



아토초과학연구팀의 연구활동

글 나베카와 야스오, 타카하시 에이지 / 국립연구개발법인 이화학연구소 광양자공학연구센터 아토초과학연구팀
번역 유정훈 / 그린광학 사업개발그룹장

1. 아토초과학이란?

1.1 아토초과학

‘아토’는 10^{-18} 을 나타내는 접두사이지만, 초고속광 펄스의 발생·응용연구를 행하는 분야에서는 1펨토초(10^{-15} 초, fs)보다 짧은 펄스폭의 코히런트 펄스광을 아토초 펄스광이라고 하고, 그 초단 펄스성을 이용한 계측기술이 21세기 초부터 급속히 발전해왔다. 이들 아토초 펄스발생방법의 개척에서 그 응용까지를 ‘아토초과학’이라고 칭한다¹⁾.

1.2 아토초 펄스광의 발생

광 펄스에서 1펨토초미만의 펄스폭을 얻기 위해서는 1페타헤르츠(10^{15} 헤르츠)를 넘는 주파수대역폭의 광 스펙트럼이 필요로 된다. 파장 600 nm의 가시광의 캐리어주파수는 약 0.5페타헤르츠이기 때문에 이것을 뛰어넘는 주파수대역을 얻기 위해서는 필연적으로 가시광보다도 파장이 짧은 진공자외(파장 ~ 200 nm이하) 혹은 극단자외(파장 ~ 90 nm이하)를 이용하는 것으로 된다. 이들 파장역의 코히런트광원으로서 1990년대부터 주목되어 온 것이 ‘고차고주파’이다^{2,3)}.

고차고주파발생의 기본적인 실험배치는 진공 중에 뿔어진 귀가스(noble gas) 등으로의 고강도의 펄스 레이저 광을 집광할 만한 극히 간단한 것이다. 이것에 의해 펄스 레이저광(기본파)과 동축상에 기본파의 캐리어주파수가 홀수 차수로 체배된 코히런트 광이 수십차 이상에 걸쳐 발생하고, 넓은 광주파수대역에 걸쳐 거의 같은 강도분포를 나타낸다. 전형적인 고차고주파의 스펙트럼의 예를 그림1(a)에 나타냈다.

고차고주파 발생 원리의 포인트는 기본파의 광 전장 크기가 매우 크고, 원자내의 전자에 작용하고 있는 쿨롱전장에 필적, 혹은 그것을 넘는 크기로 되어 있는 점이다. 이 광 전장에 의해 원자재의 전자는 속박되어 있는 쿨롱전장의 장벽을 터널하고, 혹은 넘어 전리하고, 광 전장에 따라 가속되면서 다시 원자와 재결합한다. 재결합 때에 전자가 광 전장에서 얻은 운동에너지가 순시에 광으로 되어 방출되는 현상이 고차고주파 발생이다. 전자의 전리·가속·재결합 과정(3스텝 모델이라고 한다⁴⁾)은 광 전장의 진동의 반주기마다 행해지기 때문에 고차고주파를 시간영역에서 보면 광 전장의 반주기마다 아토초 펄스광이 나타나는 ‘아토초 펄스열’을 이루고 있는 것을 알

수 있다(그림1(b)).

1.3 아토초과학의 전개

고차고주파가 아토초 펄스광원인 것이 명확하게 되고, 연구의 방향성은 몇 가지 나뉘었다. 하나는 펄스열을 단일의 아토초 펄스로 하고, 이것을 초고속의 프로브로서 사용하는 연구이다. 단일 아토초 펄스는 기본파 레이저 광의 펄스폭을 전장주기 수 사이클 정도까지 줄여 더욱 펄스 포락선 중의 전장 위상을 안정화하는 것으로 발생가능하다⁵⁾. 원편광에서는 고차고주파가 발생하지 않는 것을 이용해서 시간적으로 편광이 변화하는 펄스광을 사용하는 편광게이트법⁶⁾도 유효하다.

고차고주파발생의 메커니즘 그것에 착안해서 귀가스에서는 없고 복수원자로 이루어진 분자의 전자상태를 고차고주파 스펙트럼에 의해 조사하는 연구⁷⁾도 활발해 행해지고 있고, 근년에는 고체의 초고속 광 전장응답을 고체에서의 고차고주파발생⁸⁾과 아토초 펄스의 흡수분광⁹⁾ 등에서 명확히 하는 시도가 활발히 행해지고 있다.

이화학연구소의 아토초과학연구팀에서는 이들 연구와는 차별화된 독자 연구를 진행하고 있다. 즉 고강도의 아토초 펄스광원을 개발해서 ‘고강도’에서 밖에 할 수 없는 비선형 광학현상 등이 실험연구에서 많은 성과를 올렸었다. 이하의 장에서 그것들의 예를 소개하겠다.

2. 아토초 펄스광에 의한 비선형 광학분광

2.1 고강도 아토초 펄스광원

고차고주파를 고강도화하기 위해서는 미소한 발생메커니즘 외에 타깃 가스매질 중에서의 전파를 고려할 필요가 있다. 이것을 간단한 모델로 해석하면 고차고주파의 펄스에너지는 기본파의 빔 단면적에 비례하는 것이 명확히 되었다. 그래서 높은 펄스에너지(20 mJ 정도)의 기본파를 5 m라는 매우 긴 초점거리(통상은 수십 cm 정도의 초점거리)에서 기본파를 집광하는 것(완집광)에서 집광면적을 넓히는 고차고주파발생장치를 고안해서(루즈포스법이라고 불

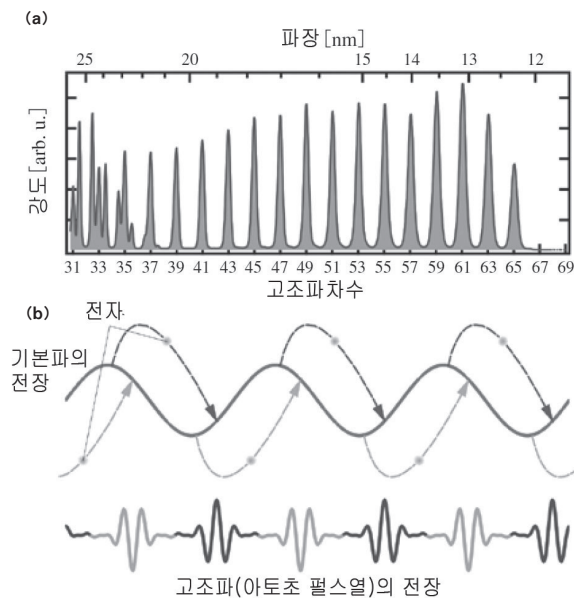


그림1 (a) 고차고조파(아토초 펄스열)의 전형적인 스펙트럼. (b) 기본파의 광 전장과 아토초 펄스열의 광 전장의 모식도. 기본파의 광 전장에서 타깃원자에서 떨어진 전자가 기본파의 반주기마다 재결합할 때에 아토초 펄스가 발생한다.

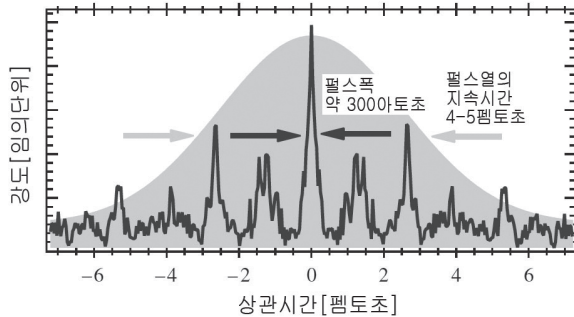


그림2 '수 펄스 아토초 펄스열'의 자기상관파형

린다), 세계최고펄스에너지의 고차고주파(1 μI 이상) 발생에 성공했다^{10,11)}. 또 이 고차고주파의 시간구조가 확실히 아토초 펄스열로 되어 있는 것을 비선형 광학현상을 이용한 자기상관측정에서 실증하고 있다^{12,13)}. 이들 성과는 10년 이상 전에 얻어진 것이지만, 이 루즈 포스법은 근년이 되어 점차 전 세계의 많은 연구 기관에서 채택되어 왔으며, 고강도 아토초 펄스광에 의한 분광연구의 중요성이 다시 증명되고 있다.

또한 현재의 아토초 펄스열의 빔 라인에서는 펄스폭을 12 fs정도 까지 줄인 티탄사파이어 레이저 시스템¹⁴⁾을 기본파로서 사용하고 있고, 그 결과 펄스열의 포락선(폭 4~5 fs) 중에 불과 3~4분 정도의 아토초 펄스광밖에 포함하지 않는 '수 펄스 아토초 펄스열'¹⁵⁾을 분광 연구에 사용하는 것이 가능으로 되었다(그림2).

2.2 수소분자이온의 초고속운동의 관측과 제어

아토초 펄스광은 단파장이기 때문에 광자에너지가 높고, 1광자 혹은 2광자흡수에 의해 분자·원자의 이온화가 가능하다. 이것을 이용하는 것에서 수소분자이온의 초고속운동 관측을 행한 예를 나타내겠다.

수소분자는 '수 펄스 아토초 펄스열'에 포함되는 11차이상의 고차고주파성분에 의해 이온화되고, 생성된 수소분자이온은 주기 약 16 fs의 초고속진동을 시작한다. 어느 시간지연 후에 2번째의 아토

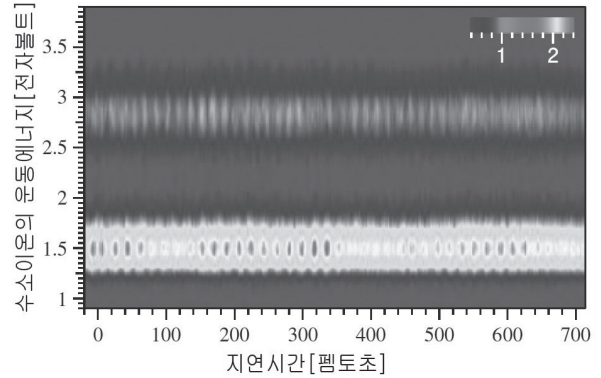


그림3 아토초 펄스의 2광자 순차적 이온화 해리과정을 이용하여 측정된 수소분자이온의 진동 모습

초 펄스열을 진동하고 있는 수소분자이온에 조사하면 수소분자이온은 지연시간에 응해 다른 운동에너지를 가져 해리하기 때문에 발생하는 수소이온(양자)의 운동에너지를 측정하면 진동 모습을 볼 수 있다. 그림3에 실험결과를 나타냈다. 이 실험데이터를 주파수분해 광학 게이터(Frequency-Resolved Optical Gating, FROG)법의 알고리즘을 사용해서 해석한 결과, 수소분자이온의 진동파속을 생성하기 위해서는 1 fs정도의 지연시간을 요하는 것이 명확히 되었다¹⁶⁾.

그리고 실험을 진행하면 수소분자이온의 해리상태는 2종류 존재하고 있는 것을 알았다. 이들 2개의 해리상태는 2번째의 아토초 펄스열을 조사하는 타이밍에 의해 다른 동작을 나타낸다. 그림4에 나타난 대로, 지연시간 280 fs부근에서는 해리상태의 최대와 최소가 진동 주기 16 fs에서 바뀐다. 이것은 불과 8 fs의 지연시간 조정에서 2개의 해리경로의 증감을 절환하는 제어가 행해진 것을 나타낸다¹⁷⁾.

2.3 질소분자의 초고속 전자파속운동의 관측

타겟으로 되는 분자를 질소로 하고 2개의 아토초 펄스열의 시간 지연 단위 폭을 35.6아토초로 줄여 해리한 질소원자이온의 운동량 스펙트럼을 측정했다. 이때 그림2에 나타난 아토초 펄스열의 자기상관파형이 얻어진다. 운동에너지가 적은 해리 질소 원자이온 만에 대해서 상관파형을 푸리에 해석하면 1 PHz를 잘 넘는 주파수성분에 복수 피크가 관측되었다. 이것들은 아토초 펄스열에 의해 코히런트

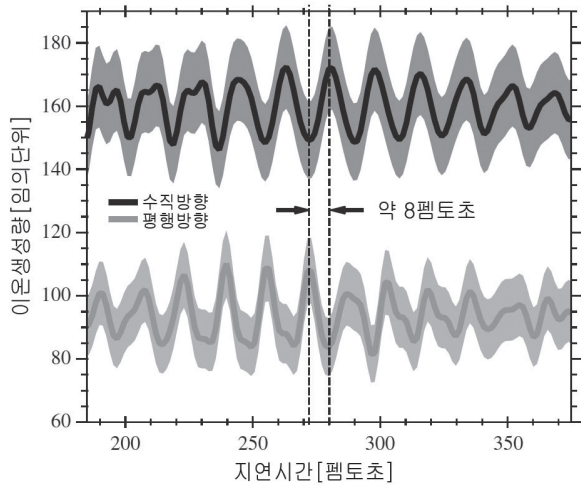


그림4 두개의 다른 해리경로(광 전장의 편광방향에 대한 이온의 각도분포로 구별할 수 있다)를 경유한 수소이온 생성량의 변화 모습. 최대와 최소가 약 8펨토초로 바뀌고 있다.

여기된 질소분자·질소분자이온내의 복수의 전자여기상태(전자파속)에 기인하는 것이고, 아토초 스케일에서 전자파속이 시간발전하고 있는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 분자내의 아토초 전자파속의 관측은 본연구팀에 의해 처음으로 행해졌다¹⁵⁾.

3. 고강도 단일 아토초 펄스 광원 실현을 향해

전장에서 말한 대로 고강도 ‘수 펄스 아토초 펄스열’은 분자의 초고속운동 관측에 유용하지만, 단일 아토초 펄스를 고강도화 혹은 단파장화 할 수 있으면 그 응용범위는 더욱더 넓어진다. 본장에서는 그것을 위한 레이저광원 개발에 대해서 소개하겠다.

3.1 고차고주파의 단파장화

고차고주파의 최대광자에너지는 사용하는 레이저의 강도 및 파장의 2승에 비례한다. 그곳에서 근적외에서 중적외역의 초단 펄스 레이저를 사용해서 고효율로 고주파파장을 단파장화하는 방법이 현재 주류로 되어 있다. 본 단파장화법은 2008년에 우리 팀에서 처음으로 실증되고¹⁸⁾, 그 후, 적외 레이저 개발의 진전에 힘입어 고주파

의 최대광자에너지는 1.6 keV에까지 확대되고 있다.

일반적으로 파장가변성을 가지는 적외 초단 펄스 레이저의 발생에는 광 파라메트릭증폭(OPA)법이 사용된다. 그러나 OPA법을 사용한 적외 초단 펄스 레이저의 출력에너지는 펄스당 수 밀리 줄 정도가 한계로 된다. 우리 팀에서는 적외 초단 펄스 레이저의 고효율화를 겨냥해서 독자 레이저 증폭법 ‘이중 차프 광 파라메트릭증폭(DC-OPA)법’을 2011년에 제창했다¹⁹⁾. DC-OPA법은 OPA법을 기본으로 하면서도 후자의 약점인 여기광 피크 파워의 낮음을 해결할 수 있다는 중요한 특성을 가지고 있다. DC-OPA법에 의해 OPA법에서는 사용하는 것이 어려웠던 줄 클래스의 고에너지 레이저를 여기광으로서 사용하는 것이 가능으로 되어 있다.

그림5에 DC-OPA법을 사용해서 개발된 파장가변 테라와트급 적외 펨토초 레이저의 시스템 레이아웃을 나타냈다²⁰⁾. DC-OPA를 사용하는 것에서 중심파장 1.4 μm에서 펄스폭 40 fs, 출력에너지 100 mJ과 종래의 장파장 펨토초 레이저에서 100배 이상 높은 출력을 가지는 레이저 시스템이 실현되고 있다. 중심파장의 튜닝도 쉽고, 본 레이저 시스템에서는 1~2.2 μm대를 커버할 수 있다. 또 여기 레이저에 줄 클래스의 출력에너지를 가지는 티탄사파이어 레이저를 사용하는 것에서 1대의 레이저에서 DC-OPA에 필요한 미약시드광과 여기광을 동시에 만들고 있다. 결과, OPCPA와 같이 별건의 여기 레이저를 준비할 필요가 없고 레이저 시스템의 번잡성을 저감할 수 있는 메리트도 있다. 보다 최근의 연구에서는 2~4 μm대²¹⁾와 차주파발생을 조합시키는 것에서 3~20 μm대의 파라메트릭 증폭에도 DC-OPA법이 적용할 수 있는 것을 알았다. 그리고 2사이클밖에 전장 진동하지 않는 테라와트급의 피크 파워를 가지는 적외 레이저와, 페타 파워급의 출력을 가지는 적외 펨토초 레이저를 실현하는 목표도 서있다. DC-OPA는 고피크 파워의 적외 초단펄스 적외 레이저개발에 혁신을 가져올 것이라고 기대되고 있다.

현재 DC-OPA를 사용한 고주파 발생실험을 개시하고 있고, 전술한 루즈포커스법과 조합시키는 것에서 연X선 영역에서 펄스당 나노줄 클래스의 고차고주파 빔이 얻어지고 있다(그림6 참조). 이후 DC-OPA를 사용해서 테라와트급의 출력을 가지는 한편, 2사이클의 펄스폭을 가지는 3미크론 레이저 시스템의 개발을 진행할 예정이다. 개발된 레이저 시스템을 사용하면 keV영역에서 서브나노 줄의 고주

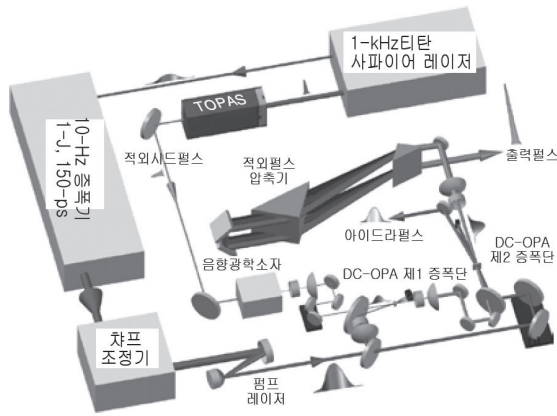


그림5 DC-OPA법에 의해 개발된 2.5 테라와트 적외초단펄스 레이저

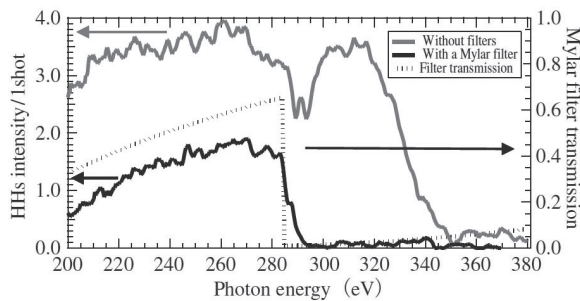


그림6 헬륨가스에서 발생한 고차고주파 스펙트럼. 탄소의 K흡수단이 명료히 관측되어 있다.

파 빔의 발생이 가능으로 된다.

3.2 고강도 단일 아토초 펄스발생

고차고주파발생에서 단일 아토초 펄스를 얻는 것에는 기본파 레이저 광의 펄스폭을 전장주기 수 사이클 정도까지 축적할 필요가 있다고 전술했지만, 정확하게는 이것은 올바르지 않고, 펄스 포락선에 전장 사이클이 다수 존재했다고 해도 포락선내의 최대전장과 두 번째로 강한 전장의 강도비가 충분하다면 단일 아토초 펄스를 만들어 낼 수 있다^{22,23}. 이것을 모티베이션으로서 현재 개발을 진행하고 있는 것이 고강도 광 신시사이저이다. 파장이 다른 다색의 레이저 펄

스를 시공간에서 코히런트로 합성해서 임의의 광 전장을 얻는 광 신시사이저는 지금까지 레이저발전기와 파이버레이저 등 반복이 높고, 펄스에너지가 낮은 레이저 시스템에서 실현되어 왔다. 그것에 대해서 우리들이 개발을 진행하는 광 신시사이저의 출력에너지는 수십 밀리 줄이고, 피크 파워는 TW급에 달한다.

종래보다 압도적으로 높은 출력에너지를 가지는 광 신시사이저의 레이아웃을 그림7에 나타냈다. 여기 레이저에는 펄스포락선 중의 전장의 위상(반송파위상)이 안정화된 티탄사파이어 레이저가 사용되고 있다. 종래, 저반복 레이저에서 반송파위상을 안정화하는 것은 곤란했지만, 우리 팀에서 간접적으로 반송파위상을 제어하는 방법을 독자로 개발해서²⁴, 안정도로서 600 mrad정도를 실현하고 있다. 다색의 광 펄스를 만들어 내기 위해 OPA법을 사용하고 있고, 0.8 μm(25 fs), 1.35 μm, 1.95 μm의 삼색의 광 펄스를 동시에 발생할 수 있다. 이들 삼색의 광 펄스의 반송파위상, 상대위상지터, 지연지터는 동적 피드백기술에 의해 정밀히 제어되고 있다. 예를 들면 3색광 펄스를 어느 강도비 관계에서 상대위상차제로, 상대지연제로서 전장합성하면 펄스포락선내의 최대전장과 두 번째로 강한 전장의 강도비를 0.6정도로 억제할 수 있다. 이 전장강도비는 단색레이저 0.8 μm 펄스의 경우로 환산하면 1.3사이클 정도로 동등하게 된다. 결과 원래는 수십 사이클의 레이저전장을 가지는 여기 레이저(펄스폭 25 fs)였음에도 불구하고, 정밀전장합성기술에 의해 단일 아토초 펄스를 발생하는 것에 충분한 광 전장을 생성할 수 있다.

광 신시사이저에 루즈포커스법을 조합해서 발생한 고차고주파 스펙트럼을 그림8에 나타냈다. 단색 레이저 0.8 μm 펄스의 경우에는 그림1(a)와 같은 방식으로 불연속인 스펙트럼구조가 보이는 것에 비해, 광 신시사이저를 사용하면 60 eV근방에서 연속스펙트럼 고주파가 관측되어 있다. 대역폭에서 시간폭 200 아토초정도의 단일 아토초 펄스가 발생하고 있는 것이 시사된다. 또 연속스펙트럼대의 펄스 에너지는 0.2 μJ이고, 매우 고효율인 단일 아토초 펄스광원이 실현되어 있다. 이 고강도 단일 아토초 펄스를 사용하면 아토초 펄스여기·아토초 펄스 프로브라고 하는 현재 실시하는 것이 곤란한 아토초 응용연구가 개척되는 것으로 기대된다.

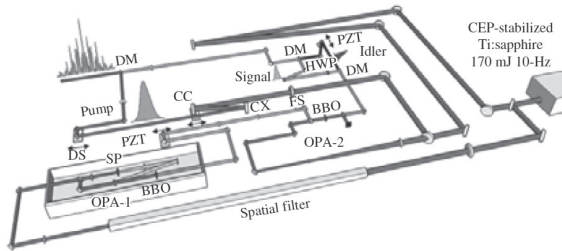


그림7 테라와트급 3색광 신시사이저

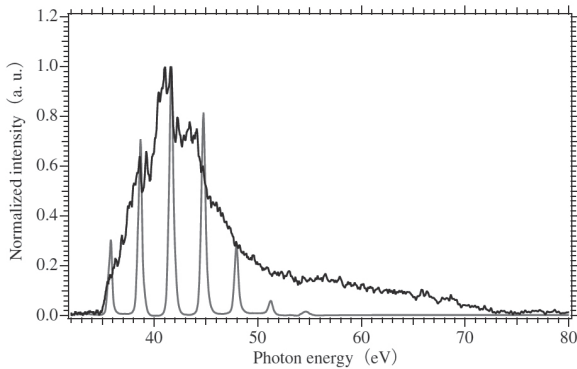


그림8 아르곤가스에서 발생한 고차고주파의 스펙트럼. 0.8 μm 여기(회색선), 삼색광 신시사이저여기(흑선)

참고문헌

1. P. B. Corkum and F. Krausz, "Attosecond science," *Nat. Phys.* 3 (2007) pp. 381-387.
2. A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I. A. McIntyre, K. Boyer, and C. K. Rhodes, "Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases," *J. Opt. Soc. Am. B.* 4 (1987) pp. 595-601.
3. M. Ferray, A. L'Huillier, X. F. Li, L. A. Lompre, G. Mainfray and C. Manus, "Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases," *J. Phys. B* 21 (1988) L31.
4. P. B. Corkum, "Plasma perspective on strong field multiphoton ionization," *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993) 1994-1997.
5. A. Baltuska, Th. Udem, M. Uiberacker, M. Hentschel, E. Goulielmakis, Ch. Gohle, R. Holzwarth, V. S. Yakovlev, A. Scrinzi, T. W. Hansch, and F. Kraus, "Attosecond control of electronic processes by intense light fields," *Nature*, 421 (2003) 611-615.
6. I. J. Sola, E. Mével, L. Elouga, E. Constant, V. Strelkov, L. Poletto, P. Villoresi, E. Benedetti, J.-P. Caumes, S. Stagira, C. Vozzi, G. Sansone and M. Nisoli, "Controlling attosecond electron dynamics by phase-stabilized polarization gating," *Nat. Phys.* 2 (2006) 319-322.
7. J. Itatani, J. Levesque, D. Zeidler, Hiromichi Niikura, H. Pepin, J. C. Kieffer, P. B. Corkum and D. M. Villeneuve, "Tomographic imaging of molecular orbitals," *Nature*, 432 (2004) 867-871.
8. T. T. Luu, M. Garg, S. Yu. Kruchini, A. Moulet, M. Th. Hassan and E. Goulielmakis, "Extreme ultraviolet high-harmonic spectroscopy of solids," *Nature*, 521 (2015) 498-502.
9. Martin Schultze, Krupa Ramasesha, C.D. Pemmaraju, S.A. Sato, D. Whitmore, A. Gandman, James S. Prell, L. J. Borja, D. Prendergast, K. Yabana, Daniel M. Neumark, and Stephen R. Leone, "Attosecond band-gap dynamics in silicon," *Science*, 346 (2014) 1348-1352.
10. Eiji Takahashi, Yasuo Nabekawa, Tatsuya Otsuka, Minoru Obara, and Katsumi Midorikawa, "Generation of highly coherent submicrojoule soft x rays by high-order harmonics," *Phys. Rev. A* 66 (2002) 021802(R).
11. Eiji Takahashi, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Generation of 10-m J coherent extreme-ultraviolet light by use of high-order harmonics," *Opt. Lett.* 21 (2002) 1920-1922.
12. Yasuo Nabekawa, Toshihiko Shimizu, Tomoya Okino, Kentaro Furusawa, Hirokazu Hasegawa, Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Conclusive Evidence of an Attosecond Pulse Train Observed with the Mode-Resolved Autocorrelation Technique," *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 083901.
13. Yasuo Nabekawa, Toshihiko Shimizu, Tomoya Okino, Kentaro Furusawa, Hirokazu Hasegawa, Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Interferometric Autocorrelation of an Attosecond Pulse Train in the Single-Cycle Regime," *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 153904.
14. Y. Nabekawa, A. Amani Eilanlou, Y. Furukawa, K.L. Ishikawa, H. Takahashi, and K. Midorikawa, "Multi-terawatt laser system generating 12-fs pulses at 100 Hz repetition rate," *Appl. Phys. B* 101 (2010) 523-534.

15. Tomoya Okino, Yusuke Furukawa, Yasuo Nabekawa, Shungo Miyabe, A. Amani Eilanlou, Eiji J. Takahashi, Kaoru Yamanouchi, and Katsumi Midorikawa, "Direct observation of an attosecond electron wave packet in a nitrogen molecule,"*Sci. Adv.* 1 (2015) e1500356.
16. Yasuo Nabekawa, Yusuke Furukawa, Tomoya Okino, A. Amani Eilanlou, Eiji J. Takahashi, Kaoru Yamanouchi and Katsumi Midorikawa, "Settling time of a vibrational wavepacket in ionization,"*Nat. Commun.* 6 (2015) 8197.
17. Yasuo Nabekawa, Yusuke Furukawa, Tomoya Okino, A. Amani Eilanlou, Eiji J. Takahashi, Kaoru Yamanouchi and Katsumi Midorikawa, "Sub-10-fs control of dissociation pathways in the hydrogen molecular ion with a few-pulse attosecond pulse train,"*Nat. Commun.* 7 (2016) 12835.
18. E. J. Takahashi, T. Kanai, K. L. Ishikawa, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, "Coherent Water Window X Ray by Phase-Matched High-Order Harmonic Generation in Neutral Media,"*Phys. Rev. Lett.* 101 (2008) 253901.
19. Q. Zhang, E. J. Takahashi, O. D. Muecke, P. Lu, and K. Midorikawa, "Dual-chirped optical parametric amplification for generating few hundred mJ infrared pulses,"*Optics Express* 19 (2011) 7190-7212.
20. Y. Fu, K. Midorikawa, and E. J. Takahashi, "Towards a petawatt-class few-cycle infrared laser system via dual-chirped optical parametric amplification,"*Sci. Rep.* 8 (2018) 7692.
21. Y. Fu, B. Xue, K. Midorikawa, and E. J. Takahashi, "TW-scale midinfrared pulses near 3.3 μm directly generated by dual-chirped optical parametric amplification,"*Appl. Phys. Lett.* 112 (2018) 241105.
22. Eiji J. Takahashi, Pengfei Lan, Oliver D. Mücke, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Infrared Two-Color Multicycle Laser Field Synthesis for Generating an Intense Attosecond Pulse,"*Phys. Rev. Lett.* 104 (2010) 233901.
23. Eiji J. Takahashi, Pengfei Lan, Oliver D. Mücke, Yasuo Nabekawa, and Katsumi Midorikawa, "Attosecond nonlinear optics using gigawatt-scale isolated attosecond pulses,"*Nat. Commun.* 4 (2013) 2692.
24. E. J. Takahashi, Y. Fu, and K. Midorikawa, "Carrier-envelope phase stabilization of a 16 TW, 10 Hz Ti:sapphire laser,"*Opt. Lett.* 40 (2015) 4835-4838.