コンファレンスレポート

第5回X線レーザー国際会議報告

加藤 義章*・大道 博行*・河内 哲哉**・緑川 克美**・窪寺 昌一***
佐々木 明†・村井 健介††・富江 敏尚†††

(1996年9月9日 受理)

Reports on 5th International Conference on X-ray Lasers

Yoshiaki KATO*, Hiromiti DAIDO*, Tetsuya KAWACHI**, Katsumi MIDORIKAWA**
Shoichi KUBODERA***, Akira SASAKI†, Kensuke MURAI†† and Toshinao TOMIE†††

(Received September 9, 1996)

1. はじめに

1984年のX線レーザーの成功を契機として、フランスのP. Jaegleの提唱により「X線レーザー国際会議」が1986年に開始され、その後ほぼ2年毎に開催されてきた。今までの会議の期間、場所、議長をTable Iに示す。この会議は参加者数が100-150名と小規模の会議ではあるが、X線レーザーのみを対象とする唯一の国際会議として、X線レーザーの進歩を報告し、物理的内容を検討し、今後の方向を模索する重要な役割を担ってきた。

第5回会議は本年6月10日～14日にスウェーデ

ンのLund市で開催された。議長のSune Svanberg教授はLund大学にLund Laser Centreを設立し、高出力超短パルスレーザーによるX線発生と医学応用を含む、広範囲のレーザー応用の研究を行っている。Lund市はスウェーデンの南部に位置し、ストックホルムから南下するよりも、コペンハーゲン(デンマーク)から船でバルト海を渡り(1時間弱)、対岸のMalmöから電車(30分)を利用の方が早い。サハリンの北部と同程度の北緯56度に位置し、会議が開かれた6月中旬は丁度春から夏に移り変わる季節で、満開をやや過ぎてはいたがライラックが家々の庭に咲き乱れていた。エクスカッションとしてスウェーデンの

* 大阪大学レーザー核融合センター (〒565 大阪府吹田市山田丘 2-6)

** 理化学研究所レーザー科学研究グループ (〒351-01 埼玉県和光市広沢 2-1)

*** 宮崎大学工学部 (〒889-21 宮崎市学園木花台西 1-1)

† 日本原子力研究所光子科学センター (〒572 大阪府寝屋川市三井南町 25-1)

†† 工業技術院大阪工業技術研究所 (〒563 大阪府池田市緑丘 1-8-31)

††† 電子技術総合研究所 (〒305 茨城県つくば市梅園 1-1-4)

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

** The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN) (2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-01)

*** Department of Electrical and Electronics Engineering, Miyazaki University (Miyazaki 889-21)

† Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute (25-1 Miiminami-machi, Neyagawa-shi, Osaka 572)

†† Osaka National Research Institute, AIST (1-8-31 Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563)

††† Electrotechnical Laboratory (1-1-4, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305)

Table I History of International Conference on X-Ray Lasers.

	1st	2nd	3rd	4th	5th
Date	'86.4.14-17	'90.9.17-21	'92.5.18-22	'94.5.15-20	'96.6.10-14
Place	Aussois	York	Schliesee	Williamsberg	Lund
	France	U.K.	Germany	U.S.A.	Sweden
Organizer	P. Jaegle	G. J. Pert	E. Fill	D. C. Eder	S. Svanberg
	A. Sureau	G. J. Tallents		D. L. Matthews	C. Wahlström

Fig. 1 Conference banquet (chorus by the students of Lund University).

最南端，バルト海に面する海岸までバス旅行をしたが，菜の花で畑が全面覆われ，実に見事であった。会議の運営は，南スウェーデンの特徴を十分生かしたもので，バンケットではLund大学学生による「春到来の歌」が皆を楽しませた (Fig. 1)。また，Svanberg一家総出でのLadies Program等への暖かい対応には心を打たれた。

Lund市は大学を中心とする小さな町で，夏期休暇期間中とあって学生は少なく，観光客も余りおらず，静かな雰囲気の中で会議は運営された。会議のプログラムをTable IIに示す。招待講演34，一般講演：口頭発表24，ポスター発表82，計140論文が発表された。会議参加者総数は143名，日本からは20名と，共に今までの会議で最大であった。

前回の会議からの大きな進歩としては，細管放電軟X線レーザーの飽和増幅 (J. Rocca, Colorado州立大学)，小型短パルスレーザー励起による高利得軟X線増幅の達成 (P. V. Nickles, Max Born 研究所) 等，X線レーザーの小型化につながる成果が挙げられよう。また，軟X線レーザー干

渉計による高密度プラズマの高分解能計測 (Lawrence Livermore 国立研究所 (LLNL)) もめざましい成果である。しかし今回の会議を全体的に見ると，X線レーザー研究は転換期を迎えているとの印象が強い。

今までの研究においては，核融合研究用に開発された大型レーザーを励起源として多くの成果が得られ，X線レーザー研究をリードしてきた。しかし大型装置をX線レーザー実験に利用できるマシンタイムは限られているため，多くの新規実験を行うことは困難である。他方，小型X線レーザーに関しては，上記のように新しい成果が得られつつあるが，波長領域は30nm以上と長く，応用の面から重要と考えられている「水の窓」より短波長域における，高出力X線レーザー光の発生は実現されていない。

X線レーザーを実用化するには，小型短波長X線レーザーの実現等，多くの面での飛躍が必要である。幸い，X線レーザー実験に使用できる中規模のレーザー装置が，わが国を含め世界各所に設置されつつあるので，今後新しい研究が生まれてくることが期待される。X線レーザー研究は今まで知的・学問的興味が原動力となって進められ，本会議もそれを反映した形で運営されてきた。今後もその基本線は変わらないと思われるが，より実的な面から見て有用なX線レーザーを実現し得るか，重要な時期にさしかかっていると思われる。なお本会議の報告書は，Institute of Physics Publishing (IOP) より本年末に出版される予定である。

この会議は特定の学会の主催によるものではなく，International Advisory Board (第5回は12名，日本からは加藤義章) の合意により運営されている。この委員会の相談により，次回のX線レー

Table II Program of the 5th International Conference on X-Ray Lasers (* indicates an invited talk, T. Arisawa took the place of M. Perry in Thursday's first session).

Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
8 : 00-900 Registration	8.30-10.15 Beam Optics and X-Ray Optics *Barbee, Jr. T. W. Larsson, J. *Vinogradov, A. V. Förster, E. Schulze, D.	8.30-10.15 X-Ray Lasers Utilizing the Prepulse Technique or Temporal Shaping of the Driver Pulse *Nilsen, J. Jacquemet, S. *Pert, G. J. Li, Y. MacPhee, A., G.	8.30-10.15 X-Ray Laser Drivers and New Pumping Approaches *Chichkov, B. N. Muendel, M. H. *Barty, C. P. J. *Perry, M. D.	8.30-10.15 Applications of Soft X-Ray Lasers *Lindau, I. *Tomie, T. Sebban, S. *Shinohara, K.
9.00-9.15 Introduction Svanberg / Flogdgrén 9.15-10.15 X-ray Lasers : Overviews *Matthews, D. L. *Jaegle, P.	10.15-10.45 Coffee	10.15-10.45 Coffee	10.15-10.45 Coffee	10.15-10.45 Coffee
10.45-12.15 X-ray Lasers : Overviews - Continued *Key, M. H. *Xu, Z.-Z. *Fill, E.	10.45-12.15 OFI and Photo-Pumped Schemes *Eder, D. C. *Midorikawa, K. *Janulewicz, K. A. Nilsen, J.	10.45-12.15 Novel Schemes and XUV Non-Linear Mixing *Letokhov, V. S. *Shkolnikov, P. L. Molchanov, A. G. Romanovsky, M. Yu.	10.45-12.15 Alternative Soft X-Ray Sources *L'Huillier, A. *Rossbach, J. Moustazis, S. D. Simanovskii, D. M.	10.45-12.15 Applications of Soft X-Ray Lasers - Continued *Da Silva, L. B. Stenz, C. Wan, A. S.
12.15-13.30 Lunch	12.15-13.30 Lunch	12.15-13.30 Lunch	12.15-13.30 Lunch	
13.30-15.30 Collisional X-ray Lasers *Daïdo, H. *Fiedorowicz, H. *Sureau, A. Healy, S. B. Ivanova, E. P. *Xu, Z.-Z. *Fill, E.	13.30-14.45 Capillary Schemes *Rocca, J. J. *Hildebrand, A. Morozov, A. Hebenstreit, M. 14.45-15.30 International Laser Facilities *Kato, Y.	13.30-15.30 Excursion	13.30-15.30 Diagnostics of X-Ray Lasers and Laser Media *Zhang, J. *Tallents, G. J. *McPherson, A. Rus, B.	
15.30-16.00 Coffee	15.30-16.00 Coffee		15.30-16.00 Coffee	
16.00-18.00 Table -Top X-Ray Lasers *Hara, T. *Nickles, P. V. *Shlyapitshev, V. N.	16.00-18.00 Poster Session I 17.30-20.00 Open House - Lund Laser Centre		16.00-18.00 Poster Session II 19.30 Dinner	

* Invited

ザー国際会議は1998年に日本で開催されることになった。この機会にわが国及びアジア地区のX線レーザー研究が進歩し、新しい成果が第6回会議で報告されることを期待したい。(加藤義章)

2. 電子衝突励起

本方式の軟X線レーザーは最近、励起方式にブリパルス、多重パルス方式を採用することにより真空紫外から「水の窓」近辺まで波長域を広げ、且つ励起エネルギーの低減(数100J)にも成功している。例えばネオン様イオンを用いたものでは、原子番号14番のSiから47番のAgまで(8nm)ほぼ途切れなく発振(顕著な誘導放出)が得られている(Max-Planck 光量子研究所, LLNL)。ただし奇数の原子番号ではハイパーファインスプリッティングにより利得波長広がりが大きくなり偶数のものに比べて利得係数が著しく小さくなっている。Ni様イオンを用いたものの波長域の拡大も報告された(阪大レーザー研, LLNL)。Agから原子番号66番のデュブセロビウムまでの発振が得られている(波長14nm-6nm)。Ni様スキームでは多重パルス励起に加えX線レーザー

ビームが屈折により利得媒質から逸れてしまうことを補償する湾曲ターゲットを用いることが発振を得るために本質的に重要である。これは利得領域がネオン様スキームに比べ狭いことによると考えられている。Ni様スキームも励起レーザーエネルギー数100Jで動作可能になっている。

高繰り返し動作等で利点を有するレーザー照射ターゲットにガスをを用いた電子衝突励起方式も着実に進歩している。Arガスの細管放電を用いたものでは利得長積27が得られており完全に飽和増幅領域に入っている。出力エネルギー30μJ, パワー40kWとが得られている(Colorado州立大学)。波長は46.9nmと少し長い、比較的シンプルな励起装置(小型パルスパワー装置)でX線レーザービームが得られており今回の会議でも注目を集めた。ガスパフ装置を用いてパル的にレーザープラズマを生成する方式を用いたNe様Ar, Ni様Xeレーザー発振の報告もあった(Poland光学研究所, Max-Planck 光量子研究所)。今後集光幅の異なる線集光と多段パルス励起を併用してガスパフから生じたプラズマ中に導波構造を構成することが考案されている。また超

短パルス高強度レーザーを照射することによりチャネリングを起こし円柱状のプラズマを生成しX線レーザー媒質として用いることも考えられている。

電子衝突励起方式のレーザーの利得値がレーザー媒質であるプラズマの均質性に極めて大きく依存していることが利得領域の結像を行うことにより明らかにされ(LLNL)。すなわち通常のコヒーレント光の照射ではプラズマ中にシート状あるいはスパイク状の利得分布が生じ実効的利得が約1/5程度に低下してしまう。Fig. 2にX線レーザービーム断面の強度分布を示す。明るい部分が利得の高いことを示している。

励起レーザーの空間フィルターのピンホール径を変えることにより線状集光の強度分布を変化させて利得測定が行われた。X線レーザー伝搬方向に均一性の高い強度分布が利得が高くなることが示された(Paris大学)。またプリパルスにより生成されるプラズマの形状の不均一性が干渉計測を用いて詳細に調べられた。プリパルスの照射強度に対する依存性が大きいことが明らかになった。(Czech物理学研究所)

プラズマ生成にナノ秒のパルス幅を有するレーザーを用い、主として励起にパルス幅1psの

高強度レーザーを用いる励起方式により利得係数約 19cm^{-1} が得られた(Max Born研究所)。高い利得係数は励起と脱励起の間に平衡が成立するまでの短時間、過渡的に生じると考えられている。過渡的励起に電子のエネルギーの非平衡分布が加わることによりさらに高利得化がはかれるものと考えられる。電子衝突励起も先に紹介したプラズマの均一性、形状制御とここで紹介した励起法を用いるとさらに性能向上がはかれるものと考えられる。(大道博行)

3. 再結合励起X線レーザー

再結合しつつあるプラズマ中でイオンの励起状態間に反転分布を生成する方法(以下、再結合法)は、水素様、He様そしてLi様イオンを主な対象として研究が行なわれている。この分野では、これまで問題になっていた、いくつかの点の解決およびその糸口を見出す発表が何件かなされた。

再結合法は、励起レーザー照射後のプラズマの冷却によって得られる再結合プラズマ中に利得領域を生成する。したがって照射レーザー強度の不均一性等が、利得領域の空間的な不均一性を引き起こし、軟X線の増幅を妨げる可能性が以前より指摘されてきた。Hutcheonらは、長さ40mmのAlプラズマ中He様AlイオンからのH α 線の一次元時間分解像を観測し、今後、照射強度の不均一性との議論が実験的に可能になった。また、Li様Alレーザーの利得係数の理論計算はこれまで実験を説明していなかったが、KawachiらはLi様イオンの励起状態からBe様イオンへ再結合する過程を導入することにより実験結果をほぼ説明し、更に小型の照射レーザーを用いた軟X線レーザーの実験においても2cmを超えるプラズマ長で10.5nm, 15.4nm線において約 1.6cm^{-1} の利得係数を得ている。

この一方で、再結合法の領域を押し広げる研究も行なわれている。Xu等は、CaやTiプラズマを用いて発振波長の短波長化を行い、波長4.7nmでの増幅を確認している。また、Demir等もCaやTiプラズマの電子温度測定を行ない、レーザー発

Fig. 2 Interferometric pattern of a 2-mm yttrium thin foil target. Bright region indicates high gain. Graph shows gain distribution obtained from the interferometric pattern. (Courtesy of Dr. A. S. Wan, LLNL)

振に最適な条件を実現する準備を行なっている。Haraらは実際にキャビティを組んだ小型軟X線レーザー開発の準備に着手している。

再結合しつつあるプラズマを用いた他の話題としては次のようなものがある。Simanovskii等は再結合プラズマ中のHe様Beイオンの準安定状態(21S)から、偏光させた色素レーザー光励起で2¹Pを生成し、高い偏光度の1¹S-2¹P (10nm)の発光を得た。また、Kunze等は2種類のプラズマを交差させる方法により、イオンイオン衝突による荷電移行励起の速度係数の測定を行なっている。この種の衝突速度係数の研究は、再結合法や放電を用いたX線レーザーの機構解明に大きく寄与する可能性がある。(河内哲哉)

4. 光電場電離 (OFI) 方式と内殻励起

ここでは、超短パルス高強度レーザーによる内殻励起とOFI方式による軟X線レーザーについて報告する。

まず、最初の講演でLLNLのMatthewsがX線レーザー研究の今後の方向として、その短波長化について報告した。原子番号に基づく短波長化のスケールリング則からは、電子衝突励起ではNi様スキームでも2nmまでであり、より短い波長には、超短パルス高強度レーザーによるOFIと内殻励起が有望であると予測している。内殻電離法では、20Jで20~50fsのレーザーを5 μ m $\times$ 1cmに線状集光することにより発生する超短パルスのX線で、Neの内殻(1s)電子を光電離することによりK α 線(14.6Å)での飽和増幅が達成できると報告した。これに対しては、そのような大型のレーザーを用いる短波長化よりも、とにかく10nm付近でテーブルトップの実用的装置を開発することが最優先課題であるとの反論がなされた。

OFIX線レーザーに関しては、予備照射により生成されるクラスターによる短波長化の可能性(理研)や、より反転分布の生成しやすい水素様イオン以外での基底状態遷移を用いる方式(Hannover大学)、また励起光の伝搬を改善し相互作用長を増加させるための細管ターゲットの導入(Princeton大学)などの実験結果の報告などがあり、最近のドライバーの進歩により、多くの

研究所で様々な実験が報告されるようになり、今後の進展が期待される。また、OFIにより生成される電子のエネルギー分布を考慮したモデル(York大学)や照射パルスの時間的形状を変化させたシミュレーション(LLNL)などOFIX線レーザーの実現を目指して理論面からの報告も活発であった。

一方、高次高調波に関しては、X線レーザーとの比較が議論の中心になった。さまざまな意見があるが、筆者の考えでは、変換効率を考慮すると20~30nmより長波長では高調波が、短波長ではX線レーザーが有利であると思われる。事実、すでに30nm以上の領域では、高調波は光電子分光をはじめとしたさまざまな応用に用いられている。高調波の短波長化と高効率化で興味深いのは、固体ターゲットに超短パルス高強度レーザーを照射した時に形成される表面固体密度プラズマを用いる方式である。この方法では、プラズマが照射レーザー波長にくらべて十分薄いいため反転対称性がなくなり、偶奇両次数とも発生できる。得られる高調波の次数は、照射強度と波長の自乗の積($I\lambda^2$)で決まり、この値が10¹⁹W/cm²のとき60次での変換率は10⁻⁶に達する。20J, 2psのガラスレーザーによる実験では、約10⁻⁶の変換効率で75th(14nm)まで観測された。(Oxford大学) (緑川克美)

5. 放電励起

1994年にColorado州立大学のRoccaらにより放電励起X線レーザーが初めて実現した。この方法ではX線レーザーの実現に巨大な励起レーザー装置を用いる必要がないことから、以来研究が進展していくように思われたが、今回の会議ではRoccaらのグループに加えてドイツ(Ruhr大学)、オーストリア(Graz工科大学, Wien工科大学)の各グループからの口頭発表があるにとどまった。またポスターではCentral Florida大学とColorado州立大学の共同グループ、韓国のPohang大学からの研究成果が発表された。

Rocca等によるNe様Arレーザー(J=1-0遷移、波長46.9nm)はその増幅器としての性能をフルにひきだしている感があった。増幅器の最適化に

より、現在までに直径4mmの毛細管内にAr760mTorrを封入し、これに立ち上がり25ns程度的高速放電を行うことにより、小信号利得 0.9cm^{-1} 、利得長20cm、gl積18を得ている。このときのレーザーエネルギーは $6\mu\text{J}$ であった。gl積14程度からレーザー出力は飽和する。反射率20%の鏡を用いてダブルパス増幅を行ったところ、gl積27でエネルギーは $30\mu\text{J}$ (ピーク出力40kW)まで増加した。さらに放電の軸方向への磁場印加(0.15T)によりレーザーの広がり角は 5.9mrad (ビーム直径 $380\mu\text{m}$)に改善された。(ただし磁場強度をこれ以上強くするとゼーマン効果による出力の低下が観測された)現在の繰り返し動作は1分間に1ショットである。

Ruhr大学のグループはRoccaらと同様の同軸型放電装置を用いてNe様Arの $J = 2-1$ 遷移(波長69.4nm)で小信号利得 0.25cm^{-1} (gl積3.5)を観測したと報告したが、疑問符付きであった。放電装置の特徴は、インダクタンス低減のために外部トリガー装置を用いない点である。被励起ガスを毛細管部に外部から注入することにより放電が開始される。この方法での低インダクタンス化については質問もあったが、外部トリガーよりも電流の立ち上がりは早くなるという回答であった。

Graz工科大学のグループでは放電エネルギーにより毛細管をアブレーションしてこれを放電励起する方法を採用している。利得は得られていないが、 Li_2CO_3 毛細管を用いてH様Li(波長72.9nm)、 SiO_2 毛細管によりLi様O(波長52.0nm)の発光を観測している。固体媒質を用いるとレーザー媒質の制限が緩和され、差動排気が不要になるなどの利点があり興味を持った。利得長の大きな(5cm以上)プラズマを生成することは困難であるが、ブリパルスを用いることによる解決の指針が示された。

今回の報告では口頭発表によるもののみを紹介したが、大規模な設備を必要としない放電励起によるX線レーザーは、超短パルスレーザーを用いたX線レーザーと並んでこの分野の研究の発展を底上げする可能性を持つであろう。今後、物理では発振波長の短波長化、工学では装置の小型化、高効率化といった点での成果が期

待される。

(窪寺昌一)

6. シミュレーション

電子衝突励起X線レーザーについては、これまでの研究によりシミュレーションはブリパルスの効果等の実験の結果を定性的に良く説明することが明かになっている。今回の会議では、出力パターン、効率などの実用的な計算よりも、基礎的な計算とその実験との比較によって、より定量的な評価に用いることの出来るシミュレーションへと発展させるための研究が行われている印象を受けた。

その一つには、LLNLのNilsen, Nickles, Fiedroviczらの発表に見られたように、Ne様電子衝突励起X線レーザーで3d準位から2p準位への光学遷移は許容であるにもかかわらず、自己吸収の効果が大きい場合は3d-3p遷移に利得が発生することがシミュレーションによって予測され、実験的にも観測されたことがある。このことは、Ne様X線レーザーのように良く知られた系でさえ、より正確な原子過程モデルが重要であることを示した。

一方、最近の実験ではプラズマの不均一性が利得長積を制限していることを強く示唆する結果が得られている。不均一性は3次元的でかつ微細な構造を持つため、現在のシミュレーションでは効果を再現することは困難であるが、不均一性のメカニズムを解明し、抑制の指針を与えることは今後のシミュレーションの重要な課題になると考えられる。

再結合励起レーザーにおいても、KawachiらによりLi様イオンの励起状態からの再結合を考慮する改良によって実験と計算の不一致が減少することが報告された。原子過程コードの精度の評価は従来困難とされてきたが、高時間空間X線分光実験との比較、コードの詳細な相互比較を通じたコードの改良を意図して、LLNL, Rutherford Appleton研究所で新しいコードの開発が行われている。

超短パルス励起X線レーザーにも再結合、電子衝突法、X線による励起を用いる方法などが提案されているが、このようなX線レーザーのシミュ

レーションを行うには、従来のシミュレーションに加え、超短パルス高強度レーザー光のプラズマ中の伝播、媒質イオンの光電界電離や非線形相互作用と、その結果生じる非マクスウェル分布電子存在下の原子過程を考慮した計算が必要である。今回はこのような計算に関する発表としては、ラザフォード研のグループのJanulewiczによる光電界電離Liプラズマ中の電子のエネルギー分布の計算が見られた。今後は、粒子コードと組み合わせた新しい手法に基づくコードを開発することが重要になると考えられる。(佐々木明)

7. X線光学素子(プラズマ診断応用等を含む)

本会議では、X線光学素子として結晶、ゾーンプレート、多層膜ミラーとその応用例について多数報告されていた。ここでは、最も多かった多層膜ミラーの報告について述べる。

X線レーザーの短波長化にともない、短波長での高い反射率を示す多層膜ミラーで設計値通りの性能を実現することが困難となってきた。波長が短くなると、各層が薄くなるとともに材料の相性や基板の平面度も考慮しなくてはならない。実用化している多層膜ミラーはプラズマ像計測やプラズマの密度計測にも応用されている。LLNLでは、X線レーザー光がレーザープラズマを通過した際にプラズマ中の屈折率の変化により生じるモアレ干渉縞の移動からレーザープラズマの密度を計測している。モアレ干渉縞は、2枚の縞状マスクをわずかに離しかつ微小角傾けた光学系により構成される。板状のプラスチックターゲットから発生したレーザープラズマの密度計測結果が示されていた。また、この計測方式を間接爆縮方式に使用するフォーラムターゲットにも応用したようであるが、残念ながら計測データは示されなかった。また、彼らは多層膜ミラーとビームスプリッターを組み合わせた干渉計についても報告していた。干渉計の光路差を数100ミクロン変化させると、X線レーザー光による干渉縞のコントラストが著しく低下することが報告され、これがX線レーザー光の時間コヒーレンスに相当する。この時

間コヒーレンスの範囲内で、プラズマの密度計測ができる。

多層膜ミラーを傾け偏光素子として使用した例があった。Kawachiらは、ネオン様ゲルマニウム軟X線レーザー光のJ=0-1線(波長19.6nm)について偏光特性があることを報告している。また、Schulzeらは高調波レーザーの偏光特性を計測し、入射光の偏光特性と相関があることを報告している。

多層膜ミラーを組み合わせた不安定共振器の報告があった。Haraらは、2枚の多層膜反射鏡の片方に出力用の穴を開けて構成した不安定共振器を再結合型アルミ軟X線レーザーに適用し、キャビティー動作させた結果を報告している。ストリークカメラによる時間分解計測では、共振器からの出力と見られる3p-4d (15.06nm), 3d-4f (15.47nm)線の発光が示されていた。

(村井健介)

8. 応用

LLNLによるレーザープラズマの診断、Orsayにおけるアルカリハライドの蛍光の観測、それに筆者による光電子分光の提案の3つを紹介する。

LLNLのDa SilvaらおよびWanらは、波長15.5nmのNe様イットリウム(Y)X線レーザーを用いたMach-Zehnder干渉計による、X線レーザープラズマ媒質の評価と衝突プラズマの評価について紹介した。

干渉計測に用いているYレーザーは、空間コヒーレンシーが悪いため精度良くビームを重ねないと干渉縞のビジビリティが低い。なぜ空間コヒーレンシーが悪いのか。また、理論では10-20cm⁻¹の利得が期待されるのに、実験的には5cm⁻¹程度しか得られない。

これらの原因を解明しようというものである。Mach-Zehnder干渉計の中に2mm幅のYプラズマを作り、これによるYレーザーの増幅を行った。利得は数mm径のスパイク状の分布をしており、局所的利得は理論値に近い10-15cm⁻¹であった。この利得の不均一さは、照射ビームの強度不均一性に起因する温度変動によるもの、つま

り、照射ビームの均一性の改善で、利得の増大およびX線レーザービームのコヒーレンシーの向上が期待できる、と報告した。

NIFにおける慣性核融合の間接照射用中空ターゲットの設計にからんで、衝突プラズマが関心を集めている。現在のLASNEXでは二つのプラズマの衝突は扱えず、スタグネーションで1MeVの温度になるという非現実的数値がでる。コードの改良のため、実験データが必要になっている。二つの金の平板を直交させ、その交差部分にレーザー照射し、二つの平板からのプラズマの衝突を干渉計測した。無衝突の場合の3倍程度に電子密度が大きくなること、ピークでは $6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ に達することなどが分かった。

OrsayのSebbanらは、波長21.2nmのNe様ZnレーザーをCsIに照射して、蛍光スペクトルを測定した。CsIへの照射強度を $1.7 \times 10^{11} \text{photons/cm}^2$ - $1.4 \times 10^9 \text{photons/cm}^2$ に変化させたところ、照射強度の高いときに蛍光のクエンチが見られた。シンクロトロン光(SR)照射で観測される300nm発光帯の他、 γ 線照射で観測される不純物欠陥によると考えられる発光帯も観測された。蛍光のクエンチは、SR照射でも光子エネルギーの大きい時に観測されている。光子エネルギーが大きく深い内殻励起を行うと、オージェ過程により多数の電子が放出される。多数の励起電子が10nm程度の非常に小さな領域に存在するために、非輻射過程で脱励起し、蛍光がクエンチすると考えられる。X線レーザー励起の場合は、光子エネルギーが低く1個の光子の吸収では複数の励起中心を作らないが、照射強度が極めて高く複数の光子が近接した場所で吸収される。 $1.7 \times 10^{11} \text{photons/cm}^2$ では、励起中心の間隔は50nm程度と考え

られ、蛍光のクエンチが生じる。このように、X線レーザーにより、高密度励起物理の分野が拓ける。

Tomieらは、光電子顕微分光がX線レーザーの最も有力な応用であると主張する。従来もX線レーザーの光電子分光への応用の可能性の議論はあったが、時間平均輝度において、低繰り返しX線レーザーは定常光源であるSRに全く太刀打ちできないのが前提であった。この常識に反して、Tomieらは、レーザープラズマからの線スペクトルを用いた光電子分光の実験結果から、1ショットで得られる光子数が、偏向電磁石SRから数十秒かけて得られているのと同程度であるという、指摘を行った。これは、SR光の回折格子による狭帯域化には何桁もの強度低下が伴うことによっている。レーザープラズマでは光電子検出効率の高い飛行時間法で電子分光が可能なので、100Hz程度の繰り返しがあれば、undulatorと同等の計測速度も可能であると主張する。光電子分光は近年ますます重要な分析手法になっており、高エネルギー分解能化、高空間分解能化が求められている。数meVの超狭帯域でかつ超高輝度のX線レーザーは、それを可能にする最も有力な光源であると言う。波長的には10nmでも十分であり、1ショットでは大きなエネルギーは不要であり、小型X線レーザーシステムに適している。高繰り返し化、波長の可変性が重要である。今後、X線レーザーによる光電子分光の実験が増えるだろう。

以上紹介したように、今回の会議で、X線レーザーの応用に関してかなり具体的に展望できる様になった。
(富江敏尚)