

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540497

研究課題名(和文) 薄膜を用いた短パルスコヒーレントX線発生のための基礎プロセスの解明

研究課題名(英文) Investigation of the basic processes for the short pulse coherent x-ray generation with thin-foil

研究代表者

匂坂 明人 (SAGISAKA AKITO)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹

研究者番号：20354970

研究成果の概要：

薄膜を用いた短パルスコヒーレントX線源として高次高調波に注目し、その発生のための基礎プロセスに関する研究を行った。最初に、レーザーのプリパルスによって生成されるプリフォームドプラズマを計測し、その電子密度分布と自然放出光の増幅(ASE)成分との関連性を確認した。次に、高強度レーザーの照射条件を変えて4次までの高調波スペクトルの形状変化を測定し、薄膜からの高調波発生に必要なレーザー照射条件を調べた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	330,000	2,630,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：高強度レーザー、高次高調波、プリフォームドプラズマ

1. 研究開始当初の背景

超短パルス高強度レーザーと物質との相互作用を調べる研究は、超高光電場下の物理学(High Field Physics)として世界的に注目され、精力的に研究されている。このときのレーザー電場は原子内電場と同程度か、又はそれ以上に達し、高エネルギー粒子(イオン・電子)発生、高輝度X線発生、X線レーザー等の様々な現象が観測されている。高輝度X線発生のなかでも短パルスコヒーレントX線である高次高調波発生については、超短パルス高強度レーザーとガス媒質との相互作用によるアト秒領域の単一パルス発生が報告され[1-3]、アト秒物理の展開が期待されている。他方、近年のレーザーシステム

開発の進歩により相対論的強度のレーザー電場生成が可能となり、様々な理論的提案や実験結果が報告されている。ここで、レーザーの波長が800nmの場合、電子の運動に相対論効果が現れる強度は、 $\sim 2 \times 10^{18}$ W/cm²となる。相対論的強度での超短パルス高強度レーザーと薄膜との相互作用により、短パルスの高次高調波発生の提案が示された[4]。このモデルによると、短パルスの高次高調波発生には、高強度レーザーパルスが固体密度の薄膜と直接的に相互作用する必要がある。この際に問題となるのは、レーザーのメインパルスに先行するプリパルスによって生成されるプリフォームドプラズマであり、プラズマ膨張による密度低下を極力抑える必要がある。

レーザーのプリパルスとプリフォームドプラズマとの関連性を調べることは、薄膜を用いた高強度領域での高次高調波発生にとって重要である。

- [1] M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz, *Nature*, **414**, 509, (2001).
- [2] R. Kienberger, E. Goulielmakis, M. Uiberacker, A. Baltuska, V. Yakovlev, F. Bammer, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz, *Nature*, **427**, 817, (2004).
- [3] T. Sekikawa, A. Kosuge, T. Kanai, and S. Watanabe, *Nature*, **432**, 605, (2004).
- [4] A. S. Pirozhkov, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, M. Mori, A. Sagisaka, and H. Daido, *Phys. Lett. A* **349**, 256 (2006).

2. 研究の目的

本研究では、薄膜を用いた短パルスコヒーレントX線源として高次高調波に注目し、その発生のための基礎プロセスに関する研究を行う。薄膜からの高次高調波発生に大きく影響するのは、プリフォームドプラズマの生成である。そのため、高調波のスペクトル測定に先立って、プリパルスによって生成されるプリフォームドプラズマを計測し、プリパルスとの関連性を調べる。具体的には、プリフォームドプラズマの電子密度の空間分布を干渉計測により評価する。次に、高強度レーザーの照射条件に対する高調波のスペクトル形状の変化を測定し、薄膜からの高調波発生に必要なレーザー照射条件を探る。

3. 研究の方法

(1) プリフォームドプラズマ計測

超短パルス高強度レーザーを薄膜ターゲットに照射した際のプリフォームドプラズマの電子密度分布を、短パルスのプローブ光による干渉計測により評価した。実験は、図1に示すようにチタンサファイアレーザー（中心波長 800nm、パルス幅~250fs）を集光パルスと計測用のプローブ光に分けて行った。集光パルスは、軸外し放物面鏡を用いてチタンの薄膜ターゲット（厚み 3 μm ）に照射した。集光パルスの集光径は 15 μm x 11 μm （半値全幅）であり、エネルギー210mJ での集光強度は $\sim 3 \times 10^{17}$ W/cm²であった。メインパルスに対する自然放出光の増幅（ASE）成分のレベルは、3 次のクロスコリレーターにより測

定し、 $\sim 5 \times 10^{-6}$ であった。プローブ光は2倍高調波（400nm）を用いて、ターゲット表面を通過させ、干渉計測によって測定した。干渉縞はバイプリズムを用いてレーザービームの波面を傾けることによって生成した。集光パルスとプローブ光の時間差を調整することにより、メインパルスの約 50ps 前でのプリフォームドプラズマの測定を行った。

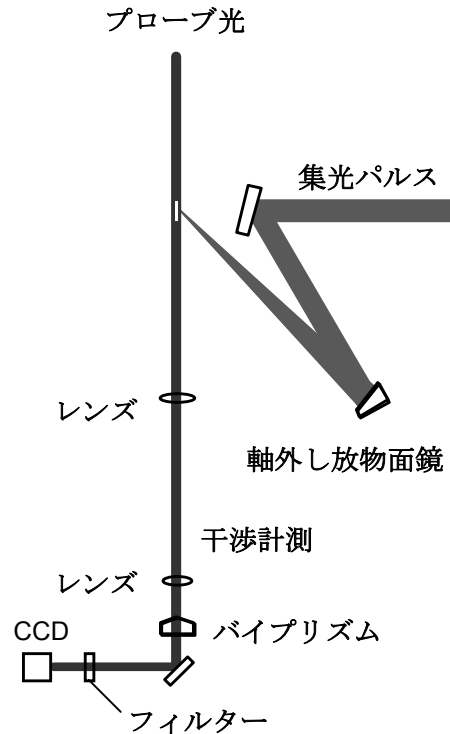


図1 プリフォームドプラズマ計測のための実験配置

(2) 高調波測定（ターゲット位置の変更）

高調波のスペクトル測定実験では、チタンサファイアレーザー（中心波長 800nm、パルス幅 50fs）を用いてポリイミドの薄膜ターゲット（厚み 7.5 μm ）に集光照射した。集光径は、4 μm x 6 μm （半値全幅）であり、エネルギーは ~ 880 mJであった。分光器をレーザー反射方向に設置し、詳細なスペクトル形状の測定を行うため、4次までの高調波スペクトルを計測した。分光器の相対強度については、ランプを用いて校正を行っている。薄膜ターゲット位置をレーザー集光位置からずらし、高調波のスペクトル形状の変化を測定した。

(3) 高調波測定（パルス幅の変更）

チタンサファイアレーザー（中心波長 800nm）のパルス幅を変えて、厚み 1.5 μm のポリエチレンテレフタレートにアルミニウム（30nm）を蒸着した薄膜ターゲットに集光

照射した。集光径は、 $4\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ (半値全幅) であり、レーザー強度は、パルス幅 $\sim 30\text{fs}$ 、エネルギー $\sim 1\text{J}$ の場合、 $\sim 1 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ に達する。ASE 成分のレベルは $< 10^{-8}$ であった。分光器をレーザー反射方向に設置し、詳細なスペクトル形状の測定を行うため、4 次までの高調波スペクトルを計測した。レーザーのパルス幅をパルス圧縮器内の回折格子対の間隔を変えることにより $\sim 30\text{fs}$ 、 $\sim 100\text{fs}$ 、 $\sim 500\text{fs}$ と変え、高調波のスペクトル形状の変化を測定した。

4. 研究成果

(1) プリフォームドプラズマ計測

プリフォームドプラズマ計測では、メインパルスよりも時間的に前にある ASE 成分の時間幅が $\sim 2\text{ns}$ と $\sim 0.5\text{ns}$ の場合について、干渉像を測定した。CCD カメラを用いて得られた、ASE 成分の時間幅が $\sim 0.5\text{ns}$ での干渉像を図 2 に示す。これは、メインパルス照射よりもおよそ 50ps 前での干渉像である。干渉縞の間隔は $\sim 18\mu\text{m}$ であり、図の点線はターゲット位置を示す。干渉像から位相分布に変換し、アーベル変換により電子密度分布を求めた。電子密度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ でのプラズマサイズは、 $\sim 2\text{ns}$ で $\sim 170\mu\text{m}$ 、 $\sim 0.5\text{ns}$ で $\sim 90\mu\text{m}$ であった。また、計測できた電子密度の上限は、 $\sim 7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であった。これより、高密度領域 ($> 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) の計測については、プローブ光のさらなる短波長化が必要であることがわかった。

干渉計測の結果、レーザー入射側にプリフォームドプラズマが生成されていることがわかった。そして、メインパルスよりも時間的に前にある ASE 成分の時間幅を $\sim 2\text{ns}$ から $\sim 0.5\text{ns}$ へ調整することで、プリフォームドプラズマの大きさを抑制できることを確認した。また、プリフォームドプラズマの大きさは、プリパルスの中でも ASE 成分が大きく影響していると考えられる。ASE 成分とプリフォームドプラズマの関連性が得られたことは、高調波の発生量最適化につながる。

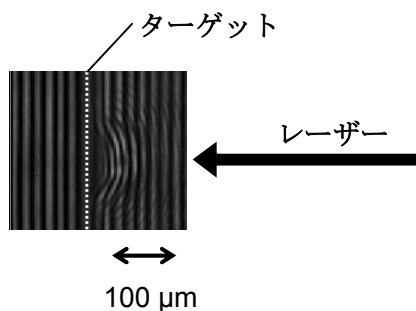


図 2 メインパルスよりもおよそ 50ps 前でのプリフォームドプラズマの干渉像

(2) 高調波測定 (ターゲット位置の変更)

高調波のスペクトル測定実験では、厚み $7.5\mu\text{m}$ のポリイミド薄膜ターゲットの位置をレーザー集光位置からずらすことで、レーザーのピーク強度とプリフォームドプラズマに大きな影響を与える ASE 強度を減少させた。そしてレーザーのピーク強度と ASE 強度を制御し、4 次高調波までのスペクトル形状の変化を測定した。

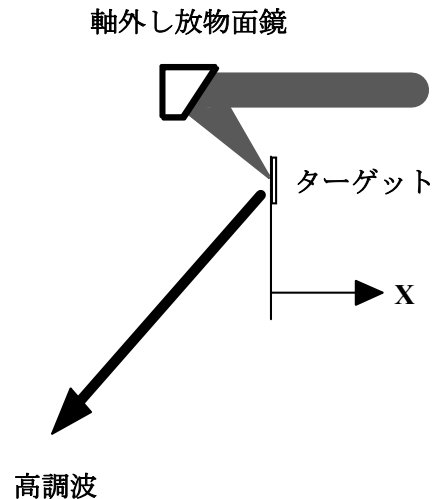


図 3 高調波計測の実験配置

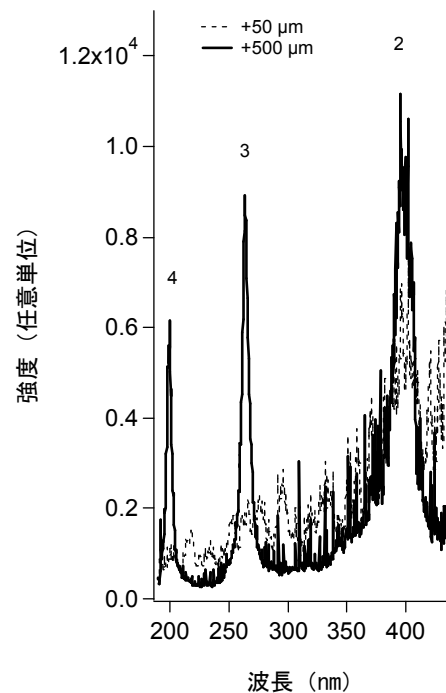


図 4 ターゲット位置 $+50\mu\text{m}$ と $+500\mu\text{m}$ での高調波スペクトル

図3に示すように、薄膜ターゲットの位置 x を+50 μm 、+300 μm 、+500 μm と変え、反射方向に発生した高調波のスペクトル形状を測定した。それぞれのレーザー強度は、 $\sim 1.5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 、 $\sim 4 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 、 $\sim 1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ である。また ASE 強度は、 $\sim 7.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 、 $\sim 2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 、 $\sim 5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ に相当する。ASE 強度が低いほど、プリフォームドプラズマのスケール長は短くなると考えられる。

図4に、ターゲット位置+50 μm (点線) と +500 μm (実線) で得られたスペクトルを示す。ターゲット位置が+50 μm の場合、ピーク強度 ($\sim 1.5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$) が高く、ASE 強度 ($\sim 7.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$) も高くなり、高調波のスペクトルは主に長波長側へ広がり、スペクトル幅が広くなるとともに強度が減少した。これは、メインパルスとプリフォームドプラズマとの相互作用の影響が無視できなくなるためだと考えられる。他方、ターゲット位置 x を+300 μm や+500 μm に変更すると、高調波の強度が増加していくことを確認した。ターゲット位置 x を+500 μm とした場合、レーザーのピーク強度 ($\sim 1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$) と ASE 強度 ($\sim 5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$) が低下し、プリフォームドプラズマのスケール長が減少するとともにメインパルスとプリフォームドプラズマとの相互作用の影響が抑えられるため、高調波強度が増加したと考えられる (図4)。相対論的強度領域となるピーク強度 $\sim 1.5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ での高調波発生を実現させるためには、ASE 強度をさらに低下させ、プリフォームドプラズマを抑える必要があると予想される。

ターゲット位置をレーザー集光位置から変え、レーザーのピーク強度と ASE 強度を減少させることで、薄膜からの高調波ピークの発生を確認した。本実験で行った薄膜ターゲットからの高調波発生最適化は、さらなる短波長化につながる。また、ターゲット位置に対する高調波のスペクトル形状の測定から、薄膜からの高調波発生に必要な条件として、プリフォームドプラズマに関連する ASE の制御が考えられる。ASE を制御し、プリフォームドプラズマを抑えることにより、相対論的強度領域での高調波発生が期待される。

(3) 高調波測定 (パルス幅の変更)

レーザーのエネルギーを一定にし、パルス幅を $\sim 30\text{fs}$ 、 $\sim 100\text{fs}$ 、 $\sim 500\text{fs}$ と変え、レーザーのピーク強度を変化させて薄膜への照射を行った。この場合、プリフォームドプラズマに影響を与える ASE 強度は、各パルス幅においてほぼ一定となっていると予想される。

図5に、パルス幅 $\sim 30\text{fs}$ と $\sim 500\text{fs}$ で得られたスペクトルを示す。パルス幅を $\sim 30\text{fs}$ と $\sim 100\text{fs}$ に設定した場合、どちらも高調波のスペクトルが主に長波長側へ広がり、スペクトル幅が広くなるとともに強度が減少した。こ

れに対し、パルス幅を $\sim 500\text{fs}$ に設定し、レーザーのピーク強度を下げた場合、高調波スペクトルの広がり狭まり、強度が増加することを確認した (図5)。パルス幅を $\sim 30\text{fs}$ や $\sim 100\text{fs}$ に設定した場合に高調波スペクトルが広がり、強度が減少するのは、レーザーのピーク強度が増加することで、メインパルスとプリフォームドプラズマとの相互作用の影響が無視できなくなるためだと考えられる。パルス幅を短くし、ピーク強度を上げた場合での高調波発生には、さらに ASE 強度を低下させ、プリフォームドプラズマを抑える必要があると予想される。

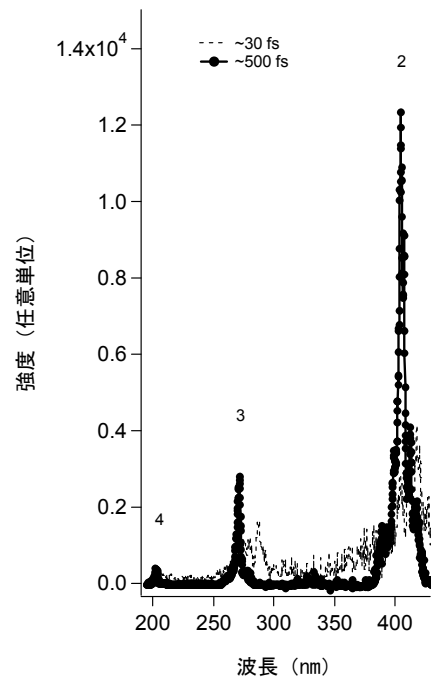


図5 パルス幅 $\sim 30\text{fs}$ と $\sim 500\text{fs}$ での高調波スペクトル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① A. Sagisaka, A. S. Pirozhkov, J. Ma, M. Mori, A. Yogo, K. Ogura, S. Orimo, M. Nishiuchi, H. Kiriya, S. Kanazawa, S. Kondo, Y. Nakai, T. Shimomura, M. Tanoue, A. Akutsu, H. Okada, T. Motomura, T. Kawachi, H. Daido, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, and H. Nagatomo, "Observation of UV harmonics from a thin-foil target in the high-intensity laser-driven proton generation", to be published in Journal of Plasma and

- Fusion Research Series. 査読有り
- ② A. Sagisaka, H. Nagatomo, H. Daido, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, S. Orimo, M. Mori, M. Nishiuchi, A. Yogo, and M. Kado, "Experimental and computational characterization of hydrodynamic expansion of a preformed plasma from thin-foil target for laser-driven proton acceleration", to be published in Journal of Plasma Physics. 査読有り
- ③ A. Sagisaka, H. Daido, A. S. Pirozhkov, M. Mori, A. Yogo, K. Ogura, S. Orimo, M. Nishiuchi, J. Ma, H. Kiriya, S. Kanazawa, S. Kondo, Y. Nakai, T. Shimomura, M. Tanoue, A. Akutsu, H. Okada, T. Motomura, T. Kawachi, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, S. Nashima, M. Hosoda, H. Nagatomo, Y. Oishi, K. Nemoto, I. W. Choi, S. K. Lee, and J. Lee, "High-intensity laser-driven particle and electromagnetic wave sources for science, industry, and medicine", to be published in Frontiers of Optoelectronics in China. 査読有り
- ④ A. Sagisaka, H. Daido, A. S. Pirozhkov, A. Yogo, K. Ogura, S. Orimo, J. Ma, M. Mori, M. Nishiuchi, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii, K. Nemoto, and H. Nagatomo, "Development of laser-driven proton source toward its applications", Journal of the Optical Society of Korea, Vol.13, pp. 37-41, (2009). 査読有り
- ⑤ A. Sagisaka, H. Daido, A. S. Pirozhkov, J. Ma, A. Yogo, K. Ogura, S. Orimo, M. Mori, M. Nishiuchi, T. Kawachi, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii, K. Nemoto, and H. Nagatomo, "Simultaneous generation of UV harmonics and protons from a thin-foil target with a high-intensity laser", IEEE transactions on plasma science, Vol. 36, pp. 1812-1816, (2008). 査読有り
- ⑥ A. Sagisaka, H. Daido, A. Yogo, K. Ogura, S. Orimo, J. Ma, M. Mori, M. Nishiuchi, A. S. Pirozhkov, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii, and K. Nemoto, "High-energy proton generation from thin-foil targets with a high-intensity ultra-short pulse laser", Proceedings of the Laser-driven relativistic plasmas applied for science, industry, and medicine, AIP conference proceedings, Vol.1024, pp.151-156, (2008).
- ⑦ A. Sagisaka, H. Daido, S. Nashima, S. Orimo, K. Ogura, M. Mori, A. Yogo, J. Ma, I. Daito, A. S. Pirozhkov, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, K. Shimizu, and M. Hosoda, "Simultaneous generation of a proton beam and terahertz radiation in high-intensity laser and thin-foil interaction", Applied Physics B, Vol.90, pp. 373-377, (2008). 査読有り
- ⑧ A. Sagisaka, H. Daido, K. Ogura, S. Orimo, Y. Hayashi, M. Mori, M. Nishiuchi, A. Yogo, M. Kado, A. Fukumi, Z. Li, A. S. Pirozhkov, S. Nakamura, Y. Iwashita, T. Shirai, A. Noda, Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii, and K. Nemoto, "Characterization of an intense laser-produced preformed plasma for proton generation", Journal of the Korean Physical Society, Vol.51, pp. 442-446, (2007). 査読有り
- ⑨ A. Sagisaka, H. Daido, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, S. Orimo, M. Mori, M. Nishiuchi, A. Yogo, M. Kado, S. Nakamura, Y. Iwashita, T. Shirai, A. Noda, and H. Nagatomo, "Characterization of thin-foil preformed plasmas for high-intensity laser plasma interactions", Acta Physica Hungarica B, Vol.26, pp. 327-333, (2006). 査読有り
- [学会発表] (計 3 件)
- ① A. Sagisaka, "Observation of UV harmonics from a thin-foil target in the high-intensity laser-driven proton generation", International Congress on Plasma Physics 2008, 11 September, 2008, Fukuoka, Japan.
- ② A. Sagisaka, "Simultaneous generation of UV harmonics and protons from a thin-foil target with a high-intensity laser", Laser and Plasma Accelerators Workshop 2007, 11 July, 2007, Azores, Portugal.
- ③ A. Sagisaka, "Characterization of thin-foil preformed plasmas for high-intensity laser plasma interactions", International Conference on the Interaction of Atoms, Molecules and Plasmas with Intense Ultrashort Laser Pulses, 1 October, 2006, Szeged, Hungary.
- [図書] (計 1 件)
- ① A. Sagisaka, "Preformed plasma characterization for high-intensity

laser and plasma interactions”,
Transworld Research Network, Science
and technology created by ultra-short,
ultra-high-peak power lasers 2007,
pp. 43-53, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

匂坂 明人 (SAGISAKA AKITO)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究部門・研究副主幹
研究者番号：20354970

(2) 研究分担者

河内 哲哉 (KAWACHI TETSUYA)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究部門・研究副主幹
研究者番号：40343941
大道 博行 (DAIDO HIROYUKI)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究部門・研究主席
研究者番号：70144532

(3) 連携研究者

なし