

이병호
서울대학교 전기공학부 교수
액티브 플라즈모닉스 응용시스템 창의연구단 단장

서론

전자의 흐름을 제어하고 저장하는 전자공학 기술은 20세기에 대동하여 21세기에 들어선 현대 정보 사회의 바탕을 이루고 있다. 최근 들어 급속히 성장하는 다양한 형태의 정보 매체 시장에서의 고밀도의 초고속 정보 처리기에 대한 수요는 전자공학 기술의 한계에 가까운 수준에 이르고 있다. 따라서, 보다 더 작고 빠르며 효율적인 전자소자의 개발을 위한 지속적인 연구개발이 계속되고 있다. 소자들의 크기 축소와 관련하여 무수한 난관이 존재하는 것 또한 사실이다. 근래, 마이크로 프로세서 처리속도의 혁신적인 향상을 저해하는 두 가지 큰 문제는 칩(chip) 내에서의 발열과 연결선상에서의 신호지연으로 알려져 있다. 반면 광학적 신호처리의 경우 엄청난 정보 전달 용량을 가지고 있으며 앞에서 언급한 발열과 신호지연의 문제에 대해 흥미롭고 새로운 해결책을 제시할 수 있을 것으로 예상되며 이러한 광학적인 대체 소자들은 특히 고속으로 결합된 분산형 계산 단위의 집합체로 이루어질 미래의 칩 구조에 가장 적합한 방식을 제공할 것으로 생각된다.

하지만, 불행히도 광학소자와 전자소자의 구성요소들 사이에 존재하는 크기의 차이로 인하여 두 가지 요소가 통합된 시스템을 구성하는데 어려움이 발생한다. 유전체 광학 소자의 물리적 최소 크기 한계는 기본적인 광 회절 한계에 의하여 결정이 되는데 이는 빛의 파장의 약 절반 정도가 되며, 유전체 광도파로의 단면 크기는 최근의 트랜지스터 게이트 크기(~50 nm)와 비교해 보면 수 백 배 이상의 차이를 보이게 된다. 이와 같은 전자 소자와 광학 소자의 구성요소간 명백한 크기의 차이는 이 두 기술의 융합에 가장 큰 제약조건이 되고 있다. 따라서 나노 스케일 소자간 광 주파수 대역에서의 정보 전달을 가능하게 하고 나노 크기의 전자소자 구성요소와 마이크로 크기의 광학 구성요소간의 간극을 채워줄 완전히 새로운 방식의 칩 스케일 소자 기술의 발전이 요구되고 있다. 또한, 현재의 반도체 기반 마이크로 프로세서에서의 중요한 문제점 중의 하나는 연결선(interconnection)에서의 RLC 시간지연이다. 이러한 마이크로 프로세서 내와 또한 마이크로 프로세서들 간의 상호 연결 문제의 돌파구로 본 연구단에서는 플라즈모닉스를 탐구하고 있다.

본 고에서는 플라즈모닉스에 대한 간단한 소개와 더불어 표면 플라즈몬을 바탕으로 한 연구동향을 살펴보고, extra ordinary transmission을 바탕으로 한 층간 연결 구조에 대한 가능성을 제시하고자 한다.

플라즈모닉스(plasmonics)에 대한 소개

1980년대 연구자들은 실험적으로 금속과 유전체의 경계에서 특정한 조건 하에 광파가 금속 표면의 자유전자들과 상호 작용하여

공진을 일으키는 것을 확인하였다. 다르게 말하면 금속 외부의 전자기파와 금속의 자유전자의 공진이라고도 할 수 있다. 그의 결과로 생성된 것이 마치 잔잔한 연못에 돌을 던져 생성된 물결 파가 표면을 따라 진행되는 것과 같은 모습의 고밀도 전자의 진행파인 표면 플라즈몬(surface plasmon)이다. 보다 정확한 명칭은 표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polariton)인데, 금속과 유전체의 경계면에서 빛(광자)과 플라즈마가 결합된 형태로 표면을 따라 진행해 가는 것을 말한다.

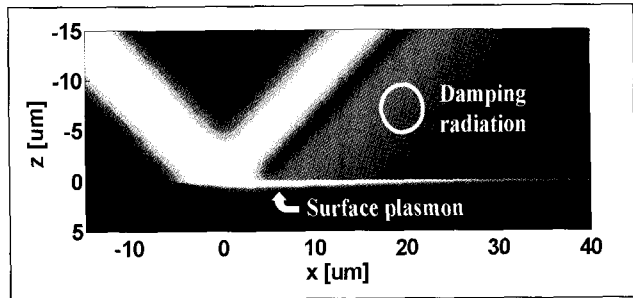


그림 1 금속 박막에 Gaussian beam을 입사하여 유도한 표면 플라즈몬 파

금속과 유전체의 경계면에 TM 편광으로 입사하는 광파가 적절한 방법에 의해 위상정합 조건을 만족시킬 수 있게 되면, 금속 표면에 전자의 움직임(플라즈마)을 만들어 내고 이 결합은 금속과 유전체의 경계면에 존재하는 근접장을 만들어낸다. 이러한 표면 플라즈몬 파는 전파 길이가 기본적으로 수십 마이크로미터 이상이 되게 만들 수 있으며, 세기가 강한 국소 근접장의 성질 및 특유의 분산 현상과 공명 현상(surface plasmon resonance)을 가진다. 그림 1에 금속-유전체 박막에서의 표면 플라즈몬 공진에 의해 광파가 진행되는 것을 가우시안 빔을 통하여 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다. 이러한 표면 플라즈몬 파를 위한 도파로를 만들고, 이를 변조할 뿐 아니라, 플라즈몬 소스(source)와 수신소자, 분배기, 결합기, 반사격자, 필터 등을 연구하는 분야가 플라즈모닉스(plasmonics)이다.

연구동향

전자 빔 리소그래피(electron beam lithography)와 이온 빔 밀링(ion beam milling)과 같은 나노 공정 기술의 발달과 더불어 TEM(transmission electron microscopy), SEM(scanning electron microscopy) 및 NSOM(near-field scanning optical microscopy) 등의 나노 구조 탐지 기술들은 표면 플라즈몬을 바탕으로 한 광자 집적 회로(photonic integrated circuit)의 현실화를 앞당기고 있다.

최근 Intel은 세계 최초의 실리콘 레이저를 개발함으로써 실리콘 기판위에 전자회로와 포토닉스 회로를 동시에 집적하는 꿈의 비전에 큰 계기를 제공하였다. 플라즈모닉스는 나노스케일의 플라즈몬 근접장을 신호 전달의 수단으로 사용하기 때문에 이와 같은 나노스케일의 융합집적회로의 구현을 위한 핵심 분야라고 할 수 있다. 이러한 비전은 플라즈모닉스 연구의 세계적인 붐을 조성하고 있으며 이 분야의 급속한 발전의 원동력이 되고 있다. 한편, α -Ga의 상전이에 의한 플라즈몬파의 초고속 전광 스위칭 개념이 Zheludev 교수 그룹(University of Southampton)에서 제안되어 액티브(active) 플라즈모닉스 광집적회로 연구에서 새로운 가능성을 열었다. α -Ga은 임계온도 이상에서는 금속성 quasi-melt 상태의 m-Ga이 되는데 이러한 상전이 현상이 빛을 조사하면 임계온도 이하에서도 똑같이 일어난다는 것을 이용하여 플라즈몬파를 스위칭하는데 성공하였다. Beltram 그룹에서는 이득 매질에 플라즈모닉스 기반의 공진기를 구성하여 플라즈모닉 레이저 및 플라즈모닉 증폭기 등의 실현 가능성을 입증했다. 이와 같은 액티브 플라즈모닉스 기술들에 의해 플라즈모닉스를 중심으로 한 나노포토닉스의 응용 분야는 급격하게 넓어질 것으로 예상되고 있다. 새로운 플라즈모닉스 집적회로 소자에 대한 연구는 Stanford 대학의 Fan 그룹에서 선도적으로 하고 있는데 photonic bandgap 구조와 플라즈모닉스를 토대로 다양한 방식의 플라즈몬 도파로 구조가 연구되었다. 또한, U. C. Berkeley의 Zhang 교수 그룹을 중심으로 플라즈모닉스 콘소시움이 구성되어 플라즈모닉스 분야에 대한 대규모의 연구 투자가 이루어지고 있다. 기반 기술의 연구 뿐 아니라, 플라즈모닉스의 응용에 대한 연구 또한 매우 활발하다. 이는 특히 바이오 기술 분야에서 두드러지는데, 플라즈몬의 공명 및 국소 근접장 향상 현상은 바이오 센서 및 이미징 기술과 바이오/분자의 매니플레이션(manipulation)을 위한 트랩핑(trapping) 및 트위저(tweezer) 등에 응용되고 있다.

Dholakia 그룹은 국소적인 근접장을 어레이 형식으로 여기시켜 나노 입자들을 정렬하고 필터링(filtering)하는 병렬 트위저 기술을 선보였다. 이러한 마이크로 매니플레이션 기술들은 최근 바이오 기술에서 중요해지고 있는 신경계 연구 및 이온채널 제어 등의 응용에 중요한 역할을 담당할 수 있을 것이다.

Extraordinary optical transmission(EOT)을 이용한 광연결

일반적으로 aperture에서의 광파의 회절 이론에 있어서, 슬릿(slit) 또는 구멍(hole)의 크기가 회절한계인 입사하는 광파의 파장의 반 이하일 경우 aperture를 통과할 수 있는 광량은 매우 작은 것으로 알려져 있다. 그러나 1998년 Ebbesen 등에 의해 이러한 정설에 위배되는 extraordinary optical transmission (EOT) 현상이 발견되었다. 얇은 금속판에 파장의 1/2보다 작은 크기의 구멍들을 파장보다 약간 짧은 길이로 2차원 격자 형태로 배열했을 경우, 구멍들의 크기가 파장의 1/2보다 작음에도 불구하고, 특정 파장에서 큰 투과율을 보이는 현상을 EOT 현상이라 부른다. 이 현상이 발견된 이후, EOT 현상에 대한 물리적인 고찰과 많은 실험이 수행되었고, 이와 관련된 여러 가지 광학적 현상들이 발견되었다. 그 중 흥미로운 광학적 현상으로서 2002년 Lezec 등이 발견한 것이 있는데, 금속면에 형성한 subwavelength 구멍 주변에 일정 간격으로 가는 홈을 파놓을 경우, subwavelength 구멍을 통과한 광파에 의해 마치 Gaussian beam과 같은 집속된 빛이 형성될 수 있다는 것이고, 이 빛은 공기 증을 전파함에 따라 잘 퍼지지 않는 성질을 보이며 금속판에 대해 수직 방향으로 진행하였다. 이러한 beaming

현상 발견 이후, photonic crystal에서의 beaming light, single metal hole에서의 EOT 현상, microwave 영역에서의 beaming light 구조를 응용한 안테나 등 여러 연구들이 진행되었다. 또한, 금속판에 홈을 파는 것이 아니라, subwavelength metal aperture 주변에 주기적인 유전체 격자를 배열함으로써 beaming light 현상을 유도할 수 있다. 본 연구진에서는 그림 2와 같이 subwavelength metal-slit의 표면에 유전체 격자 구조를 비대칭적으로 배열함으로써 공간적으로 국소화된 빔의 진행 방향을 바꿀 수 있는 방법을 고안했으며, 이는 광자 집적 회로의 구현에 필수적인 칩간 광연결 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

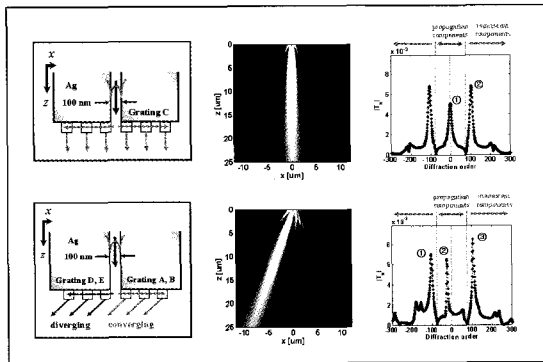


그림 2 유전체 격자의 배열과 표면 플라즈몬을 이용한 축 이방성 빔의 형성

향후 전망

표면 플라즈몬을 이용하는 새로운 범주의 소자에 대한 연구가 많은 그룹에서 진행 중에 있으며 그 결과물들이 현재 Nature 와 Science 와 같은 저널에 수시로 게재되고 있다. 플라즈몬을 이용하여 회절 한계를 극복하는 광학 리소그래피 방법과 super(hyper) lens의 구현, 광학적인 투명외투 구조의 설계, 고효율의 LED를 만드는 일, 이득 물질을 이용한 플라즈모닉 레이지의 구현과 관련한 내용들이 바로 그것이다. 이와 같은 연구를 바탕으로 하여, 전자기파를 아주 작은 구조에 집속하여 전달할 수 있는 플라즈모닉 기술은 향후 초고속 컴퓨터 칩이나 초고감도 분자 감지기술의 새로운 장을 열 것으로 기대된다. 또한, 화학과 생물학 분야에서 사용될 아주 민감한 감지기의 설계를 가능하게 하거나, 더 나아가서 나노 금속 입자의 플라즈몬 공명현상을 이용하여 피부암 세포를 치료하는 등의 분야에서의 적용이 예측된다.

본 연구는 과학기술부와 한국과학재단의 창의적연구진흥사업(액티브 플라즈모닉스 응용 시스템연구단)에 의하여 지원되었습니다.