

Surface Plasmon 기술

민 범 기

한국과학기술원 기계공학과

I. 서 론

표면 플라즈몬(surface plasmon)은 금속과 유전체의 접합면 상에서 빛에 의하여 여기되는 자유전자들의 결맞는 집단적 진동(collective oscillation)^[1]으로, 최근 나노 스케일 공정의 눈부신 발전과 강력한 성능의 상용 전자기와 시뮬레이터의 개발에 힘입어 표면 플라즈몬에 관한 연구가 나노 영역으로까지 급격히 확대되어 추진되고 있다^{[2]~[9]}. 일반적으로 표면 플라즈몬을 사용하는 기술은 국소화된 표면 플라즈몬(localized surface plasmon)과 표면 플라즈몬의 전파(propagating surface plasmon-polariton) 현상을 이용하는 두 가지 분야로 크게 나누어 볼 수 있다. [그림 1]은 지난 20년간 표면 플라즈몬 관련 연구의 양적인 팽창과 과학적으로 중요한 의미를 가지는 표면 플라

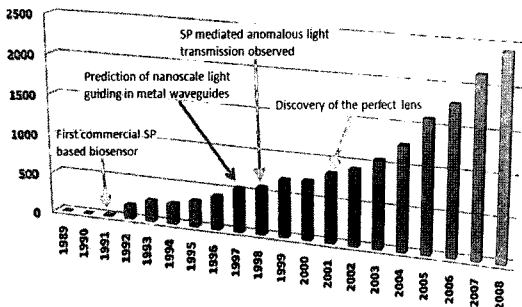
즈몬과 관련된 발견과 예측을 보여주는 그래프이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 요 근래 표면 플라즈몬 연구는 매 5년마다 양적으로 2배의 성장을 보이고 있다.

이러한 표면 플라즈몬에 관한 연구의 급격한 증가는 표면 플라즈몬을 이용한 생화학적 센서의 개발과 더불어 금속/유전체 접합면에서 파장 이하 스케일로의 전자기파의 국소화와 이를 이용한 광학 소자의 나노 스케일 소형화가 표면 플라즈몬을 통하여 가능하다는 사실에 의해 촉발되었다^{[2]~[9]}. 이론적으로 빛의 파장 스케일을 고려할 때 일반적인 유전체나 반도체 광학 소자를 나노 스케일로 집적화 하는 것은 불가능하며, 기존의 광학으로는 빛의 회절한계로 인하여 근본적으로 해결될 수 없는 문제로 생각되어져 왔다. 하지만 빛을 금속 표면에서 자유 전자들의 결맞는 집단적 진동, 즉 표면 플라즈몬으로 전환하여 파수 벡터(k)를 비약적으로 향상시키고 금속 표면에서의 유효 파장을 비약적으로 줄임으로써 나노 스케일에서의 빛의 에너지 전파 및 제어 가 가능하게 된다. [그림 2]는 일반적인 표면 플라즈몬파의 분산 관계를 보여준다^{[1],[2]}.

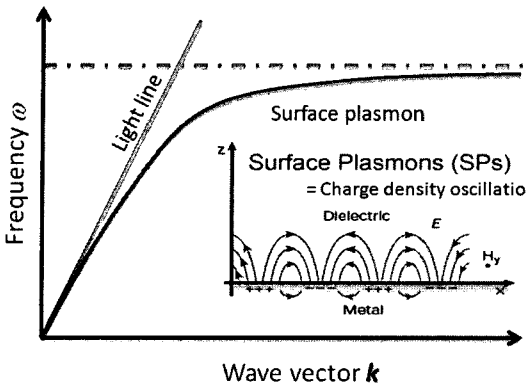
[그림 2]에서 볼 수 있듯이 진공에서의 빛의 분산 관계식(light line)에 비해 표면 플라즈몬 파장(λ_{SP})근방에서 표면 플라즈몬의 파수 벡터(k)가 비약적으로 증가함에 따라 표면 플라즈몬 파장이 나노 스케일에 적합하게 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. [그림 3]은 $\lambda_{free}=550\text{ nm}$ 의 가시광선 빛으로 여기되어진 $\lambda_{SP}=130\text{ nm}$ 의 표면 플라즈몬파의 금속/유전체 접합면에서의 진행을 유한 요소법을 사용한 수치 해석적인 방법을 통하여 나타낸 것이다.

본 고에서는 국소화된 표면 플라즈몬과 표면 플

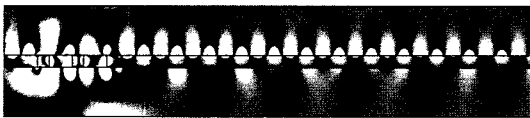
NUMBER OF PAPERS PUBLISHED WITH "SURFACE PLASMON" IN EITHER THE TITLE OR ABSTRACT



[그림 1] 연도별 표면 플라즈몬과 관련되어 출판된 논문의 수. 표면 플라즈몬 연구에서 중요한 몇 가지 핵심적인 발견과 예측, 실용제품의 개발도 같이 표시되어 있다. 논문의 수는 Web of Knowledge에서 발췌



[그림 2] 표면 플라즈몬파의 분산관계(dispersion relation)



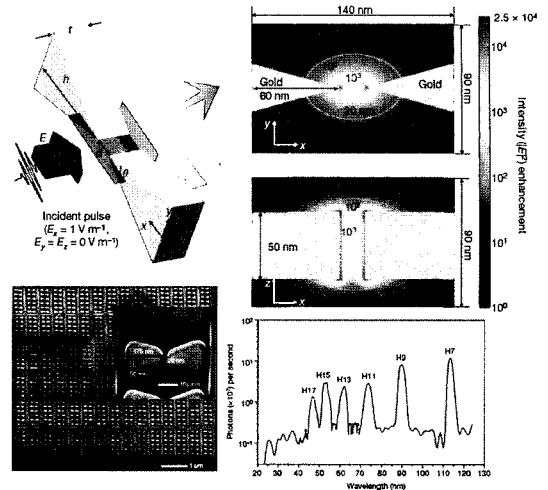
[그림 3] 수치 해석을 통하여 계산된 강하게 국소화된 (strongly localized) 금속/유전체 접합면에서의 표면 플라즈몬파의 진행 ($\lambda_{free}=550 \text{ nm}$, $\lambda_{SP}=130 \text{ nm}$)

라즈몬파의 진행을 이용한 몇 가지 응용 분야의 예를 통하여 표면 플라즈몬 기술의 최근 연구 동향을 개략적으로 살펴보고자 한다.

II. 국소화된 표면 플라즈몬의 응용

2-1 국소 필드 향상을 이용한 EUV 생성

나노 스케일의 금속 입자에 전자기파가 입사하는 경우, 금속 입자의 표면에서는 국소화된 표면 플라즈몬이 생성되게 되며, 입사 전자기파의 국소화된 표면 플라즈몬으로의 커플링을 통하여 국소적인 전자기파의 필드 향상(혹은 증폭) 효과를 얻을 수 있게 된다. 이러한 국소적인 필드의 향상 효과는 기존에 이미 SERS(Surface-Enhanced Raman Spectroscopy) 등에 이용되어 왔으나, 최근 EUV 영역(5~50 nm 파장)



[그림 4] 금으로 제작된 나노 스케일 Bow-tie 배열에 펨토초 레이저의 입사를 통한 파의 증폭과 이를 이용한 고차조화파의 생성^[10]

에서의 고차 주파수 생성에도 이용되고 있다. 일반적으로 마이크로스코피, 리소그래피 또는 스펙트로스코피 등에 유용하게 쓰일 수 있는 EUV 혹은 X선의 광원은 방사광가속기(synchrotron)를 이용하여 얻을 수 있지만, 최근에 고차조화파 생성을 통한 EUV 광원의 개발이 가속화되어져 왔다. 고차 조화파 생성은 강한 레이저 장에 의한 불활성 기체(noble gas)의 원자 및 전자 이온화/재결합 과정에 의한 현상이다. 원자가 이온화가 되기 위해서는 보통 10^{13} Wcm^{-2} 이상의 광 강도가 필요한데 오실레이터를 하나만 갖는 일반적인 펨토초 레이저의 경우는 10^{11} Wcm^{-2} 수준 이상의 광 강도를 얻기가 힘들다. 하지만, 플라즈몬 공명 원리를 이용하여 실험적으로 100배 이상의 국소 필드 향상 효과를 얻고 이를 통하여 고안정도 EUV/X 선을 간단한 나노 스케일 금속 시스템에서 생성할 수 있음을 실험적으로 보여주었다^[10]. [그림 4]에서는 플라즈몬 공명 현상을 이용한 Bow-tie 형태의 금속 나노 구조에서의 국소적 필드 향상 및 필드 향상 그리고 이를 통한 아르곤 가스에서의 고차 조

화파 스펙트럼을 보여주고 있다.

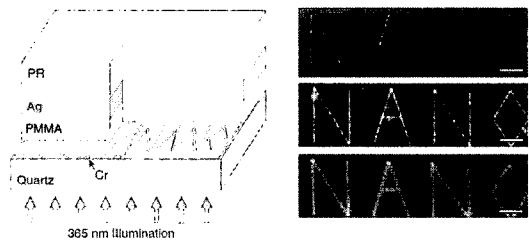
2-2 근접장/원거리장 수퍼 렌즈

광학에서의 회절 한계를 극복할 수 있는 이론은 1968년 Veselago가 음 굴절률(negative refractive index)을 가지는 가상의 물질에서의 전자기학적 현상에 관한 선구적인 연구 결과를 발표하면서 정립되기 시작했다^[11]. 이러한 음 굴절률을 가지는 가상의 물질을 통하여 역 도플러 효과와 역 Cherenkov radiation과 같은 여러 가지 놀라운 물리적 현상들이 관측되리라 예측되었으며, 이미징 시스템의 관점에서는 음 굴절률을 가지는 slab은 피사체(object)로부터 확산되는 광파를 두 개의 이미지(slab 내부와 외부)로 각각 포커싱할 수 있음을 보였다. 하지만, 음 굴절률을 가지는 렌즈의 더 큰 가능성은 이러한 가상 물질을 구현할 수 있는 나노 제조 공정의 부재로 인하여 1990년대 후반까지 잊혀 왔다.

영국 임페리얼 칼리지의 Pendry 교수는 2000년도에 Veselago에 의하여 제안된 개념을 다시 환기하여, 음 굴절률을 가지는 slab을 사용하면 피사체의 높은 공간 주파수 성분(high spatial frequency content-evanescent wave: 표면감쇠파)을 증폭시켜 “퍼펙트 렌즈(perfect lens)”를 구현할 수 있음을 보였다^[12]. 이후 음 굴절률을 가지는 퍼펙트 렌즈에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 음 굴절률을 구현하기 위하여 이용되는 물질의 광학적 손실계수에 의하여 표면 감쇠파의 증폭은 완전하지 못하게 되며, 퍼펙트 렌즈의 분해능은 감소될 수밖에 없다. 따라서 최근에는 이러한 분해능에 있어서의 현실적 한계를 고려한 “수퍼 렌즈”라는 용어가 대신 널리 쓰이고 있다. Pendry에 의한 퍼펙트 렌즈 이론적 제안 이후, 2003년 버클리 대학의 Zhang 교수는 광학 파장에서 음의 유전율을 가지는 silver slab을 이용하면 Pendry의 예측대로 표면감쇠파가 국소 플라즈몬 공명현상을 통해 증폭됨을 실험적으로 증명하였다^[13]. 이후 마이크

로웨이브(~1 GHz) 영역에서 split ring resonator(SRR)와 금속 wire로 구성된 음 굴절률 메타물질로 회절 한계를 뛰어넘는 분해능($\lambda/5$)을 가지는 마이크로웨이브 수퍼 렌즈가 듀크 대학의 Smith 교수팀에 의하여 실험적으로 구현되었으며, 광학파장에서는 2005년 버클리 대학의 Zhang 교수팀에 의하여 음 유전률(negative permittivity)을 가지는 silver slab 수퍼 렌즈가 TM(Transverse Magnetic)파에 대하여 국소 플라즈몬 공명현상을 통한 표면 감쇠파의 증폭으로 파장 한계 이하인 $\lambda/6 \sim 60$ nm의 분해능을 가질 수 있음을 실험적으로 보였다([그림 5])^[14].

하지만 전술된 근접장 수퍼 렌즈의 경우, 피사체로부터의 표면 감쇠파 성분을 전달하기 위하여 피사체 자체가 수퍼 렌즈에 매우 가까운 거리에 위치해야 한다는 점 외에도 이미지 또한 근접장에 갇힘으로 인하여 실제적인 이미징 시스템으로 구현되기에는 영상의 획득에 있어서 현실적인 어려움이 존재했다. 따라서 이미지가 원거리장(far-field)에서 형성되는 원거리장 수퍼 렌즈의 개념이 다시 버클리 대학의 Zhang 교수팀에 의해 제안되었고, 같은 팀에 의해 실제 원거리장 이미징 시스템이 실험을 통하여 증명되었다^[15]. 원거리장 수퍼 렌즈는 근접장 silver slab을 사용하여 표면 감쇠파를 증폭한 후 수퍼 렌즈 위에 최적화된 나노 스케일 grating을 사용하여 이를 진행파(propagating wave)로 전환함으로써 이미지가 원거리장에서 회절 한계 이하의 분해능을 가지고 맺힐

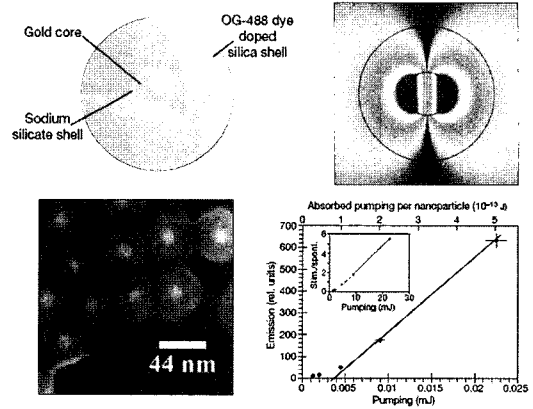


[그림 5] 음유전율을 가지는 near-field silver slab 수퍼 렌즈의 개요와 그의 실험 결과^[14]

수 있게 한 시스템이다. Zhang 교수팀은 원거리장 수퍼 렌즈를 사용하여 50 nm의 선폭을 가지는 두 개의 나노 groove가 70 nm 간격으로 있는 것을 원거리장에서 명확히 구분해낼 수 있었다([그림 6]).

2-3 국소화된 표면 플라즈몬 레이저

최근 들어 금속 나노 입자에서의 국소화된 플라즈몬 공명 현상과 이득 매질을 결합하여 나노 스케일의 레이저를 개발하려는 많은 시도들이 진행되어 왔다. 국소화된 플라즈몬 공명 현상과 이득 매질의 결합을 통한 빛(혹은 표면 플라즈몬)의 증폭은 좀 더 일반적으로 SPASER(Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation)라는 명칭 하에 여러 다른 시도를 통하여 연구되었으나^{[16],[17]}, 현실적인 문제로써 금속의 광학파장에서의 매우 큰 손실 때문에 SPASER 현상을 통한 레이저는 2009년 8월 Norfolk State University의 Noginov 교수팀에 의하여 처음 실현되었다^[18]. Noginov 교수팀은 14 nm의 지름을 가지는 금 나노 입자를 다이(OG-488)로 도핑된 실리카 클래딩을 입혀서(전체 지름 44 nm) 국소화된 표면 플라즈몬 공명의 손실을 이득 매질의 이득으로 극복하고 파장 스케일보다 훨씬 작은 나노 스케일에서의 레이징을 실험적으로 증명하였다([그림 7]). 이 레이저는 현재까지 알려진 최소 크기의 레이저로서 모든 방향으로 빛의 파장보다 훨씬 작은 레이저의 제작이 가능함을 처음으로 보였다. Noginov 팀은 이론적으로 금속이 금속으로써의 성질을 잃어버리는



[그림 7] Spaser 원리를 이용한 dye-doped 금 나노 입자 레이저의 개요, 표면 플라즈몬 필드 및 레이징 L-L curve 측정^[18]

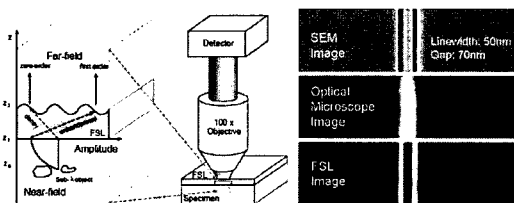
(표면 플라즈몬을 생성하는) 한계점까지 더욱 더 크기를 줄인 레이저의 실현도 가능하다고 예측하고 있다.

III. 표면 플라즈몬파의 응용

3-1 표면 플라즈몬 도파로

일반적으로 유전체나 반도체를 사용한 광도파로의 경우 빛의 회절한계에 의하여 광도파로의 유효 면적이 어느 한계 이상으로 작아질 수 없게 되며, 이러한 한계 이하의 광도파로를 집적화 하기 위해서는 광도파로간의 crosstalk의 심화와 더불어 광파의 손실 증가를 막을 수 없게 된다. 이에 반하여 표면 플라즈몬 도파로는 금속을 포함한 도파로의 제작을 통하여 빛의 진행과 전파 그리고 제어를 파장 이하 스케일에서 할 수 있는 잠재적 가능성을 지니고 있다. 이러한 플라즈몬 도파로는 여러 형태와 물질로 제작이 가능하며, 금속 스트립(metal stripe, IMI), 금속 나노와이어, 금속 나노 입자 배열 및 금속/유전체/금속(MIM) 등의 다양한 종류로 구분되어질 수 있다.

가장 간단한 형태의 표면 플라즈몬 도파로는 금속 스트립의 형태로써, 유전체 매질 사이에 금속 스

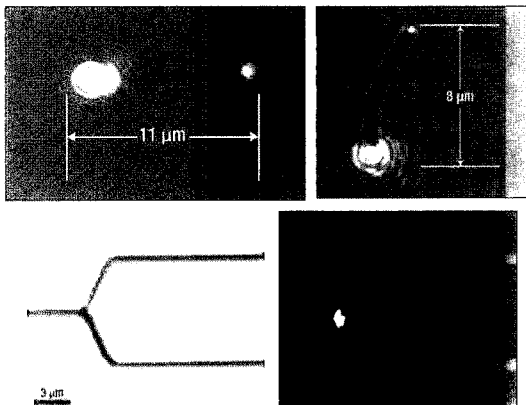


[그림 6] Far-field 수퍼 렌즈의 실험 개략도와 그의 실험결과^[15]

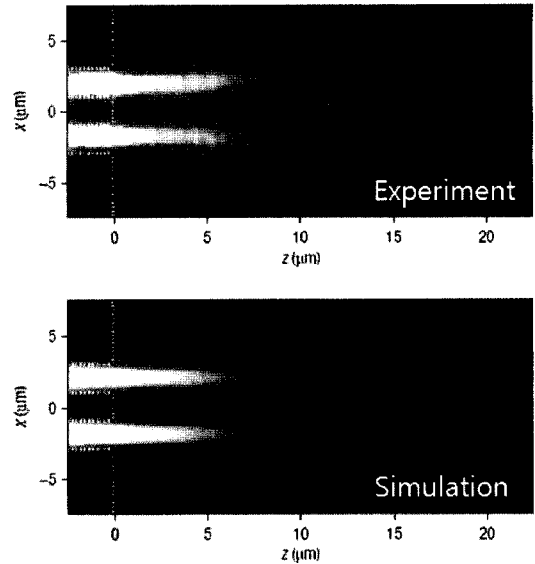
트립을 삽입하여 제작이 가능하다. 이러한 형태의 IMI 구조는 금속 스트립의 폭을 마이크로미터 수준으로 유지하는 경우 센티미터 수준의 도파 거리(propagation length)까지도 달성할 수 있음이 알려져 있다. 하지만 IMI 표면 플라즈몬 도파로의 경우, 방사에 의하여 어느 한도 이상의 파의 집속(field confinement)이 불가능하며, 따라서 파장 이하 스케일의 광도파로로 사용되어지기에는 한계를 가지고 있다. 반면, MIM 형태의 플라즈몬 도파로는 금속 자체의 손실로 인하여 표면 플라즈몬의 전파거리가 IMI 표면 플라즈몬 도파로에 비하여 줄어드는 단점을 가지고 있으나, 파의 집속 면에서는 훨씬 향상된 성능을 가지고 있다.

이렇게 리소그래픽하게 제작 가능한 표면 플라즈몬 도파로뿐만 아니라 화학적인 방법을 통해 제작된 금속 나노 와이어를 통한 표면 플라즈몬의 도파 또한 기초적인 연구의 측면에서 많이 진행되고 있다. 보통 빛은 금속 나노 와이어의 한쪽 끝단에서 커플링되며 다른 끝단에서의 산란을 통해 외부에서 관측된다^[19].

또한 금속 나노 입자의 배열을 통하여 빛의 전파가 가능하며, 이는 각각의 금속 나노 입자의 국소 플



[그림 8] 금속 나노 와이어에서의 표면 플라즈몬파의 전송^[19] 및 채널 플라즈몬을 이용한 splitter^[21]



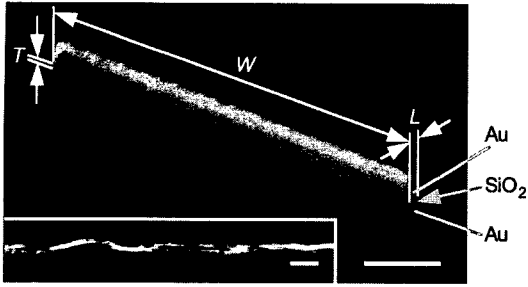
[그림 9] 두 개의 IMI 표면 플라즈몬 도파도에서 나오는 표면 플라즈몬을 이용한 영의 간섭 실험^[22]

라즈몬 공명과 이의 근접 커플링을 통하여 빛의 에너지가 전파되게 된다^[20]. 하지만 이러한 경우 전파거리는 수백 나노 미터에 제한되는 단점을 갖게 되며 공명 현상을 통한 전파이기 때문에 대역폭이 작다는 단점을 가지고 있다.

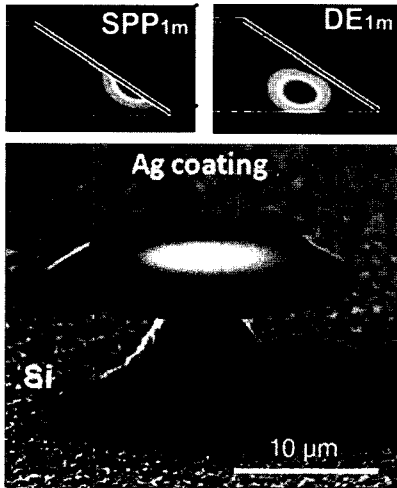
이와 더불어 최근 채널 플라즈몬의 형태의 도파로 또한 활발히 연구되고 있는데, 이는 금속 표면에 이온 빔 밀링(focused ion-beam milling)을 통하여 V-형태의 groove를 만들어 채널 플라즈몬이 이 groove를 통하여 전파하게 된다. 이 제작 방식을 통하여 간섭계, 링형 공진기 등 여러 가지 형태의 광회로를 제작할 수 있음이 최근 알려져 있다^[21].

3-2 표면 플라즈몬 공진기

플라즈몬 광도파로와 더불어 이와 피드백 구조를 결합함으로써 표면 플라즈몬 공진기를 제작하는 연구 또한 여러 가지 관점에서 진행되어지고 있다. 기본적으로 앞에서 전송된 모든 플라즈몬 광도파로가



[그림 10] MIM 구조를 이용한 FP형 표면 플라즈몬 공진기 ($W=107$ nm, $T=14$ nm)^[24]



[그림 11] 위스퍼링 갤러리형 표면 플라즈몬 광공진기의 전자현미경 사진과 그 내부에 존재하는 표면 플라즈몬 및 유전체 모드^[26]

표면 플라즈몬 공진기를 제작하는 데 사용될 수 있다. 은 나노선을 이용한 Fabry-Perot(FP)형 표면 플라즈몬 공진기^[23], 채널 플라즈몬을 이용한 공진기^[21], MIM 구조를 이용한 FP 공진기^[24], 금속 표면에 distributed Bragg mirror를 이용한 표면 플라즈몬 공진기^[25] 등 여러 가지 플라즈몬 공진기들이 실험적으로 구현되었다. 하지만 이 모든 플라즈몬 공진기의 경우, 광학적인 모드 부피(mode volume)는 표면 플라즈몬을 이용하여 상당히 감소되었으나 동시에 표면

플라즈몬의 손실과 반비례하는 Q 값은 상당히 낮은 값 (<100)으로 유지되었다. 이러한 표면 플라즈몬 광공진기의 낮은 Q 값을 높이기 위하여 축대칭 위스퍼링 갤러리형 표면 플라즈몬 광공진기의 제작과 실험 결과가 최근 발표되었다^[26]. 제작되어진 표면 플라즈몬 광공진기의 경우 최대 Q 값이 $1,376 \pm 65$ 로 기존의 모든 표면 플라즈몬 광공진기 연구에 비해 30배 이상의 성능 향상을 보였으며, 테이퍼된 광섬유를 통한 표면 플라즈몬의 적절한 위상 정합(phase-matching)이 가능함을 성공적으로 보였다. 하지만 현재까지 제작된 표면 플라즈몬 위스퍼링 갤러리형 광공진기의 경우 전체적인 크기가 파장보다 대략 10배 이상 크기 때문에 현재의 Q 값을 유지하면서 파장 크기로 공진기의 크기, 즉 광학모드 부피(V)를 비약적으로 줄이는 것이 파장스케일 위스퍼링 갤러리형 표면 플라즈몬 광공진기의 응용에 있어 필요하게 된다. 파장 이하 스케일의 모드 부피를 유지하면서 동시에 높은 Q 값을 가지는 방법으로써 표면 플라즈몬 공진기를 저온에서 동작하는 이론적인 연구들이 진행되고 있으나^[27] 현재까지는 실험적으로 증명이 되지 못한 상태이다.

3.3 표면 플라즈몬과 레이저

2.3절에서 소개된 국소화된 표면 플라즈몬 공명을 이용한 레이저와 별개로 최근 2009년 9월 하이브리드 표면 플라즈몬과 레이저가 실현되었다^[28]. 레이징의 실현에 필요한 이득 매질로써 CdS 나노 와이어를 사용하였으며, 나노 와이어를 사용함으로써 자연적으로 얻어지는 FP 형태의 공진기로 구성되며, 유효 면적을 표면 플라즈몬의 경우보다 더 줄이기 위하여 하이브리드 표면 플라즈몬을 이용하였다. 하이브리드 표면 플라즈몬은 금속/저굴절률 유전체/고굴절률 유전체의 조합을 이용하는 경우 생성되는 모드로써 강한 필드의 국소화가 저굴절률 유전체 안에서 이루어지게 된다. 이 경우 레이징은 저온에서 얻어졌으

며, 특이한 점으로 저굴절률 유전체의 두께가 얇은 경우 높은 β (spontaneous emission factor) 값 때문에 문턱값(threshold)이 거의 없는 threshold-less 레이징의 결과를 얻었다.

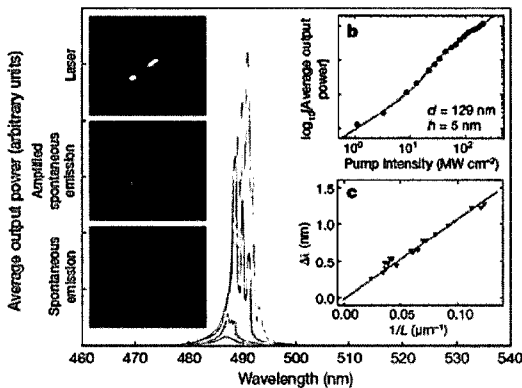
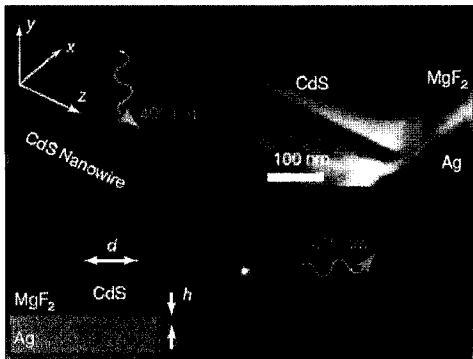
IV. 결 론

본 원고에서는 몇 가지 예시를 통하여 현재 표면 플라즈몬 기술의 동향을 살펴보았다. 여기에 예시를 통해 소개한 분야뿐 아니라 바이오 센싱, 양자광학, 칩스케일 나노 광학 등 기초적인 부분과 더불어 응용가능성이 많은 분야에서 표면 플라즈몬 기술은 사용되고 있으며 나노 기술의 발전과 더불어 표면 플

라즈몬 기술은 앞으로 더욱 발전되리라 보인다.

참 고 문 헌

- [1] H. R. Raether, "Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings", Spr. 1988.
- [2] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics", *Nature*, vol. 424, pp. 824-830, 2003.
- [3] S. A. Maier *et al.*, "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle Plasmon waveguides", *Nature Mater*, vol. 2, pp. 229-232, 2003.
- [4] M. I. Stockman, "Nanofocusing of optical energy in tapered plasmonic waveguides", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93, pp. 137-404, 2004.
- [5] E. Ozbay, "Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions", *Science*, vol. 311, pp. 189-193, 2006.
- [6] E. Cubukcu, E. A. Kort, K. B. Crozier, and F. Capasso, "Plasmonic laser antenna", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 93-120, 2006.
- [7] F. Lopez-Tejiera *et al.*, "Efficient unidirectional nanoslit couplers for surface plasmons", *Nature Phys.*, vol. 3, pp. 324-328, 2007.
- [8] S. Lal, S. Link, and N. J. Halas, "Nano-optics from sensing to waveguiding", *Nature Photon*, vol. 1, pp. 641-648, 2007.
- [9] M. L. Brongersma, P. G. Kik, *Surface Plasmon Nanophotonics*, Springer, Dordrecht, 2007.
- [10] S. Kim *et al.*, "High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement", *Nature*, vol. 453, pp. 757-760, 2008.
- [11] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ



[그림 12] 하이브리드 표면 플라즈몬 공진기 레이저의 개념과 레이징 실험^[28]

- and μ ", *Soviet Phys.*, vol. 10, pp. 509-514, 1968.
- [12] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 3966-3969, 2000.
- [13] Z. Liu, N. Fang, T.-J. Yen, and X. Zhang, "Rapid growth of evanescent wave by a silver superlens", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 5184-5186, 2003.
- [14] N. Fang, H. Lee, C. Sun, and X. Zhang, "Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens", *Science*, vol. 308, pp. 534-537, 2005.
- [15] Z. Liu *et al.*, "Far-field optical superlens", *Nano Lett.*, vol. 7, pp. 403-408, 2007.
- [16] D. J. Bergman, M. I. Stockman, "Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: Quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, pp. 027402, 2003.
- [17] N. I. Zheludev, S. L. Prosvirnin, N. Papasimakis, and V. A. Fedotov, "Lasing spaer", *Nature Photon.*, vol. 2, pp. 351-354, 2008.
- [18] M. A. Noginov *et al.*, "Demonstration of a spacer-based nanolaser", *Nature*, vol. 460, pp. 1110-1112, 2009.
- [19] A. W. Sanders *et al.*, "Observation of plasmon propagation, redirection, and fan-out in silver nanowires" *Nano Lett.*, vol. 6, pp. 1822-1826, 2006.
- [20] S. A. Maier *et al.*, "Local detection of electromagnetic energy transport below diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguide", *Nature Mater.*, vol. 2, pp. 229-232, 2003.
- [21] S. I. Bozhevolnyi *et al.*, "Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators", *Nature*, vol. 440, pp. 508-511, 2006.
- [22] R. Zia, M. L. Brongersma, "Surface plasmon polariton analogue to Young's double-slit experiment", *Nature Nanotech*, vol. 2, pp. 426-429, 2007.
- [23] H. Ditlbacher *et al.*, "Silver nanowires as surface plasmon resonators", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, pp. 257-403, 2005.
- [24] H. T. Miyazaki, Y. Kurokawa, "Squeezing visible light waves into a 3-nm-thick and 55-nm-long plasmon cavity". *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, pp. 097401, 2006.
- [25] J.-C. Weeber, A. Bouhelier, G. Colas des Francs, L. Markey, and A. Dereux, "Submicrometer in-plane integrated surface plasmon cavities", *Nano Lett.*, vol. 7, pp. 1352-1359, 2007.
- [26] B. Min *et al.*, "High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity", *Nature*, vol. 457, pp. 455-458, 2009.
- [27] Y. Y. Gong, J. Vuckovic, "Design of plasmon cavities for solid-state cavity quantum electrodynamics applications", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, 033113, 2007.
- [28] R. F. Oulton *et al.*, "Plasmon lasers at deep subwavelength scale", *Nature*, Advanced online publication, 2009.

≡ 필자소개 ≡

민 범 기



1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)

2001년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)

2003년 6월: California Institute of Technology, Applied Physics (M.S.)

2006년 6월: California Institute of Technology, Applied Physics (Ph.D.)

2006년 7월: Postdoctoral Scholar, California Institute of Technology

2007년 7월: Postdoctoral Scholar, Nanoscale Science and Engineering Center(NSEC), UC Berkeley

2009년 1월~현재: 한국과학기술원 기계공학과 조교수

[주 관심분야] 플라즈모닉스, 메타 물질, 광역학