

X 線レーザーの技術動向

加藤 義章

X 線は、医学、工業、理学、農学等の分野において、診断、治療、分析等に広く利用されてきた¹⁾。特に最近では、放射光施設の高度化と普及により、X 線利用は飛躍的な進歩を遂げつつある²⁾。X 線利用方法の拡大に伴い、放射光施設よりは小型で、しかし X 線管とは異なる性質を有する新しい高輝度 X 線源への期待が高まってきている。

最近、高次高調波、X 線レーザー、レーザープラズマ X 線、逆コンプトン散乱など、レーザーを用いた X 線発生の研究が活発化している。これらは、半導体レーザー励起固体レーザー、チャープパルス増幅超短パルスレーザーなど、レーザー技術の進歩が大きく寄与している。また、X 線結像系や X 線検出器など X 線光学の進歩³⁾も大きな要因となっている。

X 線レーザー⁴⁾は、指向性がよく、パルス幅が短く、パルス当たりの光子数が大きい、コヒーレントな X 線ビームである。この特性を生かして、透過物体の X 線干渉計測や位相差顕微測定、動的变化現象の高時間分解観測、マイクロフォーカスによる顕微表面分析、2 光子吸収による分子解離など、多様な応用が可能になる。従来大型装置を必要とした X 線レーザーの小型化が追求され、各種の小型レーザー励起 X 線レーザーが開発されるとともに、細管放電を用いた繰り返し動作 X 線レーザーが実現されている。

本稿では、X 線レーザー開発に関する最近の技術動向を、わが国における活動に重点をおいて概説する。

1. X 線レーザーの基本特性

短波長の光である X 線を増幅するには、エネルギー差の大きな 2 準位間に反転分布を生成することが必要である。中性原子・分子においては、最外殻電子の束縛エネルギーが数十 eV 以下であるので、準位間のエネルギー差もそれ以下となり、大きなエネルギーの光子を増幅することはできない。しかし原子を多価にイオン化すると、核のクーロン場が強くなり電子の束縛エネルギーが大きくなるので、イオンを用いて反転分布を生成すれば X 線を増幅できるようになる。このため X 線レーザーの増幅媒質として、多くの場合、多価に電離したプラズマが用いられる。

1.1 X 線レーザーの配置

図 1 に X 線レーザーの模式図を示す。励起レーザー光を線状に集光して固体ターゲットを照射し、細長いプラズマを生成する。プラズマ中に反転分布が生成されると、プラズマの一端から放出された自然放出光が増幅され、他端から発散角の小さな強い X 線が放出される。レーザー媒質が金属板として得られる場合は金属板をターゲットとして用いることができるが、通常はレーザー媒質をガラス等の基板上に蒸着して使用する。

X 線域では励起状態の自然放出寿命が短くなるので、反転分布の持続時間も短くなり、増幅光が共振器内を往復する前に反転分布が消滅する。このため、図 1 の例のように X 線レーザーでは通常、光共振器を用いないで発振を得る。X 線レーザーでは大きな反転分布密度を生成することができるので、利得係数が大きくなり、共振器を用いなくても短い増幅長で飽和増幅に達することができる。

図 1 は、励起光の伝搬方向と X 線レーザーの光軸が直交する横方向励起の配置であるが、気体をレーザー媒質とする場合は励起レーザー光と X 線レーザーの光軸が一致する縦方向励起が用いられる。縦方向励起のほうが励起光

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター (〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1)
E-mail: ykato@apr.jaeri.go.jp

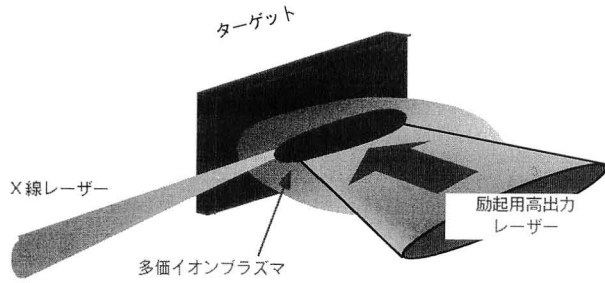


図1 X線レーザーの模式図.

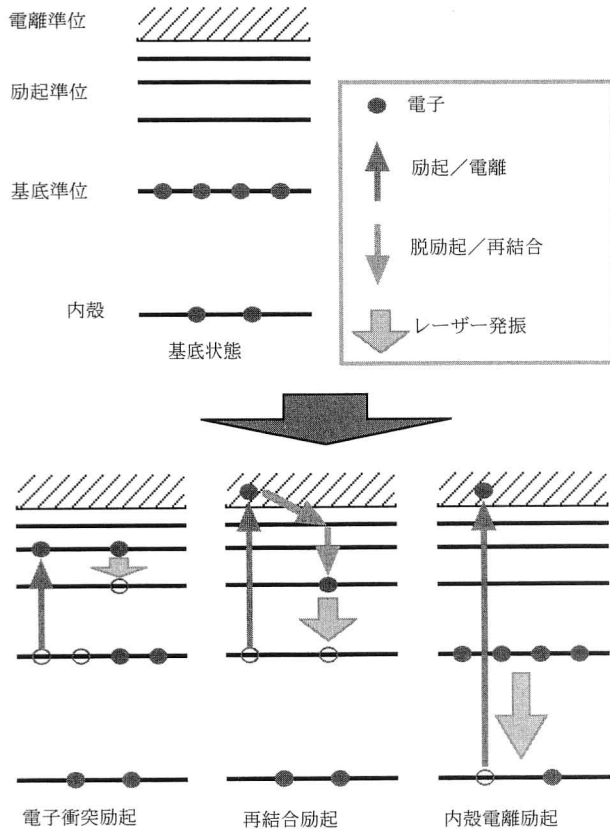


図2 X線レーザーにおける反転分布生成のモデル.

と利得領域が一致するため高い効率が得られると考えられるが、生成されるプラズマにより励起光が屈折を受けるため、利得長に制限が生じる場合が多い。

1.2 反転分布の生成

X線レーザーにおける代表的な反転分布生成機構として、電子衝突励起、再結合励起、内殻電離励起による反転分布生成のモデルを図2に示す。電子衝突励起では、ネオン様、ニッケル様等の閉殻イオンをプラズマ中の電子で励起し、励起準位間に反転分布を生成する。閉殻イオンがプラズマ中に高い分布密度で存在すること、電子準位の構造が簡単であること、電子衝突によりレーザー上準位 ($J=0$ 準位) が選択的に励起されること等の要因により、この方式では安定に反転分布が形成され、ほとんどすべての元

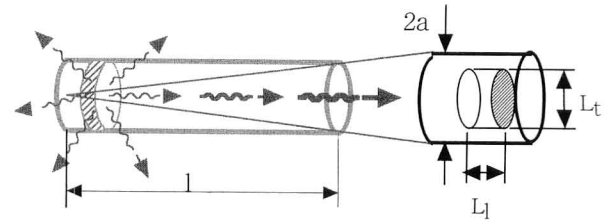


図3 円柱で近似したX線レーザー増幅器(左)と自然放射増幅光のコヒーレンス領域(右).

素で再現性よくX線増幅が得られる。

再結合励起では、プラズマが冷却する過程で過渡的に反転分布が形成される。通常は励起準位間に反転分布が生じるが、高強度光で原子をイオン化するときわめて低温の電子が生成され、励起状態と基底状態の間に反転分布を形成することが可能となる。励起状態と基底状態の間のエネルギー差は励起準位間のエネルギー差より大きいので、X線レーザーの短波長化に適している。

また、内殻電子をイオン化し反転分布を生成できると、さらに短波長のX線を増幅できるようになる。keV域で発振するX線レーザーの候補として期待されているが、内殻電離状態は自然放射、オージェ過程等によりフェムト秒程度の短時間に緩和するので、極短パルスの高強度励起が必要となる。

1.3 X線レーザーの出力

X線増幅の飽和強度を I_s 、ビーム断面積を S 、パルス幅を τ とすると、飽和増幅におけるX線レーザー光のピーク出力は $P = I_s S$ 、出力エネルギーは $E = P\tau$ で表される。過渡的電子衝突励起X線レーザー(後述)を例にとると、ほぼ $I_s = 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 、 $S = 10^{-5} \text{ cm}^2$ であるので、ピーク出力は $P = 1 \text{ MW}$ となる。 $\tau = 10 \text{ ps}$ 、光子エネルギー 100 eV (波長 12.4 nm) の場合を考えると、出力エネルギーは $E = 10 \mu\text{J}$ 、光子数は 6×10^{11} /パルスとなる。後述するようにこの光子数は他の光源に比べて格段に大きく、単一パルスで2次元像を記録するのに十分な数である。

1.4 コヒーレンス

自然放射光増幅で生成されるX線レーザー光のコヒーレンスを見積もるため、増幅媒質を長さ l 、半径 a の円柱で近似する(図3)。(実際のX線レーザー媒質は円柱ではなく、プラズマによる屈折もあるので、このモデルはだいたいのオーダーを見積もるための近似である。)空間モード数の指数となるフレネル数は、X線レーザー光の波長を λ とすると $F = a^2/\lambda l$ で与えられるので、出力部における空間コヒーレンス長は $L_c = 2a/F$ で見積もられる。数値例として $l = 5 \text{ mm}$ 、 $a = 25 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 10 \text{ nm}$ とすると、 $F = 12$ 、 $L_c = 4 \mu\text{m}$ となる。部分コヒーレント光における

ビーム径とコヒーレンス域との比 $2a/L_c (=F)$ は、伝搬に伴いビーム径が変化しても保存される。

X線レーザー光のスペクトル幅は、ドップラー広がりやシュタルク広がり、および増幅に伴う狭帯域化の影響を受け、ほぼ $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-4}$ となる⁵⁾。したがって時間コヒーレンス長は $L_c = \lambda^2/\Delta\lambda = 100 \mu\text{m}$ である。コヒーレント領域の体積は $V_c = L_c^2 L_1$ であるので、コヒーレント域に含まれる光子数(縮退度)は、上記の数値例の場合、 $\delta \sim 10^8$ となる。すなわち、 10^8 個の光子をコヒーレント光として利用することができる。

2. 電子衝突励起 X 線レーザーの小型化、短波長化

固体ターゲットの横方向励起により、ネオン様イオン(基底状態の電子配置 $2p^6$)、ニッケル様イオン(同 $3d^{10}$) の励起準位間の遷移で増幅が得られている。発振波長は 60.8 nm (ネオン様 S) から 3.56 nm (ニッケル様 Au) に及ぶ。ニッケル様イオンはネオン様イオンに比べて、基底状態からレーザー上準位への励起エネルギーに対する励起準位間のエネルギー差が大きいため、短波長での増幅が得られる。同一電子配置においては、原子番号が大きくなるほど束縛エネルギーが大きくなり、短波長光を増幅できるようになる。この場合、レーザー上準位への励起エネルギーも大きくなるので、高い電子温度を得るために高い照射強度が必要とされる。

2.1 励起条件の最適化

固体ターゲットを用いる X 線レーザーの場合(図 1)、レーザー光照射により固体がプラズマ化し、膨張プラズマ中に反転分布が生成される。プラズマの屈折率は 1 より小さいので、X 線レーザー光の光路は低密度側に曲がる。長い距離にわたって増幅するには、密度勾配の小さいプラズマ中で増幅を得ることが必要である。

できるだけ少ないレーザーエネルギーで X 線レーザー発振を得るために、小さなパルスであらかじめプラズマを生成し、膨張により密度勾配が小さくなった時点で、主レーザーパルスで短時間に加熱する 2 パルス励起法の最適化が追求された。その結果ラザフォード研(英国)では、パルス幅 75 ps、エネルギー 75 J のレーザー励起により、波長 5.8 nm までの X 線レーザーの飽和増幅を得ることに成功した⁶⁾。これは従来 1 kJ 以上の励起エネルギーを必要としていたことを考えると、きわめて大きな進歩である。

阪大では最適照射条件のもとでの X 線レーザーの高出力化と短波長化を目的として、直列に並べた 2 つのターゲットを 2 本のレーザービーム(パルス幅 100 ps、エネルギー 140 J、照射強度 $8 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$) で照射し、ニッケル

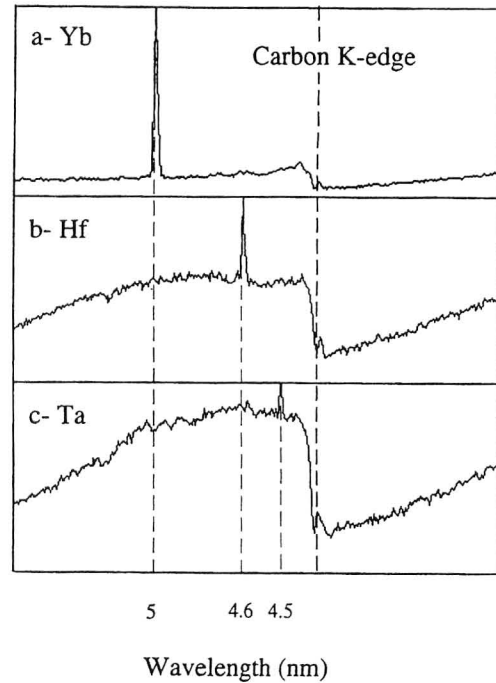


図 4 X 線レーザー発振線⁷⁾: 上より Yb(5.03 nm), Hf(4.65 nm), Ta(4.48 nm)。

様 Ag での飽和増幅により波長 13.9 nm、エネルギー約 300 μJ の高出力 X 線レーザー光を得た。また Yb, Hf, Ta により、まだ飽和増幅には至っていないが、5.03, 4.65, 4.48 nm での増幅を得ている(図 4)⁷⁾。

Ta の 4.48 nm 線は「水の窓」(2.33~4.36 nm) のやや長波長側、すなわち炭素原子の吸収端のやや低エネルギー側にあり、炭素原子による吸収は少ないが、分散が大きな波長域に当たる。このため、干渉、屈折、ホログラフィー等の位相差を利用した計測法を用い、放射線損傷を与えずに生体細胞を観測するのに適した波長である。

2.2 過渡的電子衝突励起 X 線レーザー

レーザー上準位 ($J=0$ 準位) は、近接する他の準位に約 10 ps の時定数で衝突緩和する。そこで、1 ps 程度の短いレーザーパルスを用いて短時間に励起すると、過渡的に大きな反転分布が形成される。この結果、 30 cm^{-1} 程度の大きな利得係数が得られ、短い増幅長で飽和増幅に達する。チャープパルス増幅を用いると、小型のレーザー装置で短パルス・高出力のレーザー光を生成できるので、過渡的衝突励起により X 線レーザーの小型化を実現できる。なお、1 ps に光が伝搬する距離は 0.3 mm にすぎないので、過渡的衝突励起では励起光の波面を傾け、励起光と X 線レーザー光の伝搬を同期させる進行波励起が必要となる。

過渡的衝突励起 X 線レーザーは、マックスボルン研(独)で初めて実証された⁸⁾。その後、リバモア研(米国)

で小型のガラスレーザーを用いて詳細な実験がなされ、パルス幅 1.1 ps, エネルギー 5.2 J のレーザーにより、波長 14.7 nm (ニッケル様 Pd) での飽和増幅が得られた⁹⁾。

2.3 光量子科学研究センターにおける計画

日本原子力研究所関西研究所の光量子科学研究センター(以下、光量子科学研と略す)は、平成8年より主として原研東海研で研究を行ってきたが、平成11年7月に京都府木津町の新施設に移転し、本格的な活動を開始している。小型超短パルスレーザーの開発と応用を目的とし、X線レーザーに関しては、過渡的衝突励起 X線レーザーの短波長化とコヒーレンスの向上を当面の目標としている。

過渡的衝突励起では、予備生成プラズマの最適化が非常に重要である。密度勾配が小さいことに加え、密度の絶対値が臨界密度よりも高いことが加熱レーザー光の吸収率を上げるために必要である。また、主パルスで加熱される前にニッケル様に近い段階までイオン化が進んでいないと、加熱時間内ではイオン化が十分進まず、したがって大きな反転分布も形成されない。詳細な原子過程コードを用いた佐々木らのシミュレーションによれば、薄膜ターゲットを短パルスレーザー光で主パルスと同程度の強度で照射することにより、このような条件のプラズマを生成できる¹⁰⁾。

短波長で発振を得るには照射強度を高くすることが必要である。光量子科学研では、2ビームのチャープパルス増幅ガラスレーザーを開発し、パルス幅 1 ps, エネルギー 15 J のレーザー光を生成した。このレーザー光は、収差の少ない光学系により線集光され、照射強度は 10^{15} W/cm² を超える¹¹⁾。平成11年12月にネオン様チタンイオンによる 32.6 nm での増幅に成功し、その後発振波長の短波長化、高出力化の実験を進めている。上記のガラスレーザーの繰り返しは5分程度であるが、半導体レーザー励起スラブ増幅器を用いる繰り返し 10 Hz の励起レーザーの概念設計を行っている。

X線レーザーのコヒーレンスを上げることは、応用において非常に重要である。固体ターゲットの場合は、照射レーザーの光軸方向とターゲット面に平行な方向(図1で水平方向と垂直方向)で異なる噴き出し速度をもつ非対称なプラズマ中を、X線レーザー光が増幅・伝搬する。このため、X線レーザー光の発振パターンは上下に分割された縦長となる⁷⁾。空間コヒーレンスを上げるには、できるだけ細く均一な利得領域を作り、特に増幅の種光を生成する増幅器端を細くすることが重要である。

プラズマ中での屈折は利得長を制限する要因となるが、同時に高次の横モードを散逸させる空間フィルターの役割も果たす。増幅域の利得係数が十分大きければ、屈折によ

る損失にうちかって増幅する gain guiding の状態となり、高いコヒーレンスの X線レーザー光を得ることができる。薄膜ターゲットを短パルス高強度レーザー光で照射すると薄膜は対称的に膨張し、その中心部で大きな利得が得られると予測される。実験的には、プリパルスの有無、薄膜の均一性等が影響するので、これらの要因の制御が課題となる。

各原子からの自然放出光は位相がランダムであるので、X線レーザー光の時間波形は、コヒーレンス時間程度のパルス幅(1.4の数値例の場合は 0.3 ps)を有するランダムなパルス列となる。光量子科学研では、X線レーザー光の時間コヒーレンスを制御するため、高次高調波光をプラズマ中で増幅することを検討している。通常、高次高調波は超短パルスレーザー光で発生させるが、本目的のためにはパルス幅が 1 ps 以上の比較的長いレーザー光を基本波として用い、時間的コヒーレンスのよい高調波を発生させることが必要となる。

2.4 放電励起繰り返し動作 X線レーザー

コンデンサーに蓄えた電荷を内径 4 mm の細管中で短時間に放電させると、細管内の気体が加熱され、温度が十分高ければ反転分布が生成される。放電は細管の内壁から始まるので、放電の途中で中心部のほうが低いプラズマ密度分布が形成され、細管の中心部が X線レーザー光に対する導波路となる。コロラド大学では、16.4 cm までの長い細管中で安定な放電を得ることに成功し、ネオン様アルゴンによる 46.9 nm での飽和増幅を得ることに成功した。さらに、繰り返し放電により、周波数 7 Hz, 平均出力 1 mW の安定な発振を長時間にわたって得ている。この X線レーザー光のコヒーレント出力は 2.3 kW と推定され、アンジュレーター放射光のコヒーレント出力(4 mW)より 5桁高い値である¹²⁾。

細管放電 X線レーザーは小型装置として使いやすいため、高い電子温度を得ることができないため、短波長化するのは困難である。そこで、細管放電で生成した導波路プラズマを超短パルスレーザーで過熱する「複合方式」が提案され、マックスボルン研で試みられている。細いプラズマ中に正確にレーザー光を導入することが必要であり、まだ増幅の報告はなされていない。

3. 再結合励起 X線レーザーの小型化と利用

冷却プラズマ中では、電子分布は衝突緩和により高励起状態から下の準位に次第に移行するが、下準位のほうが早く輻射放出緩和するため、過渡的に励起準位間、あるいは励起準位と基底準位間で反転分布が生成される(図2)。

水素様炭素イオンのバルマー α 線 (2p-3d 遷移: 18.2 nm), リチウム様 Al イオンの 3d-4f 遷移 (15.5 nm) 等において増幅が観測されているが, 飽和増幅は得られていない。

一般的に再結合レーザーで大きな反転分布を得るには急速な冷却が必要で, したがって短パルスレーザー照射が有利と考えられる。しかし短パルス照射で生成されるプラズマ中では, 空間的・時間的に限られた領域でのみ反転分布が生じるため, きわめて一様性のよいプラズマの生成が要求される。

原ら (豊田工大) は, エネルギー数 J, パルス幅数百 ps の市販の繰り返し Nd:YAG レーザー照射により, リチウム様 Al の 3d-4f 遷移 (15.5 nm) で再現性よく軟 X 線増幅が得られることを見出した。励起レーザー光を多数のミラーを用いて分割・合成して形成したパルス列によりターゲットを照射すると, 少ないレーザーエネルギーでも Al が次第にイオン化されヘリウム様イオンが生成される。この時点で加熱が終わると, 冷却段階でリチウム様イオンに反転分布が生成され, 広い空間領域にわたって利得域が生じる。利得係数は約 3 cm^{-1} , 利得長積は 5 程度であるため飽和増幅とはなっていないが, 約 1 ns にわたって反転分布が維持されるため, 安定な増幅が得られる¹³⁾。

さらに, 図 5 に示す配置で共振器を構成し, 片側の反射鏡にあけた 0.1 mm 角の穴より X 線レーザー光を取り出した。その結果, 光子数 10^8 /パルス, 発散角 3 mrad のレーザー光を得ることに成功した¹⁴⁾。光電子顕微鏡への応用を目的として, 出力レーザー光をシュワルツシルト顕微鏡を用いて集光し, 直径 $0.45\ \mu\text{m}$, 光子数 10^6 /パルスのマイクロビームを得ている¹⁵⁾。X 線レーザーの産業応用の可能性として, 興味深い。

3d-5f 遷移を対象としてリチウム様イオン X 線レーザーの短波長化の可能性が同グループにより調べられた。原子番号が大きくなるにつれ, 利得域はターゲット表面に近

づき, 励起エネルギーも増加する。Ca により 3.95 nm での増幅を得るには, 50~80 J/cm 程度の励起エネルギーが必要と推定されている¹⁶⁾。なお, リチウム様イオン X 線レーザーにおいて利得が制限される要因として, Li 様イオンの励起状態から Be 様イオンへの緩和の可能性が指摘されている¹⁷⁾。

4. 超短パルスレーザー励起 X 線レーザー

X 線レーザーの小型化, 短波長化には, エネルギーは小さいが高いピーク出力が得られる超短パルスレーザーを用いる方法が最も有望と考えられている。超短パルスレーザー励起 X 線レーザーとして, 光電界電離基底準位 X 線レーザー, 内殻電離 X 線レーザー等が検討されている。いずれもまだ十分な増幅は得られていないが, これからの発展が期待される。

4.1 光電離 X 線レーザー

超短パルス・高強度レーザー光により原子が光電離されると, 非常に低温の電子が生成される。このためイオンとの再結合に続く緩和が急速に起こり, 励起準位と基底準位の間で反転分布が生成される可能性が Corkum らにより指摘された。緑川ら (理研) は KrF レーザー (波長 24.8 nm) により Li を電離し, その再結合過程で水素様 Li イオンのライマン α 線 (1s-2p 遷移: 13.5 nm) の増幅を初めて観測した¹⁸⁾。約 20 cm^{-1} と非常に大きい利得係数が測定されたが, 利得長が 2 mm に限られ, 飽和増幅には至らなかった。

この原因として, 軸方向励起における励起光の屈折が制限要因になっていると考えられたため, プリンストン大では LiF キャピラリー内にプラズマを生成して導波路を形成し, 超短パルスレーザー光で励起することを試みた。その結果 5 mm にわたって増幅が得られたと報告した¹⁹⁾が, 理研で追試を行った結果, 再現性のよい増幅は得られなかった²⁰⁾。光電界電離で生成されるプラズマ条件を吟味すると, 短波長化に必要なとされる低温電子は必ずしも容易に達成できる条件とはなっておらず, 屈折効果を含め, その実現の見通しは立っていない。

また, 約 1 ps のレーザーパルスを用い, 光電界電離で生成したニッケル様イオンを過渡的電子衝突励起する方式が, 最近理研より提案された。この方式によれば, Kr を用いると波長 32.8 nm において 1000 cm^{-1} を超える非常に大きな利得が得られると予測されている²¹⁾。

4.2 電荷交換 X 線レーザー

イオンと中性原子が衝突するとき, 原子における電子の束縛エネルギーがイオンの励起準位のエネルギーと近い

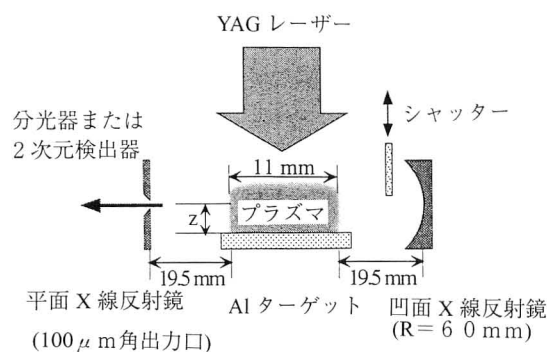
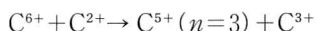


図 5 共振器を用いた X 線レーザー光の多数回増幅とエネルギーの取り出し¹⁴⁾。

と、原子からイオンへ電荷の移動が起こる。この電荷交換断面積は約 10^{-15} cm^2 と非常に大きく、イオンの特定の準位へ移行するため、大きな反転分布を生成できる可能性がある。たとえば、完全電離 C イオンと 2 個の C イオンとの衝突



により、水素様 C の $n=3$ 準位が励起される。

この場合、断面積が非常に大きいので、この電荷交換過程は $10 \mu\text{m}$ 程度の非常に短い距離の間に起こる。したがって、短い距離の間で中性原子とイオンが共存する条件を実現することが要求される。膨張プラズマを固体平面に衝突させる方法では、プラズマが同時に平面に到達する必要があり、長い距離にわたる増幅領域は形成されない。

Chichkov らは、 C_{60} のようなクラスターを超短パルスレーザー光で照射し、クラスター中の衝突電離により炭素原子の完全電離イオンを作り、その周囲のヘリウム原子と

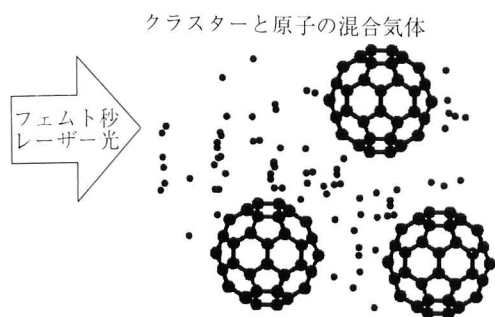


図6 クラスターの超短パルスレーザーイオン化による電荷交換 X 線レーザー²²⁾。

電荷交換する方法を提案した (図6)²²⁾。イオンと原子が共存する条件を実現できるか、実験的検討が必要であるが、匂坂らによる N_2 分子クラスターのイオン化実験²³⁾ は手がかりを与えているように見える。

4.3 内殻電離 X 線レーザー

内殻電離 X 線レーザーは、硬 X 線域で発振する可能性のあるレーザーとして、X 線レーザー研究の初期において提案された方式である。反転分布の生成に高強度極短パルスレーザーが必要とされるため実現困難と考えられてきた。しかし、光量子科学研の 100 TW, 19 fs, 10 Hz チタンサファイアレーザー²⁴⁾ 等の高性能レーザーの開発により、ようやく最近になって実験環境が整ってきた。

従来の X 線電離に代わり、超高強度照射で生成される高エネルギー電子で内殻電子を電離する方法が Barty ら (カリフォルニア大サンディエゴ校) より提案された²⁵⁾。電子衝突では束縛エネルギーの小さな上準位のほうが大きな確率で電離されるので、反転分布は生成されない。しかし、内殻電離状態のコスター・クロニッヒ緩和確率の差を利用すると、過渡的に反転分布を生成できる可能性があり、数値的検討が行われている。

また、高強度の X 線により内殻を多重電離し、中空原子を生成することにより大きな利得を得る方法が光量子科学研より提案されている²⁶⁾。この方法は、電子衝突によるレーザー下準位への緩和を小さくできる、発振波長を短くできる等の利点があるが、通常の光イオン化よりもさらに強い X 線励起を必要とする。

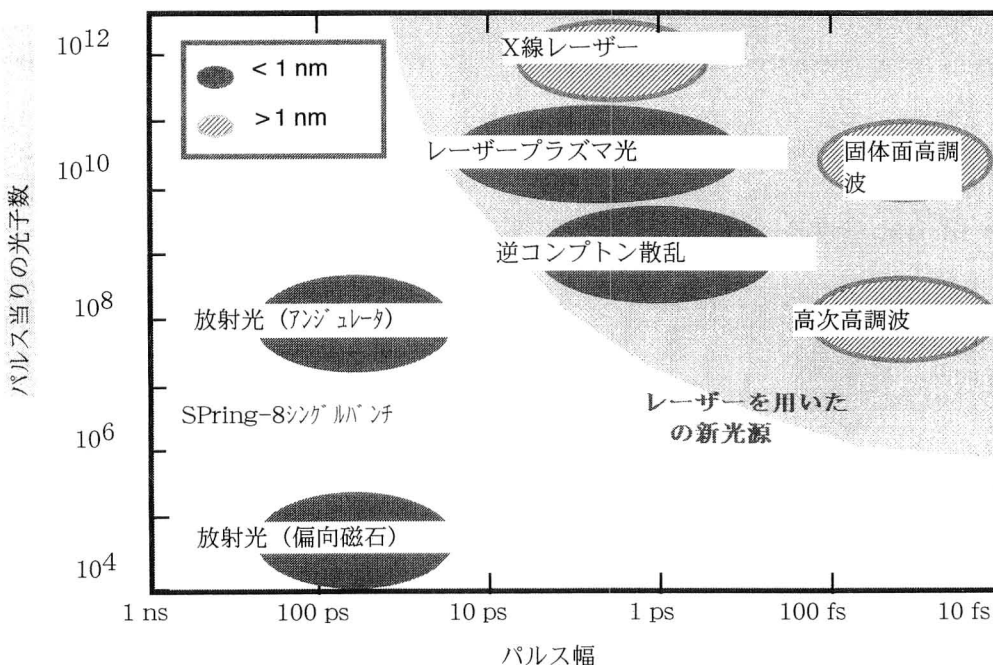


図7 レーザーを用いた新 X 線源および放射光の光子数とパルス幅。

5. 各種 X 線源の比較

透過、回折等の方法により単一パルスで物質の構造を測定する場合、データは画像として記録される。検出器の画素数を 500×500 、十分な S/N 比で記録するために必要とされる各画素当たりの平均光子数を 10^3 、透過・回折効率を 10^{-2} とすると、試料を照射する光子数として約 10^{10} 個以上必要となる。繰り返しパルスでデータを取得する場合でも、1 画像データを得るのに積分として同程度の光子数が必要となる。1 秒で 1 画像データを得るには、たとえば 100 Hz の光源では試料上で約 10^8 個以上の X 線光子が必要とされる。

図 7 にレーザーを用いた先進的な X 線源および放射光の強度の比較を示す²⁷⁾。横軸はパルス幅（時間分解能に相当）、縦軸は 1 パルス当たり放出される全光子数である。短波長光源（1 nm 以下）を実線で、長波長光源（1 nm 以上）を斜線で示した。放射光の例として SPring-8 を単一バンチで運転したとき、繰り返しは 2×10^5 Hz、パルス幅は約 100 ps で、アンジュレーター光およびウイグラー光の光子数は、硬 X 線域においてそれぞれ約 10^8 、 10^5 である。すなわちきわめて高い平均出力の硬 X 線が得られる。

X 線レーザーは軟 X 線域で発振し、パルス当たりの光子数が約 10^{12} ときわめて高く、パルス幅が 1~10 ps（過渡的衝突励起 X 線レーザーの場合）と短い点に特徴がある。上記の試算より、この光子数は単一パルスで画像データを得るのに十分な値である。1.4 の試算より X 線レーザー光の縮退光子数は約 10^8 であるので、単一パルスで十分なコヒーレント計測をするには、より高いコヒーレンスが必要とされる。また X 線レーザーはスペクトル幅が 10^{-4} と狭いので分光光源として適しているが、波長可変性を備えることが望ましい。

高次高調波光は、軟 X 線域における波長可変の超短パルスコヒーレント光源として、光電子分光、非線形 X 線光学、アト秒域の超高時間分解計測等に利用されようとしている。ただしパルス幅が狭いので単色性はよくなく、高分解能分光光源には必ずしも適していない。図 7 では位相整合により通常より 2 桁高い効率で生成された高次高調波光（49 次、50 eV）の光子数（約 10^8 ）を示した²⁸⁾。この実験で使用されたレーザーはピーク出力 50 GW のチタンサファイアレーザーであり、より高出力のレーザーを用いればさらに高輝度の X 線を得ることができよう。

レーザープラズマ X 線源として、超短パルスレーザー照射で生成された固体ターゲットから全立体角に放出される約 10 keV の特性 X 線の光子数を示した²⁹⁾。この特性 X 線を X 線回折に使用する場合、実際に使用できる光子数

は 3~4 桁小さくなるが、それでもパルス当たりの光子数はアンジュレーター光と同程度であり、パルス幅（約 1 ps 以下）は 2 桁以上短い。超短パルスレーザー光で結晶構造変化や相転移を誘起し、これと同期して発生させた特性 X 線を用いて、構造変化の時間分解計測がなされている²⁹⁾。

また、電子ビーム（電荷 1 nC）とレーザー光（10 J, 1 ps）の正面衝突において発生する逆コンプトン散乱 X 線の光子数も示した。ここで発生する X 線は、全光子数が大きくパルス幅も短い、角度により波長が変化する広帯域の光源であるので、このままでは必ずしも使いやすい X 線源とはいえない。

X 線レーザーの小型化、実用化へ向けての多様な試みの状況を紹介します。各種 X 線源の比較を行った。X 線レーザーの波長域は今のところ 4 nm 以上の軟 X 線域に限られているが、0.1 nm 以下にまで拡張できると、その応用範囲は飛躍的に広がる。この分野における研究はわが国で活発に行われており、これらの中からユニークな成果が生まれる可能性も高いと思われる。

本原稿の作成にあたり資料をご提供いただいた大道博行、緑川克美、山口直洋、永島圭介の諸氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 辻本 忠編：X線ハンドブック（(財)電子科学研究所、1998）。
- 2) 高良和武編：実用シンクロトロン放射光（日刊工業新聞社、1997）。
- 3) 波岡 武、山下広順編：X線結像光学（培風館、1999）。
- 4) Y. Kato, H. Takuma and H. Daido, ed.: *X-Ray Lasers 1998* (Institute of Physics Publishing, 1998)。
- 5) G. Yuan, Y. Kato, K. Murai, H. Daido and R. Kodama: "Measurement of line widths of Ne-like germanium soft x-ray laser in slab targets," *J. Appl. Phys.*, **78** (1995) 3610-3616。
- 6) J. Zhang, E. Wolfram, A. MacPhee, J. Lin, M. H. Key, C. L. S. Lewis, J. Nilsen, R. M. N. O'Rourke, R. Smith, G. J. Tallents and J. S. Wark: "Experiments of the saturated Ni-like x-ray lasers driven by a double 75 ps laser pulse," *X-Ray Lasers 1998* (Institute of Physics Publishing, 1998) pp. 67-70。
- 7) S. Sebban, H. Daido, N. Sakaya, T. Norimatsu, T. Jitsuno, G.-Y. Yoon, K. Mima, Y. Kato, S. Wang, Y. Gu, G. Huang, H. Tang, K. Murai, A. Klisnick, Ph. Zeitoun, R. Butzbach, I. Uschmann, M. Vollbrecht, E. Forster, J. Nilsen, G. Zhang, T. Desai, H. Takenaka and F. Koike: "Studies on collisional pumping soft x-ray lasers at ILE," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **5** (1999) 1460-1468。
- 8) P. V. Nickles, V. N. Shlyaptsev, M. Kalachnikov, M.

- Schnurer, I. Will and W. Sandner: "Short-pulse x-ray laser at 32.6 nm based on transient gain in Ne-like titanium," *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 2748-2751.
- 9) J. Dunn, A. L. Osterheld, R. Shepherd, W. E. White, V. N. Shlyaptsev and R. E. Stewart: "Demonstration of x-ray amplification in transient gain nickel-like palladium scheme," *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 2825-2828.
 - 10) A. Sasaki, A. Zhidkov, T. Utsumi, M. Kado, K. Moribayashi, T. Tajima and H. Takuma: "Numerical simulation of high-gain transient collisional x-ray lasers," *Proc. SPIE*, **3886** (2000) 642-649.
 - 11) M. Kado, A. Nagashima, K. Nagashima, T. Kawachi, N. Hasegawa, M. Tanaka, T. Hosokai, K. Sukegawa, A. Sasaki and Y. Kato: "Development of a CPA Nd: glass/Ti: sapphire laser system for generation of coherent x-ray laser radiation," *Proc. SPIE*, **3776** (1999) 242-248.
 - 12) B. R. Benware, C. D. Macchietto, C. H. Moreno and J. J. Rocca: "Demonstration of a high average power tabletop soft x-ray laser," *Phys. Rev. Lett.*, **26** (1998) 5804-5807.
 - 13) K. Okasaka, T. Kawachi, H. Oyama, T. Hara, N. Yamaguchi and K. Ando: "Effect of multipulse waveform on gains of soft x-ray lines of lithium-like aluminum ions in recombining plasmas," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 70-81.
 - 14) N. Yamaguchi, T. Hara, T. Ohchi, C. Fujikawa and T. Sata: "Demonstration of x-ray amplification in an x-ray laser cavity pumped by a pulse-train yttrium aluminum garnet laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 5114-5116.
 - 15) T. Ohchi, N. Yamaguchi, C. Fujikawa and T. Hara: "Formation of microbeam using tabletop soft x-ray laser," *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **101-103** (1999) 943-947.
 - 16) N. Yamaguchi, A. Ogata, C. Fujikawa, T. Ohchi, K. Okasaka and T. Hara: "Scaling study on lithium-like x-ray laser pumped by pulse train laser," *X-Ray Lasers 1998*, ed. Y. Kato, *et al.* (Institute of Physics Publishing, 1998) pp. 219-222.
 - 17) T. Kawachi, K. Ando, C. Fujikawa, H. Oyama, N. Yamaguchi, T. Hara and Y. Aoyagi: "Observation of excited level populations of Li-like aluminium ions in a recombining plasma; role of atomic processes involving doubly excited levels of Be-like ions," *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **32** (1999) 553-562.
 - 18) Y. Nagata, K. Midorikawa, S. Kubodera, M. Obara, H. Tashiro and K. Toyoda: "Soft x-ray amplification of the Lyman-alpha transition by optical-field-induced ionization," *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 3774-3777.
 - 19) V. V. Korobkin, C. H. Nam and S. Suckwer: "Demonstration of soft x-ray lasing to ground state in Li III," *Phys. Rev. Lett.*, **77** (1996) 5206-5209.
 - 20) K. Midorikawa and Y. Nagata: "Spectroscopic investigation of an optical-field ionized x-ray laser with a microcapillary target," *Applications of High Field and Short Wavelength Sources*, ed. Di Mauro *et al.* (Plenum Press, New York, 1998) pp. 65-69.
 - 21) O. Maya, Y. Nagata, M. Obara, Y. Aoyagi and K. Midorikawa: "Ultra-high gain Ni-like soft x-ray laser by optical field ionization initiated transient collisional excitation scheme," *Proc. SPIE*, **3776** (1999) 2-9.
 - 22) B. Chichkov, A. Egbert, S. Meyer, B. Wellenhausen, L. Aschke, H.-J. Kunze and Y. Kato: "Soft x-ray lasers with charge transfer pumping in a mixture of clusters and atomic gases," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 1975-1978.
 - 23) A. Sagisaka, H. Honda, K. Kondo, H. Suzuki, K. Nagashima, T. Kawachi, A. Nagashima, Y. Kato and H. Takuma: "Observation of x-ray spectra from nitrogen clusters irradiated with high-intensity ultrashort laser pulses," *Appl. Phys. B*, **70** (2000) 549-554.
 - 24) K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka, T. Kase, Y. Akahane and H. Takuma: "100 TW, sub-20 fs Ti:sapphire laser system at 10 Hz," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1468-1470.
 - 25) D. Kim, C. Toth and C. P. J. Barty: "Population inversion between atomic inner-shell vacancy states created by electron-impact ionization and Coster-Kronig decay," *Phys. Rev. A*, **59** (1999) R4129-4132.
 - 26) K. Moribayashi, A. Sasaki and T. Tajima: "Ultrafast x-ray processes with hollow atoms," *Phys. Rev. A*, **58** (1998) 2007-2015.
 - 27) 永島圭介, 加藤義章: "X線レーザー", 平成12年度電気学会全国大会シンポジウム予稿集.
 - 28) K. Midorikawa, Y. Tamaki, J. Itatani, Y. Nagata and M. Obara: "Phase-matched high-order harmonic generation by guided intense femtosecond pulses," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **5** (1999) 1475-1485.
 - 29) Ch. Rose-Petruck, R. Jimenzu, A. Cavalleri, C. W. Siders, F. Raski, J. A. Squir, B. C. Walker, K. R. Wilson, and C. P. J. Barty: "Picosecond-milliangstrom lattice dynamics measured by ultrafast X-ray diffraction," *Nature*, **398** (1999) 310-313.

(2000年2月28日受理)