

1. 서론

1895년 뢰트겐(Röntgen)의 엑스선 발명은 우리 몸 속의 뼈 모양을 들여다 볼 수 있는 획기적인 것으로 그 당시에도 전세계적으로 엄청난 파장을 가져왔다. 이 엑스선은 새로운 파장 영역의 전자파로서 의료 분야의 혁명적인 발전에 기여하여 뢰트겐은 1901년 첫 노벨 물리학상의 수상자로 선정되는 영예를 누렸다. 현재 엑스선 영역의 광원으로는 의료용으로 널리 쓰이는 엑스선 튜브, 넓은 파장 영역의 엑스선을 제공하는 방사광가속기, 고출력 레이저를 고체, 기체 등의 표적에 조사해서 발생된 플라즈마에서 얻는 레이저-플라즈마 엑스선 등의 결맞음성이 없는 엑스선 광원과 엑스선 레이저, 고차조화파 엑스선 등의 결맞음성이 있는 엑스선 광원이 있다. 전자를 고전압으로 가속하여 금속 표적에 충돌시켜 엑스선을 발생시키는 엑스선 튜브는

선 레이저와 강한 비선형 현상을 이용한 고차조화파 엑스선 발생에 관한 연구가 최근 다양하게 이루어지고 있다. 특히 펄핑 레이저의 결맞음성을 그대로 지니고 있는 고차조화파 엑스선은 시간과 공간적인 결맞음성이 엑스선 레이저보다 월등히 좋을 뿐만 아니라 이용할 수 있는 파장이 가변적이어서 적용 가능한 응용분야가 한층 넓다. 특히 고차조화파 엑스선은 펄스폭이 펄핑 레이저의 펄스폭보다 짧고 또한 우수한 결맞음성을 갖기 때문에, 초고속 시간분해 엑스선 분광학, 엑스선 간섭계 등의 극초단 극자외선/연엑스선 결맞는 광원을 필요로 하는 분야에 가장 이상적인 광원을 제공할 것으로 기대되고 있다. 본 글에서는 엑스선 광원에 대한 전반적인 소개와, 아울러 고출력 펄스 레이저를 이용하여 발생된 고차조화파 결맞는 엑스선 광원과 이를 이용한 엑스선 간섭계에 대해서 설명하겠다.

특집 X-ray 광학

엑스선 광원 : 결맞음성이 없는 광원과 있는 광원

남창희*

간단한 장치로 경엑스선(hard X-ray) 영역의 엑스선을 발생하나 생성 파장이 몇 가지로 제한되어 있고 광원의 크기가 커서 주로 의료용으로 활용되고 있다. 연구용 엑스선 광원으로는 방사광가속기가 다양한 파장 영역의 엑스선을 제공하여 오랫동안 널리 사용되어 왔으나, 그 설비가 크고 비용이 많이 들어 접근성에 제약이 있는 어려움이 있다. 또한 방사광가속기의 엑스선은 결맞음성이 없어 간섭계에 쓰기 위해서는 바늘구멍을 통과하여야 하고, 펄스폭이 수십 피코초 이상이다.

이러한 엑스선 광원에 비해 결맞음성이 우수한 엑스선 광원 개발을 위하여 극초단 고출력 레이저를 사용한 엑스

2. 결맞음성이 없는 엑스선 광원

방사광 엑스선은 거의 빛의 속도로 움직이는 전자가 가속될 때 발생하는 강한 엑스선을 말한다. 방사광가속기는 전자를 가속시키는 선형가속기와 전자가 원형 궤도를 따라 운동하면서 운동방향을 바꿀 때마다 접선방향으로 빛을 내는 저장링으로 구성된다. 방사광은 1946년 미국의 GE사가 만든 베타트론 가속기에서 처음으로 관찰되었으며, 1980년대부터 선진국을 중심으로 방사광가속기 건설이 경쟁적으로 이루어졌으며, 현재 전 세계적으로 17기의 고성능 방사광가속기가 운영되고 있으며, 4기가 건설 중

* 카이스트 물리학과/결맞는 엑스선 연구단

이다^[1].

방사광가속기에서 발생하는 엑스선은 윈트겐이 발견한 방식의 엑스선보다 최대 수 억 배 이상 큰 휘도(flux)를 갖고 있다^[2]. 각국에서는 방사광가속기를 국가거대과학시설로 운영하고 있으며, 우리나라도 1995년부터 제 3세대 방사광가속기인 포항방사광가속기를 운영하고 있다. 포항방사광가속기는 가시광선 영역에서 태양보다 1억 배 밝은 빛을 방출한다. 또한 방사광가속기는 원적외선에서 경엑스선에 이르는 매우 넓은 연속적이고 파장가변성 있는 광원을 제공하므로, 결정 단색기(crystal monochromator)를 사용하여 원하는 파장만을 선택, 연구에 사용할 수 있다. 방사광 가속기는 현재 가장 활발히 사용되고 있는 엑스선 광원으로 물질 구조 분석, 단백질 구조 및 신약 개발, 의학적 진단, 마이크로 장치 제작 등에 널리 사용되고 있다. 방사광가속기 엑스선 광원을 이용한 엑스선 광학은 방사광가속기 분야에서 별도로 자세히 다루어진다.

위의 방사광가속기가 대규모의 장치를 필요로 하는 것에 비해서, 고출력 레이저를 이용하여 발생한 플라즈마도 강한 엑스선 발생 광원이 될 수 있다. 고출력 레이저 기술이 급속도로 발전함에 따라 개별 실험실 규모에서도 극자외선, 엑스선을 발생시킬 수 있게 되었다. 현재는 페타와트(10^{15} W)의 출력을 갖는 레이저가 개발되고 이를 집속시키면 10^{21} W/cm² 세기를 만들어 낸다^[3]. 고출력레이저를 이용해 고온, 고압의 플라즈마를 만들 수 있어 극한과학에 많이 활용되고 있다. 이러한 고밀도, 고온 플라즈마에서는 THz부터 엑스선, 감마선에 이르는 전자기파 방출이 일어난다.

고출력 레이저를 이용한 플라즈마 기반의 엑스선 광원은 표적 물질과 구동 레이저의 성능이 광원의 최적화에 매우 중요한 역할을 하며, 특히 엑스선 전환 효율(X-ray conversion efficiency)을 높이기 위한 많은 연구가 이루어졌다. 고체 표적은 높은 엑스선 전환 효율을 보이지만 파편이 다른 광학계를 손상시키는 문제가 있고, 기체 표적은 파편문제는 적지만 엑스선 전환 효율이 낮다. 두 표적의 장점을 모은 기체분자의 클러스터(cluster)를 표적으로 사용하는 경우 고체와 기체 표적의 장점을 모은 결과를 얻을 수 있다. 이러한 레이저-플라즈마 엑스선 광원은 엑스선 마이크로스코피나 차세대 집적소자 생산을 위한 극자외선 리소그래피 광원을 위해 사용될 것으로 기대되고 있다. 급격하게 발전하는 나노기술, 정보기술은 점점 더 작은 선포

의 집적소자 개발을 필요로 하고 이를 위해서는 엑스선 파장의 광원이 필수적이다.

방사광 가속기와 레이저-플라즈마 상호작용으로 발생한 엑스선은 결맞음성이 부분적이거나 결여되어 있어서 간섭계, 홀로그래피 등에 사용할 수 없거나 광량의 손실이 큰 바늘구멍을 이용한 공간적인 필터를 통과한 후 간섭계에 활용할 수 있다.

3. 결맞는 엑스선 광원

결맞는 엑스선 광원으로는 레이저-플라즈마를 이용하는 엑스선 레이저, 고차조화파 엑스선 광원, 그리고 엑스선 자유전자 레이저 등이 있다. 엑스선 레이저는 1985년 미국의 로렌스 리버모어 국립연구소와 프린스턴 플라즈마 연구소의 2곳에서 괄목할 만한 연구 결과를 얻은 이래 레이저-플라즈마를 이용하거나 기체 방전 플라즈마를 써서 많은 성과를 얻었다. 레이저-플라즈마를 쓰는 경우 Pd, Ag, Cd 등의 원자를 이용하여 10 nm 영역에서 강한 레이저 발진을 얻었고, 모세관 기체 방전의 경우 Ar 원자를 이용하여 46.9 nm 에서 매우 강한 레이저 발진을 얻어 엑스선 간섭계와 현미경 등의 다양한 응용 결과를 발표하고 있다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 본 특집의 엑스선 레이저 분야에서 다루어진다.

엑스선 자유전자 레이저의 경우 독일 DESY의 FLASH (Free electron LASer in Hamburg), 미국 스탠포드 대학의 Linac Coherent Light Source(LCLS), 일본의 방사광 가속기인 Spring8의 SCSS에서 막대한 연구비를 투입하여 활발하게 추진되고 있다. 본 글에서는 본 연구팀에서 연구중인 고차조화파 엑스선 광원을 위주로 결맞는 엑스선의 발생과 이의 간섭계 응용에 대해 설명하고자 한다.

강한 세기의 펨토초 레이저 펄스로 원자를 구동하면, 레이저와 같은 결맞음을 갖는 엑스선을 발생할 수 있다. 고출력 펨토초 레이저에 의해 형성된 강한 레이저장에 기체 원자가 놓일 때, 원자의 상태는 레이저의 전기장에 의해 주기적으로 변조되어 원자는 레이저 주파수의 높은 차수에 해당하는 조화파를 발생한다. 이때 레이저장에 의해 원자에 형성되는 분극의 반전 대칭성(inversion symmetry)에 의하여 고차조화파는 홀수 차수에서만 생성된다. 레이저 진행방향으로 놓인 다수의 원자들이 발생

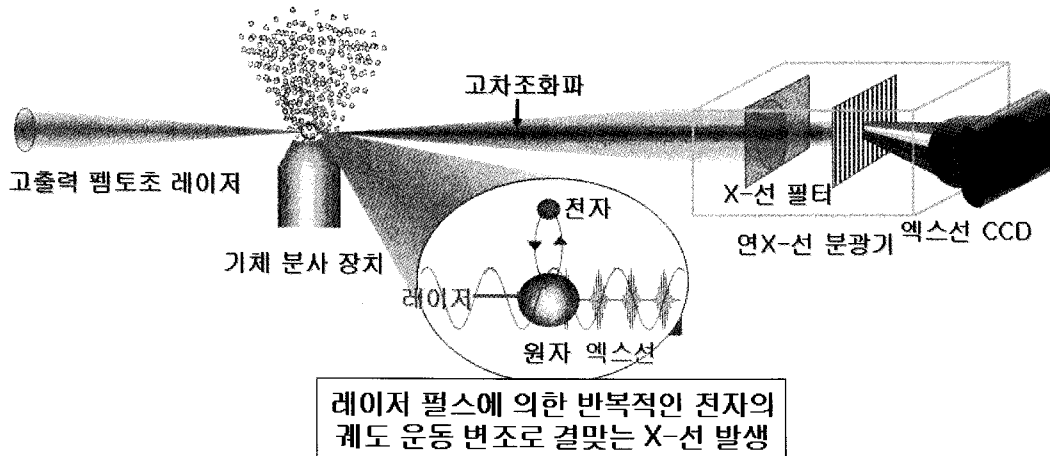
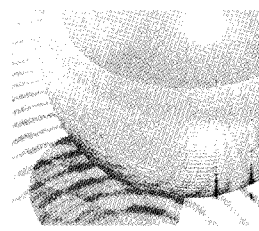


그림 1. 펄초 레이저와 원자의 상호작용에 의한 고차조화파 엑스선 발생

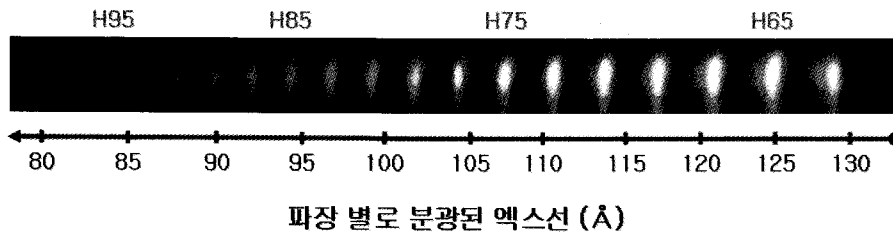


그림 2. 헬륨 원자로부터 생성된 고차조화파의 스펙트럼 (Hn 은 n 차 조화파를 나타낸다)

한 고차조화파가 결맞는 합을 이룰 때 강한 고차조화파를 만들게 된다(그림 1). 고차조화파는 강한 레이저 마당이 존재하는 동안에만 발생하게 되므로, 레이저 펄스폭 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 이룬다(그림 2). 이는 기존의 섭동영역에서 발생된 조화파와 크게 다른 특징으로 고차조화파는 아주 높은 차수까지 발생 세기를 비슷하게 유지할 수 있다. 강한 펄초 레이저를 쓰는 경우 물 투과 엑스선 영역(2.3 - 4.4 nm)에까지 이르는 넓은 극자외선/연엑스선 영역에서 발생된다. 고차조화파는 레이저 펄스가 갖는 결맞음성을 이어 받아 결맞는 펄초 극자외선/연엑스선 광원으로 활용될 수 있어서 많은 응용성을 갖고 있다.

엑스선 레이저와 더불어 고차조화파 엑스선은 연엑스선 영역에서의 결맞는 광원을 제공함으로써 물리, 화학, 생물 분야에서 유용하게 이용될 수 있다. 고차조화파는 이미 고

체분광학과 플라즈마 진단 등에 사용되었으며, 앞으로 다양한 분야에서 응용될 것이다. 그러나 앞으로 광범위한 분야에서 유용하게 사용되기 위해서는 발생효율 향상이 중요하다. 현재까지 몇몇 그룹에서 펄초 레이저를 기체가 채워진 속이 빈 광섬유, 고밀도 기체분사 표적, 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 네온 원자가 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 보였다^[5]. 이는 탄소의 K층 흡수가 시작되는 4.4 nm 이하의 물 투과 영역에서 결맞는 조화파를 생성시킴으로써 앞으로 생물 분야에의 연구에 획기적인 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다.

엑스선 광원 : 결맞음성이 없는 광원과 있는 광원

국내에서는 결맞은 엑스선 연구단에서 1998년부터 고차조화파 발생에 대한 연구를 수행하여 왔으며 몇몇 중요한 연구 결과들을 발표하였다. 주된 연구 주제로는 고차조화파의 최대 발생차수 확장, 조화파를 이용한 아토초 펄스 발생 및 계측, 조화파의 발생효율향상, 연속적 파장기변 고차조화파 발생, 초프린 레이저 펄스를 이용한 고차조화파의 결맞는 조정⁶⁾, 고차조화파를 이용한 연엑스선 간섭계 등이다. 이 연구단에서는 1999년에 강력한 펨토초 레이저를 이용하여 고차조화파의 파장이 레이저의 중심파장에 의해서 결정된 홀수 차수에 해당하는 파장보다도 더 짧은 파장으로 청색변이할 수 있음을 발표하였다⁷⁾. 이를 이용하여 연속적으로 파장기변이 가능한 고차조화파를 발생시킬 수 있음을 실험적으로 보였다. 뿐만 아니라, 긴 길이의 기체분사 표적을 이용하여 30 nm부근의 조화파 발생 효율을 세계적인 수준으로까지 향상시켰고, 엑스선 간섭 실험을 통하여 발생된 고차조화파의 결맞음 정도가 아주 우수함을 보였다. 최근에는 고차조화파를 이용하여 200 아토초(10^{-18} s) 펄스를 발생하고 이를 실험적으로 계측하였다.

고차조화파의 광범위한 활용을 위해서는 효율적인 고차조화파의 발생이 필요하다. 낮은 고차조화파의 발생 효율로는 실제적인 응용이 어려우므로, 다양한 응용분야에 적용하기 위해 효율 향상에 많은 연구가 수행되고 있다. 본 연구팀에서는 이색 레이저파를 고차조화파 발생에 적용하여 20 nm 영역에서 발생 효율이 10^4 에 이르는 매우 효율적인 고차조화파 발생을 얻었다⁸⁾. 영국의 퀸즈 대학과 옥스퍼드 대학 연구팀에서는 고풍력 펨토초 레이저 펄스를 아르곤 기체가 차 있는 속 빈 광섬유에 통과시켜 고차조화파 발생에 준위상정합 방법을 적용하여 물투과 영역의 파장에서 획기적인 효율 향상을 얻었음을 보고하였다⁹⁾. 이와 같이 고차조화파의 발생 효율이 향상 됨으로 다양한 분야에서 고차조화파의 실제적인 응용이 가능해질 것이다.

4. 결맞는 엑스선을 이용한 엑스선 간섭계

고차조화파는 레이저와의 결맞는 상호작용을 통하여 생성되기 때문에 다른 어떤 엑스선 광원보다 우수한 결맞음을 가지고 있다. 이에 따라 고차조화파 엑스선은 결맞는

(a)



(b)

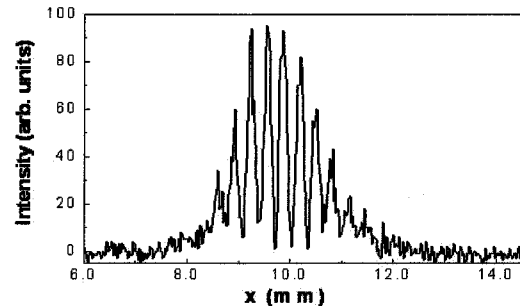


그림 3. 바늘 구멍 빔을 이용한 고차조화파 엑스선 간섭실험. 엑스선 CCD에 검출된 간섭무늬 (a)와 세기 분포 (b).

엑스선을 이용하는 기초 과학분야 및 응용분야에 아주 유용하게 사용될 수 있다. 이러한 결맞는 엑스선 광원은 극자외선(EUV) 리소그래피, 엑스선 현미경, 엑스선 홀로그래피 등에 사용되는 엑스선 광학계를 검사할 수 있는 엑스선 간섭계에 활용될 수 있다. 현재까지 극자외선 광학계 검사 기술 중 가장 잘 알려진 기술은 바늘구멍 에달이 간섭계(Point-diffraction interferometry)이다. 방사광 가속기의 엑스선 광원이 바늘구멍 에달이 간섭계에 주로 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 고정밀 측정이 가능하나, 방사광 가속기의 엑스선을 산업적으로 요구되는 광학계의 조사에 실용적으로 이용되기에는 그 크기가 커서 사용에 한계가 있음이 알려져 왔다.

이에 반해 우수한 결맞는 엑스선 광원인 고차조화파 엑

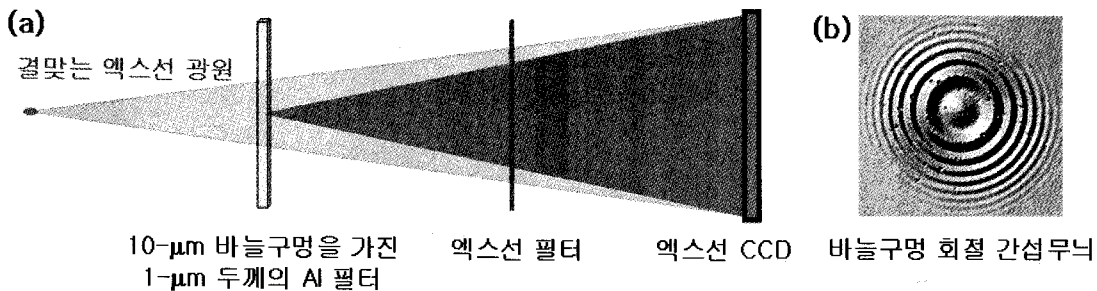
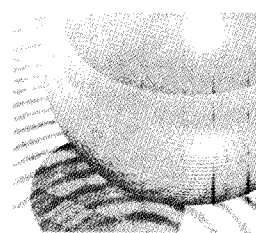


그림 4. (a) 30 nm 영역의 고차조화파를 이용한 엑스선 바늘구멍 회절 간섭계 개요도. (b) 엑스선 CCD에 검출된 간섭무늬.

스선의 사용은 이러한 한계를 극복함과 동시에 공간적으로 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. 광원 중심부에서 간섭무늬의 가시도가 거의 1 이므로 발생한 고차조화파 엑스선 빔의 공간적 결맞음성이 아주 우수함을 알 수 있다. 공간적으로 우수한 결맞음성을 가지는 엑스선 빔은 그림 4 (a)에 도시된 바늘 구멍 예들이 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 바늘구멍 예들이 간섭 무늬가 도시되어 있다. 지름 1 mm 정도의 조화파 엑스선 빔의 전부분에 높은 가시도를 가진 간섭무늬가 형성되는 것을 보여주고 있다. 이는 결맞는 엑스선 연구단에서 생성된 고차조화파를 극자외선 광학계를 검사할 수 있는 실용적인 바늘구멍 예들이 간섭계를 구성할 수 있음을 실험적으로 보여 주고 있다^[10]. 결맞는 엑스선을 이용한 엑스선 광학계의 검사기술 개발은 이러한 광학계를 이용하는 극자외선 리소그래피, 엑스선 홀로그래피, 엑스선 현미경 등의 연구를 더욱 활성화시킬 것으로 기대한다.

5. 맺음말

다양한 엑스선 광원의 출현은 엑스선 광학 분야의 활성화에 중요한 기여를 하였다. 방사광가속기는 언들레이터

와 같은 삽입 장치를 설치할 수 있는 제3세대 방사광가속기에서 엑스선 자유전자 레이저를 발전시키는 제4세대로 접어들고 있고, 엑스선 레이저와 고차조화파 엑스선 광원 같은 결맞는 엑스선 광원을 손쉽게 활용할 수 있는 시대에 이르렀다. 다양한 엑스선 광원은 엑스선 분광학, 엑스선 간섭계와 같은 기초연구 분야와 응용분야에서 활용될 것이다. 고차조화파 발생을 이용한 결맞는 엑스선 광원은 우수한 결맞음성과 아토초 영역에 이르는 극초단 펄스폭을 갖고 있어 다른 엑스선 광원이 갖지 못하는 특성을 갖고 있다. 이와 같은 특성으로 인하여 고차조화파 엑스선 광원은 아토초 물리나 나노 계측 분야에서 매우 유용하게 활용될 것이다. 뿐만 아니라 소규모로 손쉽게 얻을 수 있는 결맞는 엑스선은 엑스선 광학분야의 비약적인 발전을 가져올 것이다. 국내에서도 KAIST 외에 고등광기술 연구소, 포항공대, 원자력연구소 등에서 초강력 레이저장 물리학 연구를 위한 레이저 시설을 건설하여 활용하고 있으므로, 이를 활용한 엑스선 광원 개발 및 이의 응용 연구가 국내에서도 활발히 진행될 것이며 산업적 응용도 활발히 이루어질 것으로 기대한다.

참고문헌

- (1) 고인수, "방사광과 그 응용," 한국물리학회, 물리학과 첨단기술 (2007년 6월) pp. 92-94.
- (2) A. Hellemaans, Science 277, 1214 (1997).
- (3) J. D. Bonlie, F. Patterson, D. Price, B. White, and P. Springer, Appl. Phys. B-Lasers Opt. 70, S155 (2000).
- (4) T. Mocek, J. J. Park, C. M. Kim, H. T. Kim, D. G. Lee, K. H. Hong, and C. H. Nam, J. Appl. Phys. 93, 3105 (2003).

엑스선 광원 : 결맞음성이 없는 광원과 있는 광원

- (5) M. Schnurer, Ch. Spielmann, P. Wobrauschek, C. Strelli, N. H. Burnett, C. Kan, K. Ferencz, R. Koppitsch, Z. Cheng, T. Brabec, and F. Krausz, Phys. Rev. Lett. 80, 3236 (1998).
- (6) H. J. Shin, D. G. Lee, Y. H. Cha, K. H. Hong, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. 83, 2544 (1999).
- (7) D. G. Lee, J.-H. Kim, K. H. Hong, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. 87, 243902 (2001).
- (8) I. J. Kim, C. M. Kim, H. T. Kim, G. H. Lee, Y. S. Lee, J. Y. Park, D. J. Cho, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. 94, 243901 (2005).
- (9) M. Zepf, B. Dromey, M. Landreman, P. Foster, and S. M. Hooker, Phys. Rev. Lett. 99, 143901 (2007).
- (10) D. G. Lee, J. J. Park, J. H. Sung, and C. H. Nam, Opt. Lett. 28, 480 (2003).

약 력



남형혜

현재근무처: 한국과학기술원 물리학과 교수로 재직 중이며 1999년부터 과학기술부의 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:

1989-현재, 한국과학기술원 조교수, 부교수, 교수

1988-1989, 프린스턴 플라즈마 물리연구소 연구원

1979-1982, 부산대학교 전임강사

주관심분야:

초강력 레이저장 물리, 고차조화파 엑스선 발생과 응용, 아토초 펄스 발생, 아토초 물리, 펨토초 테라와트 레이저 개발