

氏 名 Kausas Arvydas

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大乙第 285 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 Nd:YAG/sapphire interlayer-assisted surface-activated bonded structure for extremely high brightness laser

論文審査委員 主 査 岡本 裕巳
分子科学コース 教授
横山 利彦
分子科学コース 教授
杉本 敏樹
分子科学コース 准教授
倉持 光
分子科学コース 准教授
吉田 光宏
加速器科学コース 教授
平等 拓範
理化学研究所 放射光科学研究センター
グループディレクター

博士論文の要旨

氏 名 : Kausas Arvydas

論文題目 : Nd:YAG/sapphire interlayer-assisted surface-activated bonded structure for extremely high brightness laser

Constructing a tool for comprehending the laws of the Universe poses a challenging task, demanding national funding and the establishment of connections between diverse research groups and engineering teams. One such tool is particle acceleration, involving the acceleration of light and heavy particles to near-light speeds, followed by collisions or the generation of secondary source radiation, opening new opportunities for exploring the Laws of Nature.

Conventional facilities like SPring-8 in Japan or the Large Hadron Collider necessitate accelerators ranging from several hundred meters to nearly 30 kilometers in length, consuming extensive space and resources. Alternatively, high-intensity light is utilized to accelerate particles, exemplified by laser plasma electron acceleration (LPA) or terahertz (THz) wave dielectric laser acceleration (THz-DLA). The former relies on a Petawatt laser source creating plasma in a guided channel for accelerating electrons through plasma wakefields. Recent advancements include demonstrating petawatt (PW) laser-guided electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide as part of LPA. Another approach involves THz wave laser-driven acceleration in dielectric structures, reporting THz pulses with electric fields exceeding 1 GV/m.

However, the current size of PW-class lasers negates their compact acceleration advantages. Addressing this, there is a critical need to reduce the size of petawatt (PW) lasers, particularly those based on frequency-doubled flash lamp-based solid-state lasers pumped Ti:sapphire lasers, to align with LPA applications. Additionally, their low repetition rate of 1 Hz impedes practical application in Laser Plasma Accelerator scenarios. Meanwhile, Joule-class, 100-picosecond short-pulse lasers enable the generation of 10-millijoule-class terahertz (THz) wave sources for THz-driven Dielectric Laser Accelerators. Overcoming challenges related to achieving pulse energies greater than 2 Joules and a compact, room-temperature-operating laser source with a repetition rate of 100 Hz remains a significant focus in laser-driven electron acceleration.

Historically, cryogenically cooled Helium gas is used to dissipate excess heat from gain

crystals, introducing complexity and demanding additional space and budget. To overcome size and repetition rate constraints in Joule-class short-pulse lasers, a novel approach introduces an artificially-bonded composite structure using Distributed Face Cooling (DFC). This structure employs intermediate-layer assisted surface activated bonding (il-SAB), relying on surface activation and mechanical press at room temperature, eliminating internal stresses. Combining il-SAB bonding with DFC enhances thermo-mechanical properties, including effective thermal conductivity and thermal shock parameter.

The thesis details the development of an amplifier system based on Nd³⁺:YAG gain medium periodically bonded to a sapphire crystal for improved heat extraction. Numerical simulations and analytical models assess temperature distribution and gain at the primary amplifier stage, considering parasitic oscillation effects. Laser Induced Damage Threshold (LIDT) tests anticipate the behavior of bonded doped YAG samples, guiding the selection of optimal bonding materials. Bonding strength is evaluated through the four-point flexure method, achieving enhanced bonding strength through post-annealing adjustments.

The proposed use of Nd³⁺:YAG crystal as a gain medium, operating at room temperature, contributes to a more compact amplifier setup. By pumping at an alternative wavelength of 885 nm instead of the traditional 808 nm, the quantum defect and internal heat generation are reduced, enhancing heat generation efficiency by 30%.

In this work, we have successfully developed an amplifier system designed to operate at a repetition rate of 10 to 25 Hz, delivering over 2 J of energy with a sub-nanosecond pulse duration. The system comprises a front-end system providing over 100 mJ of energy to the main amplifier, which includes two main amplifier stages. The primary amplifier utilizes the DFC-PowerChip architecture and incorporates multiple bonded sapphire/Nd³⁺:YAG chips. This amplifier system has been specifically designed for applications in Terahertz wave Dielectric Laser-driven particle Acceleration (THz-DLA). A notable achievement of this project is marked by the development of an amplifier at the Institute for Molecular Science, which will deliver over 5 J of energy at a 100 Hz repetition rate, intended for use at the RIKEN SPring-8 Center.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 Kausas Arvydas

Title
論文題目 Nd:YAG/sapphire interlayer-assisted surface-activated bonded structure for extremely high brightness laser

申請者 Kausas Arvydas は、提出した博士論文「Nd:YAG/sapphire interlayer-assisted surface-activated bonded structure for extremely high brightness laser」において、以下の内容を記述している。まず第 1 章で、研究の動機として、レーザー粒子加速では駆動用の高強度のパワーレーザーが巨大化する事を指摘し、パワースケーリングを示す基礎研究としてレーザー媒質の面積から見たエネルギー密度への挑戦との方向性を示した。

第 2 章では、小型化が望める高いエネルギー密度のレーザー増幅器として、新たな分布面冷却 (distributed face cooling, DFC)、特にレーザー媒質である Nd:YAG チップにサファイアをヒートシンクとして接合する構造を提案した。さらに量子欠損を約 30%低減できるレーザー上準位直接励起 (波長 885nm) 法と合わせモデル化を行った。

第 3 章では、従来困難と考えられていたレーザー材料の常温接合として、Nd:YAG およびサファイアチップに対し、アモルファス層を介して原子レベルで接合する中間層援用表面活性接合 (interlayer assisted-surface activated bonding, il-SAB) を考案し、これを実施した。これにより提案の DFC 構造の実現が可能となった。

第 4、5 章では、接合した材料の特性について幾つかの解析を行った。特に求めているレーザー耐性につき評価を進め、バルク結晶とほぼ同程度の耐性を維持できる接合法を見出した。

第 6 章では、最大レーザー密度を制限する量子欠損に起因した発熱の低減と、レーザー発振効率改善につながる励起光吸収効率を高める DFC 構成につき、有限要素法による数値解析を行い、最適設計を進めた。

第 7、8 章では、開発した材料によるレーザーおよび増幅器について、その性能と寄生発振の抑制について検討した。15mm 角の Nd:YAG とサファイアを il-SAB で常温接合した独自の DFC チップを用いてレーザー及び増幅器を構築し、繰り返し周波数 10Hz にてパルスエネルギー 2.7J、尖頭出力で 3.4GW に達するサブナノ秒パルスを得た。次に、DFC チップを改良し、2J を 25Hz で得るまでに至った。

第 9 章では、レーザー駆動電子加速に対する DFC チップによる小型集積レーザーの可能性につき展望した。一方、レーザー加速に資する小型集積レーザーの社会実装について議論することで、次世代に求められる新たなレーザーの可能性を示唆し、結言とした。

まとめるなら、本博士論文で申請者は、レーザー粒子加速の実現を目指し、求められる高性能レーザーにつき理論的、実験的なアプローチを進めた。そして従来レーザーの性能限界を突破すべく、原子レベルで接合できる il-SAB の手法を創出し、DFC チップによる新たな小型集積レーザーのアーキテクチャを創出し、学術的な体系化を行った。以上の理

由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。