



5.12 時間コヒーレント X線レーザーの開発 Temporally coherent x-ray laser with the high order harmonic light

長谷川登、河内哲哉、岸本牧、助川鋼太、田中桃子、
越智義浩、錦野将元、川染勇人、永島圭介
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

Noboru HASEGAWA, Tetsuya KAWACHI, Maki KISHIMOTO, Kouta SUKEGAWA,
Momoko TANAKA, Yoshihiro OCHI, Masaharu NISHIKINO, HAYATO Kawazome, and
Keisuke NAGASHIMA
Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,
Japan Atomic Energy Research Institute
8-1 Umemidai Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0215 Japan

We obtained the neon-like manganese x-ray laser with the injection of the high order harmonic light as the seed x-ray at the wavelength of 26.9 nm for the purpose of generation of the temporally coherent x-ray laser. The x-ray amplifier, which has quite narrow spectral width, selected and amplified the temporally coherent mode of the harmonic light. The temporal coherence of the mode selected harmonic light was nearly transform limited pulse, and the obtained x-ray laser with the seed x-ray expected to be nearly temporally coherent x-ray.

Keywords: x-ray laser, temporal coherence, high-order harmonic light, x-ray amplifier.

1. 始めに

X線レーザーは単色性、輝度、短パルス性、干渉性（コヒーレンス）に優れた特性を持ち、X線光学素子の評価、X線干渉計、X線を用いた非線形現象の観察などへの応用が期待できる。しかし通常のX線レーザーは自然放出光を種光源とし、空間及び時間モードの制御がなされていないため、コヒーレンスについては改善の必要性がある。過去に我々はX線レーザーの空間コヒーレンスを向上させるために、部分空間コヒーレント光である通常のX線レーザーをX線レーザー媒質に種光として入射し、種光の空間コヒーレントな成分のみを空間的に切り出し、増幅することにより、完全空間コヒーレントなX線レーザーを波長 13.9nm において実現した^{[1],[2]}。同様にX線レーザーの時間コヒーレント化を実現するためにはX線レーザー媒質よりも広い周波数帯域を持つ部分時間コヒーレントX線から、時間コヒーレントな成分のみを周波数的に切り出し、増幅する必要がある。超短パルスレーザーとガスターゲットにより生成される高次高調波は、軟X線波長域においてもほぼ完全な空間コヒーレンスを有し^[3]、かつフーリエ限界の数倍程度のパルス幅を有する部分時間コヒーレント光であることが実験的に示されているため^[4]、時間コヒーレントX線レーザーを生成するための種光源として最適である。

本研究では、ネオン様マンガンX線レーザー媒質にチタンサファイアレーザーの第 29 次高次高調波を種光として入射し、周波数選択を伴った増幅を実験的に確認し、得られたX線レーザーの時間コヒーレンスについての考察を行った。

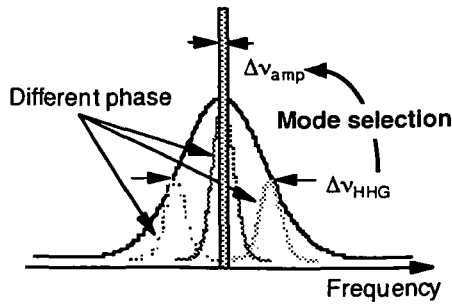


図1) 周波数選択の概略図。高次高調波の周波数帯域幅 (Δv_{HHG}) に位相の異なるモードを多数有しているが、狭い周波数帯域内での位相はほぼ等しい。X線増幅媒質は高次高調波の中の一部の周波数帯域 (Δv_{amp}) のみを選択的に増幅する。

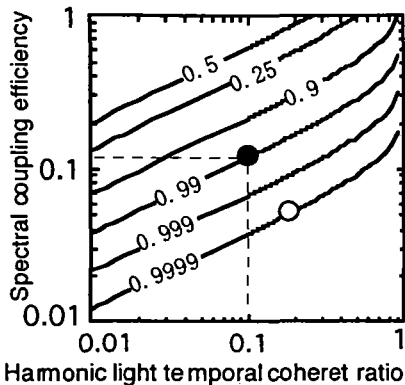


図2) 高次高調波の時間コヒーレンス、X線増幅媒質の増幅効率、周波数選択された高次高調波の時間コヒーレンス (グラフ中の数字) の関係。

2. 時間コヒーレントX線レーザー

X線レーザーの時間コヒーレンスの向上のための周波数選択についての概略を図1に示す。部分時間コヒーレント光である高次高調波はX線レーザーと比較して広い周波数帯域内に位相の異なるモードを多数保有しているが、個々のモード間の位相差は周波数変換される際に受ける媒質の分散に起因しているため、狭い周波数帯域内での位相差は非常に小さい。故に、周波数帯域の狭いX線レーザー媒質により、位相差の小さいモード(時間コヒーレントな成分)のみを切り出し、増幅することが可能である。図2に種光として入射する高次高調波の時間コヒーレンス(パルス幅に対する時間コヒーレント成分の比率)、X線レーザー媒質の増幅効率、周波数選択された高次高調波の時間コヒーレンスの関係を示す。高次高調波とX線レーザー媒質はそれぞれガウス型の周波数波形を持つと仮定した。X線レーザー媒質の増幅効率は、高次高調波とX線レーザー媒質の周波数帯域幅の比によって表され、この値の減少に伴い、得られるX線レーザーの時間コヒーレンスは向上する。フーリエ限界の10倍程度のパルス幅を持つ部分時間コヒーレント光(時間コヒーレンス: 0.1)を種光として用いた場合、増幅効率を10%程度とすることで、パルス幅に対して99%の時間コヒーレンスを持つX線レーザーが得られる(図2中の●)。

3. 時間コヒーレントX線レーザー生成実験

高次高調波を用いたコヒーレントX線レーザーの配置図を図3に示す。アルゴンガスターゲットに入射されたチタンサファイア(Ti:S)レーザーから生成された高次高調波が、ネオジウムガラス(Nd:Glass)レーザーをマンガントarget上(幅200 μ m、長さ5mm)に集光することにより得られるX線レーザー媒質に入射され、周波数選択と増幅を受ける。チタンサファイアレーザーの入射エネルギーは2.5mJ、中心波長780.1nm、波長幅13nm、パルス幅80fs、集光サイズは半値全幅にて100 μ m、集光強度は 2×10^{14} W/cm²であった。ガラスレーザーはプラズマ生成用のプリパルス(エネルギー: 1J)とイオン励起用のメインパルス(エネルギー: 7J)から成り、それぞれのパルス幅は10ps、メインパルスの照射強度は 7×10^{13} W/cm²であった。

生成されたX線レーザーは、球面鏡、平面結像型回折格子、背面照射型CCDカメラを組み合わせた軟X線射入射分光器により観測される。波長分解能は0.04nmであり、第29次高調波の線幅(0.12nm)に対して十分な波長分解能を有している。本分光器は波長分解と同時に空間広がり(空間広がり)を観測することが可能であり、種光の増幅の有無は空間広がり(空間広がり)の差として観測された。

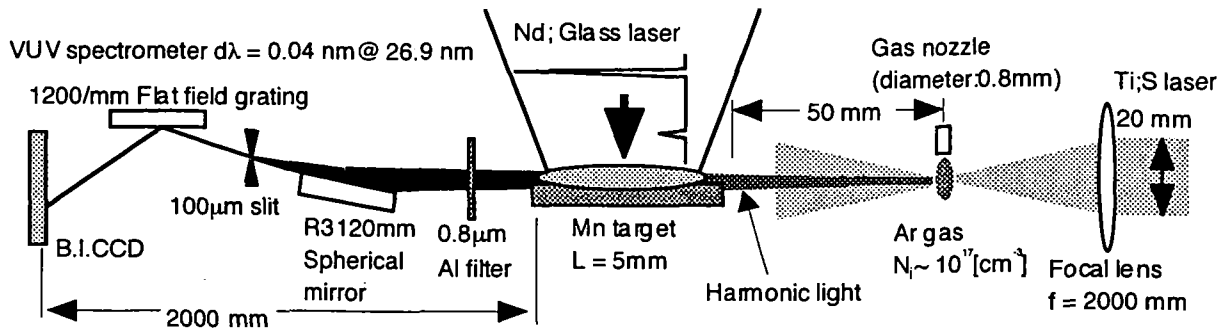


図3) 高次高調波を種光とした時間コヒーレントX線レーザー生成実験配置。

種光として用いた第 29 次高調波は分光器を用いて、中心波長 26.9 nm、波長幅 0.12 nm、エネルギー 0.1 nJ、広がり角 1.9 mrad と計測された。ガスターゲットから 50mm 後方に配置された増幅媒質入口での高次高調波のビーム直径は約 100 μm であり、増幅媒質の直径約 200 μm 以下であることから、高次高調波と X 線レーザー媒質の空間的な結合率は 1 となり、周波数帯域の比が高次高調波の種光としての効率を決定する。ネオン様マンガンの波長幅をネオン様セレン（発振波長：20.6 nm）の増幅線幅 0.0056 nm^[5] と等しいと仮定すると、周波数帯域の比は 0.047 であり、今回用いた第 29 次高調波の 4.7% (4.7 pJ) が種光として有効であったと推測される。この場合、X 線レーザー媒質入口での有効な種光の強度は $7.4 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ であり、X 線レーザー媒質からの自然放出光強度 ($1.5 \times 10^4 \text{W/cm}^2$) と比較して十分に大きく、種光として十分な光量であると言える。

ガラスレーザーがマンガンターゲットに入射された時刻から 30ps 後にチタンサファイアレーザーが増幅媒質入口に到達する場合に観測された X 線レーザーの空間広がりについての観測結果を図 4 に示す。第 29 次高調波は増幅対象であり、同一ショット内での比較を行うため、同等の空間広がりを持つ第 27 次高調波を比較対象とした。種光を入射しない場合 (4.6 mrad) と比較して、種光を入射した場合 (1.9 mrad) に広がり角の減少が確認された。また、観測された X 線レーザーの出力は約 3 nJ であり、入力された高次高調波 (0.1nJ) と比較して十分に大きいことから、広がり角の減少は小さい広がり角を持った種光が増幅されたことに起因すると言える。種光と X 線レーザーの出力比から、X 線レーザー媒質の増幅率 (G) は 640 倍、利得長積 (gl) は 6.5、利得 (g) は 13 /cm と求められ、この値はネオン様マンガンの X 線レーザー単独での利得測定の結果 (g=12) とほぼ一致している。

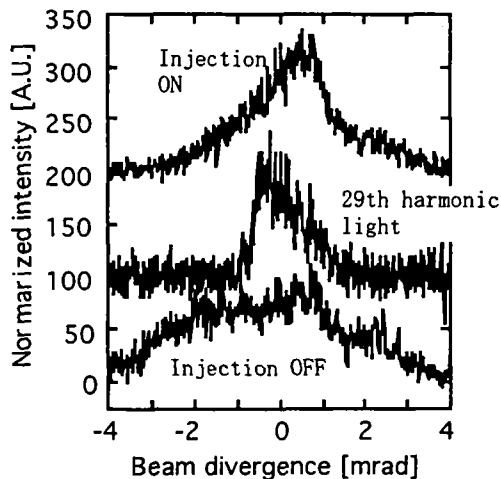


図4) 種光 (29次高調波) の有無による X 線レーザーの広がり角の比較。種光無しの時 4.6mrad、種光 1.4mrad、種光有りの時 1.9mrad。

4. 考察

高次高調波の周波数選択を伴う増幅が確認されたことは、X 線レーザーの時間コヒーレンスの向上を意味する。種光として用いた第 29 次高調波が基本波と同等のパルス幅を持つと仮定した場合、その時間コヒーレンスはパルス幅に対して 18% である。高調波の 4.7% の周波数帯域を持つ X 線レーザー媒質による周波数選択により、時間コヒーレンスはほぼ 100% に向上する (図 2 中○)。

また、周波数選択された高次高調波が増幅媒質から受ける群速度分散は、X線レーザーの波長に対して十分に小さい ($\sim 0.01 \lambda_{\text{XRL}}$) ため、増幅後にも時間コヒーレンスは保たれる。更に、計測から得られた増幅率からスペクトルの狭帯域化を考慮することで、得られた時間コヒーレントX線レーザーの線幅及びパルス幅はそれぞれ、0.0029 nm、360fs と推測できる。

今回の実験では、高次高調波の増幅効率 4.7%を得ているが、時間コヒーレンスをX線レーザーパルスの 99%とすることにより、増幅効率は約 15%に改善が可能である。故に、ピコ秒程度の基本波により生成される周波数帯域の狭い高次高調波を用いることにより、より効率の良い時間コヒーレントX線レーザーの生成が可能である。

4. 結論

今回、ネオン様マンガンX線レーザー媒質を用いた高次高調波の増幅実験を行い、X線レーザーの広がり角の改善から、高次高調波の増幅を実験的に確認した。周波数選択による時間コヒーレントX線レーザー生成の手法が確立したことにより、時間空間コヒーレントなX線レーザーの生成が期待できる。

参考文献

- [1] M. Tanaka *et al.*, Opt. Lett. 28, 1680 (2003).
- [2] M. Nishikino *et al.*, Phys. Rev. A 68, 61802 (2003).
- [3] R. A. Bartels *et al.*, Science Vol.297, 19, 376, 2002.
- [4] T. Sekikawa, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83, 2564 (1999).
- [5] Jeffrey A. Kochet *et al.*, Phys. Rev. A 50 (1994) 1877