

### 31. X線レーザーの高コヒーレント化

#### Higher coherent x-ray laser

長谷川 登、永島 圭介、河内 哲哉、加道 雅孝、田中 桃子、助川 鋼太、  
陸 培祥、唐 華経、高橋 謙次郎、難波 慎一、長島 章、加藤 義章

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見台8-1

HASEGAWA Noboru, NAGASHIMA Keisuke, KAWACHI Tetsuya, KADO Masataka,  
TANAKA Momoko, SUKEGAWA Kouta, LU Peixiang, TANG Huajing, TAKAHASHI  
Kenjiro, NAMBA Shinichi, NAGASHIMA Akira and KATO Yoshiaki

Advanced Photon Research Center Kansai Research Establishment,

Japan Atomic Energy Research Institute

8-1, Umemidai Kuzu-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0215, Japan

X-ray lasers generated by an ultra short pulse laser have advantages such as monochromatic, short pulse duration, small beam divergence, high intensity, and coherence. Spatial coherence is most important for applications. we have investigated the transient collisional excitation (TCE) scheme x-ray laser lasing from Ne-like titanium (31.6nm), Ne-like silver (13.9nm) and tin (11.9nm). However, the spatial coherence was not so good with this scheme. We have been studying to improve the spatial coherence of the x-ray laser and have proposed to use coherent seed light tuned to the x-ray laser wavelength generated from higher harmonics generation (HHG), which is introduced to the x-ray laser medium (Ne-like titanium, Ni-like silver plasmas). We present about the theoretical study of the coupling efficiency HHG light with x-ray laser medium.

Keywords : X-ray laser, Higher harmonics generation, Coherence, Coupling efficiency.

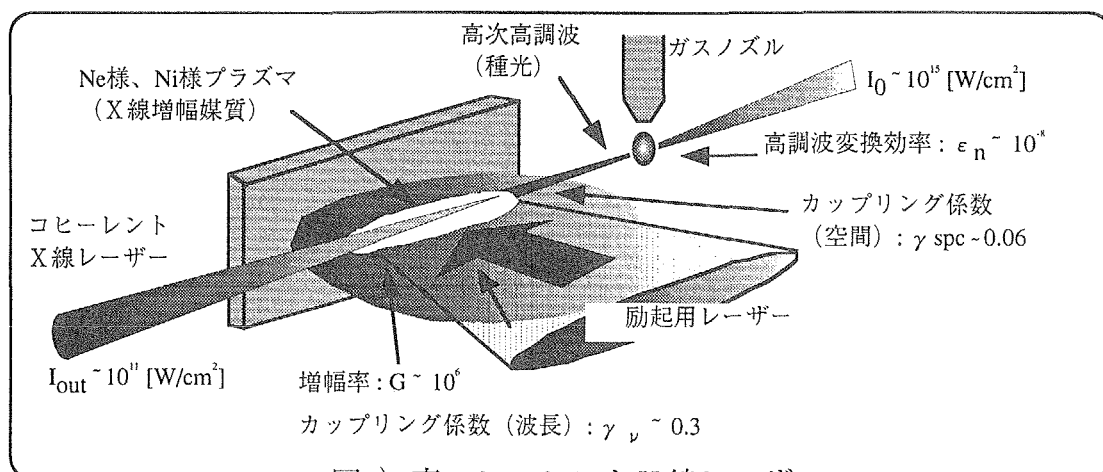


図1) 高コヒーレントX線レーザー

## 1.始めに

超短パルスX線レーザーは通常のX線光源と比較して、高輝度、単色性、指向性、高コヒーレンス、等の優れた特性を持っている。特に高コヒーレンスは他のX線光源にない優れた点であり、応用する際に最も重要視される点である。現在、光量子科学研究センターで実現している平板ターゲットを用いた過渡利得型X線レーザーは輝度、単色性、指向性に優れるが、コヒーレンスでは十分な結果が得られていない。本研究では、コヒーレンスに優れる高次高調波をX線レーザーの種光とすることでX線レーザーの高コヒーレント化を行う。

## 2.高コヒーレント化

可視域のレーザーでは発信器により発生した光を増幅器で増幅することでコヒーレンスを保ったまま高出力を得ている。現在実現されているX線レーザーは平板ターゲットに励起用レーザーを線集光させて発生した線状のプラズマから直接生成されるものがほとんどである。この場合可視域のレーザーとは異なり、発振源がレーザー媒質内の不特定領域から発生した自然放出光であるため、高コヒーレント光を得ることは原理的に困難である。コヒーレンスの高い光を得るためには、レーザー媒質内の増幅領域及び増幅時間を外部から制御する必要があり、それには可視域のレーザーと同様に、高いコヒーレンスを持つ光を種光としてX線レーザー媒質に入射することが必要である。コヒーレントX線レーザーの種光としては、(1)高コヒーレンス、(2)パルス幅がX線レーザーの利得発生時間と同程度、(3)波長、波長幅がX線レーザーと同程度、であることが望ましい。これらの条件を満たす光源として高次高調波が挙げられる。高次高調波は基本波である可視域レーザーと同程度のパルス幅とコヒーレンスを有し、基本波の中心波長を変えることでX線レーザーと波長を合わせることも可能である。現在光量子科学研究センターにおいて、波長可変ピコ秒チタンサファイアレーザーが開発中であり、これにより発生する高次高調波は当研究の光源として最適である。図1)に高調波を種光としたコヒーレントX線レーザーの概略図を示す。

## 3.X線レーザー媒質とのカップリング

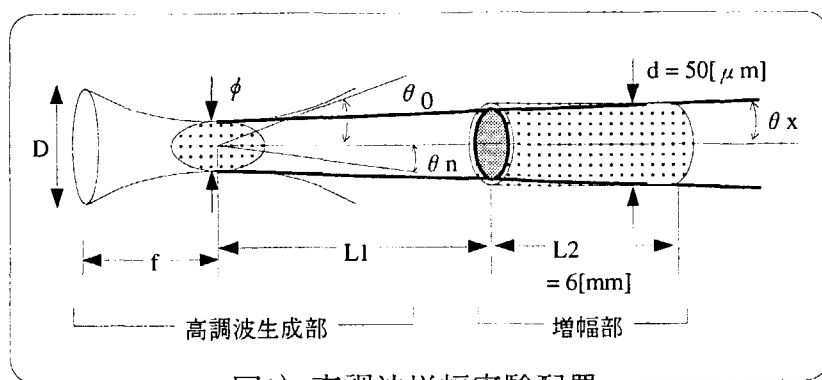


図2) 高調波増幅実験配置

実際に高次高調波を増幅する際には、種光とX線レーザー媒質との空間、波長、時間におけるマッチングと、媒質内に入射するコヒーレント光と媒質内での自然放出光との強度比が重要となる。前者は全体のエネルギー効率を、後者はコヒーレンスを決定する。図2)に実際の配置を示し、これ

らの値の評価を行う。現在光量子科学研究センターでは超短パルスレーザーを用いた過渡利得方式Ne様TiX線レーザー ( $\lambda = 32.6[\text{nm}]$ 、利得長 $6[\text{mm}]$ 、利得領域 $50[\mu\text{m}\phi]$ )の飽和増幅

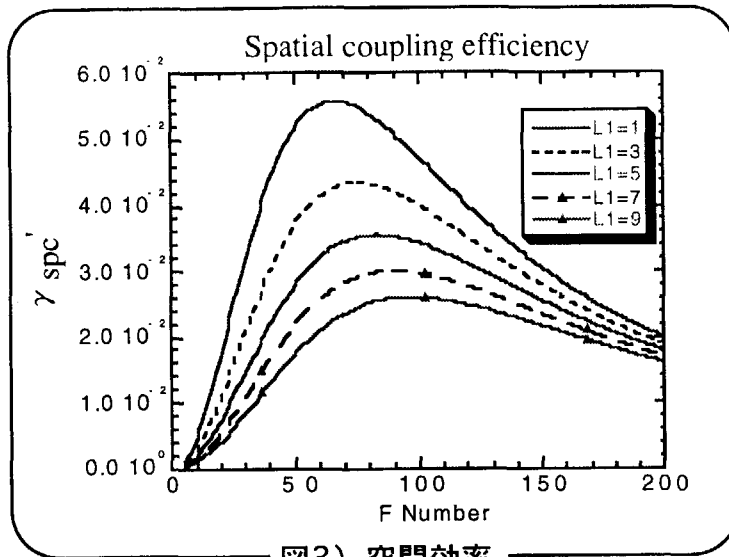


図3) 空間効率

を達成しているの、これを増幅媒質として用いることにする。

空間に対する効率  $\gamma_{\text{spc}}$  は、高次高調波の発散角を  $\theta_n$ 、増幅媒質を通過する高次高調波の見込み立体角を  $\theta_s$  とすれば  $\gamma_{\text{spc}} = (\theta_s / \theta_n)^2$  と表せる。高調波の発生領域を回折限界の2倍と仮定した場合の空間に対する効率を図3) に示す。実際には  $\theta_n = \alpha \theta_0$  ( $\alpha < 1$ ) であり、 $\gamma_{\text{spc}} = (\gamma_{\text{spc}}) / \alpha^2$  となる。高次高調波とX線レーザー媒質との距離を1[mm]、集光系がF60の

時、 $\gamma_{\text{spc}} = 5.6 \times 10^2$  となる。この時、基本波の集光径は約50 [ $\mu\text{m}$ ] であり、サブテラワット級のレーザーでも高次高調波の生成に必要な照射強度  $I_0 = 10^{15} [\text{W}/\text{cm}^2]$  を得ることが出来る。

波長に関する効率  $\gamma_\nu$  は、X線レーザーの発振線と高調波の周波数と帯域をそれぞれ  $\Delta \nu_s$ 、 $\nu_s$ 、 $\Delta \nu_n$ 、 $\nu_n$  とすると、 $\gamma_\nu = (\Delta \nu_s / \nu_s) / (\Delta \nu_n / \nu_n)$  と表せる。Ne-like Tiの場合、基本波の中心波長  $\lambda_0$  は815[nm] であり (25次で32.6[nm])、 $\Delta \nu_s / \nu_s = 3 \times 10^4$  である。フーリエ限界パルス ( $\Delta \nu_s \tau_0 = 0.44$ ) を想定し、 $(\Delta \nu_s / \nu_s) = \beta (\Delta \nu_n / \nu_n)$  とすると、 $\gamma_\nu = 0.33 \beta / \tau_0$  と

なる。高次高調波と基本波の波長幅の比  $\beta$  は1.0以下であり<sup>11)</sup>、 $\gamma_\nu \sim 0.33$  ( $\tau_0 = 1.0$  [ps]) が得られる。

時間のマッチングに関しては図4) に示した様に、Ne-like Tiを過渡利得領域で増幅媒質とした場合の利得時間は10 [ps]程度であり、高次高調波の持続時間 (基本波の時間幅と同程度  $\sim 1.0$  [ps]) よりも長い為、効率は1.0となる。

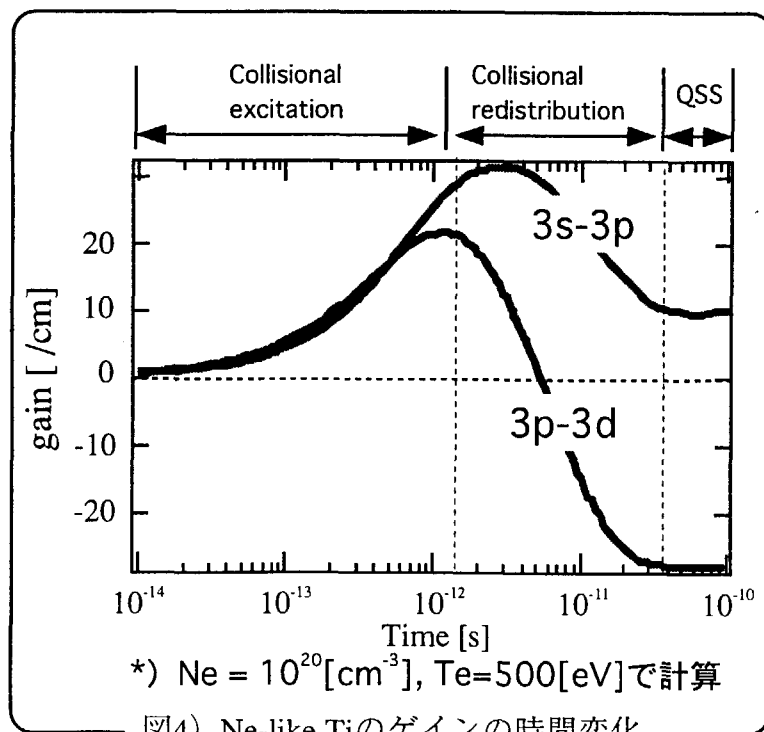


図4) Ne-like Tiのゲインの時間変化

以上より、種光として有効な高次高調波の強度： $I_n = I_0 \epsilon_n \gamma_{spc} \gamma_l$ （高次高調波の効率： $\epsilon_n \sim 10^8$ 、 $\gamma_{spc} = 5.6 \times 10^2$ 、 $\gamma_l = 0.33$ ）は、 $1.7 \times 10^4$  [W/cm<sup>2</sup>]となる。更に、X線レーザー媒質内での増幅倍率を現在得られている値、 $10^6$ 程度とすると、得られるコヒーレント光の出力は $1.7 \times 10^{10}$  [W/cm<sup>2</sup>]となり、既存のX線レーザー（ $\sim 10^{10}$  [W/cm<sup>2</sup>]）と同等以上の出力が得られる。特にコヒーレンスを用いた応用を考えた場合、種光となる高次高調波のパルス幅内での自然放出光の照射強度はコヒーレンスを決定する重要な要素である。増幅媒質からの自然放出光の強度は、 $I_{se} = A L N_i (S / 4 \pi L_2^2) \tau_{se}$ と表され、実効的な増幅倍率を持つ領域に入射される自然放出光の発生領域LはNe-like Tiの増幅率曲線<sup>[1]</sup>から0 ~ 400 [ $\mu$ m]と推測される。Ne-like Ti 3p-3s 自然放出係数は $A = 4.1 \times 10^8$  [1/s]であり、イオン密度 $N_i = 10^{20}$  [cm<sup>-3</sup>]、利得時間 $\tau_{se} = 10$  [ps]とすると、 $I_{se} = 2.1 \times 10^{10}$  [photon/cm<sup>2</sup>/10ps] =  $1.1 \times 10^4$  [W/cm<sup>2</sup>]となる。高次高調波と自然放出光の照射強度比は15であり、コヒーレント成分が勝っていることがわかる。利得発生時間が種光と比較して10倍程度長いいため、全体の光子数としては同程度になるが、干渉を用いた応用を行う際にはコヒーレントな時間領域（種光のパルス幅）のみが有効なため、問題にはならない。

#### 4.今後の実験予定

現在開発中の波長可変ピコ秒チタンサファイアレーザーを用いた高次高調波の発生実験を行う。本レーザーは波長、波長幅、パルス幅が可変であり、これらの調整によりX線レーザーの種光としての最適化を行う。これに平行して、分光器に設置するダブルスリットによるヤングの干渉を利用したコヒーレンス測定<sup>[2]</sup>も行う。これらの実験の後に、ガラスレーザー励起のX線レーザー媒質を用いた増幅実験を平成13年度内に行う予定である。

[1] C. G. Wahlstrom, J. Larsson, A. Persson, T. Starczewski, and S. Svanberg, Phys. Rev. A. 48,4709 (1993).

[2] James Dunn, Albert L. Osterheld, Ronnie Shepherd, William E. White, Vyacheslav N. Shlyaptsev, Anthony B. Bullock, and Richard E. Stewart, SPIE Proceedings 3156, 114-120 (1997)

[3] T. Ditmire, E. T. Gumbrell, R. A. Smith, J. W. G. Tisch, D. D. Meyerhofer, and M. H. R. Hutchinson, Phys. Rev. Lett. 77, 4756 (1996)