

1. 서론

표면 플라즈몬(surface plasmon)은 물리학, 화학, 생물학, 재료공학 등 다양한 여러 학문 분야에 걸쳐 많은 연구자들이 활발하게 연구 하고 있는 주제이다[1]. 특히 지난 10여 년간 표면 플라즈몬에 대한 관심은 대단히 높아졌다고 할 수 있는데, 이는 지난 1998년에 발표된 비정상적 광 투과 현상(extraordinary optical transmission)에 대한 실험 논문에 의해 촉발 된 것으로 [2], 금속에 뚫어놓은 회절 한계 이하의 작은 구멍들을 통해 투과되는 빛의 양이, 특정 조건 하에서 비정상적으로 증대되는 현상에 대한 보고로서, 해당 논문의 저자들이 표면 플라즈몬에 의한 빛의 투과를 이 현상의 원인으로 지목하였기 때문이다. 이러한 비정상적 광 투과 현상에서 표면 플라즈몬의 역할에 대해서는 아직까지 다양한

터 저장 등의 다양한 응용 분야에서 활용 하기 위한 기초적인 연구로서[3, 4], 표면 플라즈몬의 회절을 이용하여 공간상에서 빔을 형성하거나[4-8], 포커싱(focusing)을 하거나[9, 10], 혹은 금속 표면에 소용돌이(vortex) 등을 형성하는 [11] 등의 연구들을 그 예로 들 수 있을 것이다.

2. 표면 플라즈몬의 특성

표면 플라즈몬, 보다 정확히는 표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polariton)은 주로 내부에 무수히 많은 자유전자가 존재하여, 외부의 전자기적 자극에 의해 전류가 무리 없이 전달 될 수 있는 금속과 같은 도체 물질이, 부도체인 유전체와 만나 경계를 이루고 있는 경우에 나타날 수 있는 표면 전자기파의 일종으로, 집합적인

특집 | SPP

표면 플라즈몬 비밍과 포커싱

이병호*

해석들이 존재하고 있기는 하지만(참고, [3]), 표면 플라즈몬에 대한 이처럼 높은 관심의 근저에는 현대 정보통신이나 바이오 분야 등 다양한 곳에서 기술의 급속한 발전이 이루어지면서, 차세대 기술 성장의 원동력을 다양하게 모색하는 과정에서 자연스럽게 표면 플라즈몬의 여러 가지 장점들이 주목을 받게 된 배경이 있다고 할 수 있다.

이러한 다양한 연구 가운데, 표면 플라즈몬을 이용하여 빛의 공간적인 진행을 조절 하기 위한 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다. 이는, 표면 플라즈몬을 칩간 연결(interconnection), 나노 안테나, 이미징(imaging), 데이

터면 전하 밀도의 진동의 형태로 존재한다[12]. 보다 수학적인 서술을 하자면, 가장 단순한 형태일 경우, 물질의 유전율의 실수부의 부호가 서로 반대인 두 물질간의 경계에서 존재하는 표면 전자기파 모드를 일컫는 말이라고 할 수 있다.

표면 플라즈몬이 표면 전하 밀도의 진동의 형태라는 사실로부터, 표면 플라즈몬의 중요한 성질들이 나타나게 된다.

첫째로, 일반적인 도체에서는 전자가 대부분 그 표면 근처에 존재 할 수 밖에 없기 때문에, 표면 플라즈몬의 에너지도 두 물질의 경계면에서 가장 강하고, 물질 내부

* 서울대학교 전기공학부 액티브 플라즈모닉스 창의연구단

표면 플라즈몬 비밍과 포커싱

로 갈수록 그 에너지가 급격히 줄어들게 된다[1, 12]. 이러한 특성은, 일반적으로 회절 한계에 의해 빛이나 전자 기파가 투과 할 수 없는 작은 단면의 도파로라 할지라도 어느 정도의 단면 크기까지는 표면플라즈몬의 형태로 빛이나 전자기파가 전달 될 수 있게 하여, 수십 나노미터 이하의 선폭을 갖는 도파로에서도 빛과 유사한 광대역의 신호를 전송 할 수 있게 된다[13]. 이처럼 금속 표면을 따라 도파 될 수 있는 형태의 표면 플라즈몬을 전파형(propagating) 표면 플라즈몬이라 하는데, 전파형 플라즈몬은 대개의 경우 매끄러운 경계를 따라 전달되며, 금속의 손실 특성에 의해 전송거리가 제약되는 특성을 갖기 때문에, 빛의 경우, 전송 손실을 낮추기 위해 금이나 은과 같은 물질을 주로 사용한다.

한편, 금속 구조 자체의 크기가 수~수십 나노미터 정도인 경우에는, 자유전자의 자유로운 흐름이 금속의 경계에 의해 강하게 방해 받기 때문에 구조의 크기와 경계 형상에 의해 결정되는, 국소적인 공명 형태의 표면 플라즈몬이 보다 지배적인 현상으로 관측되게 된다. 이러한 표면 플라즈몬은, 파장보다 매우 작은 금속 입자에서 빛이나 전자기파의 매우 강한 흡수 공명 현상을 일으키는 원인이 되며, 이러한 형태의 표면 플라즈몬을 국소 표면 플라즈몬(localized surface plasmon)이라 한다[13].

이 글에서 다루게 될 플라즈몬 비밍(beaming)과 포커싱(focusing)은 이 둘 가운데, 전파형 표면 플라즈몬의 회절(diffraction) 현상을 주로 이용하고 있다.

3. 표면 플라즈몬 비밍

평평한 금속 판에, 통상적인 도파 모드(photon mode)가 존재 할 수 없는 작은 크기의 개구(aperture)나 슬릿(slot)을 뚫고 한 면(입사면)에서 빛을 비추면, 금속의 두께가 충분히 두꺼울 경우 (수백 나노미터 이상), 빛이 이 금속 판을 투과하려면 슬릿이나 개구에 존재 할 수 있는 표면 플라즈몬 모드에 의해서만 투과 할 수 있게 된다 [13]. 이렇게 투과 된 빛은 금속 판의 반대 표면(출사면)에서 회절을 겪게 되는데, 그 중 일부는 슬릿이나 개구를 중심으로, 점 광원이나 쌍극자로부터 나오는 것과 흡사한 방사 (radiation) 전자장이 되고, 나머지는 금속 면을 따라 흐르는 표면 플라즈몬으로 결합 되게 된다. 이 때,

출사 면이 매끄러운 평면이 아니고 주기적인 격자 (grating)를 포함하고 있을 경우, 전파형 표면 플라즈몬은 격자 구조에 의한 추가적인 회절을 겪게 된다. 격자에 의한 유전율의 변화가 충분히 클 경우, 즉 격자를 이루는 서로 다른 물질들간의 굴절율의 차이가 크고 격자의 높이가 충분히 높은 경우, 블록 위상 정합 조건(Bloch phase-matching condition)으로부터 아래와 같은 각도에 해당하는 특정 회절 차수(diffraction order)로 대부분의 에너지가 결합 되게 된다.

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{\lambda_{sp}} \left(1 - m \frac{\lambda_{sp}}{\Lambda} \right) \quad (1)$$

위 식에서 θ 는 회절각도를, λ 와 λ_{sp} 는 각각 입사파와 표면 플라즈몬의 유효 파장을, Λ 는 격자의 주기를, m 은 정수를 나타낸다. 그림 1은 이러한 상황을 도식적으로 표현 한 것이다. 이 때, 격자는 유전체와 금속 어느 쪽이든 가능하다. 금속 격자를 사용 할 경우, 금속판에 홈을 새기는 방법으로 격자를 형성 한다면 제작 공정이 단순해지는 장점이 있을 수 있지만, 슬릿이나 개구로부터 가장 가까운 첫 격자에서 일어나는 산란(scattering)이 너무 강하여 전체 격자에 걸쳐 일어나는 균일한 회절을 기대 하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서, 보다 높은 효율의 비밍이나 포커싱 소자를 제작 하기 위해서는 공정상 다소의 어려움이 있다고 하더라도 유전체 격자를 사용하는 것이 보다 적합하다[4].

이 때, 예를 들어 금속판에 대해 수직 방향으로 비밍을 하고자 한다면, 앞의 식에서 회절 각이 영도인 격자주기를 구하면 되며, 그렇게 얻어지는 격자 주기는 $\Lambda = \lambda_{sp} / m$ 으로 결정 된다. 지난 2002년에 Lezec 등이 사이언스지에 발표한 플라즈모닉 비밍 구조가 이러한 비밍의 예

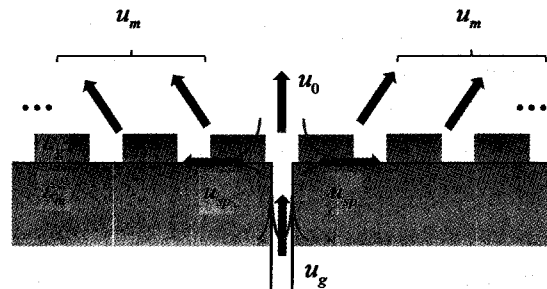


그림 1. 플라즈모닉 비밍, 포커싱 구조의 개념도.

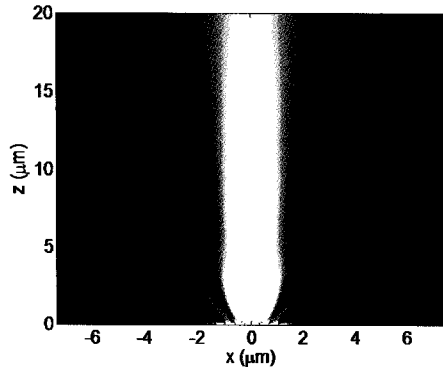
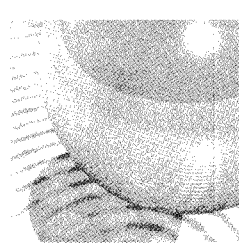


그림 2. 수직방향 플라즈모닉 비밍

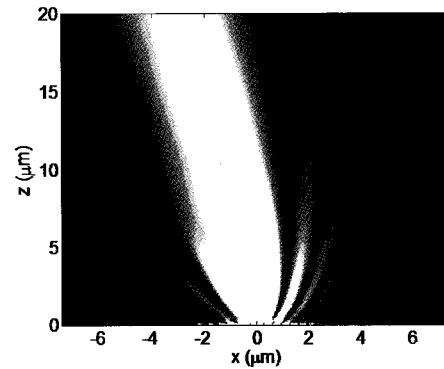


그림 3. 기울어진 방향 플라즈모닉 비밍

가 될 수 있을 것이다[5]. 보다 높은 에너지 효율을 얻기 위해서는, 위의 단순식을 쓰는 대신 수치 해석 모델링을 통해 격자 주기와 높이, 듀티-비율(duty-ratio) 등과 같은 구조 설계 변수들을 최적화 할 필요가 있다. 수치 해석적 방법에는 여러 가지가 있을 수 있지만, 격자 구조 해석에 최적화 된 방법으로 여겨지는 RCWA(rigorous coupled-wave analysis)를 사용 하는 것이 가장 적합한 것으로 보인다[14]. 그림 2는 RCWA를 통해 계산한 이차원 연직 방향 플라즈모닉 비밍 구조에서 빔이 나아가는 모습을 나타낸 결과이다. 그림에서 가장 아래 부분 ($z = 0$)은 금속의 출사면이자 격자의 바닥에 해당한다. 이 때, 입사 되는 빛은 532 nm 파장을 갖는 평면파로 슬릿의 단면 방향으로 편광된 빛이며, 그 때 금속인 은의 굴절율은 약 $0.13 + 3.19i$ 이고[15], 격자를 형성하는 유전체는 굴절율이 약 2.958인 것으로 가정 하였다. 또한 슬릿의 폭은 100 nm 이고, 격자의 주기는 376 nm, 높이는 80 nm, 듀티-비율은 0.5이다.

위의 원리를 이용하면, 금속 판에 대하여 기울어진 각도로 빔을 형성 하는 것도 가능한데, 이러한 기울어진 비밍(off-axis beaming)을 하기 위해서는, 슬릿을 기준으로 좌, 우의 격자들이 각각 서로 다른 각도로 회절 되도록 설계를 해 주면 된다. 즉, 그림 1에서 슬릿의 오른쪽으로 진행되는 표면 플라즈몬파를 θ 로 회절 되게 하는 격자를 오른쪽에 두고, 슬릿의 왼쪽으로 진행되는 표면 플라즈몬 파는 진행 하던 방향에서 반대로 틀어져 오른쪽의 회절 각과 같은 각도로 회절 되도록 $-\theta$ 의 회절 각을 갖는 격자를 배치 한다[6]. 그림 3은 이러한 방법으로 설계 된 구조로부터 기울어진 비밍이 나오는 모습을 나타

낸 계산 결과이다. 이 때, 슬릿의 왼쪽 ($x < 0$)에 해당하는 격자 주기는 438 nm, 오른쪽 ($x > 0$)에 해당하는 격자 주기는 336 nm 이고, 나머지 조건은 그림 2의 경우와 같다.

이와 같은, 표면 플라즈몬의 회절을 이용한 비밍 구조는, 표면 플라즈몬 기반의 집적 소자 기술과 접목되어, 칩(chip)간, 혹은 칩 층(layer)간 연결 등에 적용 할 수 있을 것이다[8]. 특히, 연결의 응용을 고려하면, 수신단과 송신단이 평행하게 배치 될 경우, 양단간의 다중 반사에 의한 신호 왜곡이 생길 우려가 있기 때문에, 기울어진 비밍 구조를 적용 하는 것이 보다 유용하다[8].

4. 표면 플라즈몬 포커싱

앞에서 살펴본 비밍 구조의 원리를 확장하면, 공간상에 초점을 맺는 플라즈모닉 포커싱 렌즈 구조를 만들 수 있다. 이러한 구조를 만들기 위해서는, 그림 1에서 슬릿 좌, 우의 격자들이 균일한 주기를 갖는 대신, 점진적으로 변하는 주기를 갖게 설계 함으로써, 슬릿으로부터 일정 높이가 위의 초점을 향해 회절 되도록 설계한다[9]. 이 경우, 각각의 격자 주기마다 각각 하나의 회절 각을 담당하도록 설계가 되어야 하기 때문에, 앞 절의 단순화된 격자 식과는 오차가 커질 수 밖에 없다. 따라서, 포커싱 구조의 경우, 수치 해석적 모델링을 통하여 구조를 최적화 하는 단계를 거쳐야 한다. 이 과정은 일차적으로 균일한 주기의 격자를 가정했을 때, 각각의 격자 주기가 어떠한 회절 각에 대응 되는지를 조사 한 후, 그 결과를 토대로 점

표면 플라즈몬 비밍과 포커싱

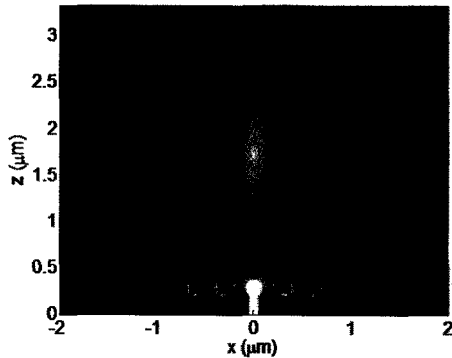


그림 4. 격자를 이용한 플라즈모닉 포커싱 구조

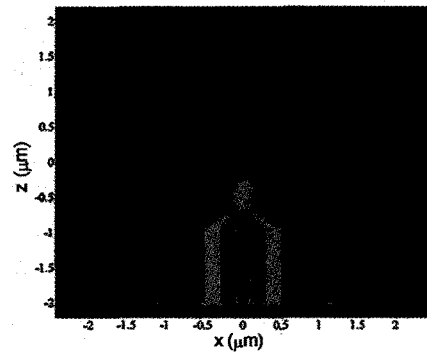


그림 5. 반구형 금속 표면의 다중슬릿을 이용한 플라즈모닉 포커싱 구조(10)

진적으로 변하는 각도에 해당하는 격자를 한 주기씩 배치하는 방식으로 이루어진다. 그림 4는, 이렇게 얻어진, 슬릿을 통과 한 빛이 포커싱 되는 구조의 계산 결과를 나타낸 것이다[9]. 경우에 따라서는 이렇게 설계 된 격자에 대해 추가적인 최적화 알고리즘을 적용 할 수도 있을 것이다. 이 계산에 사용된 제반 조건은 대부분 앞절의 비밍 구조와 같으며, 구체적인 각각의 격자 주기 등은 참고문헌 [9]에 사용 된 것과 동일하다.

다양한 응용 분야를 고려 할 때, 포커싱 구조에서 초점의 크기(spot-size)는 중요한 항목이다. 작은 공간에 높은 에너지를 집중하는 것은, 디스플레이 장치나, 각종 기록, 재생장치, 송, 수신 안테나, 센서 등의 다양한 응용 측면에서 매우 유용할 수 있다. 이렇게 초점의 크기를 줄이기 위해서는, 큰 각 스펙트럼(angular spectrum)을 갖는 평면파 성분들까지 잘 집중을 해 주는 구조를 찾을 필요가 있다. 각 스펙트럼이 큰 평면파 성분이라 함은, 그림 1을 기준으로 생각 할 경우, 슬릿에서 먼 곳으로부터 회절 되어 돌아오는 성분을 의미한다. 그러나 표면 플라즈몬은 전송 손실이 크기 때문에, 이러한 빛은 그 크기가 작을 수 밖에 없다. 이러한 문제는 금속의 출사면을 반구형으로 파낸 구조를 채택 하면 어느 정도 해결 할 수 있다. 그림 5는 반구형 금속 표면에 뚫린 여러 개의 슬릿을 통해 포커싱이 되는 구조를 나타내고 있다[10]. 이 구조에서는 격자의 주기나 위치 대신, 슬릿의 위치에 따라 슬릿을 통해 투과되는 표면 플라즈몬 모드의 위상이 달라짐을 이용한다. 이상적인 경우, 반구 상의 모든 지점에서 방출하는 전자파의 위상이 모두 동위상이면, 반구의 중심에서 초점이 맺게 된다. 그렇지 않은 경우라 하더라도,

반구상의 각 슬릿에서 방출하는 빛의 위상 분포에 따라, 공간적으로 초점을 맺게 설계 할 수 있다. 이 경우, 슬릿에서 나오는 빛의 위상은 슬릿의 폭과 길이를 통해 결정 된다. 이러한 반구형 표면 렌즈를 사용하면, 전체 포커싱 구조의 크기가 작아진다는 장점이 있다.

이 외에도, 금속 표면에서 표면 플라즈몬 상태로 빛을 포커싱 하는 다양한 방법들이 존재한다[4]. 이러한 방법들은, 금속에 슬릿이나 개구를 이차원적으로 배열하여, 출사면에서 발생되어 진행하는 표면 플라즈몬의 위상을 변형하는 원리를 이용하는 것으로, 금속면 상의 한 점, 또는 여러 점에 플라즈몬에 의한 초점을 맺게 하여 도파로 등에 결합시키는 등의 용도로 응용 될 수 있다[4]. 최근에는, 이러한 방법을 더욱 확장하여, 금속 면 상에 바람개비 날개와 같은 형태로 기하학적 회전 성분이 있는 슬릿을 배열하고 빛을 비추면, 입사되는 빛의 편광에 따라 회전하는 핫-스팟(hot-spot: 빛이 강하게 모인 부분)과 그 내부의 다크-스팟(dark-spot: 빛이 존재 하지 않는 부분)을 만들 수 있음을 밝혔으며, 이러한 플라즈몬 소용돌이(plasmonic vortex)는 슬릿의 기하학적 구조 정보(topological charge)에 의해 각궤도 운동량(orbital angular momentum)이 바뀔 수 있음이 보고된 바 있다 [11]. 따라서, 플라즈모닉 소용돌이의 토크(torque)를 기하학적인 토폴로지를 통해 증대 시킬 수 있을 것으로 기대되며, 이는 바이오 센서나 기타 물리적인 응용 등에 유용하게 이용 될 수 있을 것으로 기대된다. 그림 6은 이러한 플라즈모닉 소용돌이 구조에서 나선형 날개가 5개(왼쪽)일 때와 6개(오른쪽)일 때의 표면에서 필드 세기 분포를 살펴 본 계산 결과이다. 이 때 사용된 빛의 파장은

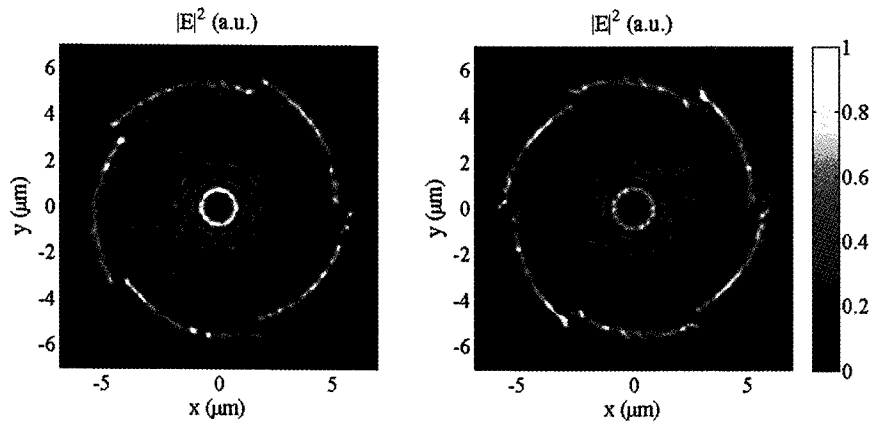
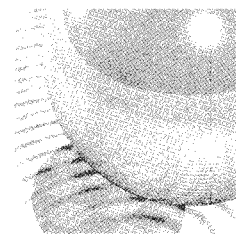


그림 6. 나선형으로 배열된 슬릿을 이용한 플라즈몬 소용돌이

600 nm이고, 금속인 은의 굴절율은 약 $0.14 + 4.21i$, 슬릿의 폭은 모두 300 nm, 금속의 두께는 150 nm로 가정했고, 입사면 쪽 물질의 굴절율은 1.5, 출사면은 공기로 가정했다. 그림에서 가운데 부분이 밝게 빛나는 원형 핫-스팟 내부에 동그란 형상의 검은색 다크-스팟을 확인 할 수 있다. 이 그림으로 회전하는 볼텍스를 확인 하는 것은 무리이겠지만, 중심을 기준으로 한 바퀴를 돌면서 볼 때, 날개의 개수가 많은 오른쪽 그림이 보다 많은 간섭 패턴을 가지고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 중심의 다크-핫 스팟 영역을 형성하는데 있어, 날개가 많은 쪽이 보다 더 많은 위상 변화를 겪음을 의미하며, 이것은 곧 중심의 소용돌이의 관점에서 볼 때, 날개가 많은 쪽이 더 큰 소용돌이 차지(charge)가 큼을 의미한다.

로 가공하여 포커싱 렌즈의 크기를 줄이는 방법, 그리고 금속 면에 플라즈몬 형태의 초점을 맺거나, 나아가 플라즈몬 소용돌이를 만드는 방법 등을 간략하게 원리와 응용 가능성 위주로 살펴 보았다. 본문에서 보인 비와 같이 단순화된 가정에서 출발한 설계 원리들로 이러한 소자들의 기본적인 성질들을 설명 하였으며, 수치 해석이나 최적화 알고리즘 등이 필요한 부분 들에 대해서도 간략하게나마 살펴보았다. 이러한 표면 플라즈몬 비밍, 포커싱 소자들은 플라즈모닉 집적소자의 신호 연결이나, 디스플레이 장치, 바이오 센서 등의 다양한 분야에 걸쳐 적용 가능할 것으로 기대된다.

5. 결론

표면 플라즈몬을 이용한 다양한 비밍과 포커싱 방법과 그 원리를 살펴보았다. 금속 표면을 따라 진행되는 전파형 표면 플라즈몬을 다양한 격자를 이용하여 회절 시켜 빔을 형성하거나 초점을 맺는 방법과, 금속 면을 곡면으

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단을 통해 창의적연구진흥사업(과제명 : 액티브 플라즈모닉스 응용시스템 창의연구)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature* 424, 824-830 (2003).
2. T. Ebbesen, H. Lezec, H. Ghaemi, T. Thio, and P. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature* 391, 667-669 (1998).
3. B. Lee, I.-M. Lee, S. Kim, D.-H. Oh, and L. Hesselink, "Review on subwavelength confinement of light with plasmonics," *J. Mod. Opt.* 57, 1479-1497 (2010).
4. B. Lee, S. Kim, H. Kim, and Y. Lim, "The use of plasmonics in light beaming and focusing," *Prog. Quantum Electron.* 34, 47-87 (2009).
5. H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, and T. W. Ebbesen, "Beaming light from a subwavelength aperture," *Science* 297, 820-822 (2002).
6. S. Kim, H. Kim, Y. Lim, and B. Lee, "Off-axis directional beaming of optical field diffracted by a single subwavelength metal slit with asymmetric dielectric surface gratings," *Appl. Phys. Lett.* 90, 051113 (2007).
7. H. Kim, J. Park, and B. Lee, "Tunable directional beaming from subwavelength metal slits with metal-dielectric composite surface gratings," *Opt. Lett.* 34, 2569-2571 (2009).
8. D. Choi, I. M. Lee, J. Jung, J. Park, J. H. Han, and B. Lee, "Metallic-grating-based interconnector between surface plasmon polariton waveguides," *J. Lightwave Technol.* 27, 5675-5680 (2009).
9. S. Kim, Y. Lim, H. Kim, J. Park, and B. Lee, "Optical beam focusing by a single subwavelength metal slit surrounded by chirped dielectric surface gratings," *Appl. Phys. Lett.* 92, 013103 (2008).
10. D. Choi, Y. Lim, S. Roh, I.-M. Lee, J. Jung, and B. Lee, "Optical beam focusing with a metal slit array arranged along a semicircular surface and its optimization with a genetic algorithm," *Appl. Opt.* 49, A30-A35 (2010).
11. H. Kim, J. Park, S. W. Cho, S. Y. Lee, M. Kang, and B. Lee, "Synthesis and dynamic switching of surface plasmon vortices with plasmonic vortex lens," *Nano Lett.* 10, 529-536 (2010).
12. H. Raether, *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* (Springer Verlag, Berlin, 1988).
13. S. Bozhevolnyi, *Plasmonic Nanoguides and Circuits* (Pan Stanford Publishing, 2008).
14. H. Kim, I. Lee, and B. Lee, "Extended scattering-matrix method for efficient full parallel implementation of rigorous coupled-wave analysis," *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 2313-2327 (2007).
15. E. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic press, 1985).

약 령



이병호

1993년 University of California at Berkeley, EECS PhD.
1994년 9월부터 서울대학교 전기공학부 근무. 현재 정교수.
현재 미국광학회(OSA) 기획위원, 회원 및 교육위원회 (MES Council) 부위원장.
현재 JOSK 편집위원장, Applied Optics, Journal of SID, Journal of Information Display 편집위원.
SPIE Fellow, OSA Fellow.
OSA Director-at-Large, member of Awards Committee of Board of Directors 역임.
한국광학회 학술상 수상, 제5회 젊은과학자상 수상, 이달의 과학기술자상 수상(2009년 9월)