レーザー解説

ロシアにおける高出力レーザー開発

中 塚 正 大*

(1993年3月11日 受理)

Present Development of High Power Lasers in Russia

Masahiro NAKATSUKA*

(Received March 11, 1993)

The recent some technologies in Russia on high power lasers are reviewed. The potential of Russia is inherently seen to have higher level at these fields in which some institutes are now opened to foreign visitors. Large dimension optics, laser materials and nonlinear optic crystals are developed and phase conjugation technology is generally used in high power laser systems. Fusion-fission hybrid reactor project with a nuclear pump laser is proposed. The medical and energetic laser development and its application are seemed main issues in restructuring institutes.

Key Words: Laser, High power laser, Laser glass, KDP crystal, Laser fusion, Phase conjugation, Large optics

1. はじめに

ロシアにおけるレーザー核融合研究用高出力レーザーの開発の現状を調査する文部省在外研究員派遣と、レーザー研とレベデフ物理研究所との共同研究を進めるためのロシア科学アカデミーの招待が重なり、1992年9月16日より2週間、モスクワ及びサンクトペテルブルグにあるレーザー研究関係機関を訪問する機会を得た。訪問したのはモスクワのレベデフ物理研究所、天文物理研究所、モスクワ大学国際レーザーセンター、モスクワより100km南西のオブニンスクにある物理エネルギー研究所、サンクトペテルブルグのパピロフ光学研究所である。一部は

レーザー研センター長、中井貞雄教授と同行した。いずれも高出力レーザー関係の部門を訪れ、研究内容と技術開発の様子を知ることが出来た。日本人として最初の訪問者であった機関(複数)もあり、関係各位の参考になれば幸いと、本報告をする次第である。

一般的にいてロシアの状況は大変革期にある。ペテルブルグでも、かつての中国ばりの壁新聞で各政治潮流が意見を公開し、その前で市民が大論戦を行っており、混乱した変革と自由さが入り乱れていた。世情のことでは、急速な経済自由化が実施されたことによる価格体系の混乱が激しい。革命後、2年ほどで物価は100倍に、一方給与は10倍にしか上がっていないと

*大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘2-6)

*Institute of Laser Engineering, Osaka University, (2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

いう(外貨交換レートは0.6円/ルーブル, 11年前に行った時は, 記憶では確か400円/ルーブルだった)。彼らの社会主義はあまり「コスト」の概念がはっきりしないらしく, 未だに価格の決定法が確立していない。たとえばポリショイバレーが20円そこそこ, 立派な電気剃刀が200円, ロシアレストランのディナーもワイン付きで200円である。大学教授の給与4000~10000円でいかに過ごしているのか。ロシア科学アカデミーから1週間分の滞在費として1000円程を支給されたのは印象的であった。しかし, 研究者が困っているのは, 生活はさておいても研究予算(人件費も含めて)の逼迫である。生産にも携わっている研究所では, しきりに日本との契約の重要性を問いかけてきた。曰く, 「おまえは日本では偉いか。ここで何を契約できるか」と。彼らにはまだ物を売るためのノウハウが無いが, 面白い製品がかなり有るので, 今後読者諸兄の皆さんも積極的にアプローチされることをお勧めする。

さて, この報告は, 日本人では初めての訪問であるとか, めったに日本人は来ないと言った所もあるので, 各研究所で得た研究・技術情報を書き留めて, 読者の参考につしたい。従って, 既に国際学会などで知られているものは割愛する。

2. レベデフ物理研究所

ノーベル賞研究者ニコライBasov先生の招待で, レーザー核融合研究の共同研究に関する討論のために中井教授と共に訪問した。最初にレベデフ物理研究所のレーザー関連の研究テーマやデータの興味深いものを紹介したい。

2.1 高出力レーザー

当研究所はレーザー核融合関連としては早くから多ビームガラスレーザーシステムを開発してきた。計画では, 口径40mm, 216ビーム, 10kJシステム(Delfin)として有名で, 108ビームの建設完了段階で核融合研究に利用されていた。6ビームが基本単位で6方向照射配置を取る。

Fig. 1 Summarizing method of pulses distributed in space. Pumps are $1.06 \mu\text{m}$, 20 segmented beams with $50 \text{ MW}/\text{cm}^2$ in each. Raman shifted input is amplified at $1.13 \mu\text{m}$ with cross-section of $S = 1 \times 1 \text{ cm}$. Rectangular "Combining SUMMATOR" cell has a light transmission length of 40 cm which includes hydrogen gas of pressure of 3 atm. $I_{\text{out}} = 0.8 \text{ GW}/\text{cm}^2$, $E_{\text{out}} = 2.3 \text{ J}$, beam divergence is 0.2 mrad.

ガラスレーザー発振器出力を多ビーム増幅するため, ターゲット上で各ビームの位相関係がランダムになり, 時間コヒーレンスが低下し, 結果として一様な照射が達成されている。現在は, 予算の関係で36ビームしか稼働していないが, 爆縮実験は続行されている。

新レーザーシステムとしては, 110mmロッド増幅器を最終段とするサブピコ秒レーザーが製作されている。ここにはBeam Summarizing (BS)の技法が採用される予定である。時間的および空間的なBSを誘導散乱過程で実現し, 増幅の効率の向上と多数ビームから単一ビームへのエネルギーの集中を図る計画である。

空間的BSの実験配置をFig.1に示す。空間的BSとは非線形光学物質中に設定された光導波路中に, ささまざまな入射角で導入された多ビームは導波路に閉じこめられるが, 媒質内のレーザー光強度が閾値を越えるとラマン散乱光またはブリラン散乱光にたいして利得を示すようになる。従って, 散乱過程に応じた散乱光成分を入射してやると, 多ビームのエネルギーは非線形散乱過程を通じて散乱光に移行する。即ち,

Fig. 2 Amplifying method with narrow path summarizing of pulses distributed in time. $T = L/c$, L ; path length along a single ring optical linear delay from an exit of a light transmission cell. Several pulses meet simultaneously at a cell with an appropriate delay, which energy is converted to Raman shifted single pulse.

空間的に方向に異なる光エネルギーが一つのビームに集中されたことになる。実験例としては、散乱媒質に3気圧、1m長の水素ガス、または20cmの四塩化炭素を用いている。前者の例として、80mmφのガラスレーザー光(1.06μm, 50MW/cm²)をプリズムアレー(5x5)で20本のセグメントビームを偏向入射し、中央部に波面の良いラマン散乱光(1.13μm)を信号光として増幅させると、出力で2.3J, 0.8GW/cm²となり、ビーム広がり角は0.2mradであった。この過程の特徴は、利得の空間分布が一樣に出来ること、増幅ビームの波面は入射信号光で決まること、閾値以下の入射エネルギーは変換されず、パルス波形のコントラスト比が向上することなどである。エネルギー変換率も80%に達し、多ビーム増幅系の波面歪の影響がない。問題は多分、変換セル内におけるレーザー損傷にあると思われるが、多ビームをまとめる手法として極めて有効である。

時間的BSとしてラマン散乱過程を利用する概念図をFig.2に示す。等間隔のパルス列を適当な光学系によって誘導散乱セルに同時入射できるように配置する。入射ビームは中心光軸に対し同一角度を取るようにする。全てのビーム

にたいして同一のラマン散乱波が作用して前方散乱に利得を与える。予備実験によると変換効率70~80%が可能である。ガラスレーザー増幅器のように飽和増幅強度の比較的大きなレーザー媒質に対しては連続パルス列により、エネルギー抽出効率が数倍に改善できるため、この手法は有効である。

2.2 核融合・核分裂ハイブリッド炉計画

ニコライBasov教授を中心とするグループは、いくつかの他の研究所と協力して慣性核融合で得られる高密度中性子束を利用し、未臨界核分裂炉からエネルギーを取り出す研究プロジェクトを立案しつつある。

レーザー出力は約200kJ(効率数%以上、繰返し1Hz以上)でブレイクイーブン状態で高中性子利得を実現する。炉壁に用いるウランの分裂利得 $Q=100$ によりエネルギー発生を行なう。分裂燃料そのものは未臨界状態であり、この形式に暴走の危険性は全くない。現在の原発の危険性の排除と、慣性核融合の技術実現性を結合した計画である。また、使用するウラン燃料の濃縮度も0.5%程度でよく、総燃焼率も3%以上となる。

レーザーに対する照射一様性への要求が緩和され、またレーザー入射ポートは2方向であり、間接照射型をも考えている。レーザーシステムとしては核分裂中性子励起ネオジウムレーザーまたは化学爆発励起ヨウ素レーザーが考えられている。

研究計画は第1期が'92~'93年で既存レーザーによるテスト、レーザーの評価、共同研究組織の立ち上げ、第2期は'94~'96年で200kJレーザー(LD励起固体レーザー、沃素化学レーザー、または核励起レーザー)の開発、第3期は'97~2005年でレーザーと炉システムの建設となっている。

沃素レーザーの基礎研究については、円筒形ガスレーザー媒質(沃素化合物)の中心部にセットした高性能爆薬による衝撃波・光励起装置で波長1.30μmでエネルギー蓄積密度30J/lを達成

した。直径1.3m、長さ10mの装置よりMJ出力を得る設計を持っている。パルス出力は長パルスとなるため、パルスの時分割と圧縮、更にパルスSummarizingを併用の予定である。

必要なレーザーの規模はレーザー研の次期システム「金剛」と同レベルであり、またレーザー核融合実験に関する共同実験の希望を持っているため、レベデフ研究所はレーザー研との共同研究をはじめ、米仏独などとの国際協力を望んでいる。

3. アストロフィジカ(天文物理)研究所

モスクワ都市周回環状道路の西・内側に職員6000名を擁する研究所(研究・生産工場)がある。もともと工業省の国防工業局傘下であり'92年の5月から比較的オープンになったと言うことで、日本人としては初めての訪問者とのことであった。第一副所長セルゲイV.Bilibin氏、科学研究所長ニコライV.Cheburkin教授他数名の歓迎の中、日本におけるレーザー核融合研究の紹介を行なった。

本研究所ではレーザー関連の仕事として、高出力炭酸ガスレーザー(5-10kW)のほか、固体レーザーの屋外仕様のもの(軍需品か)も生産されている。工場の展示コーナーでは、数10cm級の金属ミラー(Al, Cu, Si, SiCなど)で、ハニカム構造、ポーラス(Cu:1-2g/cm^3)構造や水冷構造(ミラー基盤に多くの水冷チャンネル内蔵)のもの、誘電体蒸着品(米国製2m ϕ 蒸着機による)のほか、ピエゾ駆動的可変形ミラー(CO_2 レーザー用で可変形量12 $\mu\text{m}/300\text{V}$, 500Hz駆動)、平面組み合わせミラー(80cmの6角単体7枚で直径2m)など各種製品が説明された。

固体レーザー用部品としてネオジウム燐酸ガラス(40 $\times$ 250 $\times$ 1000mmディスク, 45 ϕ $\times$ 1000mmロッド, 8 $\times$ 100 $\times$ 100mmジグザグスラブなど)、円筒形フラッシュランプ(内径20mm, 外径50mm, 長さ200~1000mm, 入力1kJ/100mm程度, 白濁溶融石英反射部付き(反射率95%以上)), 自動光軸調整温度補正付きDKDPボック

ス素子, 色素レーザー(可視~近赤外線)セル, 波長変換素子(DKDP, 30 ϕ $\times$ 50mm, レーザー耐力1GW/ cm^2)などが示された。

非線形光学の応用としては、ここでも位相共役鏡¹⁾の研究と実用化が進んでおり、上記メートル級ロッドによる回折限界程度の単機kJ出力を得ている。また小径ロッド多数の組み合わせヘッドに位相共役鏡を適用(後述のBeam Combining)し、高速水冷却で繰り返し動作固体レーザーを実現した。大規模実験としては、1.8m ϕ 口径のレーザービームを18セグメントのレンズアレイで4km先に回折限界で集光したとの話も出て驚かされた。

なお野外使用のため電源としても、キャパシターバンクの代わりにパルス発電機を開発し、比出力(機器重量あたりのパワー)200kW/kgでバンクの10倍以上の性能を実証した。動作設計範囲はパルス幅50 μs ~5ms, 繰り返し500Hz, 電圧500V~30kV, 電流1~2MA, 寿命5000時間が達成された。上記の1mロッドの連続パルス励起用には、発電機は400 ϕ $\times$ 1000mm, 500kg程度の大きさとなったそうである。

連邦の変革後、軍事産業から環境/エネルギー産業への変身に熱心であり、いくつかの大きなプロジェクトの提案をも国際会議などで報告しているらしい。筆者は浅学で知らなかったが、例としては、宇宙空間に位相共役鏡併用の太陽光励起YAGレーザーを建設し、地上基地への電力供給源として設置する計画がニコライI.Olenev教授から話された(ロシアでは工場の研究所にも教授の資格を持った研究者がいる)。太陽光を薄膜集光鏡(直径数10m)で集め、アレーYAGロッドシステムの励起に用いる。回折限界に近い出力は地上でも50m ϕ 程度にしかない。約100tonの材料で組み上げられ、効率数%でレーザー出力25MWを送り出す。変換後の地上電力は10MWである。完全固体化システムのため10年程度は維持作業不要である。地上での太陽発電コスト\$6000/kWに対して、このシステムは打ち上げも含めて\$200/kWとなるそうである。彼は、このレーザーシステム

の開発はレーザー核融合研究とも関連していると強調した。なんだか気宇壮大でロシア的感覚の計画ではあった。

この研究所はBasov教授のハイブリッド炉計画では、サンクトペテルブルグのバビロフ光学研究所と共に、レーザーの生産を担当することになっている。

4. モスクワ大学国際レーザーセンター

東欧諸国のレーザーの研究教育者のための協力機関として国際レーザーセンターがあり、モスクワ大学には研究部門が設置されている。学部で言うと理学部物理学科である。訪問先は、大学の副学長も兼任しているニコライ I. Koroteev教授の研究室であった。ここでは非線形光学結晶、特にKDPグループ結晶やKTP結晶の研究²⁾に力を入れている。

KDPおよびDKDP結晶はナターリア P. Zaitseva 博士が中心で、10cm級の結晶で50mm/dayの高速成長が可能となっている。通常、結晶の育成は1~4mm/day程度であり、彼女等の技術はLLNLなど米国からも注目を浴びている。ちなみにこの1月から彼女はリヴァモア研究所の客員研究員として招待された。実験装置は簡単な手作りで見受けられた (Fig.3参照)。外槽は直径約40cm、内槽は約25cmで、外槽温度の制御性は ± 0.5 度、結晶はBottom seedで、回転数は70rpmと速い。過飽和度も20~50%と極めて大きい。種結晶も小さなpoint seedを用いており、縦横同時育成が可能である。結晶育成前の原液の純度管理、フィルタリング、溶液の過熱などにノウハウが有るようである。重水素化KDP (DKDP) に対しても通常、単斜晶は正方晶より溶けやすいため、正方晶を育成するには摂氏26.5度以下で用いるが、高温における準安定性を研究した結果、摂氏70~80度からの温度降下法で成功した。現在、110mm角までの結晶育成が可能である。サンプル提供を受け、我々とリヴァモア研究所が調べた結果も含めて性能を述べる。最も大きな特長は、レーザー耐力が大きく $8\sim 10\text{J}/\text{cm}^2$ (1ns, 1.05 μm)、従来の育成法と比

Fig. 3 Pictures of (a) the high speed KDP growing system at Moskow university and (b) 10cm class DKDP crystal.

べて非線形効果に劣化はない。ただ、pyramidal sectionに比べて、prismatic sectionの紫外域 (波長200nm以下)での吸収が極めて大きいこと、境界域に歪みが残る、その結果屈折率の変化と偏光解消が生じるらしいことである。これらの点については研究が続けられている。

KTP結晶についても研究グループがあった。30mm級の単一グレインの結晶の育成に成功したとのことである。興味深かったのは、回転引き上げ育成中の結晶成長の度合いを調べる方法である。一般に、高温フラックス中の結晶重量を直接計測する方法が使われているが高価である。彼らは、結晶の成長に伴いフラックス中の結晶が、フラックスの粘性のために回転軸にたいして、逆回転力を発生することに注目し、回転軸の捻れを計測し結晶成長のモニターとしていた。回転軸を手で持った薄い紙で少し触るだけでもモニターに検知観測され、極めて高感度であることを示した。KTP結晶で屈折率の内部分布を解消する技術については、後述するバビロフ光学研究所でも成功しているようであったが、共にその詳細は不明である。cm級を越えるKTP結晶の出現は間近のものとの感触を得た。

5. 物理エネルギー (Physical Energetics) 研究所

モスクワから約100km南南西に向かったところ、人口30万人程度のオブニンスクにあるこの研究所(物理パワー工学研究所ともいう)は、'46年に設立され、ロシアで初めての原子力パワープラント、欧州で初めての高速増殖炉が建設されたところである。約10,000人の職員をかかえ、内6,000人は科学・技術者である。加速器(60MeV, 5mA/ns)による各種重イオンの核断面積の計測、原子炉やその応用研究(原子熱源、宇宙用電源、液体Na, NaK, Pb-Biなどの冷却システムやヒートパイプなど)についても多くの説明を受けたが、ここではレーザー関連に限って報告する。

核励起レーザーの材料としては、酸化ネオジムおよび酸化ウランウムをコードプできる液体溶媒として POCl_3 を研究しており、核中性子工学とレーザー工学が組み合わされている。溶媒と種々のレーザー材料(Nd^{3+} , Eu^{3+} , Ti^{3+} など)の研究、中性子エネルギーの吸収・透過・励起率の検討などの基礎的実験の他に、実機レベル(2.5×2.5×3.5m)でのレーザー励起モデルによる核分裂中性子の取り扱い技術などの実験的検討が続けられ、高出力レーザー用に新建屋の建設が進行中である。

核励起レーザーの計算モデルをFig.4に示す。直径1.5m、長さ1.5mのレーザー媒質が中性子反射材で囲まれている。媒質はレーザー材料である Nd_2O_3 と媒質内での2次中性子発生用のウラン酸化を含んでいる。容器の中央部に初期中性子源となる0.9%程度の濃度の濃縮ウラン10~20kgが置かれ、その周辺には低速中性子に変換する減速材(回転式で1~50Hzの繰り返しで低速中性子バーストを媒質中に照射する)がある。時間幅100 μs 程度の分裂生成物(エネルギーで数MJ)が媒質に入り、計算結果ではレーザー出力は効率2%で160kJパルスが期待できる。

中性子工学的な実験研究設備は、形状は六角

Fig. 4 The reactor pumped laser scheme. 1; laser module, 2; core of pulse reactor, 3; reactivity modulator 4; reflector of neutrons, 5; optical windows.

形柱で直径2.5m、高さ3.5m程度の中性子反射材(ポリエチレンを詰めた金属管を沢山立てたもの)の内部に、中心部にレーザー媒質、その回りの中間部に熱中性子遮断材(Mn, Bo)、周辺部に中性子源が、それぞれ直径5cm程度の金属円筒に充填されたものを単位として組み上げられていた。レーザー媒質の場合は、金属管の端部は石英またはパイレックスガラス窓が直接コバールのようなもので融着されている。どの程度の照射Dose量かは不明であるが、核分裂中性子源をいとも簡単に組み上げ、そのまわりに多くの研究者が取りついているのを見ると、筆者には何とも不可思議な感じであった。

100kJからMJの出力を実機で検討すべく、新実験棟が建設中である。幅約10m、長さ約40m、高さ約15m(総4階)で、核分裂炉室、レーザー増幅器室(炉はレールでこの部屋へ引き込める)、発振器の設置および増幅レーザー光によるプラズマ実験をする部屋から成っている。現在約50人がこのプロジェクトで働いており、2

年後をめざして装置の建設にかかっている。所長の悩みはインフレであり、煉瓦ひとつの価格も今後の不安であると言っていた。

案内役の、アカデミッシェンでもあるヴァレリーI. Subbotin科学顧問は極めて紳士的でもあり、かつ研究に対する情熱を感じさせる方であった。ロシアの原子力科学者の研究分野を拡大するため、あらゆる可能性を追求している姿を感じた。

この分野に関しては、現在、日本国内の原子核物理学を研究しておられる研究者の協力が無いと不明な点も多く、共同した検討が必要と思われる。

6. バビロフ国立光学研究所

アーサー A. Mak教授の好意により、V.A. Serebryakov教授が訪問の世話をしてくださった。バビロフ光学研究所は'18年の設立で、所員10,000人、3ヶ所に分かれている。Mak教授の研究グループは230人、内70人が研究者である。研究室は固体レーザー、ガスレーザーと光学、レーザー応用(かつてはレーザー核融合、今は主に医用応用)である。

固体レーザー研究室のUstsyugov教授は、LD励起YAGレーザーの研究に取り組んでいる。

LD部は500mWLD(ペルチェ温度制御、出力安定化回路付、プリズムビーム整形)、レーザー部はYAGでピエゾ調整共振器、波長変換はKTP結晶を使用する。同様の設計で緑色ミニレーザーをも開発し(レーザー部、10数mm ϕ ×10cm長、バッテリー15cm、ペンシル型)、多量生産して来週のベルリンでの展示会に出展すると得意に話された。因みにLDは同市にあるIoffe物理技術研究所から供給されており、最大出力5W/stripe、アレー構成で60Wまで生産可能であった。

応用の中心は分光光源で、ピエゾ同調でCS₂分子でのラム同期法で相対周波数帯域分解能 $6 \times 10^{-10} \sim 10^{-11}$ (10ms~10s)、将来沃素分子を用い2倍高調波で 10^{-12} が目標である。

全体に医用への応用を中心としている新固体レーザーの開発(Antilenko教授)も、2-3 μ m(水の吸収帯)の近赤外域を見ており、新材料BaYb₂F₈: Er (2.0 μ m), BaYb₂F₈: Tm: Ho (2.07 μ m)がある。YbF₃とBaF₂より育成し(Tm = 1100°), CaF₂と似た性質を示す。YAGに比べ少し軟らかいが、数mm ϕ ×100mmロッドで平均出力40Wを得ていた。

高出力レーザーはガラスが中心である。日米と同じく珪酸・リン酸ガラスが各種生産されて

Table I Parameters of Phosphate Nd: glasses of Vavilov State Optical Institute, Sanct Petersburg.

Parameter	Glass	GLS-22	OPS-3106	OPS-1111	KGSS-0178	KGSS-0135
Density, ρ	(g/cm ³)	3.52	2.80	2.85	2.80	2.89
Linear Index, n_e		1.595	1.53	1.538	1.53	1.54
Nonlinear index, n_2	(10^{-13} cgsesu)	1.3	1.0	1.1	1.1	1.1
Cross-section, σ_e	(10^{-20} cm ²)	3.0	3.3	3.2	4.0	4.0
Max Temperature gradient	(°C)	30	35	50	70	30
Thermo-conductivity	(W/K·m)	0.4	0.7	0.65	0.7	—
Thermo-optical const	(10^{-7} /K)	P 4 Q 4-5	5-7 6-7	5-7 6-7	20 4	10 7

いる (Table I)。性能に大きな差は見られない。ディスクレーザー装置はあまり見かけなかった。ので、大型ディスクガラスの生産技術に遅れがあるのかもしれない (但し、アストロフィジカではメートル級のレーザーガラスがあることは既に述べた)。ロッド型レーザーは長さ30cmが標準で、口径と標準利得 (カッコ内) は30mm (18%/cm), 45 (12), 60 (10), 85 (7), 100 (5), 140 (4) と各種開発している。全てのロッドレーザーにはサマリウム含有シールドガラスを採用し、寄生発振の抑制とエネルギー抽出効率の改善に成功している。パイレックス管に比べ、レーザー利得は30%程度大きい。一般にフラッシュランプの励起電流密度は kA/cm^2 程度の低レベルで紫外線発生の少ない状態で用いている。

レーザー技術としては、位相共役鏡の利用が他の国に比べて格段に進歩している。いくつかの例を示す。Fig. 5は200kJ/2nsレーザーの設計例であり、リバモア研究所との検討対象になっている。100ns程度の長パルス発振器、予備増幅器、主増幅器 (位相共役鏡による2パス増幅) および広帯域SBSパルス圧縮器より成る。従来のns増幅システムとの比較を図中に示した。エネルギー抽出効率の向上、必要ガラス量とビーム数の軽減によりコストは約15分の1になる。増幅器部は長パルスモードであるので非線形光学効果は起こらず、レーザーガラスはリン酸系から珪酸系に替えられ、レーザー耐力とコストの面から有利である。

パルス圧縮は誘導ブリラン散乱 (SBS媒質: Ar, SF_6 , CCl_4 など) や誘導ラマン散乱 (SRS媒質: CH_4 , SF_6 など) による後方散乱が利用される。実験例では、 $8\text{ns} \rightarrow (\text{SBS}) \rightarrow 300\text{ps} \rightarrow (\text{SRS}) \rightarrow 200\text{ps} \rightarrow (\text{SRS}) \rightarrow 30\text{ps}$ や、 $100\text{J}/30\text{ns}$ パルスから $80\text{J}/1\text{ns}$ への変換 (エネルギー変換効率80%) を実証した。

位相共役鏡のPhasing (BeamCombiningともいう) の実験も進んでいる。Phasingとは空間的に不連続な光ビームの位相を合わせる技術であり、例えば、透過位相差の異なる組合せ媒質中

		MOPA	Regen.
Pulse	(ns)	1	100
Efficiency	(%)	30	80
Weight of glass	(ton)	3	1
Glass		Phosohat	Silicate
No. of beams		40	8
Cost	(Rb M)	15	1

Fig. 5 200kJ output glass laser design with phase conjugation optic at Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg.

を通った単一位相ビームを位相共役鏡で反射し、再度同一媒質を透過させると、元の位相関係に復活できる。この技術を注入光型レーザー共振器に利用すると、多数のレーザーロッドや多数のレーザーディスクを単一位相レーザー媒質のように扱えるので、強度レーザーや平均高出力レーザーへの応用が可能となる。前図の増幅器部はこの例である。ガラスの組ロッドで $100\text{J}/1\text{Hz}$, YAGの組ロッドで $2\text{J}/25\text{Hz}$ を実現した。現在、組ガラススラブ ($2 \times 6 \times 32\text{cm}$, 4×5 列、スラブの間にフラッシュランプが配置されている) で実験中であった。

7. おわりに

大変革期のロシアの訪問ゆえ少々不安があったが、知己の研究者は年は取っていたが全く変わっていなかったし、街の様子にも悪い変化はそんなに感じられなかった。前回の訪問時に比べて、かえって「自由」の増加が、話す言葉の端々に出て、ロシア人の真面目さに、ますます人なつこさが増えられたようである。

研究面では、相変わらず創造的な研究、大国のダイナミズムが感じられる反面、研究成果の機能性・信頼性に問題がありそうである。しかし、新材料・新技術はたくさんあり、日露共同開発の有効性が発揮できるであろう。今後の進展に期待したい。最後に今回のロシア訪問は、日ソ科学技術協力(文部省)の援助であり、現地訪問の一部は(株)ニチメンの藤澤幸男氏、(株)サンテックの馬野嘉夫氏のお世話になった。記して厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) N. G. Basov (series editor): "Phase Conjugation of Laser Emission", (1988, NOVA SCIENCE PUB. New York)
- 2) L. N. Rashkovich: "KDP-family single crystals", (1991, ADAM HIGLER, New York)