochester erhielt ich eine Postdoktoranden-Stelle am Physikalischen Institut der University of California in Irvine, wo ich die Möglichkeit hatte, zur zeitaufgelösten Spektroskopie von Phononen zurückzukehren. Da mit kommerziell erhältlichen Lasern die zur Untersuchung nichtlinearer Wechselwirkungen von Phononen erforderlichen Pulsleistungen nicht erreicht werden konnten, entwickelte ich zunächst ein Lasersystem zur Bereitstellung von intensiven ultrakurzen Laserpulsen.

### 2.1. Duale synchron gepumpte und synchron verstärkte Farbstoff-Laser

Duale Pikosekunden-Farbstoff-Laser werden mit der zweiten Harmonischen eines aktiv modengekoppelten Nd:YAG-Lasers synchron gepumpt. Ein kleiner Anteil des IR-Strahls wird in einen regenerativen Nd:YAG-Verstärker eingekoppelt, der die Pulse auf bis zu ~1.8 mJ Pulsenergie bei einer Repetitionsrate von 1 kHz verstärkt. Durch Frequenzverdopplung wird eine Leistung von 0.8 W im Grünen erreicht, die in vier Strahlen aufgespalten wird, um die beiden Verstärkerstufen des dualen Lasersystems synchron zu pumpen. Ein Verstärkungsfaktor von  $6 \times 10^4$  wird für jeden der beiden Farbstoff-Laser erreicht. Somit ist die gesamte für die Zweiphotonen-Anregung zur Verfügung stehende Intensität um einen Faktor von ca.  $4 \times 10^9$  gegenüber der ursprünglichen Pulsleistung verstärkt. [*Opt. Lett.* 13, 577 (1988)]

## 2.2. Nicht-exponentieller Phononenzerfall, Phononen-Renormalisierung

Mit dem neu entwickelten Lasersystem wurden kohärente hochgradig Nicht-Gleichgewichts-Phononen in GaAs angeregt. Es wurden experimentelle Untersuchungen zur Renormalisierung der Zustände optischer Phononen unter Nicht-Gleichgewichtsbedingungen, die von der Anregung einer Nicht-Gleichgewichtsverteilung akustischer Phononen herrührt, durchgeführt. Die experimentellen Ergebnisse weisen in Übereinstimmung mit den theoretischen Grundlagen darauf hin, daß die Nicht-Gleichgewichtszustände zwei Zerfallsraten und zwei Resonanzfrequenzen haben. Außerdem weisen die Zerfallsraten und Resonanzfrequenzen eine starke Abhängigkeit von der Phononen-Besetzungszahl auf. [*Phys. Rev. Lett.* 62, 1655, (1989); *Phys. Rev.* B45, 209 (1992)]

## 2.3. Wechselwirkung eines Elektron-Loch-Plasmas mit optischen Phononen

Die Wechselwirkung eines optisch induzierten nicht-stationären Elektron-Loch-Plasmas mit kohärent angeregten optischen Phononen in GaAs wurde mit Hilfe eines TR-CARS Experiments untersucht. Ein nicht-exponentieller Zerfall der Kohärenz der optischen Phononen wird bei Anwesenheit eines Elektron-Loch-Plasmas beobachtet. Ein Modell, welches die Wechselwirkung zwischen optischen Phononen und dem Elektron-Loch-Plasma beschreibt, wurde vorgestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse des theoretischen Modells mit den experimentellen Daten ergibt eine gute Übereinstimmung. [*Phys. Rev. Lett.* 68, 2366 (1992); *J. of Lumin.* 53, 283 (1992)]

## 2.4. Ausweitung der Zeitauflösung der TR-CARS Experimente in den Femtosekunden-Bereich: Erzeugung und Verstärkung von synchronisierten Femtosekunden- und Pikosekunden-Laserpulsen

Viele TR-CARS Experimente erfordern eine Zeitauflösung im Femtosekunden-Bereich. Aus diesem Grund habe ich ein synchron gepumptes, duales Lasersystem mit linearer Resonatorconfiguration in beiden Lasern entwickelt, welches synchronisierte Femtosekunden- und durchstimmbare Pikosekunden-Laserpulse erzeugt. Die Langzeit-Stabilität der Synchronisation sowie der Frequenz des Femtosekunden-Farbstoff-Lasers wird durch eine aktive Stabilisierung der Resonatorlänge gewährleistet. Zusätzlich wurden sowohl

die Pikosekunden- als auch die Femtosekunden-Pulse mit Hilfe einer dualen Verstärkerkette auf Pulsenergien im Mikrojoule-Bereich bei einer kHz-Repetitionsrate verstärkt. [*IEEE J. of Quant. Electron.* 25, 1704 (1989)]

## 2.5. Zerfall von Polaritonen mit Auflösung im Subpikosekunden-Bereich

Unter Ausnutzung der Möglichkeiten des Femtosekunden TR-CARS Systems habe ich den Zerfall von Polaritonen in GaAs auf einer Subpikosekunden-Zeitskala untersucht. Polaritonen wurden durch kohärente Raman-Anregung mit einem zeitlich synchronisierten Pikosekunden- und Femtosekunden-Laserpuls erzeugt. Die angeregten Polaritonen wurden durch Anwendung der zeitaufgelösten Anti-Stokes-Raman-Streuung untersucht. Zwei unterschiedliche Zerfallszeiten wurden in GaAs beobachtet. Die Temperaturabhängigkeit der beiden Zerfallszeiten ermöglicht die Identifizierung von zwei unterschiedlichen Zerfallskanälen. Die Ergebnisse ergänzen zuvor im Spektralbereich erhaltene Resultate und verdeutlichen die Vorteile von zeitaufgelösten Untersuchungen. [*Phys. Rev. Lett.* 63, 2385 (1989)]

## 2.6. Phononen mit langer Lebensdauer

Die Produkte des Polaritonen-Zerfalls sind transversale akustische (TA) Phononen in der Nähe des X-Punktes der Brillouin-Zone. Das TA-Phonon stellt den Zweig mit der niedrigsten Dispersion dar und kann daher - aufgrund der Energie- und Impulserhaltungssätze - nicht in Phononen mit niedriger Energie zerfallen. Daher sollte die Lebensdauer der TA-Phononen bis zur 3. Ordnung der Zerfallsdynamik unendlich betragen. Man erhält eine theoretische Lebensdauer von 38 ms für thermisch aktivierte Wechselwirkung der dritten Ordnung bzw. von  $10^3$  s unter Berücksichtigung eines Prozesses der 4. Ordnung. Im Gegensatz hierzu wurde mittels zeitaufgelöster Seitenband-Phononen-Spektroskopie eine Lebensdauer von  $66.5 \pm 5$  ns für die durch den Zerfall eines Polaritons erzeugten TA-Phononen gemessen. Diese Zeit ist lang im Vergleich zu den Lebensdauern von optischen Phononen ( $\sim 10$  ps), von Polaritonen ( $\sim 100$  fs) und von LA-Phononen (1 ps), aber kurz verglichen mit den theoretischen Vorhersagen. [*SPIE Proceedings* 2142, 142 (1994)]

### 3. Wechselwirkung von ultrakurzen Laserpulsen mit supraleitenden Materialien

Nicht-Gleichgewichts-Zustände können in supraleitenden Pb-Schichten mit Pikosekunden-Laserpulsen angeregt werden. Die Technik des elektro-optischen "sampling" wurde benützt, um das vorübergehende elektrische Feld, welches durch diese Zustände in Anwesenheit eines Supra-Stroms erzeugt wird, zu beobachten. Aus unserem Experiment kann gefolgert werden, daß der Übergang zwischen supraleitendem und normalem Zustand innerhalb von 1 ps erfolgt. Die durch die Existenz der Nicht-Gleichgewichtszustände hervorgerufenen Änderungen des spezifischen Widerstandes der Schicht wurden mit einem schnellen Oszilloskop gemessen. Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands wurde mit Hilfe der Theorie von Elisin für den Zwischenzustand analysiert. Der Vergleich des theoretischen Modells stimmt mit der gemessenen Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands gut überein. [*Appl. Phys. Lett.* 59, 3333 (1991); *Appl. Phys.* A52, 155 (1991)]

### 4. Dynamik der Relaxation von optischen Ladungsträgern in C<sub>60</sub>-Schichten

Die Relaxation von durch Femtosekunden-Laserpulse angeregte Ladungsträger in C<sub>60</sub>-Schichten wurde mittels zeitaufgelöster Transmissionsmessungen untersucht. Erniedrigt man die Umgebungstemperatur von Raumtemperatur auf 5 Kelvin, so geht die nicht-exponentielle zeitliche Relaxation in einen exponentiellen Abfall über. Zusätzlich wurde eine Arrhenius-artige Abhängigkeit der Ladungsträger von der Umgebungstemperatur beobachtet. Diese Ergebnisse legen die Vermutung nahe, daß das Einfangen von Ladungsträgern eine wichtige Rolle bei der Relaxation spielt. Die Abhängigkeit der Relaxationszeit von der Ladungsträgerdichte spricht ebenfalls für diese Annahme. Der Vergleich mit einem einfachen Modell des nicht-exponentiellen („gestreckten“) Abfalls legt nahe, daß temperaturabhängige Strukturänderungen der Schicht auch die Relaxation der Ladungsträger beeinflussen. [*Phys. Rev.* B48, 4929 (1993)]

### 5. Nicht-Gleichgewichts-Elektronen in Metallschichten

Nicht-Gleichgewichts-Elektronen wurden durch die Absorption von Femtosekunden-Laserpulsen angeregt und durch zeitaufgelöste Messung der vorübergehenden Transmission

oder Reflektion beobachtet. Die angeregten Elektronen verlieren Energie an das Phononen-System bis das thermische Gleichgewicht im Metall erreicht ist. Ich habe die Relaxation und den Transport von mit Femtosekunden-Lasern angeregten Elektronen in verschiedenen Experimenten untersucht.

### 5.1 Femtosekunden-Thermoreflektivität und -Thermotransmission von dünnen Goldschichten unterschiedlicher Kristallstruktur

Ich habe einen Femtosekunden-Laser benutzt, um Nicht-Gleichgewichts-Elektronen in poly-kristallinen und einfach-kristallinen Goldschichten zu erzeugen und zu beobachten. Die vorübergehende Thermoreflektivität und Thermotransmission wurde für verschiedene Energieflußdichten des anregenden Laserpulses erzeugt. Eine zeitliche Analyse erlaubt es, Veränderungen des Realteils und des Imaginärteiles der Dielektrizitätskonstante aufzulösen. Letzterer ist offenbar bei der aktuell eingesetzten Wellenlänge des Probestrahls dominierend. Die Lebensdauer des Energieverlustes der Elektronen wurde zu 1-3 ps bestimmt und nimmt mit der Energiedichte der Laserstrahlung zu. Das Experiment läßt den Schluß zu, daß Korngrenzen die Relaxation und den Transport von angeregten Elektronen beeinflussen. [*Phys. Rev. B*43, 4488 (1991); *Phys. Rev. B*47, 13599 (1993)]

### 5.2 Temperaturabhängigkeit der zeitaufgelösten Thermoreflektivität

Es wurde die Abhängigkeit der vorübergehenden Thermoreflektivität dünner Goldschichten von der Umgebungstemperatur untersucht. Dabei nahm ich die Existenz einer effektiven Elektronentemperatur während des Experimentes an und zeigte, daß es möglich ist, den zeitlichen Verlauf der Thermoreflektivität in einen zeitlichen Verlauf der effektiven Elektronentemperatur überzuführen, sowie die Abhängigkeit des Abfalls der effektiven Elektronentemperatur von der Umgebungstemperatur zu bestimmen. [*Phys. Rev. B*45, 13819 (1992)]

### 5.3 Direkte Messung des Transports von Nicht-Gleichgewichts-Elektronen in Goldschichten mit unterschiedlicher Kristallstruktur

Ich habe den Transport von Nicht-Gleichgewichts-Elektronen, welche mit Femtosekunden-Lasern angeregt wurden, in poly- und einfach-kristallinen Goldschichten durch Flugzeit-Messungen untersucht. Die Dicke der Schichten lag zwischen 25 nm und 400 nm. Es wurden sowohl ballistische Elektronen als auch Elektronen, die mit anderen Elektronen und/oder dem Gitter wechselwirkten beobachtet. Die ballistische Komponente dominiert den Transport in den dünneren Schichten, wohingegen der wechselwirkende Transportmechanismus an der oberen Grenze der untersuchten Schichtdicken bestimmend ist. Bei poly-kristallinen Proben wurde eine langsamere effektive Geschwindigkeit des wechselwirkenden Prozesses registriert, der vermutlich auf der Existenz von Korngrenzen beruht. Aus dem Experiment wurde der Reflektionskoeffizient der angeregten Elektronen an den Korngrenzen gewonnen. Er kann auf etwa  $r \approx 0.12$  abgeschätzt werden. Das Experiment legt außerdem nahe, daß das thermische Gleichgewicht in den ersten  $\sim 500$  fs nach der Anregung noch nicht vollständig vorliegt. [*Phys. Rev. B* 48 15488 (1993)]

### 5.4 Theorie des Transportes von Nicht-Gleichgewichts-Elektronen in Metallen

Wie die Transportmessungen angedeutet haben, ist das thermische Gleichgewicht der angeregten Elektronen in den ersten 500 fs nach Anregung noch nicht vollständig realisiert. Diese Tatsache stellt die Verwendung des sogenannten „Zwei-Temperatur-Modells“ in Frage, welches ein thermisches Gleichgewicht zwischen den Elektronen annimmt. Um diese Schwierigkeit zu überwinden, wurde ein neues Modell entwickelt zur Beschreibung der Dynamik und des Transportes von mit Femtosekunden-Lasern angeregten Elektronen, welches auf der Theorie der Fermi-Flüssigkeiten basiert. Die Übereinstimmung zwischen dem Experiment und dem Modell ist sehr gut. [*Phys. Rev. Lett.* 75, Dec.1, (1995)(in press)]

## 6. Medizinische Anwendung von Ultrakurzpuls-Lasern

### 6.1 Entwicklung eines Dioden-endgepumten Pikosekunden-Festkörperlasers für medizinischen Einsatz

Zuverlässigkeit, kompakte Abmessungen, geringe Wartung und niedriger Preis sind die wichtigsten Anforderungen an medizinische Lasersysteme. Im Bereich der Pikosekunden-Laserpulsdauern sind mittels Diodenlasern endgepumpte Festkörperlaser die vielversprechendsten Kandidaten, um diese Anforderungen zu erfüllen.

#### 6.1.1 Longitudinal Dioden-endgepumpter Nd:YLF-Oszillator

Ich habe einen longitudinal Dioden-endgepumten Nd:YLF-Oszillatorlaser entwickelt, der mittels eines piezoelektrisch getriebenen Beugungsmodulators modengekoppelt wird. Dieser Laser erzeugt Pulse mit einer Dauer von 7 ps bei einer mittleren Leistung von 160 mW bei 160 MHz Repetitionsrate. [*Opt. Lett.* 15, 1458 (1990)]

#### 6.1.2 Leistungsstarker regenerativer Nd:YLF-Verstärker mit Dioden-Endpumpung

Es wurde ein kompakter, Dioden-gepumpter regenerativer Nd:YLF-Verstärker hoher Leistung konstruiert. Die Pumpquelle besteht aus einem 15 W-Diodenlaserarray. Dessen Strahlung wird in den Laserkristall fokussiert, und zwar mittels einer longitudinalen End-Pumpgeometrie unter Verwendung eines Arrays aus zylindrischen Mikrolinsen. Speist man den Verstärker mit den 15 ps-Pulsen eines Dioden-gepumten und modengekoppelten Nd:YLF-Oszillators, so erzeugt der regenerative Verstärker Laserpulse mit einer Energie von 0.5 mJ bei einer Wiederholfrequenz von 1 kHz. Bei bis zu 500 Hz Repetitionsrate wurden Pulsenergien bis 0.75 mJ erreicht. [*Opt. Lett.* 20, 154 (1995)]

#### 6.1.3 Dioden-gepumpter Nd:YLF-All-In-One-Laser

Es wurde ein Nd:YLF-All-In-One-Laser mit longitudinaler Dioden-Endpumpung konstruiert. Der kompakte Laser, der aus einem einzigen Resonator besteht, erzeugt Pulse mit einer Dauer von etwa 28 ps. Pulsenergien von etwa 120  $\mu$ J bzw. 500  $\mu$ J wurden gemessen bei

einer Repetitionsrate von 1 kHz unter Verwendung einer 3 W- bzw. 15 W-Pumplaserdiode. Das Pre-Lasing des Systems wurde beeinflusst, um starke Relaxationsschwingungen zu verhindern und um den Pre-Lasing-Verlust zu minimieren. Die Pulsbildung des All-In-One-Lasers wurde unter Verwendung der Kuizenga-Siegman-Theorie analysiert. [*Opt. Lett.* 20, 1541 (1995)]

## 6.2 Laser-Gewebe-Wechselwirkung

### 6.2.1 Wechselwirkung nah-infraroter Pikosekunden-Laserpulse mit dem Cornea-Stroma

Es wurde der optische Durchbruch am Stromagewebe der Cornea untersucht. Der Schwellwert für die Zerstörung hängt von der Pulsdauer ab und nimmt bei kürzeren Laserpulsen ab. Durch Elektronenmikroskopie konnte die intrastromale Abtragung mittels optischen Durchbruchs durch Pikosekunden-Pulse gezeigt werden. [*Lasers and Light in Ophthalmol.* 5, 149 (1993)]

### 6.2.2 Experimentelle Untersuchung der Dynamik von Schockwellen und Kavitätsblasen, welche durch Pikosekunden-optischen Durchbruch in Gewebe und Wasser erzeugt wurden

Schockwellen und Kavitätsblasen, welche bei einem optischen Durchbruch erzeugt werden, beeinflussen vermutlich erheblich den Effekt photodisruptiver Laser. Es wurden zeitaufgelöst Aufnahmen gemacht, um die Schockwellen und Kavitationsblasen, welche durch den vom Pikosekunden-Puls induzierten optischen Durchbruch in Gewebe und Wasser erzeugt wurden, zu analysieren. In beiden Materialien fand sich eine rasche Abnahme des Schockwelleneffekts mit ähnlichem Zeitverhalten. Bei der Kavitationsblasen-Dynamik wurden Abweichungen gefunden, die sich auf Unterschiede der thermischen und mechanischen Eigenschaften der beiden Materialien zurückführen lassen. Desweiteren ergab das Experiment wichtige Informationen zur Optimierung der Laserparameter bei dem chirurgischen Verfahren der intrastromalen Ablation. [*Lasers in Surg. Med.* 15, 91 (1994)]

### 6.2.3 Dynamik von Schockwellen und Kavitationsblasen, erzeugt durch Femtosekunden-optischen Durchbruch in biologischem Gewebe und Wasser

Ich habe das Verhalten der Schockwelle und der Kavitationsblasen bei deren Erzeugung mit Femtosekunden-Laserpulsen durch Photodisruption in Cornea-Gewebe und Wasser untersucht. Es wurde eine rasche Abnahme der Schockwellen beobachtet, mit einer Ausdehnung, die bedeutend kleiner als bei Schockwellen war, welche von Pikosekunden- (oder Nanosekunden-) Pulsen herrührten. Es zeigte sich außerdem, daß die Kavitationsblasen sich vergleichsweise schneller entwickelten und einen geringeren Gesamtdurchmesser erreichten, als die von längeren Pulsen erzeugten. Die reduzierten Schockwellen- und Kavitationsblasen-Effekte resultieren in einer besser lokalisierten Gewebeschädigung. Dies deutet auf einen vielversprechenden Einsatz von Femtosekunden-Lasern in der Mikrochirurgie am Auge hin. [*Lasers in Surg. Med.* (in press)]

### 6.2.4 Wechselwirkung von UV-Pikosekunden-Pulsen mit Cornea-Gewebe

Ich habe die Ablation menschlichen und Kaninchen-Cornea-Gewebes mit Pikosekunden-Laserpulsen bei einer Wellenlänge von 211 nm und 263 nm analysiert. Für diese Pikosekunden-Pulse wurde ein deutlich niedrigerer Schwellwert für die Ablation gefunden, als er etwa bei gewöhnlichen Excimer-Lasern vorliegt. Dies kann durch die kürzere Dauer der Laserpulse begründet werden. Bei der Wellenlänge von 211 nm wurde eine geringere Schädigung des umgebenden Gewebes vorgefunden, was auf eine bessere Eignung dieser Wellenlänge in praktischen Anwendungen hindeutet. [*Lasers in Surg. Med.* (in press)]

## 6.3 Klinische Anwendungen des Pikosekunden-Nd:YLF-Lasers

### 6.3.1 Refraktive Chirurgie an Katzenaugen mit Pikosekunden-Laserpulsen

Zur Beurteilung der Effizienz des Pikosekunden-Nd:YLF-Lasers in der Hornhautchirurgie wurden Intrastromale Photorefraktive Keratektomien (ISPRK) an Katzenaugen durchgeführt. Der Laserstrahl wurde dazu in das obere Drittel des cornealen Stromas fokussiert und dann in speziellen spiralförmigen Bewegungen verfahren. Sechs Wochen nach der Behandlung konnte eine durchschnittliche topographische Abflachung von 11.4 Dioptrien und eine pachymetrische Verdünnung um 50 µm festgestellt werden. Während

eines sechsmonatigen Zeitraums nach der Behandlung konnte kein Rückgang des topographischen Effektes beobachtet werden. [*Arch. of Ophthalmol.* 113, 499 (1995)]

### 6.3.2 Pikosekunden-Laser-Mikrokeratomie

Mittels spiralförmiger Flächenablation konnte eine lamellenartige Schnitttechnik an menschlichen Hornhäuten gezeigt werden. Mit dieser Technik kann ein Gewebelappen der Cornea mittels Pikosekunden-Laserpulsen entfernt werden. Dadurch werden viele Risikofaktoren der mechanischen Mikrokeratomie umgangen. Unter Einsatz dieser Technik wurden erfolgreiche „flap-and-zap“-Behandlungen an blinden menschlichen Augen durchgeführt. [*1995 Pre - American Academy of Ophthalmology Meeting*, p.56, Atlanta, (1995)]

### 6.3.3 Pikosekunden-Laser-Keratomilensie

Unter Verwendung von spiralförmigen Flächenpattern konnte eine hüllenartige Ausschälung eines Linsenvolumens innerhalb des Cornea-Stromas durch Photodisruption des umgebenden Gewebes demonstriert werden. Durch eine kleine Öffnung kann das abgetrennte Gewebe dann entnommen werden. Wir nennen diese Methode Pikosekunden-Laser-Keratomilensie (PLK). PLK kann zur Korrektur hochgradiger Myopie eingesetzt werden. Mit dieser Technik konnten Brechungsveränderungen bis zu 18 Dioptrien an blinden menschlichen Augen gemessen werden. [*Symposium on Cataract, IOL and Refractive Surgery*, p.107, San Diego, (1995)]

## Zusammenfassung

Seit Erlangen des Dokortitels habe ich Forschungsprojekte in drei Hauptgebieten durchgeführt: 1. Entwicklung von Ultrakurzpuls-Lasern; 2. Anwendung von Ultrakurzpuls-Lasern in der Festkörper-Physik; 3. Einsatz von Ultrakurzpuls-Lasern in der Medizin. Als ein Ergebnis meiner Forschungsarbeiten bin ich Autor bzw. Mitautor von mehr als 50 wissenschaftlichen Artikeln und mehr als 30 Konferenzbeiträgen. Desweiteren fanden die Ergebnisse meiner wissenschaftlichen Arbeit Verwendung in kommerziellen Medizinlasern und bei neuen Techniken der Laserchirurgie.

## List of Publications

### A. Papers published in journals, books, or conference reports

1. T. O. Abraham, J. S. Bakos, Zs. Sorlei, and T. Juhasz, Stark Shift of Methanol Vibration Levels Measured By Optoacoustic Lamb-Dip Spectroscopy, *Optics Communications* 49, 266 (1984).
2. J. S. Bakos, T. Juhasz, Cs. Kuti, and L. Vannay. KDP Q-switches and Second Harmonic Generators for High Power Solid State Lasers. *Acta Physica Hungarica* 57, 208 (1985).
3. T. Juhasz, J. S. Bakos, and Cs. Kuti, Coherent Optical Generation and Time Resolved Detection of Phonons in Calcite, in "Phonons '85", ed. J Kollar, et al. World Scientific Press: Singapore, P. 897, 1986.
4. G. P. Djotyan, G. N. Karadzan, J. S. Bakos, and T. Juhasz, Generation of Tunable Picosecond Pulses by Four Photon Interaction, *Rev. Rom. Phys.* 31, 563 (1986).
5. G. V. Arutunyan, G. P. Djotyan, T. Juhasz, and Cs. Kuti, Phase Conjugated Reflection in the Field of Surface Reference Waves, *Rev. Rom. Phys.* 31, 957 (1986).
6. P. Kalman, and T. Juhasz, Doubled Electro-Optic Light Shutter, *Journal of Physics E* 19, 932 (1986).
7. T. Juhasz, J. S. Bakos, and Cs. Kuti, Direct Lifetime Measurement of the  $A_{1g}$  Phonon Mode in Calcite, *Physica Status Solidi (b)* 135, K99 (1986).
8. F. Krausz, T. Juhasz, J.S. Bakos, and Cs. Kuti, Microprocessor-Based System for the Measurement of the Characteristic of Ultrashort Laser Pulses, *Journal of Physics E* 19, 1027 (1986).
9. Cs. Kuti, T. Juhasz, J.S. Bakos, and L. Vannay, KDP Q-Switch with Decreased Piezooptic Influences, *Acta Physica Hungarica* 61, 247 (1987).
10. C. Bamber, W. Donaldson, T. Juhasz, L. Kingsley, and A. C. Melissinos, Radial Compression of Picosecond Electrical Pulses, *Particle Accelerators*, 23, 255 (1988).
11. T. Juhasz, J. Kuhl, and W. E. Bron, Dual Synchronously Pumped and Synchronously Amplified Dye Lasers, *Optics Letters* 13, 579 (1988).
12. W. E. Bron, T. Juhasz, and S. Mehta, A New Nonequilibrium Phonon State, *Physical Review Letters* 62, 1655 (1989).
13. T. Juhasz, G. O. Smith, S. Mehta, K. Harris, and W. E. Bron, Generation and Kilohertz Rate Amplification of Synchronized Picosecond and Femtosecond Laser Pulses, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 25, 1704 (1989).
14. J. S. Bakos, G. P. Djotyan, and T. Juhasz, Phase Conjugation by Four Wave Mixing with a Nonstationary Pumping Wave, *Journal of the Optical Society of America B* 6, 540 (1989).
15. T. Juhasz, and W. E. Bron, Subpicosecond Resolved Polariton Decay, *Physical Review Letters* 63, 2385 (1989).

6. T. Juhasz and W. E. Bron, Polariton Dephasing, in "Phonons '89" ed. S. Huklinger et. al. World Scientific Publishing, Singapore, p.1254, 1990.
7. W. E. Bron, T. Juhasz, S. Mehta, Observation of a New Nonequilibrium Phonon State, in "Phonons '89" ed. S. Huklinger et. al. World Scientific Publishing, Singapore, p.1236, 1990.
8. G. O. Smith, T. Juhasz, and W. E. Bron, Time-Resolved Electron-Hole Plasma and Optical Phonon Interaction in GaP, in "Ultrafast Phenomena VII" ed. C. B. Harris et.al. Springer-Verlag, p.343, 1990.
9. T. Juhasz, S. T. Lai, M. Pessot, L. Turi, Cs. Kuti, Efficient Mode Locking of a Diode Pumped Nd:YLF Laser with a Piezoelectrically Induced Diffraction Modulator, in "Proceedings of the International Conference on Lasers '90" ed. by D. G. Harris et al. STS Press McLean, p.87, 1991.
0. H. E. Elsayed-Ali, T. Juhasz, G. O. Smith, and W. E. Bron, Femtosecond Thermorefectivity and Thermotransmissivity of Polycrystalline and Single-Crystalline Gold Films, in "Ultrafast Phenomena VII", ed. by C. B. Harris, et al. Springer-Verlag, p.315, 1990.
1. T. Juhasz, S. T. Lai and M. Pessot, Efficient Short Pulse Generation from a Diode Pumped Nd:YLF Laser with a Piezoelectrically Induced Diffraction Modulator, *Optics Letters* 15, 1458 (1990).
2. X. H. Hu, T. Juhasz, and W. E. Bron, The temperature Dependence of the Resistive Response of Superconducting Pb Films upon Picosecond Optical Excitations, *Applied Physics A* 52, 155 (1991).
3. H. E. Elsayed-Ali, T. Juhasz, G. O. Smith and W. E. Bron, Femtosecond Thermorefectivity and Thermotransmissivity of Polycrystalline and Single Crystalline Gold Films, *Physical Review B* 43, 4488 (1991).
4. X. H. Hu, T. Juhasz, and W. E. Bron, Transient Electric Field Generated by Nonequilibrium States in Superconducting Pb Films, *Applied Physics Letters* 59, 3333 (1991).
5. S. Mehta, T. Juhasz, and W. E. Bron, Mode Renormalization of Nonequilibrium Optical Phonons, *Physical Review B* 45, 209 (1992).
6. G. O. Smith, T. Juhasz, W. E. Bron, and Y. B. Levinson, Interaction of an Electron-Hole Plasma with Optical Phonons, *Physical Review Letters* 68, 2366 (1992).
7. T. Juhasz, H. E. Elsayed-Ali, X. H. Hu, and W. E. Bron, Time Resolved Thermorefectivity of Thin Gold Films and Its Dependence on the Ambient Temperature, *Physical Review B* 45, 13819 (1992).
8. W. E. Bron, G. O. Smith, T. Juhasz, S. Mehta, Y. B. Levinson, J. Kuhl, and M. Klingenstein, Interaction of One- and Two Component Plasma with Optical Phonons, *Journal of Luminescence* 53, 283 (1992).
9. W. E. Bron, G. O. Smith and T. Juhasz, Plasma-Phonon Interactions, *SPIE Proceedings* 1677, 36 (1992).
0. T. Juhasz, L Turi, Z. Bor, B. E. Frueh, and G. Szabo, Experimental Investigation of Picosecond Optical Breakdown in Water and Biological Tissues, in "Proceedings of the International Conference on Lasers '92" ed. by S. L. Thomsen et al. STS Press McLean, p.212, 1993.

31. M. H. Niemz, T. P. Hoppeler, T. Juhasz, J. F. Bille, Intrastromal Ablations for Refractive Corneal Surgery Using Picosecond Infrared Laser Pulses, *Lasers and Light in Ophthalmology*, 5, 149, (1993).
32. H. E. Elsayed-Ali and T. Juhasz, Femtosecond Time Resolved Thermomodulation of Thin Gold Films with Different Crystal Structures, *Physical Review B* 47, 13599, (1993).
33. T. Juhasz, X. H. Hu, C. S. Suarez, W. E. Bron, E. Maiken, and P. Taborek, Dynamics of Photo-Excited Carrier Relaxation in C<sub>60</sub> Films, *Physical Review B* 48, 4929 (1993).
34. T. Juhasz, H. E. Elsayed-Ali, C. Suarez, G. O. Smith, and W. E. Bron, Direct Measurements of the Transport of Nonequilibrium Electrons in Gold Films with Different Crystal Structures, *Physical Review B* 48, 15488 (1993).
35. Z. Bor, G. Szabo, B. Hopp, Zs. Marton, I. Ratkay, J. Mohay, I. Suveges, and T. Juhasz, Dynamics of Laser Ablation of Biological Tissues, *AIP Conference Proceedings* 288, 483 (1993).
36. W. E. Bron, and T. Juhasz, Phonon and Polariton Dynamics and the Existence of Long-lived Acoustic Phonons, in "Ultrafast Phenomena in Semiconductors" Ed: D. K. Ferry et al., *SPIE Proceedings* 2142, 142 (1994).
37. X. H. Hu, and T. Juhasz, Corneal Ablation with Picosecond UV Laser Pulses, in Ophthalmic Technologies IV, ed: J. M. Panel, *SPIE proceedings* 2126, 15 (1994).
38. M. G. Speaker, M. S. Habib, and T. Juhasz, Efficient Picosecond Intrastromal Photodisruption for Corneal Refractive Surgery, *OSA Technical Digest Series* 7, 600 (1994).
39. T. Juhasz, X. H. Hu, L. Turi, and Z. Bor, Dynamics of Shock Waves and Cavitations Generated by Picosecond Laser Pulses in Corneal Tissue and Water, *Lasers in Surgery and Medicine* 15, 91 (1994).
40. T. Qiu, T. Juhasz, C. Suarez, W. E. Bron, and C. L. Tien, Femtosecond Laser Heating of Multi-Layer Metals, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*.37, 2799 (1994).
41. L. Turi, and T. Juhasz, High-Power Longitudinally Diode-Pumped Nd:YLF Regenerative Amplifier, *Optics Letters* 20, 154 (1995).
42. M. G. Speaker, M. S. Habib, and T. Juhasz, Intrastromal Corneal Reshaping Using Picosecond Laser Pulses, in "Ultrafast Phenomena IX" ed. P. F. Barbara et.al. Springer-Verlag, p.252, 1994.
43. T. Juhasz, C. Suarez, W. E. Bron, and H. E. Elsayed-Ali, Femtosecond Measurements of Ballistic and Interactive Transport of Non-Equilibrium Electrons in Thin Gold Films, in "Ultrafast Phenomena IX" ed. P. F. Barbara et.al. Springer-Verlag, p.331, 1994.
44. M. S. Habib, M. G. Speaker, R. Kaiser, and T. Juhasz, Myopic Intrastromal Photorefractive Keratectomy with the Nd:YLF Picosecond Laser in the Cat Cornea, *Archives of Ophthalmology* 113, 499 (1995).
45. R. R. Krueger, and T. Juhasz, Comparative Shock Wave Analyses During Corneal Ablation with an Excimer Laser, Picosecond Laser and Femtosecond Laser, in press, Ophthalmic Technologies V, *SPIE Proceedings* ed. by Jean-Marie Parel et.al., (1995).

46. X. H. Hu, and T. Juhasz, Experimental Study of Corneal Ablation with Picosecond Laser Pulses at 211 and 263 Nanometers, Accepted for publication, *Lasers in Surgery and Medicine*.
47. L. Turi, and T. Juhasz, Diode-Pumped Nd:YLF All-In-One Laser, *Optics Letters* 20, 1541 (1995).
48. A. Chayat, T. Juhasz, M. G. Speaker, R. R. Krueger, and M. S. Sharp, Picosecond Nd:YLF-Excimer Laser Keratomileusis as an Viable Alternative to Refractive Surgery, *Occ. Surg. News* 13, 43 (1995)
49. T. Juhasz, G. A. Kastis, C. Suarez, Z. Bor and W. E. Bron, Time-Resolved Observations of Shock waves and Cavitation Bubbles Generated By Femtosecond Laser Pulses in Corneal Tissue and Water, In press, *Lasers in Surgery and Medicine*.
50. C. Suarez, W. E. Bron, and T. Juhasz, Dynamics and Transport of Electronic Carriers in Thin Gold Films, In press, *Physical Review Letters*.
51. R. R. Krueger, A. J. Quantock, T. Juhasz, M. Ito, K. K. Assil, and D. J. Schanzlin, Histology and Ultrastructure of Picosecond Intrastromal Ablation, In press, *Corneal and Refractive Surgery*
52. J. P. Fischer, T. Juhasz, and J. F. Bille, Time-Resolved Imaging of Surface Ablation of Soft Tissue with IR Picosecond Laser Pulses, Submitted to *Applied Physics B*.
53. F. Loesel, M. H. Niemz , and T. Juhasz, The Dependence of Optical Breakdown Threshold on the Pulse Duration on the Surface of Soft and Hard Biological Tissue: Experiment and Theory, Submitted to *IEEE Journal of Quantum Electronics*

B. Talks or abstracts contributed to meetings

1. T. Juhasz, F. Krausz, J. S. Bakos, and Cs. Kuti, Computer Processing of Picosecond Laser Pulses. In the Technical Digest of UPS'85, International Symposium on Ultrafast Phenomena in Spectroscopy. Reinhardsbrunn, Germany, 1985.
2. G. P. Djotyan, G. N. Karadzan, J. S. Bakos, and T. Juhasz, Generation of Tunable Picosecond Pulses by Four Photon Interaction, Second International Conference, Trends in Quantum Electronics TQE'85 Bucharest, Romania, 1985.
3. G. V. Arutunyan, G. P. Djotyan, T. Juhasz, and Cs. Kuti, Phase Conjugated Reflection in the Field of Surface Reference Waves, Second International Conference, Trends in Quantum Electronics TQE'85, Bucharest, Romania, 1985.
4. T. Juhasz, J. Kuhl, K. Harris, S. Mehta, and W. E. Bron, Kilohertz Dual Synchronously Pumped and Synchronously Amplified Dye Lasers, in "Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'88)" TuM66, 1988.
5. W. E. Bron, T. Juhasz, S. Mehta, Observation of a New Nonequilibrium Phonon State, *Bull. Am. Phys. Soc.* 34, 869 (1989).
6. X. H. Hu, T. Juhasz, and W. E. Bron, Temperature Dependence of Superconducting Pb Film Response to Picosecond Optical Pulses, *Bull. Am. Phys. Soc.* 35, 250 (1990).

7. T. Juhasz, H. Elsayed-Ali, G. O. Smith, and W. E. Bron, Hot Electron Relaxation In Gold Films with Different Crystal Structures. *Bull. Am. Phys. Soc.* 35, 831 (1990).
8. H. Elsayed-Ali, T. Juhasz, and G. O. Smith, Femtosecond Transient Thermomodulation of Thin Gold Films with Different Crystal Structures, in "Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'90)" CTuM43, 1990.
9. H. E. Elsayed-Ali, T. Juhasz, X. H. Hu, and W. E. Bron, Temperature Dependence of Femtosecond Thermorefectivity of Thin Gold Films, in "Technical Digest of Conference on Quantum Electronics and Laser Science (QELS'91)" QThA4, 1991.
10. G. O. Smith, T. Juhasz, W. E. Bron, and Y. B. Levinson, Interaction of an Electron-Hole Plasma With Optical Phonons, *Bull. Am. Phys. Soc.* 36, 349 (1991).
11. X. H. Hu, T. Juhasz, and W. E. Bron, An Investigation Through Electro-Optic Sampling of a Nonequilibrium State in Superconducting Pb Films, *Bull. Am. Phys. Soc.* 36, 567 (1991).
12. T. Juhasz, X. H. Hu, W. E. Bron, and H. E. Elsayed-Ali, Temperature Dependence of Time Resolved Thermorefectivity of Single Crystalline Gold Thin Films, *Bull. Am. Phys. Soc.* 36, 817 (1991).
13. M. H. Niemz, T. P. Hoppeler, T. Juhasz, J. F. Bille, Experimental Investigation of the Ablation Mechanism During Laser Induced Optical Breakdown in Corneal Tissue, in "Association for Research in Vision and Ophthalmology (ARVO) 33, Annual Meeting Abstract Issue 351-23 p.764, 1992.
14. B. E. Frueh, C. K. Shields, T. Juhasz, and S. T. Feldman, DNA-Synthesis and Proto-Oncogene Expression of Keratocytes After Nd:YLF Picosecond Laser Irradiation, in "Association for Research in Vision and Ophthalmology (ARVO) 33, Annual Meeting Abstract Issue, 370-42 p.767, 1992.
15. X. H. Hu, T. Juhasz, C. S. Suarez, W. E. Bron, E. Maiken, and P. Taborek, Time-Resolved Thermomodulation Studies of C<sub>60</sub> films, in "Technical Digest of Conference on Quantum Electronics and Laser Science (QELS'91)" QTuH4, 1992.
16. T. Juhasz, X. H. Hu, C. S. Suarez, W. E. Bron, E. Maiken, and P. Taborek, Time-Resolved Spectroscopy of C<sub>60</sub> films, in "Advance Program of the 8th Interdisciplinary Laser Science Conference (ILS-VIII)" (Supplement to Optics & Photonics News Vol. 3, No. 7) ThKK6, 1992, and *Bull. Am. Phys. Soc.* 37, 1230 (1992).
17. T. Juhasz, X. H. Hu, C. S. Suarez, W. E. Bron, E. Maiken, and P. Taborek, Carrier Trapping in C<sub>60</sub> films, *Bull. Am. Phys. Soc.* 38, 616 (1993).
18. T. Juhasz, X. H. Hu, L. Turi, and Z. Bor, Experimental Investigation of Shock Waves and Cavitation Bubbles Generated by Picosecond Optical Breakdown in Water and Biological Tissues, in "Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'93)" CTuN88, 1993.
19. T. Juhasz, H. E. Elsayed-Ali, G. O. Smith, C. Suarez, and W. E. Bron, Femtosecond Hot Electron Transport Measurements in Gold Films with Different Crystal Structures in "Advance Program of the 9th Interdisciplinary Laser Science Conference (ILS-IX)" (Supplement to Optics & Photonics News Vol. 4, No. 7) ThJ3, 1993, and *Bull. Am. Phys. Soc.* 38, 1750 (1993).

20. X. H. Hu, L. Turi, and T. Juhasz, Time-Resolved Study of Shock Waves and Cavitations Generated by Picosecond Laser Pulses in Water and Tissue, in "Advance Program of the 1993 OSA Annual Meeting" (Supplement to Optics & Photonics News Vol. 4, No. 7), and OSA Technical Digest Series, 16, 93 (1993).
21. M.G. Speaker, M.S. Habib, and T. Juhasz, Efficient Picosecond Intrastromal Photodisruption for Corneal Refractive Surgery, OSA Technical Digest Series 8, CTuK95 (1994).
22. T. Juhasz, C. Suarez, W. E. Bron, T.Q. Qui, and C.L. Tien, Femtosecond Thermorefractivity of Multilayer Metal Films, OSA Technical Digest Series 8, CTuK95 (1994).
23. T. Juhasz, M. G. Speaker, M. S. Habib, and R. Kaiser, Refractive Effects of Myopic Intrastromal Ablation of the Cat Cornea with the Nd: YLF Picosecond Laser, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 35, 2026, (1994).
24. M. G. Speaker, V. Marchi, T. Juhasz, and J. F. Bille, Mathematical Modeling of Results of Intrastromal Keratectomy, International Society of Refractive Keratoplasty, Program and Abstracts of "1994 Pre-American Academy of Ophthalmology Meeting", p. 90, San Francisco, (1994)
25. M. G. Speaker, M. S. Habib, V. Marchi, and T. Juhasz, Results of a Safety Study of Intrastromal Refractive Keratectomy with the Nd:YLF Picosecond Laser in Blind Human Eyes, Abstracts of "Symposium on Cataract, IOL and Refractive Surgery", p. 107, San Diego, (1995).
26. T. Juhasz, G. Kastis, C. Suarez, Z. Bor and W.E. Bron, Evaluation of Femtosecond Lasers for Intraocular Microsurgery, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 36: S987, 1995.
27. M. G. Speaker, M.S. Habib, V. Marchi, S. A. McCormic and T Juhasz, Results of a Safety study of Myopic Intrastromal Photorefractive Keratectomy with the Nd:YLF Picosecond Laser in blind Human Eyes. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 36: S985, 1995.
28. M. S. Habib, M. G. Speaker, N.J. Friedman, and T. Juhasz, Wound Healing Response in the Cat Cornea Following Intrastromal Photorefractive Keratectomy with the Picosecond Laser. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 36: S985, 1995.
29. N. J. Friedman, M. S. Habib, M. G. Speaker, T. Juhasz, and M. R. Bryant, Cavity Geometry for Intrastromal Refractive Keratectomy with the Nd:YLF Picosecond Laser. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 36: S985, 1995.
30. L. Turi and T. Juhasz, High Power Diode-Pumped All-In-One Laser, *OSA Technical Digest Series* 15:122-123 1995.
31. T. Juhasz, G. Kastis, C. Suarez, Z. Bor, W. E. Bron, Photoacoustic Effects of Femtosecond Optical Breakdown in Biological Tissue and Water, *OSA Technical Digest Series* 15:295-296 1995.
32. J. P. Fischer, T. Juhasz and J. F. Bille, Time-Resolved Imaging of Plasma Induced Surface Ablation with Picosecond Laser Pulses *Proc. of Lasers in Medicine*, Springer, Munich (1995) (in press)

33. A. Chayat, T. Juhasz, R. R. Krueger, M. G. Speaker and M. Sharp, Picosecond Laser Corneal Dissection for "Flap and Zap" Refractive surgery, Program and Abstracts of "1995 Pre-American Academy of Ophthalmology Meeting", p. 56, Atlanta, (1995)
34. M. G. Speaker, M.S. Habib, V. Marchi, S. A. McCormic and T Juhasz, Results of a Safety study of Myopic Intrastromal Photorefractive Keratectomy with the Nd:YLF Picosecond Laser in Blind Human Eyes. Program and Abstracts of "1995 Pre-American Academy of Ophthalmology Meeting", p. 32, Atlanta, (1995)

Patents held (applied)

1. "Pockels Cell Damping System" US Patent No. 5,221,988
2. "Two Step Solid State Pockels Cell Driver US Patent No. 6,367,478
3. "Device and Method for High Power End Pumping" US Patent Application No. 08/337,872)
4. "Intrastromal Photorefractive Keratectomy" US Patent Application No. 08/151,726)
5. " Picosecond Laser Keratomileusis" US Patent Application No. 08/578,414)
6. "Diode-Pumped All-In-One Laser" US Patent Application No. 08/693,687)