

# 서울대학교 근접장이용 극한광기술 연구단

제 원 호

서울대학교 물리학과

whjhe@phya.snu.ac.kr

## 1. 광기술의 관점

빛을 이용하는 기존의 광학계에서는 근본적으로 빛의 파동성에 의한 회절현상 때문에 얻을 수 있는 분해능의 절대적인 한계가 생기게 되는데 이를 회절 한계라 한다. 예를 들어 종래의 광학현미경으로는 조명광으로 사용되는 빛의 약 반 파장보다 작은 물체를 관측할 수 없는데 이는 물체에서 산란되어 진행하는 빛을 렌즈로 집속하여 측정하는 과정에서 상이 희미해지기 때문이다. 가시광의 회절한계를 극복하면서 작은 물체를 관측하기 위해 그 동안 x-선 현미경, 전자현미경, 주사터널현미경 등 고분해능 현미경이 개발되었다. 그러나 이러한 방법으로는 광파장 이하의 나노영역에서 다양하고 흥미로운 광학적 특성을 연구 및 응용하는데는 적합하지 못하다.

진행되는 빛을 이용하는 기존의 광리소그라피 방법에서도 입사광의 반 파장정도 이하의 미세패턴 역시 제작할 수 없는데 이는 빛이 렌즈의 초점면에 맺힐 때 반 파장보다 작게는 집속되지 않기 때문이다. 이런 문제를 해결하기 위해 자외선, x-선 등 짧은 파장의 광원을 이용하거나 전자빔을 이용하려는 많은 연구가 활발히 시도되고 있다. 물론 이러한 연구 모두 회절한계 내에서 이루어지고 있고 특히 빛이나 전자의 파장이 짧아짐에 따른 여러 기술적인 문제점들이 있다.

그리고 집속된 빛을 이용하여 정보를 기록하고 재생하는 광정보기록 연구에서도 동일한 회절한계가 적용되는데 즉 사용되는 빛의 대략 반 파장 정도보다 작은 정보를 기록할 수도 없고 설사 기록되었더라도 읽을 수 없게된다. 현재 사용되는 CD(compact disc)의 기록밀도를 높이려는 다양한 시도들 특히 청색레이저를 개발함으로써 짧은 파장으로 인한 기록밀도 향상에 관한 연구는 많은 진전을 보이고 있고 또 홀로그래프를 이용하거나 SIL(solid immersion lens)를 이용하려는 새로운 연구도 많은 진행되고 있다. 이들 여러 방식들 역시 빛의 회절한계 내에서 진행되는 연구들이고 따라서 궁극적인 분해능이나 기록밀도에는 한계가 있게된다.

## 2. 광과학의 관점

한편 빛을 주어진 물리계에 조사할 때 그 다양하고 복잡한 광학적 반응을 측정함으로써 계의 물리/화학적 성질을 연구하는 레이저분광학 분야에서도 마찬가지로 회절한계로 인하여 미세한 크기의 단일 계를 광학적으로 관측 및 조사하는 것이 어렵다. 특히 크기 10nm에서  $1\mu\text{m}$  정도까지의 영역에서는 각 개체들의 크기와 모양이 다르고 그에 따라 각각의 분광학적 성질도 매우 달라지게 된다. 가령 어떤 개체의 크기가 평균 10nm 이고 밀도가  $2500\text{개}/\mu\text{m}^2$ 인 경우에 현미경 렌즈로 집속되어 직경이  $1\mu\text{m}$ 인 빛으로 그 광학적 성질을 조사하는 경우, 조사광속의 개체 수는 약 2000개가 된다. 이 경우에 각 개체들의 크기의 차이로 인하여 측정값의 편차가 크게 되고 결과적으로 inhomogeneous broadening으로 인해 각 개체의 성질을 제대로 정확히 연구할 수 없다. 즉 평균 개념(ensemble average)의 관점에서만 그 성질을 이해할 수 있는데 이러한 문제를 해결하기 위해서는 단일 개체에 대한 자세한 연구가 필요하다.

양자역학을 중심으로 하는 현대물리학은 단일 원자의 분광학적 이해의 토대 위에서 발전했다고 해도 과언이 아니다. 물론 20 세기초에 자유원자 하나 하나를 따로 붙잡아 두거나 개별적으로 관측할 수 있는 기술이 있어서 가능했던 것은 아니다. 주어진 원자 또는 분자는 시공을 초월해서 모두 정확히 동일한 물리적 성질을 가지기 때문에 한번에 수많은 원자나 분자들을 관측하더라도 환경에 의한 평균 개념과 상관없이 단일 원자나 단일 분자의 물리적 성질을 이끌어 낼 수 있는 분광학적 방법을 개발했기 때문에 가능했다. 그 토대 위에 지난 수 십 년 동안 원자의 에너지 스펙트럼과 시간적 동역학 정보의 정밀도는 혁명적으로 발전되었다.

그러나 단일 원자나 분자 등 microscopic system보다 크면서도 새로운 mesoscopic system에 대한 관심이 최근 고조되고 있고 또 그 응용가능성 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다. 예를 들어 물리학에서는 양자점 등의 반도체 나노양자구조에 관한 연구가, 화학에서는 Fullerene  $\text{C}_{60}$ 을 포함하여 carbon

nanotube 등의 거대분자 또는 cluster 등에 관한 연구가, 생물학에서는 cell 안에서의 각종 미세한 생물학적 조직들의 작동에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

그러나 이러한 mesoscopic 영역에서는 단일 원자나 분자와 달리 각 개체들의 크기와 모양이 서로 다르고 그에 따라 물리적 성질도 전혀 달라지게 된다. 따라서 이들 각 mesoscopic system의 물리/화학적 성질에 대한 정확한 이해를 위해서는 ensemble 개념이 아니라 single fullerene, single molecule, single DNA, single quantum dot 등 단일 양자계에 대한 연구 특히 분광학적 연구가 필수적이다. 현재 이들 mesoscopic system의 전기적 성질은 STM, AFM, SEM 등을 이용하여 많이 연구되고 있으나 특히 다양한 현상과 정보를 제공하는 분광학적 연구는 그 중요성에도 불구하고 상대적으로 많은 연구가 이루어지지 못하고 있다. 이는 기존의(레이저)분광학에서는 회절한계 때문에 mesoscopic 단일 계를 별도로 연구하기 어렵기 때문이다.

이러한 영역에서의 정밀한 분광학을 통해서 원자·분자·반도체 등의 단일 양자계 자체의 깊은 물리적 성질들을 연구하고 단일 양자계 사이의 독특한 상호작용도 연구할 수 있을 뿐 아니라, 나아가 신비로운 생명현상과 관련된 물리/화학/생물학적 계를 탐구할 수 있게 된다. 더구나 앞으로 다가올 21세기에는 정보량의 증가와 컴퓨터 등 전자기기의 소형, 경량화가 가속될 것이며, 이에 따른 소자의 집적화와 대용량의 정보기록 매체가 더욱 필요하게 된다. 따라서 현재 빛의 회절한계를 극복하는 미세한 물리 및 공학계의 관측, 분석, 제작을 위해서는 필수적으로 새로운 개념의 분광학 연구 및 광기술 개발이 절대적으로 요구된다.

결론적으로 기존의 optical microscopy, optical spectroscopy, optical lithography, optical storage 등을 포함한 모든 광학계에서는 반 파장 이하의 물체를 다룰 수 없다. 그 공통된 이유는 한마디로 회절한계 때문인데 이러한 분야에서 모두 예외 없이 진행되는 빛 즉 far-field를 사용하기 때문이다. 이는 광학 계측 기기의 성능 및 연구대상 물체의 크기에 제한을 주며, 나아가 광학적 방법을 이용하여 생산되는 모든 전자제품 및 부품 등의 성능향상에 한계를 주게 된다. 회절한계 이상의 고분해능과 함께 다양한 광학적 정보를 동시에 얻고 응용할 수 있는 거의 유일한 방법은 기존의 far-field 대신 공간적으로 국소되어 있는 근접장(near-field)을 사용하는 것이다. 특히 최근 근접장 광학(near field optics)이라는 새로운 광학 분야가 태동되어 근접장 현미경, 근접장 분광학, 근접장 광기술 등의 활발한 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>.

따라서 본 과제에서는 10nm 크기 또는 그 이상의 영역에서

근접장 현상의 원리를 체계적인 분광학 연구로 이론 체계를 정립하고, 나아가 회절한계를 극복하는 10nm 수준의 차세대 극한 광기술로서 구현 가능한 새로운 개념의 연구를 수행하고 있다. 특히 본 연구는 빛의 회절한계를 극복하는 다음의 세 가지 연구분야로 나눌 수 있다. (A) Near-field Photonics, (B) Atom Photonics, (C) Near-field Spectroscopy 등이 그것인데(A)와 (C)는 빛의 근접장 개념을 사용하는 것으로서 기존의 photonics 및 spectroscopy 등의 한계를 극복하는 연구이고 (B)는 원자의 근접장 파동성 개념을 사용하는 것으로서 특히 원자 현미경, 원자 리소그래피, 원자 홀로그램 등에 관한 새로운 개념의 photonics 연구이다. 이들은 각각 독립적이면서도 상호보완적인 밀접한 연관 관계를 가지고 있다.

### 연구내용

진행하지 않고 공간적으로 국소된(localized) 빛을 다루는 근접장 광학은 전자 현미경 등 다른 고분해능 현미경처럼 파장이 하 크기의 미세한 나노영역의 물질을 다루면서도 동시에 광학적 정보를 제공할 수 있다. 현재 이 분야에 많은 새로운 연구활동이 이어지고 있지만, 물리적 원리의 명백하고 확립된 이해와 기술적이고 산업적인 응용을 위해 실제적인 모델을 위한 연구가 시급하다. 이런 관점에서 본 연구단의 목적은 나노 영역의 근접장 광 자체의 새로운 양자역학적 특징의 이해를 바탕으로 실시간 근접장 주사광현미경(Real-time Near-field Scanning Optical Microscopy)과 원자 주사현미경(Scanning Atom Microscopy)에 대한 새로운 개념의 현미경 연구를 진행하고 나아가 나노영역의 광학적 리소그래피 및 광정보의 기록/재생을 실현하는 등 실질적 응용가능성에 대한 연구를 수행하는 것이다.

연구내용은 크게 근접장 분광학, 원자 광학, 근접장 광학 등으로 나눌 수 있다. 먼저 근접장 분광학에는 단일 양자계와의 상호작용을 통하여 근접장 광의 양자역학적 성질을 연구한다. 특히, 새로운 양자적 특성들, 예를 들어 전자기장의 횡적성질의 깨짐과 양자점과의 결합을 상호작용을 통해 양자계산 등에 대한 연구도 함께 진행될 것이다. 그리고 원자 광학과 근접장 광학 연구에서는 공간적으로 국소된 원자와 광자를 이용하여 새로운 현미경 원리를 개발하고 나아가 이를 이용한 나노 리소그래피에 대한 연구를 수행하게 된다. 특히 이러한 연구에 있어서 광파장과 무관한 미세한 영역의 광자의 근접장(작은 마이크로 피펫 주위의 나노 스케일에 국한)과 원자의 근접장(작은 속빈 광섬유의 구멍 속에서 가간섭성 원자의 특성)이 새로운 주요 연구주제로 이용되고 있다.

구체적으로 본 연구단에서는 기본적으로 빛의 회절한계를 극복하는 새로운 개념의 나노영역 현미경 및 분광학에 관한 연

구를 수행하고 있는데, 특히 실시간 근접장 주사광현미경 (Real-time Near-field Scanning Optical Microscopy)과 원자 주사현미경(Scanning Atom Microscopy)에 대한 연구를 진행하고 있다. 실시간 근접장 주사 광현미경에서는 높은 공간 분해능과 함께 기존의 전자현미경과 비슷한 속도의 실시간적 광학정보 및 영상을 얻으려는 시도를 하고 있고 현재 세계에서 가장 빠른 이미지를 얻고 있다. 한편 원자 주사현미경에서는 기존의 전자현미경에 쓰이는 전자 대신 중성입자인 원자를 사용하여 저에너지 표면연구 등을 가능하게 하는 새로운 개념의 현미경 구현을 시도하고 있다. 한편 이러한 나노영역의 광기술을 이용하면 단일 양자계(단일원자, 단일분자, 단일반도체, 단일생체 등)에 대한 레이저분광학 연구를 수행할 수 있게 되는데, 현재 단일 반도체 양자점에 대한 분광학 연구가 한창 진행 중이다.

요컨대 저차원의 국소된 광자와 원자의 근접장에 대한 물리적 성질의 깊은 이해와 기술적 응용을 위한 구체적 연구는 새로운 학제간 과학 및 기술 영역을 창조할 수 있는 주요한 발전을 제공하게 되리라 기대된다.

### 주요연구소개

1. 연구원 사진.
2. 고분해능 근접장 현미경<sup>[2]</sup>.
3. 고분해능 공초점 주사 현미경<sup>[3]</sup>.
4. 근접장 현미경을 이용한 비선형광학 실험<sup>[4]</sup>.
5. 실시간 근접장현미경을 위한 초고속 스캐닝<sup>[5]</sup>.
6. 나노펜을 이용한 리소그래피<sup>[6]</sup>.
7. 근접장광을 이용한 고밀도 광기록<sup>[7]</sup>.
8. 반도체 양자점의 근접장 분광학<sup>[8]</sup>.
9. 단일 반도체 양자점의 근접장 분광학<sup>[9]</sup>.
10. 가장 간단한 저속 원자빔 발생 장치<sup>[10]</sup>.
11. 원자 유도를 위한 속빈 레이저 빔<sup>[11]</sup>.

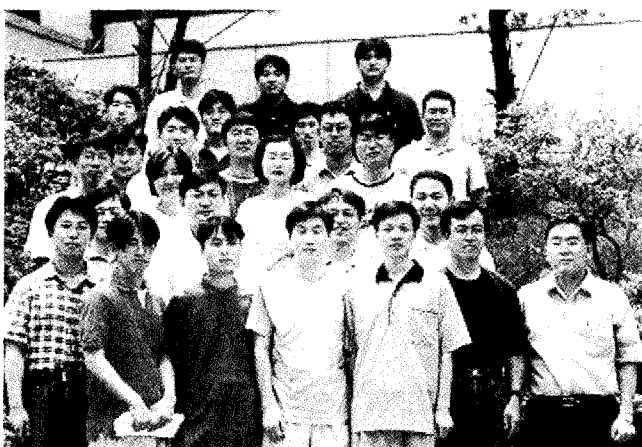


그림 1. 연구원 사진.

12. 속 빈 레이저를 이용한 저온 원자 유도<sup>[12]</sup>.
13. 원자 주사현미경을 위한 고휘도 연속 원자빔<sup>[13]</sup>.
14. Bose 응집물질을 이용한 가간섭성 원자빔
15. 근접장광의 양자이론 및 에바네스cent파 레이저 이론<sup>[14]</sup>.

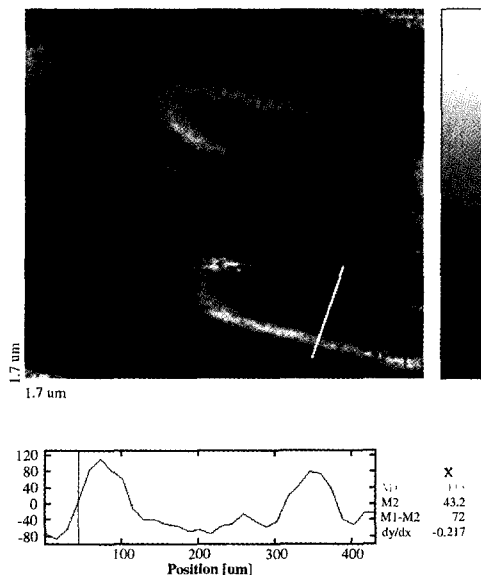


그림 2. 2차 조화진동을 이용한 CD ROM 이미지: 60nm 분해능.

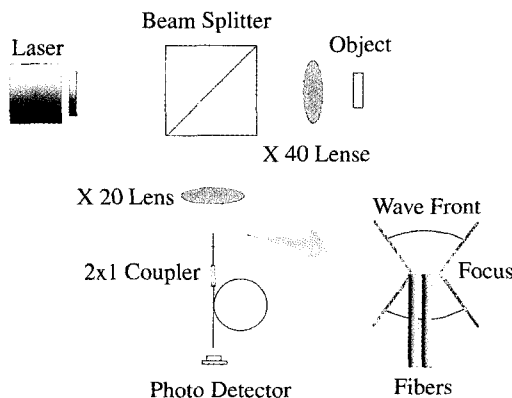


그림 3. 실험장치: 1x2 Fiber Coupler를 이용한 파의 곡률차이 측정.

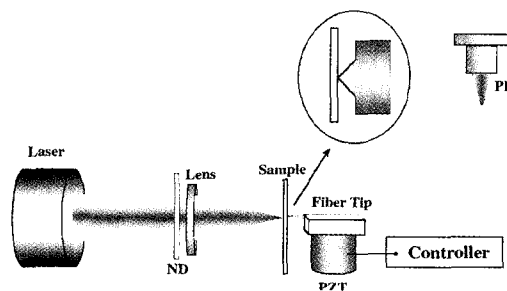


그림 4. 근접장 현미경을 이용한 3차 비선형 효과 측정.

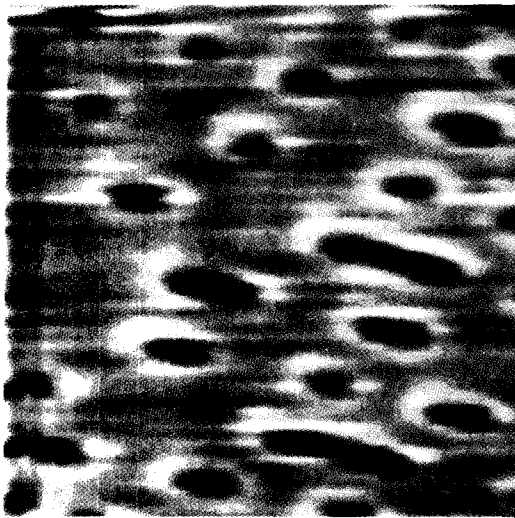


그림 5. 현재 가장 빠른 AFM 스캐닝 이미지: 64×64픽셀, 10μm×10μm, 스캔시간 0.5초.

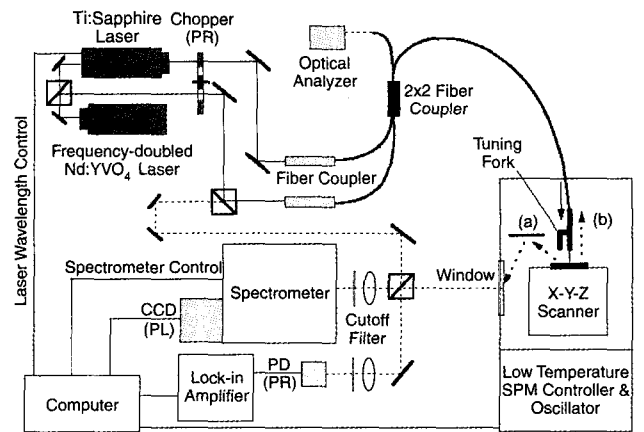


그림 8. 저온 근접장 현미경을 이용한 근접장 분광학 실험장치.

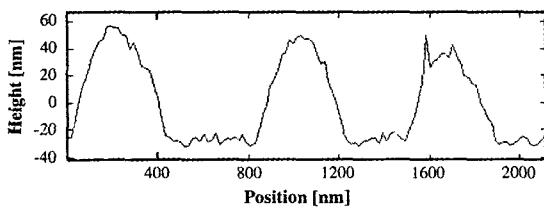
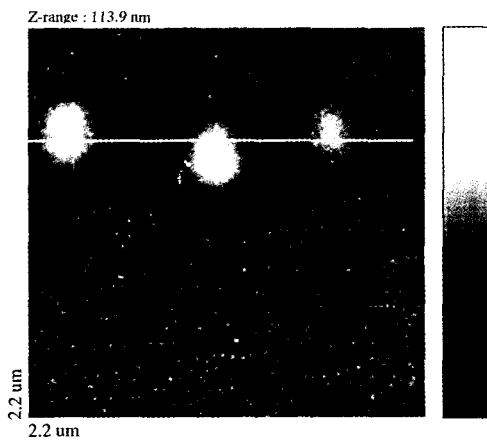
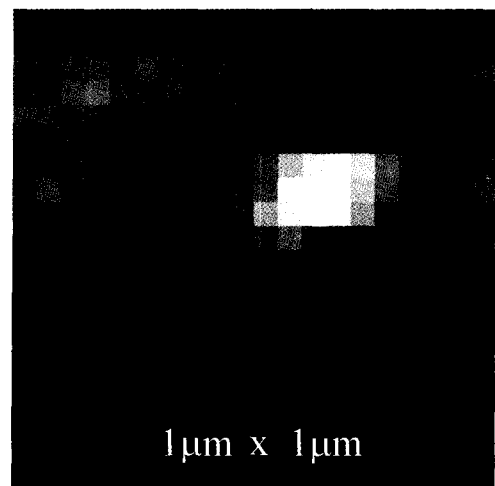


그림 6. 나노펜을 이용한 포토리지스트 패턴: < 300 nm.



그림 7. 근접장광을 이용하여 광기록매체에 기록한 연구단 로고.



- peak at 1.333 eV

그림 9. 양자점 2차원 분광이미지: 1.333 eV 에너지.

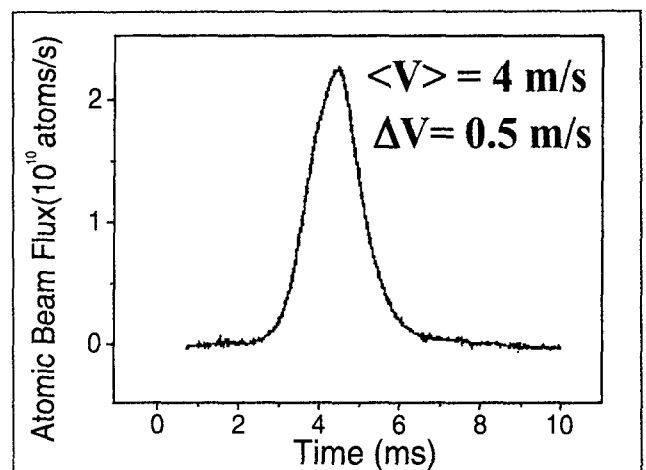


그림 10. 가장 간단한 원자포획장치를 이용한 저속 원자빔 발생.

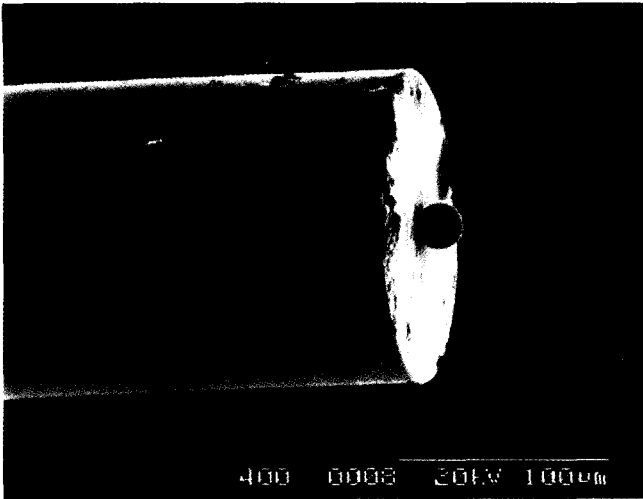


그림 11. 미세구가 부착된 속빈 광섬유와 유도된 빛.

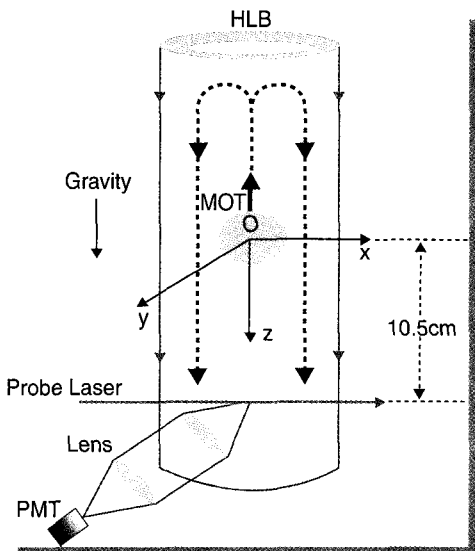


그림 12. 도넛모양의 레이저를 이용한 고효율 원자분수.

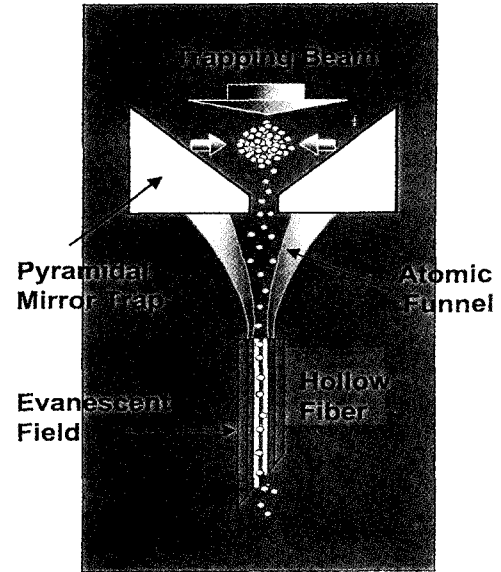


그림 13. 실험장치도: 원자주사현미경.

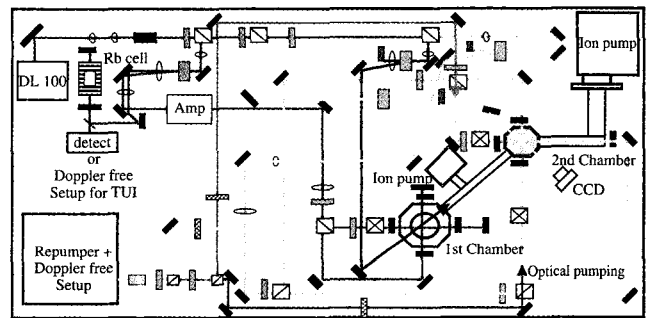


그림 14. 실험장치도: 보즈 응집물질.

## 참고논문

1. *Near Field Optics*, edited by D.W. Pohl and D. Courjon(Klumer Academic Publishers, 1992); *Near-Field Optics: theory, instrumentation, and applications*, Michael A. Paesler and Patric J. Moyer, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996; M. Ohtsu, *Near-Field Nano/Atom Optics and Technology*, Springer-Verlag, Tokyo, Berlin, Heidelberg, 1998; M. Ohtsu and H. Hori, *Near-field nano-optics*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
2. "Resolution Enhancement in Reflection Mode Near-field Optical Microscope Using Second Harmonic Modulation Signals", J. H. Park, M. R. Kim, and W. Jhe, *Opt. Lett.* 25, 628(2000)
3. "High Resolution Confocal Detection of Nanometric

- Displacement using a 2x1 Optical Fiber Coupler”, Joon Ho Bae, Ki Hyun Kim, Mun-Heon Hong, Chang Hoon Gim, and Wonho Jhe, Opt. Lett., accepted for publication(2000)
4. “Direct Observation of Self-focusing near Diffraction Limit in Silicon Film”, June-H. Park, Myong R. Kim, Wonho Jhe, and Bum Ku Rhee, Appl. Phys. Lett., accepted for publication(2000)
  5. “Fast-scanning Shear-force Microscopy using a High-frequency Dithering Probe”, Yongho Seo, June H. Park, Jin B. Moon, and Wonho Jhe, Appl. Phys. Lett., accepted for publication(2000)
  6. “Scanning Nanolithography using Material-filled Nanopipette”, Moon-Heon Hong, Ki Hyun Kim, Joonho Bae, and Wonho Jhe, Appl. Phys. Lett., accepted for publication(2000); “Nano-pattern Lithographic Fabrication Using Pulled Micro-pipette and Method Thereof”, U.S.A. Patent(09/443,051), Pending
  7. “Recording Medium Having Planar Aperture Array and Fabrication Method Thereof, and Near-field Optical Recording/Reproducing Device Using Same Method Therefor”, U.S.A. Patent(09/364,530), Pending Japan Patent(11-216941), Pending
  8. “Near-field Photorefectance Spectroscopy of Quantum Well Structure”, Yong-Hoon Cho, Dai-Sik Kim, and Wonho Jhe, Appl. Phys. Lett., submitted(2000)
  9. “Near-field Optical Spectroscopy and Microscopy of Self-assembled InAs Single Quantum Dots” Sang-Kee Eah, Seong-cheol Hong, Y. Arakawa, and Wonho Jhe In preparation for submission(2000)
  10. “Cold Atomic Beam Produced by a Conical Mirror Funnel”, K. H. Kim, K. I. Lee, H. R. Noh, M. Ohtsu, and W. Jhe, Phys. Rev. A, submitted(2000)
  11. “Diffraction-limited Dark Laser-spot produced by Hollow Optical Fiber”, Yong-II Shin, Kihwan Kim, Jong-An Kim, Heung-Ryol Noh, and Wonho Jhe, Opt. Lett., accepted for publication(2000)
  12. “Efficient Optical Guiding of Trapped Cold Atoms by a Hollow Laser Beam”, Xinye Xu, Kihwan Kim, and Wonho Jhe, Phys. Rev. Lett., submitted(2000)
  13. “Scanning Atom Microscopy”, Jong-An Kim, Heung-Ryol Noh, and Wonho Jhe, In preparation for submission (2000)
  14. “Quantum Theory of Amplified Total Internal Reflection due to Evanescent Mode Photon”, Chang-Woo Lee, Kyungbum Kim, Jaewoo Noh, Wonho Jhe, Phys. Rev. A, accepted for publication(2000)

---

#### 연구 기관

- 지원 : 과학기술부/한국과학기술평가원(KISTEP)의 창의적 연구사업
- 기간 : 1997년 12월부터 2006년 9월까지
- 구성 : 연구단장(제 원호)
  - Near-field Photonics 그룹: 서용호(리더), 홍문현, 박준형, 문진배, 김창훈, 장성진
  - Atom Photonics 그룹: 노홍렬(리더), 김재완, 김종안, 심우식, 김기환, 신용일, 허명선, 연영희
  - Near-field Spectroscopy 그룹: 제원호(리더), 홍성철, 이상기, 조호진, 배준호, 문세정, 최현호, 안준모
  - 전직연구원: 김명룡(LG종기원, 전 서브리더), 조영탁(KAIST 물리과 교수), 조용훈(충북대 물리과 교수), 심언엽(외국기업), 송연호(벤처기업), 지정용(Arizona대학 강사), X. Xu(JILA 연구원), 이관일(KAIST 연구원)
  - 방문과학자: W. D. Phillips(NIST), S. Chu(Stanford), H. Walther(MPQ), Y. K. Kim(NIST), M. Ducloy(Paris), U. Fisher(Muenster), V. Minogin(IOS), V. Balykin(IOS) 등
- 위치 : 서울대학교 물리학과 및 신소재공동연구소 내에 위치.  
 TEL : 880-6600, 5785  
 FAX : 882 0246  
 URL : <http://cnat.snu.ac.kr>