

1. 서론

펨토초 영역의 극초단 펄스를 생성하는 극초단 레이저 기술, 이를 효과적으로 증폭할 수 있는 처프펄스증폭(CPA) 기술 그리고 극초단 고출력 레이저의 이득 매질로 적합한 티타늄 사파이어(Ti:sapphire) 이득 매질의 개발 등을 통하여 1980년대 중반부터 극초단 고출력 레이저의 급속한 발전이 이루어졌다. 이러한 레이저들은 피코초($1\text{ ps}=10^{-12}\text{ s}$) 혹은 펨토초($1\text{ fs}=10^{-15}$)의 매우 짧은 펄스를 사용하기 때문에 적은 에너지로도 테라와트($1\text{ TW}=10^{12}\text{ W}$) 이상의 고출력을 생성할 수 있으며, 소규모로 제작이 가능하고 수 kHz의 고반복률로도 레이저 펄스를 생성할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라, 최근에는 10 fs이하의 극초단 레이저 펄스를 만드는 것도 가능해졌다. 극초단 고

단 극자외선 결맞는 광원을 필요로 하는 분야에 가장 이상적인 광원을 제공할 것으로 기대되고 있다. 본 글에서는 초강력 레이저를 이용한 결맞는 펨토초 엑스선 발생기술을 소개하고, 발생된 결맞는 고차조화파 엑스선을 이용한 엑스선 간섭계에 대해서 소개하겠다.

2. 초강력 레이저를 이용한 결맞는 펨토초 엑스선 발생 기술

강한 세기의 펨토초 레이저 펄스로 원자를 구동하면, 일반 레이저 수준의 결맞음성을 갖는 엑스선을 발생시킬 수 있다. 초강력 레이저에 의해서 형성된 강한 레이저 마당에 기체 원자가 놓일 때, 원자의 상태는 레이저의 전기장에

특집 ■ 펨토 과학 I

결맞는 펨토초 엑스선의 발생과 응용

이동근, 남창희*

출력 레이저를 제작할 수 있는 기술이 개발됨에 따라 이를 응용하는 새로운 분야들이 나타나기 시작했다.

현재 연엑스선 영역의 광원으로 방사광 가속기 이외에는 특별한 광원이 없는 상태이다. 방사광 가속기는 그 설비가 크고 비용이 많이 들어 일반적인 사용에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 들어 극초단 고출력 레이저를 사용한 엑스선 레이저 개발이나 강한 비선형 현상을 이용한 고차 조화파 엑스선 발생에 많은 연구가 집중적으로 수행되어 오고 있다. 특히 펨핑 레이저의 결맞음을 그대로 지니고 있는 고차 조화파 엑스선은 시간과 공간적인 결맞음이 엑스선 레이저보다 월등히 좋을 뿐만 아니라 이용할 수 있는 파장이 가변적이어서 적용 가능한 응용분야가 한층 넓다. 특히 고차 조화파의 시간폭은 펨핑 레이저의 펄스폭보다 짧고 우수한 결맞음성을 가지기 때문에 초고속 시간분해 엑스선 분광학, 엑스선 간섭계 등의 극초

외해 주기적으로 변조되어 원자는 레이저 주파수의 고차 조화파를 발생한다. 고차조화파는 레이저 마당에 의해 원자에 형성되는 분극의 반전 대칭성(inversion symmetry)에 의하여 홀수 차수만이 생성 가능하다. 레이저 진행방향으로 놓은 다수의 원자들이 레이저 마당에 의해 변주될 때, 발생한 고차조화파들이 결맞는 합을 이루어 강한 고차조화파를 만들게 된다(그림 1). 고차조화파는 강한 레이저 마당이 존재하는 동안에만 발생하게 되므로 레이저 펄스 폭 보다 짧은 펄스폭을 갖는다. 고차조화파의 차수에 따른 세기분포는 처음 몇 개의 차수에서 그 세기가 급격히 떨어지나, 그 후부터는 넓은 영역에서 세기가 비슷하게 유지되는 평탄 영역을 이룬다는 것이 알려져 왔다(그림 2). 이는 기존의 섭동영역에서 발생된 조화파와 다른 특징으로써 고차조화파는 아주 높은 차수까지 발생 세기를 비슷하게 유지하며, 펨토초 레이저를 쓰는 경우 물 투과 엑스선 영

* 한국과학기술원 물리학과/결맞는 X-선 연구단



역(2.3 -4.4 nm)에까지 이르는 넓은 극자외선/연엑스선 영역에서 발생된다. 고차조화파는 레이저 펄스가 갖는 결맞음성을 이어 받아 결맞는 펄토초 극자외선 연엑스선 광원으로 활용될 수 있어서 많은 응용성을 가지고 있다. 또한, 고차조화파 스펙트럼에는 강한 레이저마당과 원자와의 상호작용에 대한 정보가 담겨 있으므로, 이에 대한 분석은 초강력 레이저 마당 내의 원자상태에 대한 근본적인 물리현상을 규명하는 길을 제공한다.

엑스선 레이저와 더불어 고차조화파 엑스선은 연엑스선 영역에서의 결맞는 광원을 제공함으로써 원자물리, 화학, 생물분야에서 유용하게 이용될 수 있다. 고차 조화파는 이미 고체분광학과 플라즈마 진단 등에 사용되었으며, 앞으로 다양한 분야에서 응용될 것이다. 그러나 앞으로 광범위한 분야에서 유용하게 사용되기 위해서는 발생효율 향상이 이루어져야 한다. 현재까지 몇몇 그룹에서 펄토초 레이저를 기체가 채워진 속이 빈 광섬유, 고밀도 가스제트, 혹은 가스 셀 등에 조사하여 조화파의 발생효율을 상당히 많이 향상시켜 왔다. 30 nm보다 긴 파장영역에서는 제논 원자나 아르곤 원자를 이용하여 최대 발생효율을 $10^5 - 10^6$ 까지 향상시켰으며, 그보다 짧은 파장인 10 nm까지는 네온원자가 사용되었고 그 발생효율은 약 10^7 정도이다. 최근에는 고차조화파의 발생효율 향상 외에도 짧은 파장 쪽으로 파장영역 확장에 대한 많은 실험적, 이론적 연구가 행해지고 있으며, 2 nm영역으로까지 고차조화파의 발생영역을 확장시킬 수 있음을 실험적으로 보였다¹⁾. 이는 탄소의 K층 흡수가 시작되는 4.4 nm이하의 물 투과 영역에서 결맞는 조화파를 생성시킴으로써 앞으로 생물 분야에의 연구에 획기적인 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 이의 발생효율이 현저히 낮으므로 응용분야에 적용하기 위해서는 앞으로 효율향상에 많은 연구가 수

행되어야 할 것으로 여겨지고 있다.

고차조화파를 이용한 아토초 펄스 발생에 대한 연구도 최근 활발히 이루어지고 있다. 이론적 연구결과에 의하면 수십 펄토초의 레이저를 이용하였을 때 아토초(10^{-18} s) 영역의 펄스 폭을 갖는 고차조화파가 발생할 수 있음을 보여 주고 있다. 현재까지 가장 짧은 펄스 폭을 만들 수 있는 티타늄사파이어 레이저로도 이득 매질의 이득 선평의 제한과 중심파장의 고유주기에 의해서 가능한 최소 펄스폭은 3 fs 정도이다. 따라서 이보다 더 짧은 아토초 영역의 펄스를 만들기 위해서는 발생 파장 영역을 더욱더 짧은 파장영역(극자외선 영역)의 빛을 적용하는 것이 필수적인 것으로 인식되었다. 고차 조화파는 이러한 목적에 잘 맞을 뿐만 아니라, 넓은 파장 영역에 걸쳐 효율이 일정한 평탄영역을 가짐으로써 더욱더 짧은 아토초 펄스 발생에 매우 유리하다. 평탄 영역의 홀수 차수마다 발생하는 고차 조화파의 각 차수의 위상이 일정한 관계를 가진다면, 이는 여러 종모드가 모드로킹된 극초단 레이저 펄스처럼 조화파의 위상이 로킹됨으로써 아주 짧은 아토초 펄스를 생성할 수 있다. 최근에 이 각 홀수 차수 간의 위상차를 실험적으로 측정함으로써 다섯 개의 홀수차 조화파를 이용하여 레이저의 반주기마다 약 250 as의 펄스를 생성시킬 수 있음을 보였다²⁾. 이는 고차조화파를 이용한 아토초 영역의 물리현상을 연구할 수 있는 시대가 열리고 있음을 말해준다.

국내에서는 결맞은 엑스선 연구단에서 1998년부터 고차조화파 발생에 대한 연구를 수행하여왔으며 몇몇 중요한 연구 결과들을 발표하였다. 주된 연구 주제로는 고차조화파의 최대 발생차수 확장, 조화파를 이용한 아토초 펄스 발생 및 측정, 조화파의 발생효율향상, 연속적 파장가변 고차조화파 발생, 초프된 레이저 펄스를 이용한 고차조화파의 결맞음 조정³⁾, 고차조화파를 이용한 연엑스선 간섭

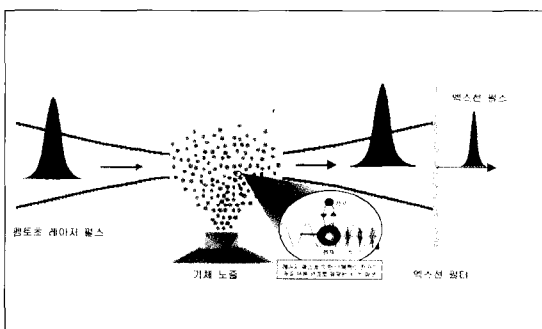


그림 1 펄토초 레이저와 원자의 상호작용에 의한 고차조화파 엑스선 발생

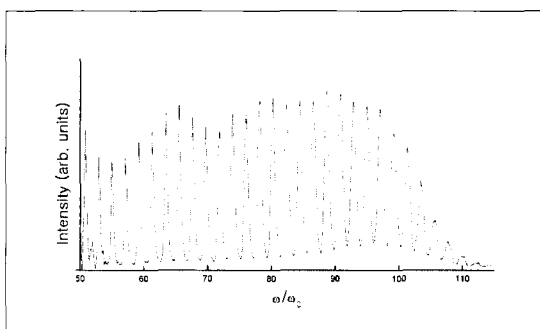


그림 2 헬륨 원자로부터 생성된 고차조화파의 발생차수에 따른 세기분포 (ω_0 = 레이저 주파수)

결맞는 펨토초 엑스선의 발생과 응용

계등이다. 이 연구단에서는 1999년에 강력한 레이저를 이용하여 고차조화파의 파장이 레이저의 중심파장에 의해서 결정된 홀수 차수에 해당하는 파장보다도 더 짧은 파장으로 청색변이할 수 있음을 발표하였다⁴⁾. 이를 이용하여 연속적으로 파장변이가 가능한 고차조화파를 발생시킬 수 있음을 실험적으로 보였다. 뿐만 아니라, 아토초 펄스열을 형성하기 위한 조건을 실험적으로 규명하였으며, 비선형 매질에서 자체유도된 레이저 펄스를 이용하여 30nm부근의 조화파 발생 효율을 세계적인 수준으로까지 향상시켰고 엑스선 간섭 실험을 통하여 발생된 고차조화파의 결맞음 정도가 아주 우수함을 보였다. 실험적 연구뿐만 아니라 이론적으로는 결맞는 합산 방법을 개발하여 단위자 계산만으로도 실험적으로 관측되는 고차조화파의 스펙트럼 구조를 잘 설명할 수 있음을 보였고, 위그너 분포함수를 이용한 고차조화파의 처핑의 해석과 고차조화파의 진행효과에 대한 일차원 전산시뮬을 통하여 새로운 실험 결과의 물리적 해석을 수행하고 있다.

3. 결맞는 엑스선을 이용한 엑스선 간섭계

레이저와의 결맞는 상호작용을 통하여 생성된 고차조화

파는 다른 어떤 엑스선 광원보다 우수한 결맞음성을 가지고 있기 때문에 결맞는 엑스선을 이용하는 기초 과학분야 및 응용분야에 아주 유용하게 사용될 수 있다. 이러한 결맞는 엑스선 광원은 극자외선(EUV) 리소그라피, 엑스선 현미경, 엑스선 홀로그래피 등에 사용되는 엑스선 광학계를 검사할 수 있는 엑스선 간섭계에 활용될 수 있다. 현재까지 EUV 광학계 조사 기술 중 잘 알려진 기술은 바늘구멍 회절 간섭계(Point-diffraction interferometry)이다. 방사광 가속기의 엑스선 광원이 바늘구멍 회절 간섭계에 사용되어 왔으나, 이 경우 엑스선 광원의 공간적 결맞음 정도가 좋지 못해서 이를 우선 미세한 바늘구멍을 통과시켜 그 결맞음 정도를 개선하였다. 그럼에도 불구하고 공간적 결맞음 정도가 빔의 위치에 따라서 급격히 변하므로 주로 조사에 사용되는 부분은 방사광 엑스선빔 중앙의 좁은 영역만이 사용된다. 이 경우 10 nm와 13 nm의 파장을 이용하여 광학계를 조사했을 때의 측정오차가 $\lambda/300$ 정도까지 정밀하게 측정할 수 있다. 이 기술을 이용하여 실용적인 요구를 충족시킬 수 있는 고정밀측정이 가능하나, 방사광가속기의 엑스선을 산업적으로 요구되는 광학계의 조사에 실용적으로 이용되기에는 사용에 한계가 있음이 알려져 왔다.

이에 반해 우수한 결맞는 엑스선 광원인 고차조화파 엑스선의 사용은 이러한 한계를 극복함과 동시에 공간적으

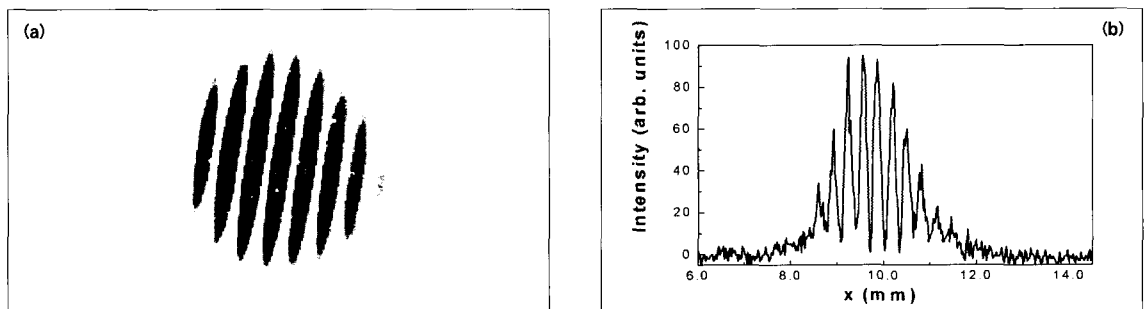


그림 3. 바늘 구멍 쌍을 이용한 고차조화파 엑스선 간섭실험. 엑스선 CCD에 검출된 간섭무늬 (a)와 세기 분포 (b)

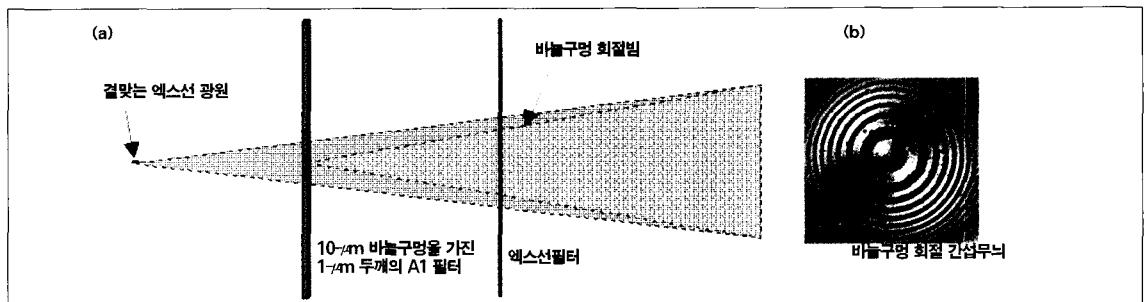


그림 4. (a) 30 nm 영역의 고차조화파를 이용한 엑스선 바늘구멍 회절 간섭계 개요도. (b) 엑스선 CCD에 검출된 간섭 무늬



로 보다 넓은 영역에서 우수한 결맞음성을 가짐으로써 광학계의 일회 조사 면적을 획기적으로 증가시킬 수 있다. 그림 3에 KAIST의 결맞는 엑스선 연구단에서 바늘 구멍 쌍을 이용한 엑스선 간섭 실험결과가 도시되어 있다. 간섭 무늬의 가시도가 거의 1 이므로 발생된 고차조화파 엑스선 빔의 공간적 결맞음성이 아주 우수함을 알 수 있다. 공간적으로 우수한 결맞음성을 가지는 엑스선 빔은 그림 4(a)에 도시된 바늘 구멍 회절 간섭계의 광원으로써 곧바로 이용될 수 있다. 뿐만 아니라 엑스선 빔의 전부분에 걸친 우수한 결맞음성으로 보다 큰 반경을 가진 광학계를 검사하는데 용이하다. 그림 4(b)에 고차조화파 엑스선을 이용한 바늘 구멍 회절 간섭 무늬가 도시되어 있다. 지름 1 mm 정도의 조화파 엑스선빔의 전 부분에 높은 가시도를 가진 간섭무늬가 형성되는 것을 보여주고 있다. 이는 결맞는 엑스선 연구단에서 생성된 고차 조화파를 EUV광학계를 조사할 수 있는 실용적인 바늘구멍 회절 간섭계를 구성할 수 있음을 실험적으로 보여 주고 있다⁵⁾. 결맞는 엑스선을 이용한 엑스선 광학계의 검사기술 개발은 이러한 광학계를 이용하는 엑스선 홀로그래피, 엑스선 현미경등의 분야의 연구를 더욱 활성화시킬 것으로 기대한다.

4. 맺음말

고출력 펄스 레이저 기술의 눈부신 개발에 힘입어 지난 10년간 고차조화파를 이용한 펄스결맞는 엑스선 발

생에 대한 연구가 빠르게 진행되었다. 앞으로 기초연구를 수행하는 분야뿐만 아니라 엑스선 영역의 결맞는 광원을 필요로 하는 다양한 응용분야에서 고차조화파를 이용한 펄스결맞는 엑스선 광원이 각광받게 될 것이다. 뿐만 아니라 소규모로 손쉽게 얻을 수 있는 결맞는 엑스선은 엑스선 광학분야의 비약적인 발전을 가져오게 될 것이다. 국내에서도 KAIST 외에 포항공대, 원자력연구소, 광주 과학원 등에서도 초강력장 물리학 연구를 위한 레이저 시설을 건설하고 있으므로, 이를 활용한 엑스선 광원 개발 및 이의 응용 연구가 국내에서도 활발히 진행될 것이며 산업적 응용도 활발히 이루어질 것으로 예상된다.

(1) M. Schnurer, Ch. Spielmann, P. Wobrauschek, C. Strelt, N. H. Burnett, C. Kan, K. Ferencz, R. Koppritsch, Z. Cheng, T. Brabec, and F. Krausz, Phys. Rev. Lett. 80, 3236 (1998).
 (2) P. M. Paul, E. S. Toma, P. Berger, G. Mullot, F. Audebert, Ph. Balcou, H. G. Muller, and P. Agostini, Science 292, 1689 (2001).
 (3) H. J. Shin, D. G. Lee, Y. H. Cha, K. H. Hong, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. 83, 2544 (1999).
 (4) D. G. Lee, J.-H. Kim, K. H. Hong, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. 87, 243902 (2001).
 (5) D. G. Lee, J. J. Park, J. H. Sung, and C. H. Nam, Opt. Lett. (accepted).



현재근무처: 한국과학기술원 결맞는 엑스선 연구단에서 연수연구원으로 재직중
 최종학력: 2002. 2. 한국과학기술원 물리학과 박사
 1998. 2. 한국과학기술원 물리학과 석사
 1995. 2. 부산대학교 물리학과 학사
 주요경력: 2002-현재, 결맞는 엑스선 연구단 연수연구원
 1998-2000, 한국과학기술원 응용물리실험 석사과정 조교
 1997-1998, 한국과학기술원 물리학과 학사과정 조교
 주관심분야: 초강력 레이저장과 원자외의 상호작용, 고차조화파를 이용한 결맞는 엑스선 광원 개발, EUV 광학계의 검사를 위한 엑스선 간섭계, 엑스선 홀로그래피



현재근무처: 한국과학기술원 물리학과 교수로 재직중이며 1999년부터 과기부의 창의연구단인 결맞는 X-선 연구단을 맡고 있음.
 최종학력: 1983- 1988, 프린스턴 대학교 박사(플라즈마 물리학)
 1977- 1979, 한국과학기술원 물리학과 석사
 1973- 1977, 서울대학교 원자핵공학과 학사
 주요경력: 1998-현재, 한국과학기술원 교수
 1992-1998, 한국과학기술원 부교수
 1989-1992, 한국과학기술원 조교수
 1988-1989, 프린스턴 플라즈마 물리연구소 연구원
 1979-1982, 부산대학교 전임강사
 주관심분야: 초강력 레이저장 물리, 고차조화파 엑스선 발생과 응용, 펄스초 테라와트 레이저 개발, 레이저-플라즈마의 분광학적 연구, 레이저-플라즈마에서 발생된 엑스선 응용, 엑스선 레이저 개발