



研究開発ノート

粒子線励起 Ar-Xe レーザーの慣性核融合への応用の可能性

富澤 宏光, 服部 俊幸
(東京工業大学原子炉工学研究所)

Possibility of Particle-Beam-Pumped Ar-Xe Laser
as an Inertial Confinement Fusion Driver

TOMIZAWA Hiromitsu and HATTORI Toshiyuki

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8550, Japan

(Received 8 September 1999 / Accepted 3 February 2000)

Abstract

Fission-product-beam pumped Ar-Xe laser as a candidate of the driver for a hybrid fission-fusion reactor is studied. Such hybrid reactor can reduce the power requirements for the laser driver. These Ar-Xe lasers have been realized as reactor pumped lasers (RPL) with pulsed reactors. However, high power RPL experiments often face the problem of premature termination of laser output power with respect to the pumping power. Several reasons, including temperature effects, outgassing of impurities from walls have been discussed. Two experiments, elucidating the influence of water vapor impurities in the lasing gas mixture and laser threshold, and the effects of temperature rise in the laser gas on laser output have been performed at the Munich Tandem accelerator, using 100 MeV $^{32}\text{S}^{9+}$ beams, thus simulating RPL experiments at a pumping power density of $\sim 100 \text{ W/cm}^3$. Using these experimental and theoretical results, these RPL-oscillations can be stabilized with high instinctive efficiency. Laser-gas-purification systems and breakeven conditions and related requirements on the hybrid reactor using RPL driver schematically discussed.

Keywords:

Reactor Pumped Laser (RPL), atomic gas laser, high-power cw-laser, Inertial Confinement Fusion (ICF), hybrid reactor, reactor driver

1. はじめに

現在研究されているレーザー慣性核融合炉を実用化の段階に引き上げるには、レーザードライバーの効率を上げなければならない。一般的に発電システムにおけるエネルギー変換は途中で熱エネルギーへの変換を含む。これはエクセルギーの観点から見ると、かなりエネルギーを無駄に使っていることになる。何とかして、このようなエクセルギー率が低くなる方向のエネルギー変換をなくし、エクセルギーの損失を防げないものだろうか。現在計画されているレーザー慣性核融合においても、その

ドライバー用のレーザーの励起源として先に述べたような貴重な電気エネルギーを利用している。もし、核融合反応によって生じる中性子線エネルギーを直接、ドライバー用レーザーの励起に利用できるならば、無駄なエクセルギーの損失が減少するため、炉全体の効率を格段に上げることができる。

核エネルギーを直接的にレーザー光エネルギーに変換する方法[1]として1961年に核励起レーザーが提案された。核励起レーザーとはレーザー媒質を核分裂片で励起するものである。現在までのところ、核分裂を起こすた

author's e-mail: hirolein@aol.com

めの中性子源として原子炉を利用していることから、原子炉励起レーザー (RPL) とも言われる。核分裂片によりレーザーを励起させるため、 ^{235}U などをレーザー媒質容器壁面にコーティングするか、 ^3He , $^{235}\text{UF}_6$ などをレーザー媒質ガス中に混入する方法が試みられた[2]。米国・旧ソ連を中心にパルス型原子炉を使用し、壁面にウランをコーティングしたレーザー媒質容器で様々なレーザー媒質を用いて、実験・理論の両面から研究されてきた[3-18]。

以下にロシアのオブニンスクにあるパルス炉を用いた実験をこの具体例としてあげる。まず、40 ms のパルス幅で 5×10^{17} の核分裂を起こすことができる BARS-6 などのパルス炉からの高強度中性子線を、ガスセル壁面に厚さ $6 \mu\text{m}$ でコーティングされた ^{235}U に減速材を通して照射する。そして、熱中性子とウラン膜との核反応で生成された核分裂片が、ガスセル内のレーザー媒質ガスを励起するものとなっている[3,15-18]。様々なレーザー媒質が試みられたが、炭酸ガスレーザーなどの分子をそのレーザー活性物質に使用したものはその分子自体が解離してしまい、この励起方法ではレーザー発振にいたっていない[2]。そこで、核励起を用いても安定に存在できるレーザー媒質ガスとして希ガス原子が注目されてきた。

希ガス混合ガスレーザーの中で最も高効率[7-9,19]なものの一つに、Ar-Xe レーザーがある。このレーザーは、レーザー媒質として大気圧程度のアルゴンに 0.1~1% のキセノンを混合したレーザー媒質を用い、効率は最大 8 % [7,19]、発振波長が $1.73 \mu\text{m}$ の近赤外レーザーである。この近赤外レーザーは、平均出力が約 5~10 MW であり、連続発振するため、有力な原子炉励起レーザーとして注目されてきた[11,18]。しかし、ポンピングパワーが高くなると、レーザー発振が未成熟で止まり、その効率と平均出力が著しく低下することが実験で確認されている[8,20-22]。実用上重要な問題となるこの現象を説明すべく、多くのガスキネティックモデル[8-10,12-14]が提出されたが、いまだに解決されていない。原因として主に議論されてきたのは、レーザー媒質ガスの温度上昇に関するものである[23-25]。そのほかに少数ではあるが、このレーザー発振不安定性はレーザー媒質ガス中の不純脱ガスであるとする説[26]も提出された。

この原因を究明するために、ガス温度および水蒸気脱ガス量の依存性を調べる独立な 2 つの実験を行った[27-28]。この実験のために、核励起 Ar-Xe レーザーの各レーザーパラメータが制御可能な状態で再現する重イオンビーム励起レーザー装置を作った。レーザーの励起

源として ^{235}U の核分裂片の運動エネルギーと同程度の粒子エネルギーを持つミュンヘン工科大学のタンデム型ヴァンデグラフ静電加速器からの 100 MeV の $^{32}\text{S}^{9+}$ を用いた。この実験において、レーザー出力へのレーザー媒質ガス中に含まれる水蒸気の影響およびそのガス温度依存性の高精度で定量的な実験成果を得ることができたため、その挙動のモデル化も一部できるようになった[28]。特に、このレーザーの実用化の点で重要なレーザー出力の水蒸気不純ガス量依存性は世界で初めて定量的に観測されたものである。

ドライバーとして核励起レーザーを用いた核融合炉は、核分裂と核融合とを組み合わせたハイブリッド炉[3]になる。この論文は、以上の実験およびモデル計算結果を踏まえて、将来のハイブリッド炉のドライバーとしての核励起 Ar-Xe レーザーの可能性を議論するものである。

2. 粒子線励起 Ar-Xe レーザー

中性子線をはじめとした高強度粒子線をレーザー励起源として使用する場合、レーザー媒質 (活性物質) に固体または炭酸ガスなどの分子気体を用いることは、レーザー活性物質の物理的な損傷を招くために困難である[29]。そこで、希ガスをを用いるとこのような困難が存在せず、また気体であるために高速な冷却が可能である。そのため、粒子線励起に適した希ガス混合ガスに、最も高効率[7-9,19]な波長 $1.73 \mu\text{m}$ のレーザー発振線をもつ Ar-Xe 混合ガスを選んだ。また、このレーザー媒質は化学的に不活性な気体であるので、長時間の繰り返し使用による不純脱ガスの除去が容易である。この希ガスレーザーは以上の点で慣性核融合用ドライバーなどの高強度レーザー媒質として優れた性質をもっているが、固体媒質と比べてレーザー媒質密度を高くすることができないという欠点もある。そこでこのガス圧を通常的气体レーザーの 1 mbar 程度から大気圧程度にし、そのレーザー活性物質密度を十分に高くすることでその欠点を補っている。

2.1 粒子線励起法について

粒子線励起レーザーは高圧ガスを励起する方法の一つである。それはガスレーザーの励起法としてよく使われている放電が低ガス圧でのみ可能なためにこの方法が注目されるようになった。この励起法が高強度ガスレーザーに有利であることは、大きく分けて次の 2 つの理由からなる。一つはガスを高圧にすることでレーザー活性物質の濃度を高くすることができ、結果としてレーザーの高強度化ができる。もう一つは核分裂片またはイオン

ビームが比較的短い飛程を持つため、高い励起パワー密度を実現できることである。この2つの間にはガスを高圧にすることによる相乗効果が働いている。

粒子線励起レーザーの種類にはその励起方法から大きくわけて3通りある。それらは核励起、電子ビーム励起、イオンビーム励起である。核励起とは核反応で生じる核分裂片による励起法であり、具体的にはパルス型原子炉を中性子源として使うため、前章で触れたように原子炉励起ともいう。電子ビーム励起[30]は最もよく使われている粒子線励起法でエキシマレーザーなどにも使われている方法である。イオンビーム励起はあまり使われていない励起法で、今回実験で使用したイオンビーム加速器からの重イオンビーム以外にも軽・中イオンビームも含まれる多様なものである[27-28,31]。

イオンビーム励起は核分裂片による核励起と物理的に同等な方法であり、さらにその粒子の種類やエネルギー、強度を自由にイオンビーム加速器で選ぶことができるため、核励起レーザーの基礎研究用に最適である。また、重イオンビームほど多価イオンが容易にできるため、高い励起パワー密度をターゲットガス中に得ることができ

る。このことは励起法の観点から言えば、より短波長、より高強度のレーザーをめざすには有利である。

2.2 Ar-Xe 原子ガスレーザーについて

Fig. 1 にいろいろな希ガス原子・二量体のエネルギー準位を示す。より軽い希ガスほどイオン化および励起エネルギーが高いため、キセノン原子ガスレーザーを発振させるためにはキセノンよりも軽い多くの希ガス原子をバッファーガスとして混合させる必要がある。したがって、レーザー媒質として適当な混合比の混合ガスを使用することによって、その媒質中に反転分布を形成することができる。大気圧 Ar-Xe 混合ガスの場合、キセノンの混合率が1~0.1%程度のとき最適であることがわかっている[4]。最終的に反転分布は5dと6pの間に形成されるが、これらの準位は多くのエネルギー間隔の小さい準位から成っていて、Manifold (Fig. 1 参照) と言われる。これら準位間でそれぞれ反転分布が形成され、光共振器に金コーティングミラーを用いれば、近赤外域で波

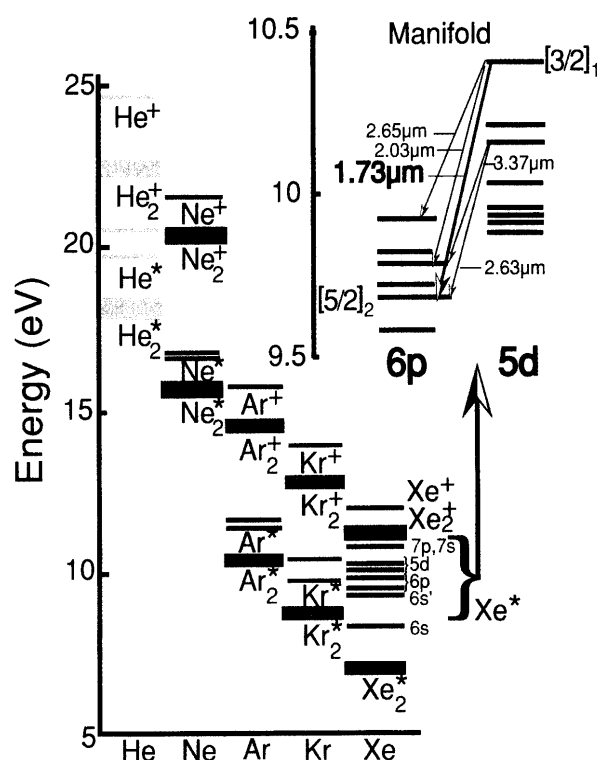


Fig. 1 Energy level of atomic xenon laser: The exciting and ionizing energy level of different sort of rare gas atoms and dimers are shown. In the diagram of manifold of Xe I (5d, 6p) different laser transitions include 1.73 μm line are shown.

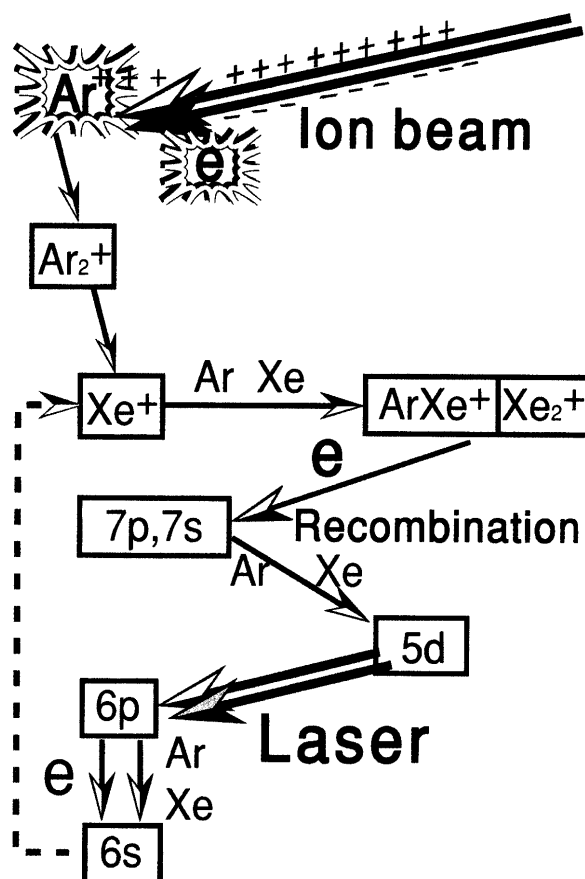


Fig. 2 Diagram of gas kinetics: The gas kinetics of ion-beam-pumped Ar-Xe laser is illustrated. Note that the recombination processes of this laser are critical for this laser oscillation.

長が異なるレーザーが同時発振する。

次に実際の粒子線励起でレーザーが発振に至る過程をイオンビームによる場合を例にとって Fig. 2 に示す。以下に、その過程を順を追って説明する。

- ①イオンビームが混合ガスに打ち込まれることによって、99.5%以上含まれる Ar をイオン化、励起する。
- ② Ar^+ がその二量体イオン Ar_2^+ を形成し、この電荷が Xe に移行することにより、 Xe^+ が生成される。
- ③生成された Xe^+ が Xe や Ar と三体衝突することにより、 ArXe^+ や Xe_2^+ が生成される。これらの二量体イオンは再結合レーザーの前駆物質である。
- ④これら二量体イオンが電子と再結合することによって、励起中性 Xe^* が生成される。
- ⑤励起中性 Xe^* は生成直後には、高い励起準位 (7p, 7s) にあるが、中性原子との衝突により脱励起するため、最終的にレーザー上準位 (5d) にポピュレートする。
- ⑥レーザー上下準位間に反転分布が形成され、レーザーが発振する。
- ⑦レーザー発振によりレーザー下準位 (6p) がポピュレートするが、この準位の自然放射確率と Ar によるクエンチング反応速度定数が大きいので、高速で準安定準位 (6s) にディポピュレートする。結果的にこの反転分布が保たれるので、このレーザーは連続発振する。

- ⑧高強度でポンピングが行われると、準安定準位 (6s) にある Xe^* の二次電子によるイオン化が支配的になり [8]、結果としてレーザー効率がよくなる [19]。

3. 原子炉励起 Ar-Xe レーザー発振障害の再現実験

このレーザーの特徴は、再結合過程を利用して発振することで、もし、この過程が阻害されれば、発振は不安定になる。また、レーザー出力はレーザー上準位のクエンチング効果によっても大きく影響を受ける可能性がある。今回この2点がこの再結合レーザー発振の効率と安定性の向上に関して着目した点である。他の再結合レーザーの研究開発においても、同様なことが考えられ、その発振の効率と安定性の向上のために重要な議論である。

原子炉励起レーザー発振不安定性の原因を究明するために、2つの独立な実験を行った。まず、レーザー媒質ガス中の不純ガス量がレーザー発振に与える影響を調べ、次にガス温度がレーザー発振に与える影響について調べた。以上の2つの実験を行う場合のレーザーの励起方法としては先にも述べたように、重イオンビーム励起が適している。そこで、Ar-Xe レーザーの励起には ^{235}U の核分裂片と同等の 100 MeV 程度の粒子エネルギーの重イオンビームを用いることにした。この実験で

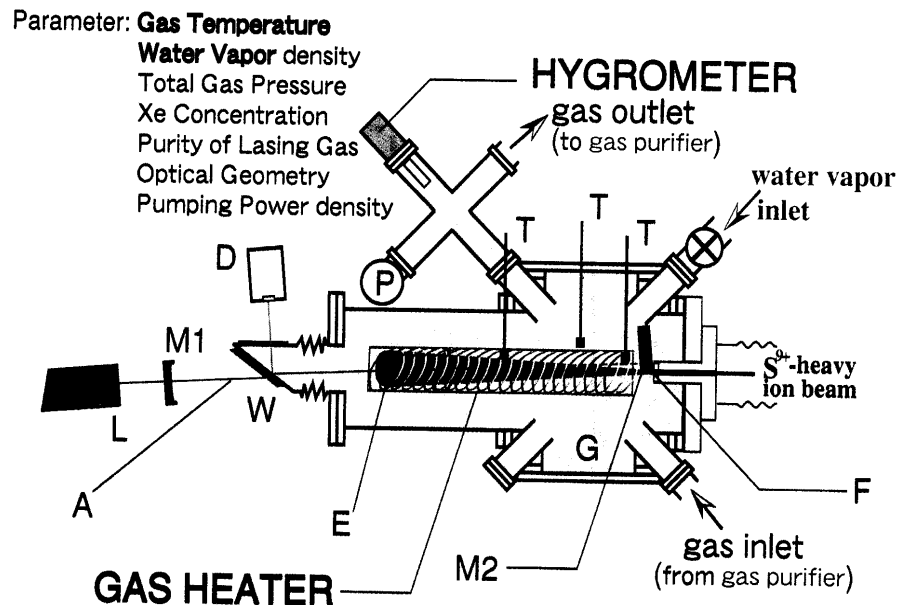


Fig. 3 Schematic drawing of the experimental setup: The gas cell (G), beam line, laser optical axis (A), excited region (E), laser optics (L: alignment laser; M1, M2: mirror (rcc = 1.5, 10 m); W: Brewster window), valve (V), pressure gauges (P), germanium photodiode detector (D), platinum resistance thermometer (T), titanium entrance foil (F), hygrometer, and gas heater cell are shown. The angle that measured between ion beam and laser axes was 1.2°.

は重イオンビームの照射は、ミュンヘン工科大学にあるタンデム型ヴァンデグラフ静電加速器からの $^{32}\text{S}^{9+}$ を使用した。

原子炉励起を踏まえて、Ar-Xe レーザー発振装置は様々なパラメータの制御が可能になるように作成した。

Fig. 3 に作成した装置と各レーザーパラメータを示す。

ここで、Fig. 3 に示した装置について、簡単に説明する。

- ①重イオンビームを大気圧のガスセル (G) と高真空の加速器側を仕切っているチタン薄膜 (F) で取り出す。ガスセル内に打ち込まれたビームがレーザー媒質をその飛程内において励起する。
- ②レーザー光軸 (A) とイオンビームが励起した領域 (E) ができるだけ長く重なるようにする。この際、軸出し用レーザー (L) を用いて、レーザーミラー (M1, M2) を調節して光共振器の設定を行う。この軸出しの際にレーザー出力測定用のディテクタ (D) の設定もする。
- ③最初に水蒸気量依存性の実験を行う。ガス用湿度計 (hygrometer) を用いてレーザー媒質ガス中の水蒸気含有量を露結点で測定する。ここでレーザー媒質ガスには室温における全圧が 500 mbar でキセノンの混合率が 0.5% の Ar-Xe 混合ガスを用いる。まず、水蒸気は水蒸気セル内で蒸留水を真空中で固化しておく。飽和蒸気圧の水蒸気を水蒸気セル (water vapor inlet) よりガスセル内に導入する。そして、1,100 K に熱したチタンをゲッターとして使用する希ガス清浄機 (gas purifier) でレーザー媒質ガス中の水蒸気を徐々に除去する。この作業の後、それぞれの水蒸気含有量のレーザー媒質ガスでレーザー発振させ、その出力と露結点を記録する。この実験は水蒸気含有量以外のレーザーパラメータ (Fig. 3 左上参照) はすべて固定して行う。
- ④次にガス温度依存性の実験を行う。白金抵抗温度計 (T) を用いて石英ガラス管で被われたガスヒーター (gas heater) の内外の温度分布を測定する。ここでレーザー媒質ガスには室温における全圧が 330 mbar でキセノンの混合率が 0.9% の Ar-Xe 混合ガスを用いる。ガスヒーターはタングステンの互いに絶縁された同芯線でコイル状に巻かれているものである。ここでタングステン同芯線を用いたのは誘導磁場の効果を除去するためにコイル内を流れる電流を往復させ、磁場がコイルにより誘導されないようにするためである。実験中はガス清浄機を用い、ガス用湿度計で確認しながらガスセル壁面からの脱ガ

スを常に除去した。この実験はガス温度以外のレーザーパラメータ (Fig. 3 左上参照) はすべて固定して行う。

3.1 不純脱ガス含有量増加によるレーザー発振障害の考察

レーザー媒質ガスに含まれる可能性のある不純ガスとして考えられるものには通常の状態では窒素、酸素、水蒸気が主なものである。Fig. 4 にこれら 3 種の不純ガス量の増加に伴うレーザー発振障害の機構を水蒸気と酸素、窒素のクエンチング (反応速度定数: $K_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Q}}$, $K_{\text{O}_2}^{\text{Q}}$, $K_{\text{N}_2}^{\text{Q}}$) と水蒸気による電子付着反応 (反応速度定数: $K_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{R}}$) とともに示す。過去の例[32]では窒素によるレーザー上準位のクエンチング効果を含めたレーザー発振障害は、この不純ガス含有量が 1 ~ 25% のときにレーザー出力の減少が観測されている。酸素による同様の効果は、その分子の大きさが窒素分子のそれと同程度であることから、窒素によるものとほぼ同程度と考えられる。この再現実験で用いたレーザー媒質ガス中の窒素と酸素の濃度が 10^{17} cm^{-3} 程度以上のときに、これらの不純ガスによるレーザー発振障害が観測されることがわかる。Fig. 5 にガス温度が 300 K におけるレーザー出力の水蒸気不純ガス量依存性の実験結果を示す。ここで使用したレーザー媒質ガスは全圧が 500 mbar でキセノンの混合率は 0.5% である。この実験で水蒸気濃度が 10^{15} cm^{-3} 程度の範囲でレーザー発振障害が再現的に確認された。以上のことから単純に比較しても水蒸気によるレーザー発振障害が支配的なことがわかる。Fig. 5 に示した実験結果の他にレーザー媒質ガス中に空気を混入させる実験も行ったが、それぞれの不純ガス濃度が 10^{15} cm^{-3} 程度の範囲では水蒸気量増加によるレーザー発振障害が他の 2 つと比べて際立って高いことが示された[27]。

また、通常の大気圧レーザーガスセルのガス漏れが少ないことを考えれば、先に述べたようにそのようなレーザー媒質ガス中の不純ガスはほとんど水蒸気脱ガスと考えるのが妥当である。特に、実際に試みられている原子炉励起レーザーは、脱ガスしやすい構造になっていると指摘できる。なぜならば、この機構においてはレーザーガスセル壁面で核反応が起こり、そこから核分裂片が飛び出すからである (Fig. 7 参照)。壁面表面に不純ガスが吸着していた場合、核反応で温度が上昇した壁面からの水蒸気不純脱ガスがレーザー媒質ガス中に混入するためであると考えられる。しかし、これらを定量的に説明している実験的・理論的データは本実験[27]以外にない。

この実験結果と Fig. 4 に示した水蒸気ガスによる

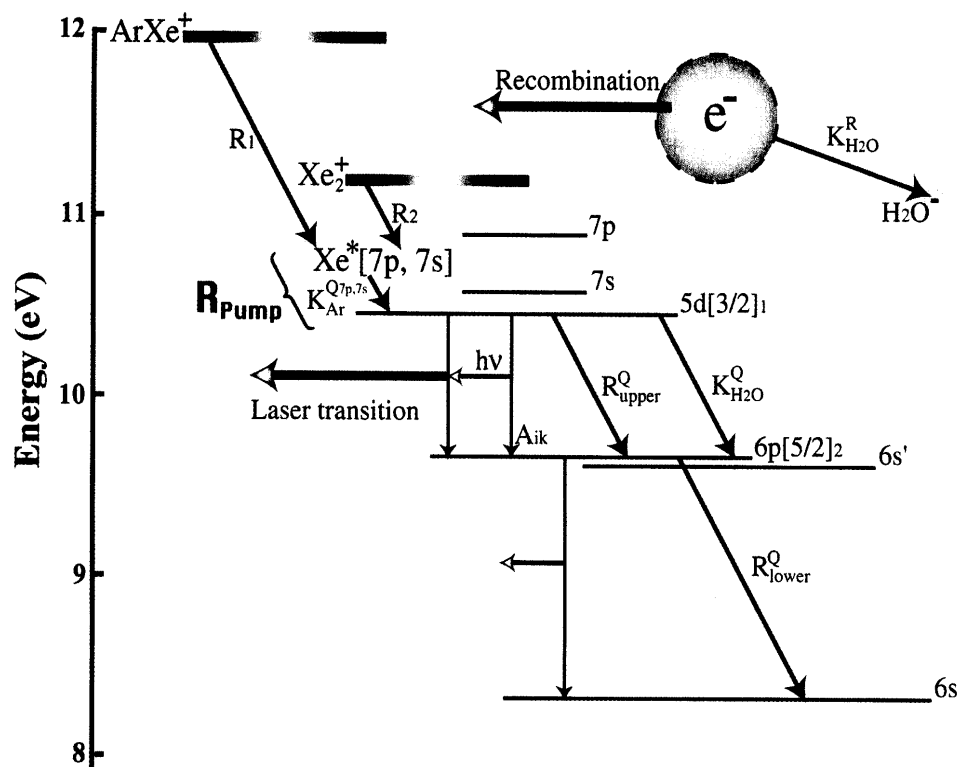


Fig. 4 Schematic level diagram: The excited xenon atoms ($\text{Xe}^* [7p, 7s]$), which are precursors of the upper laser levels, molecular ion (ArXe^+ , Xe^{2+}) levels and the laser upper $5d[3/2]_1$ and lower $6p[5/2]_2$ levels are shown. Also, the dominant kinetic processes of the laser scheme considered here such as collisional quenching (constants: $K_{\text{Ar}}^{Q_{7p,7s}}$, $K_{\text{H}_2\text{O}}^Q$, $K_{\text{O}_2}^Q$, $K_{\text{N}_2}^Q$; the total quenching rates of upper and lower laser level: R_{upper}^Q , R_{lower}^Q), des dissociative recombinations (R_1 , R_2), electron attachment to water vapor ($K_{\text{H}_2\text{O}}^R$), and optical transitions are shown. The rate R_{pump} is the pumping rate from the excited atomic xenon 7p- and 7s- level to the laser upper level.

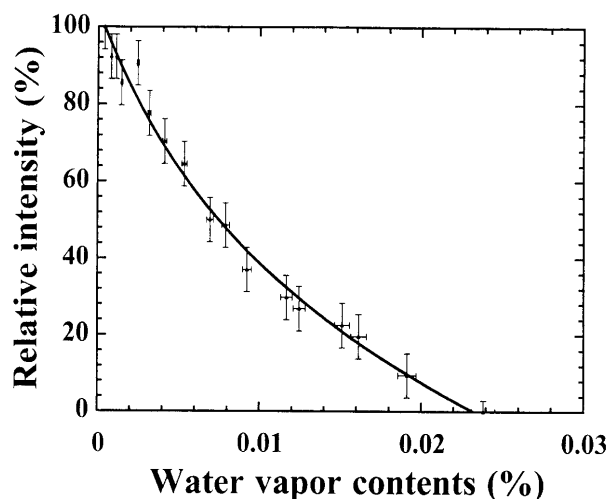


Fig. 5 Experimental result of influence of water vapor impurities on laser output: The relative intensity inside the optical resonator vs. the water vapor contents (%). A fit to the data using the model described in the literature [27] is also shown. According to this model, for example at the laser threshold, the electron attachment rate is 60% of the total electron depopulation rate and 30% of the total transition rate from the upper laser level is due to quenching of water vapor which demonstrates that both processes play an important role.

レーザー発振阻害の物理モデルから得られた結果を比較することによって、水蒸気脱ガスはレーザー上準位のクエンチングと電子付着によるプラズマ再結合阻害の支配的な2つの理由でレーザー発振が阻害されることがわかった[27]。これら2つの効果によるレーザー発振障害のモデルの詳しい計算はすでに報告済みであり[27]、ここではその結果のみを示す。Fig. 5にこの2つの効果を考えた場合のレーザー障害の曲線を示す。水蒸気によるレーザー上準位のクエンチング反応速度定数 $K_{\text{H}_2\text{O}}^Q$ が $4 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ で、電子温度 T_e のときの全再結合反応レートに対する水蒸気による電子付着反応レートの割合 $K_{\text{H}_2\text{O}}^R[\text{H}_2\text{O}]/R(T_e)$ が $6 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 [\text{H}_2\text{O}]$ であることがわかった。

3.2 ガス温度上昇によるレーザー発振障害の考察

ガス温度依存性はほかにもいろいろな実験[23-25]が報告されているが、本研究の実験[28]ではレーザーの損失を最低に抑えることに成功したために、そのしきい値を低く抑えることができ、レーザー発振の温度依存性について従来の温度範囲の約2倍というデータを得ている。実験に使用したガスヒーター系 (Fig. 3 参照) を被

っている石英ガラス管は重イオンビームの飛程に対して十分長く作られている。このガスヒーター系内外の温度を白金抵抗温度計により測定した。ガスヒーター内の温度はその中央で最高 663 K まで測定し、それがほぼ一定に保たれていることを確かめた。

この一連の温度依存性を調べる実験において、温度が上昇してもガス密度は常に一定に保つようにした。これは温度上昇に伴うガス密度変化により、重イオンビームの飛程の変化によるレーザー光軸と励起領域の重なり

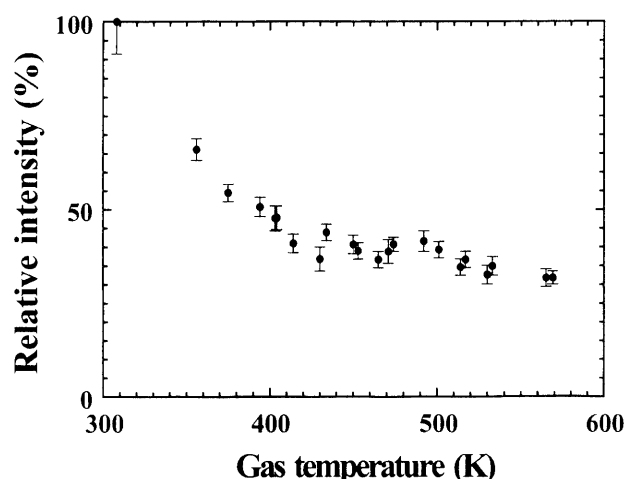


Fig. 6 Experimental result of influence of gas temperature on laser output: Relative intensity of Laser output at its maximum point (%) vs. gas temperature in the gas heater cell (K). The laser gas was a mixture of 99.1 % Ar and 0.9 % Xe with $4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ of constant density. All other parameters such as water vapor density, optical geometry, etc. were kept fixed.

程度の変化を防ぐためである。この作業により純粋なガス温度上昇によるレーザー発振障害を調べることができた。実験結果を Fig. 6 に示す。このグラフからもわかるように 300~400 K 間におけるレーザー出力の低下が著しい。レーザー出力はガス温度が 400 K では 300 K の時の半分弱になる。この温度領域以上ではレーザー出力はほぼ一定に保たれている。実際の核励起レーザーにおいてはガスセルが密閉されているので、密度一定に保った温度依存性実験がそのレーザー発振不安定性の問題解決のためのよいデータを提供する。これらの実験結果から言えることは、レーザーが発振しなくなることはないが、ガス温度は室温程度に保った方がレーザー出力の減少を抑えることができるということである。

レーザー出力のガス温度依存性の機構は非常に複雑であるため簡単なモデルが作れないが、定性的に議論されてきたものに次の2つがある。一つはレーザー混合気体の温度上昇がそのプラズマ中の電子温度の上昇を招き、その再結合の反応速度を遅くするために再結合レーザーの発振が阻害されるというものである。もう一つはこのレーザーの上準位が互いに小さいエネルギー間隔の単位からなる manifold の最上位に位置しており、電子温度が上昇することでこの準位間で電子による励起と脱励起が頻繁に起こり、そのためにこのレーザーの上準位が脱励起され、レーザー発振が阻害されるというものである。この現象を説明すべく、多くの数値計算モデル[8,10,13]が提出されているがいずれも満足に実験結果を再現していない。

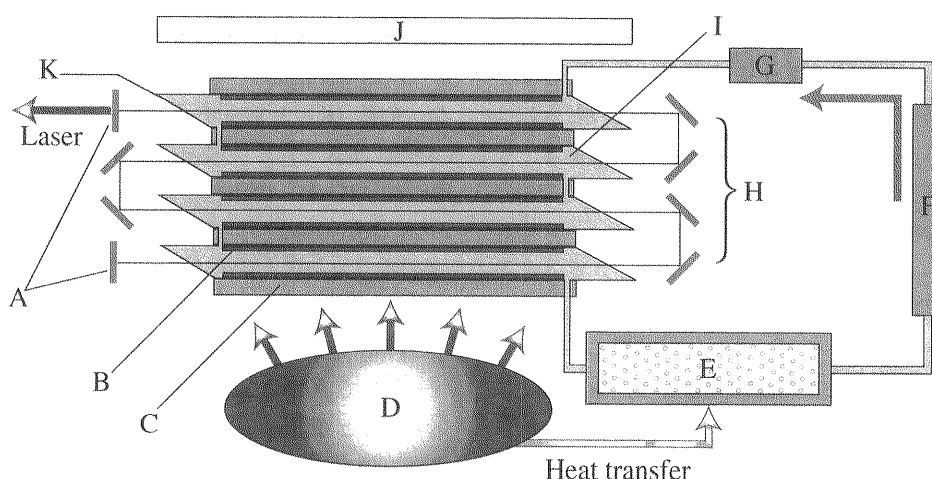


Fig. 7 Schematic arranging of RPL setup: The cavity mirrors (A), optical axes, metal uranium-235 coating (B), moderator (C), neutron source (D), rare gas purifier operating with hot titanium (E), cooling system (F), metal bellows compressor (G), turning mirrors (H), laser gas cell with Brewster window (I), neutron reflector (J) and Brewster window (K) are shown.

4. 高温・高不純脱ガス濃度におけるレーザー発振障害

今まで扱ってきた水蒸気脱ガス量依存性はガス温度が室温であり、同様にガス温度依存性は水蒸気脱ガスが含まれない場合であった。しかし、実際の核励起レーザーの問題を議論するためには 600 K 程度のガス温度における水蒸気脱ガス量依存性を議論しなければならない。そのためには、不純ガスのクエンチング反応速度定数と水蒸気による再結合阻害速度定数のガス温度依存性をここで考察する必要がある。

まず、不純ガス分子によるクエンチング反応速度定数から議論する。この定数はガス分子の平均速度に比例するので、温度の平方根に比例する。したがってガス温度が室温の 2.3 倍程度になってもこの反応速度は室温時のその 2 倍に満たない。したがって、この効果による高温時の物理的機構に大きな変更は必要ない。当然ながら、他の分子によるクエンチング効果にも同様の議論が当てはまる。水蒸気以外にレーザー発振に与える効果が大きいものに、アルゴンによるクエンチングがある。アルゴンはバッファガスとしてレーザー媒質ガスに含まれるものなので不純ガスではないが、同様に高温になるにつれレーザー上準位の寿命を縮める原因になる。

次に、水蒸気の電子吸着による再結合障害について議論する。この効果を理解するためには水蒸気に含まれる水クラスタについて正しい考察をしなければならない。電子吸着はクラスタがある程度大きいときに起こるため、この解析には高温時の水蒸気を構成する水クラスタ数スペクトルが必要である[33-43]。水クラスタ数スペクトルに関する詳しい計算結果は室温でアルゴンと水蒸気が等量含まれる混合ガスについて求められている[44-45]。しかし、本実験のように不純ガスとして含まれる水蒸気密度がアルゴンのその 10^{-4} 程度のときには、どのようなスペクトルになっているか不明である。高温時の水クラスタ数スペクトルが得られることでこの効果の研究は進むであろう。

5. 核融合用の原子炉励起レーザーの提案と今後の課題

これらの一連の研究結果と理論的考察から、レーザー発振の高効率化と安定化のためにレーザー媒質ガスの清浄化と冷却が必要であることが言える。本研究では原子炉励起レーザーの発振の安定化および本来の高効率を実現するために、定量的にレーザー発振に障害を与える水蒸気濃度とガス温度を明らかにした。ガス用湿度計と白

金抵抗温度計でレーザー媒質ガスの水蒸気濃度とガス温度を監視することで、レーザーが安定に効率よく発振する条件が確認できる。特に、レーザー媒質ガスの浄化が重要である。原子炉励起 Ar-Xe レーザーの特徴の一つにその媒質ガスが化学的不活性の混合希ガスを使用することがあげられる。このレーザー媒質ガスの清浄化は約 1,100 K に熱したチタンゲッターを使用して、窒素、酸素、水蒸気を除去して行うことができる。ガス冷却に関しては Fig. 6 からわかるように 400 ~ 300 K 間の冷却が特にレーザー発振の安定化に対して意味を持つ。そこで、室温程度にガス温度を保つためには、絶えず冷却してガスを循環させればよい。したがって、Fig. 7 に示すようにコンプレッサ (G) を用いてレーザーガスセル (I) から希ガス清浄機 (E) に送り、その後清浄化されたガスを冷却 (F) して循環させる構造にすることで原子炉励起レーザーを改善することができる。以上のようなガス循環システムを構成することで、この原子炉励起レーザーの高強度化と高効率化が実現可能である。

ロシアの VNIEF で計画中のレーザーエネルギー数 MJ 級のシステム[46]にはガス冷却および、ガス清浄システムはないが、Fig. 7 に示した装置のようなガス清浄システムを考慮することで、レーザーエネルギー数 MJ の高効率、高強度レーザーが実現できる。中性子源 (G) の種類と大きさにより、レーザー装置全体の大きさは形状は異なったものになる。この Fig. 7 に示した概念設計において、レーザー光学系は方向変換用ミラー群 (H) により、すべてのガスセルが一つの共振器内にある構造になっている。しかし、巨大なシステムの場合には一部のガスセル群を主共振器にし、他のガスセル群をレーザー増幅用にすることもできる。ほかにもレーザー光学系には原子炉励起レーザーの設計上、注意すべき点がある。光窓 (K) とレーザーミラー (A, H) は汚れや損傷に非常に弱いので、ガスセル中に照射される核分裂片や反射材 (J) からの中性子線による損傷から光学系を守らなければならない。したがって、光窓 (K) はガスセル壁面にコーティングしたウラン (B) から飛散する核分裂片の飛程以上に離すように設計した。

このレーザーはハイブリッド炉の慣性核融合用ドライバとして使用することにより炉全体の総合的効率を高くすることができる。Fig. 7 の中性子源 (D) にパルス型原子炉を用いれば従来型の原子炉励起レーザーになる。しかし、この中性子源に核融合炉を用いれば中性子エネルギーをレーザー光エネルギーに直接変換し、このレーザー光をドライバとして用いるハイブリッド炉が

できる。核融合炉容器の回復時間により 1 Hz 運転に制限されているので[47], ここでは10台の直径 4 m, 高さ 2.5 m の D-T 反応の核融合炉を 1 Hz, ドライバーを 10 Hz で運転する設計にした。この10台の融合炉を縦に一列に並べ, その中央にハイブリッド炉のイグニッション用にパルス炉を設置する。ガスセル内には厚さ 5 μm の U^{235} がコーティングされている。全長 22 m のレーザーガスセル (I) 600本で構成されたレーザーセル集合体が, 融合炉からの中性子取り込み用に一部 (120°) 欠けている直径 1m の中性子反射体円筒 (J) の中に納まっている。このレーザーセル集合体 3 本が対称に120°間隔で, 縦に並べられた10台の核融合炉の周りに配置されている。レーザー混合 Ar-Xe ガスは全圧 500 mbar, Xe 混合率 0.5% のものを使用する。核融合反応で生じた中性子の一部を中性子取り込み用口からレーザー集合体内に取り込み, レーザーガスセル表面のウランコーティングでの核分裂により生じる中性子が減速後, 核融合炉を一個当たりのレーザー集合体の全ガスセル中に 3×10^{18} 回の核分裂を起こす。その際, 生じた分裂片でポンピングすると 5 MJ の高強度 Ar-Xe レーザーが発振し, これをすべてドライバー用レーザーとして次の融合反応に投入する。このハイブリッド炉でのレーザー効率を 10%, 波長変換効率を 50%, ペレット利得が 50 とすると, 融合炉 1 台あたり 250 MJ の熱エネルギーが発生する。核融合反応で生じた全中性子の内, ドライバー用レーザーポンピング用に投入する中性子以外はトリチウム生産用に使われる。中性子減速材 (D) および, 核融合ブランケットでの熱エネルギーを発電用に利用して, 融合炉 1 台あたり平均 70 MJ の電気エネルギー, すなわちハイブリッド炉全体で 700 MW の電力を供給できる。

現在, 原子炉励起レーザーの中で最も有望視されている Ar-Xe レーザーの波長は 1.73 μm と長いため, レーザーエネルギーから爆縮プラズマの熱エネルギーへの変換効率を高くし, ペレットゲイン 50 を達成するためにはレーザー光は非線形素子によって 3, 4 倍高調波に変換される必要がある。現在最もレーザー慣性核融合用ドライバーとして有望視されている LD 励起固体レーザーの発振波長 1 μm の 3 倍高調波への波長変換効率は 80 % [48] が得られており, すでに十分な効率が得られている。現在試みられている他のドライバーは電力を必要とするのに, 今回提案する核励起ドライバーは直接中性子エネルギーを使って駆動できるので, 電力損失を低減できる。

将来的に電力ではなくレーザー光を直接供給するインフラが設備されたとき, この原子炉励起レーザーによる

直接変換は重要な基盤技術となる可能性がある。また, このレーザー波長が近赤外であることは光エネルギーを大気中において低損失での輸送を可能にし, 地球と宇宙の間で光エネルギーの輸送を可能にする[49]。このことは宇宙で発電して地上に送電する技術的可能性を与えてくれるだろう。

謝辞

本研究は著者がドイツ学術振興会の奨学金でミュンヘン工科大学において1996年～1998年にかけて行われた一連の重イオンビーム励起レーザーの研究, および東京工業大学原子炉工学研究所での修士課程において1994年～1996年にかけて行われた高強度 $^4\text{He}^+$ イオンビーム励起レーザーの研究を基に将来のハイブリッド炉用のドライバーの可能性を検討したものである。この間, ミュンヘン工科大学の Dr. A. Ulrich, Dr. J. Wieser, Dr. M. Salvermoser に直接的な研究の方向づけをしていただいた。この実験にはミュンヘン郊外ガルヒンのタンデム加速器研究所およびミュンヘン工科大学の物理学部 E12 の方々の協力があったことを付記しておく。

参考文献

- [1] A.M. Voinov, L.E. Dovbysh, V.N. Krivosov, S.P. Mel'nikov, A.T. Kazakevich, I.V. Podmoshenkii and A.A. Sinyanskii, *Sov. Phys. Dokl.* **24**, 189 (1979).
- [2] A.A. Sinyanskii, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Physics of Nuclear- Induced Plasma and Problems of Nuclear- Pumped Lasers (NPL-94)*, Sept. 26-30, 1994, Arzamas-16, Russia, ed. A.M. Voinov, S.P. Mel'nikov and A.A. Sinyanskii, VNIIEF, Arzamas-16, 1995, ISBN 5-85165-065-9, Vol. 1, p.16.
- [3] A.P. Barzilov, A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk and A.V. Zrodnikov, *Proc. of 8th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES'96)*, Obninsk, Russia (1996), Vol.1, p.322-329.
- [4] A.V. Karelin, A.A. Sinyanskii and S.I. Yakovlenko, *Quantum Electron.* **27**, 375 (1997).
- [5] A.M. Voinov, L.E. Dovbysh, V.N. Krivosov, S.P. Mel'nikov, A.T. Kazakevich, I.V. Podmoshenkii and A.A. Sinyanskii, *Sov. Tech. Phys. Lett.* **5**, 171 (1979).
- [6] O.V. Sereda, V.F. Tarasenko, A.V. Fedenev and S.I. Yakovlenko, *Quantum Electron.* **23**, 459 (1993).
- [7] W.J. Witteman, S.W.A. Gielkens, V.N. Tskhai and P.J. Peters, *Proc. of Int. Conf. on Atomic and Molecular Pulsed Lasers II*, Sept. 22-26, 1997, Tomsk, Russia, ed. V.F. Tarasenko, G.V. Mayer and G.G. Petrash, *Proc. of SPIE* **3403**, 11 (1998).

- [8] A.V. Karelin and O.V. Simakova, *Laser Phys.* **8** 567 (1998); preprint No. 9 (Moscow: Institute of General Physics, Russian Academy of Sciences, Mar. 15, 1998).
- [9] G.A. Hebner and G.N. Hays, *J. Appl. Phys.* **65**, 3760 (1993).
- [10] A.V. Karelin, *Quantum Electron.* **28**, 602 (1998).
- [11] P.P. Dyachenko, *Proc. of the 12th Int. Conf. on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, Apr. 24- 28, 1995, Osaka, Japan, ed. S. Nakai and G.H. Miley, Osaka, Japan, 1995, ISBN 1-56396-624-7, Vol. 2, p.894.
- [12] M. Ohwa and M.J. Kushner, *J. Quantum Electronics* **26**, 1639 (1990).
- [13] M. Ohwa, T.J. Moratz and M.J. Kushner, *J. Appl. Phys.* **66**, 5131 (1989).
- [14] V.A. Ivanov, *Sov. Phys. Usp.* **35**, 17 (1992).
- [15] E.D. Poletaev, A.F. Gamaly, P.P. Dyachenko, V.N. Smolsky, M.Yu. Zaitsev, V.R. Agafonov, Yu.A. Dyuzhov, A.V. Gulevich, B.V. Kachanov and O.F. Kukharchuk, *Proc. of 9th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES'98)*, Tel-Aviv, Israel (1998), Vol.2, p.832.
- [16] V.N. Kononov, M.V. Bokhovko, P.P. Dyachenko, V.V. Korobkin, Yu. A. Prokhorov, V.I. Regushevsky, A.P. Barzilov, A.V. Gulevich, A.V. Zrodnikov, O.F. Kukharchuk, E.A. Pashin and V.N. Smolsky, *Proc. of 8th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES'96)*, Obninsk, Russia (1996), Vol.1, p.336.
- [17] A.V. Gulevich, A.P. Barzilov, P.P. Dyachenko, A.V. Zrodnikov, O.F. Kukharchuk, B.N. Kachanov, S.G. Kolyada and E.A. Pashin, *Proc. of 12th Int. Conf. on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena (LIRPP'95)*, Osaka, Japan (1995), ISBN 1-56396-624-7, Part 2, p.933.
- [18] A.P. Barzilov, P.P. Dyachenko, A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk, Yu. A. Prokhorov and A.V. Zrodnikov, *Proc. of 2nd Int. Conf. on Advanced Reactor Safety (ARS'97)*, Orlando, USA (1997), ISBN 0-89448-624-1, Vol.2, p.665.
- [19] H. Botma, Dissertation: ter verkrijging van de graad van doctor aan de Universiteit Twente, op gezag van de rector magnificus Prof. Dr. J.A. Popma, Apr. 8, 1993, ISBN 90-9005741-2, p. 19.
- [20] G.A. Hebner and G.N. Hays, *J. Appl. Phys.* **74**, 3673 (1993).
- [21] W.J. Alford and G.N. Hays, *J. Appl. Phys.* **65**, 3760 (1989).
- [22] V.N. Kononov, M.V. Bokhovko, A.P. Budnik, I.V. Dobrovolskaya and O.E. Kononov, *Proc. of the Ninth Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems*, June 28- July 2, 1998, Tel-Aviv, Israel, ed. Y. Ronen, L. Teppers and E. Elias, Vol. 2, p. 881.
- [23] A.I. Konak, S.P. Melnikov, V.V. Porkhaev and A.A. Sinyanskii, *Laser Part. Beams* **11**, 663 (1993).
- [24] G.A. Hebner, J.W. Shon and M.J. Kushner, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2872 (1993).
- [25] G.A. Hebner, *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, 1626 (1995).
- [26] A.A. Mavlyutov, A.I. Mis'kevich and B.S. Salama-kha, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Physics of Nuclear- Induced Plasma and Problems of Nuclear-Pumped Lasers (NPL-94)*, Sept. 26-30, 1994, Arzamas-16, Russia, ed. A.M. Voinov, S.P. Melnikov and A. A. Sinyanskii, VNIIEF, Arzamas-16, 1995, ISBN 5-85165-065-9, Vol. 1, p. 318.
- [27] H. Tomizawa, M. Salvermoser, J. Wieser and A. Ulrich, *J. Phys. B* **32**, 181 (2000).
- [28] H. Tomizawa, M. Salvermoser, J. Wieser and A. Ulrich to be published in *J. Phys. B* (2000).
- [29] N.W. Jalufka, *Proc. of a workshop held at NASA Langley Research Center Hampton*, Virginia, July. 25-26, 1979, Hampton, USA, ed. F. Hohl, (NASA, 1979), NASA Conference Publication 2107, p. 61.
- [30] A. Ulrich, C. Niessl, J. Wieser, H. Tomizawa, D.E. Murnick and M. Salvermoser, *J. Appl. Phys.* **86**, 3525 (1999).
- [31] A. Ulrich, H. Bohn, P. Kienle and G.J. Perlow, *Appl. Phys. Lett.* **42**, 782 (1983).
- [32] V.I. Derzhiev, N.N. Koval', G.A. Mesyats, A.M. Prokhorov, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko, V.S. Tol-kachev, E.A. Formin and S.I. Yakovlenko, *Sov. J. Quantum Electron.* **17**, 269 (1987).
- [33] R.N. Barnett, U. Landman, C.L. Cleveland and J. Jortner, *J. Chem. Phys.* **88**, 4429 (1988).
- [34] B.J. Berne and D. Thirumalai, *Ann. Rev. Phys. Chem.* **37** 401 (1986).
- [35] R.N. Barnett, U. Landman, C.L. Cleveland and J. Jortner, *J. Chem. Phys.* **88**, 4421 (1988).
- [36] R.N. Barnett, U. Landman, C.L. Cleveland and J. Jortner, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 811 (1987).
- [37] U. Landman, R.N. Barnett, C.L. Cleveland, D. Scharf and J. Jortner, *J. Phys. Chem.* **91** 4890 (1987).
- [38] A. Baba, Y. Hirata, S. Saaito, I. Ohmine and D.J. Wales, *J. Phys. Chem.* **106**, 3329 (1997).
- [39] A. Khan, *J. Phys. Chem.* **106**, 5537 (1997).
- [40] M. Svanberg, L. Ming, N. Markovic and J.B.C. Pettersson, *J. Phys. Chem.* **108**, 5888 (1998).
- [41] L.X. Dang and T. Chang, *J. Phys. Chem.* **106**, 8149

- (1997).
- [42] M. Masella and J.P. Flament, J. Phys. Chem. **107**, 9105 (1997).
- [43] R.N. Barnett, U. Landman, C.L. Cleveland, N.R. Kestner and J. Jortner, J. Phys. Chem. **88**, 6670 (1988).
- [44] K. Yasuoka and M. Matsumoto, J. Chem. Phys. **109**, 8451 (1998).
- [45] K. Yasuoka and M. Matsumoto, J. Chem. Phys. **109**, 8463 (1998).
- [46] A.A. Sinyanskii and V. Krivonosov, *Proc. of the 4th Int. Conf. on Atomic and Molecular pulsed lasers (AMPL '99)*, Tomsk, Russia, Sept. 13-17, 1999.
- [47] 服部俊幸, 片山武司, 堀岡一彦: プラズマ・核融合学会誌 **71**, 939 (1995).
- [48] 佐々木孝友: 核融合研究 **68** 別, 249 (1992).
- [49] R.J. Lipinski and D.A. McArthur, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Physics of Nuclear- Induced Plasma and Problems of Nuclear- Pumped Lasers (NPL-94)*, Sept. 26-30, 1994, Arzamas-16, Russia, ed. A.M. Voinov, S.P. Melnikov and A.A. Sinyanskii, VNIIEF, Arzamas-16, 1995, ISBN 5-85165-065-9, Vol. 1, p. 44.