

高次高調波による高輝度コヒーレント軟X線の発生 Generation of High-Brightness High-Order Harmonics

緑川 克美、玉木祐介
理化学研究所 レーザー物理工学研究室

1. はじめに

高強度フェムト秒レーザーを原子や分子気体中に集光して得られる高次高調波波長は、テーブルトップサイズのコヒーレント軟X線源として盛んに研究されており、その波長域は、いわゆる”水の窓”といわれる2~4 nmにまで達している¹⁻³⁾。しかし、短波長域では基本波からの変換効率が低いため、応用に十分な光子数が得られていないのが現状である。

我々は、励起レーザー光のガイディングによる高調波発生効率の改善を行ってきたが^{4,5)}、最近、高次高調波の発生に関して実験および理論の両面から大きな進展が見られ、出力強度や波長ばかりでなく、そのビーム品質やスペクトル輝度の制御も可能になってきた。ここでは、それらの実験結果に加えて、位相整合や媒質による吸収、イオン化等の巨視的な要因を考慮したモデル計算の結果に基づく高次高調波の発生の最適化について報告する。

2. 軟X線領域での位相整合による高効率高次高調波の発生

我々は、高強度フェムト秒レーザーをArガスを充填した中空ファイバーでの励起光のガイディングにより、高次高調波の変換効率を大幅に改善することに成功したが、これは、簡単なシミュレーションモデルにより、高強度レーザー電場による中性原子の非線形屈折率の変化とプラズマによる分散が釣り合い、位相整合が満たされたためであると考えられた⁴⁾。その結果、中空ファイバーを用いなくとも位相整合条件が満たせることがわかった。そこで、Neガスを用いて自己チャネリングによる高調波の発生を試み、波長16 nm近傍(49次)で変換効率を従来法に比べて約2桁向上させることに成功した⁵⁾。このときの出力エネルギーは数 nJ で、変換効率は約 10^{-6} であった。この変換効率は、レーザープラズマを用いたX線レーザーに匹敵する。これらの結果、軟X線領域においても位相整合が満たされた非線形波長変換が可能なが実証された。

3. 高調波発生の最適化

位相整合による高調波発生効率の最適化を行うため、Arガスを媒質として27次高調波の発生効率と同時にビーム品質の測定を行った。その結果を、Fig. 1(a)およびFig. 2に示す。位相整合

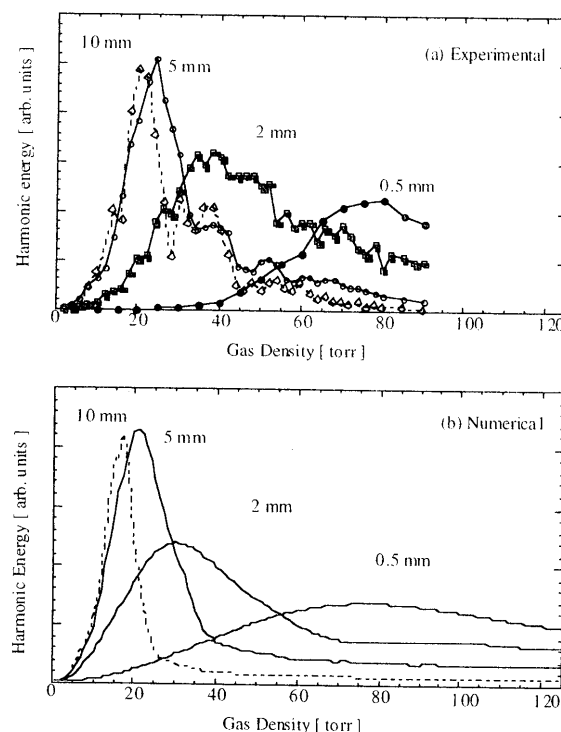


Figure 1. (a) Measured energy of the 29th harmonic as function of the gas density from the interaction lengths of 0.5, 2, 5, 10 mm. (b) Numerical results.

と自己吸収により、相互作用長約 10 mm で圧力 20 torr のとき最大出力が得られるとともに、ほぼガウス型に近いビーム形状が観測された (Fig. 2(c))。これに対して、位相整合が十分満たされていない場合は、Fig. 2(a), (b) に示されるような空間的に高次の成分を含み大きな広がり角を有することが明らかになった⁶⁾。

さらにこれらの実験結果を、説明するために次式に基づき、自己吸収と巨視的位相整合条件を考慮したモデル計算を行った。

$$A_q(z) \approx N_0 \cdot d(q\omega_l) \cdot \exp(i\Delta k z) \cdot \exp(-\alpha(L_{im} - z)/2) \cdot dz,$$

ここで $A_q(z)$ は、 q 次高調波の振幅で、 N_0 および $d(q\omega_l)$ は、それぞれ媒質の原子密度と双極子強度である。また、 Δk 、 α および L_{im} 、それぞれ位相不整合量、自己吸収長および相互作用長である。

計算の詳細は、文献 6) に譲るが、Fig. 1 に示されるように計算結果は、実験結果と比較して非常によい一致が得られていることがわかる。

また、このモデル計算の結果から、さらに伝搬長を 5 cm 以上の長さにするによりサブフェムト秒の XUV パルスの発生が可能であることが示唆された。

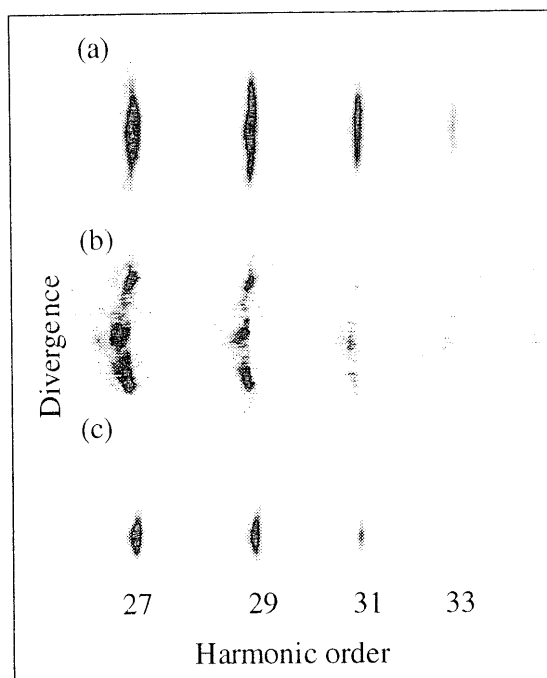


Figure 2. Experimentally observed images of a 10-shot average. The horizontal axis denotes wavelength (29-35th) and the vertical axis denotes the emission angle of high harmonics. Laser pulses of 30 fs, 1.8×10^{14} W/cm² were interacted with argon atoms in quasi-static gas cell: (a) 0.5 mm, 90 torr, (b) 10 mm, 6 torr, and (c) 10 mm, 20 torr.

参考文献

- 1) P. Salières, A. L'Huillier, P. Antoine, and M. Lewenstein, "Study of the spatial and temporal coherence of high-order harmonics", *Atomic, molecular, and optical physics*, B. Bederson and H. Walther Eds. (Academic Press, San Diego, 1999) vol. **41**, pp.83-142.
- 2) J. J. Macklin, J. D. Kmetec, and C. L. Gordon III, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 766 (1993).
- 3) Ch. Spielmann, N. H. Burnett, S. Sartania, R. Koppitsch, M. Schnürer, C. Kan, M. Lenzner, P. Wobrauschek, and F. Krausz, *Science* **271**, 661 (1997).
- 4) Y. Tamaki, Y. Nagata, M. Obara, and K. Midorikawa, *Phys. Rev. A* **59**, 4041 (1999).
- 5) Y. Tamaki, J. Itatani, Y. Nagata, M. Obara, and K. Midorikawa, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1422 (1999).
- 6) Y. Tamaki, J. Itatani, M. Obara, and K. Midorikawa, *Phys. Rev. A*, (in press).