



1. 서론

초기에 광자결정 제작은 실리콘 웨이퍼에 서로 평행한 방향으로 작은 구멍을 뚫거나 막대모양의 유전물질을 서로 겹치게 쌓아 둠으로써, 유전체-공기 구조물의 유전율에 주기성을 두어 마이크로 파장영역에서의 3차원 광자 밴드갭을 실현하였다. 그러나, 적외선, 가시광선 파장영역의 경우 위의 방법은 식각(etching) 간격의 미세화를 필요로 하여 3차원 광자 밴드갭 형성이 매우 힘들어 2차원에서 구현이 주로 이루어지고 있다. 2차원 광자결정을 이루기 위해서는 광을 2차원 면에 구속시키고 이차원 평면에 주기적인 구조를 만들어야 한다. 광을 2차원 면에 구속시키는 방법으로는 주로 광도파로를 만들어서 평면상에 광을 구속시킨다.

에 표면 플라즈몬을 여기 시키기 위해서는 파수벡터를 크게 만들어야 한다. 파수벡터를 크게 만드는 방법은 회절격자를 이용하거나 높은 굴절률을 가지는 프리즘을 이용한다. 높은 굴절률의 프리즘을 이용하는 감쇠전반사 방법은 프리즘과 프리즘에 입혀진 얇은 금속박막으로 이루어진다. 금속박막은 프리즘으로 입사하는 광자가 충분히 금속박막을 지나갈수 있을 만큼 얇아야 한다. 프리즘에서 금속박막으로 입사하는 광자는 전반사각보다 큰 각을 가지고 입사해야 표면 플라즈몬을 여기시킬 수 있다. 전반사각을 지나서 입사하는 광자는 특정한 각에서는 금속박막을 지나 금속박막과 그 위에 있는 유전체의 경계면에 전부 흡수 된다.

이때의 조건을 표면 플라즈몬 공명 조건(surface plasmon resonance) 또는 표면 플라즈몬이 여기 되

특집 ■ 나노포토닉스

표면-플라즈몬 광자 밴드갭

이관수*, 윤재웅*, 송석호*

하지만 표면 플라즈몬(surface plasmon)은 두 물질의 경계면에 구속되어 강하게 집중된 형태로 존재하는 전자기파이기 때문에, 2차원 혹은 1차원 광자 밴드갭을 만들기 위해서 2차원 평면상에 광을 가두는 작업이 따로 필요 없으며, 밴드갭 구조와의 강한 상호작용 효과를 얻을 수 있어서 센서나 비선형 현상을 이용하는 다양한 응용분야에 널리 적용될 수 있다.

2. 표면 플라즈몬

표면 플라즈몬은 금속과 유전체의 경계면을 따라 진행되는 전자기파의 일종이다. 표면 플라즈몬의 파수벡터(wave vector)의 크기는 유전체 내부에서 진행되는 광자의 파수벡터보다 크다. 그래서 유전체 내부로 전파할 수 없고 표면에만 존재한다. 이러한 성질 때문

었다고 한다

표면 플라즈몬 공명이 일어나면 금속박막과 유전체의 경계면에 강한 전기장이 생긴다. 이때 생기는 전기장도 표면에만 구속화 되고 경계면에 수직방향으로는 지수함수 적으로 감쇠하는 모양을 가진다. 또한 이때의 전기장의 세기는 표면 플라즈몬이 여기 되지 않았을 때 보다 10~100배 정도 큰 값을 가진다. 표면 플라즈몬의 공명조건은 금속박막과 접해있는 유전체에 따라 아주 민감하게 달라진다. 이러한 성질을 이용하면 수 Å 두께의 유전체 박막의 두께를 측정할 수 있으며, 광변조기, 광 스위치, 광 필터, 편광 빔 분할기와 같은 많은 광 소자 구현에 적용될 수 있다.

최근에는 금속의 표면이 주기적인 모양을 가지고 있을 때 나타나는 표면 플라즈몬 밴드갭에 대한 연구가 많이 이루어 지고있다^[1]. 특히 주기적인 금속 표면에 의해서 표면 플라즈몬의 여기가 일어나는, 광 주파수

* 한양대학교 물리학과, 마이크로광학 국가지정연구실
shsong@hanyang.ac.kr

표면-플라즈몬 광자 밴드갭

영역에서의 에너지 밴드 갭에 대한 연구와 표면 플라즈몬 채널 가이드에 관한 연구도 발표 되었다^[2]. 특히 Barnes와 그의 동료들은 주기적인 금속 표면에 의한 표면 플라즈몬 밴드갭을 확인 하였으며, 이론적인 해석 방법을 제시하였다^[3].

금속 격자에 의해서 산란 되는 표면의 모드는 격자를 따라 진행되는 정상파를 이루어진다.

정상파는 두개의 해를 갖는데 하나는 전기장의 최대 세기가 금속격자의 마루에 있는 경우와 골에 있는 경우로 나누어 진다. 이 두 정상파의 해는 서로 다른 에너지를 가지기 때문에 에너지 밴드갭이 생긴다. 하지만, 많은 응용분야에서는 금속표면이 주기적으로 변조된 구조 보다는, 평평한 금속면 위에 유전체가 주기적으로 변조되어 밴드갭 구조를 이루는 경우를 요구한다. 따라서, 본 연구실에서는 유전체 광자결정 구조를 갖는 표면 플라즈몬 시스템을 연구하고 있는데, 관련 연구 결과들을 소개하면 다음과 같다.

3. 유전체 격자에 의한 표면 플라즈몬 밴드 갭

유전체에 의한 표면 플라즈몬 밴드갭은 주기적인 모양을 하고있는 금속대신에 평평한 금속과 그 위에 유전체 격자 층으로 이루어 진다. 이것은 앞서 금속 격자에 의한 표면 플라즈몬 밴드갭과는 다른 점을 갖는다. 1차원 경우를 생각해 보면, 서로 다른 유전체로 이루

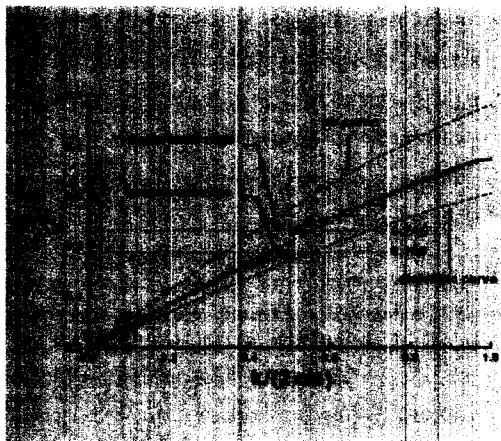


그림 1. 표면 플라즈몬 밴드 : $a = 1.5\lambda_p$ 일때 평면파 전개(-)와 엄밀결합파(W) 방법

어 져있고 주기가 a 인 광자결정이 있다고 가정을 하자. 그리고 표면 플라즈몬의 파수벡터가 $k_{sp} = \pi/a$ 인 조건을 만족하게 된다면 Bragg 반사에 의해서 유전체 격자 내에 서로 다른 두 개의 정상파를 가진다. 서로 다른 에너지를 가지는 것은 두 정상파는 전기장의 최대세기가 있는 곳이 다르기 때문이다. 즉, 높은 유전상수 쪽으로 전기장의 최대 세기를 가지면 낮은 에너지를 가지게 된다.

표면 플라즈몬이 표면 전하 밀도 분포와 결합되어있는 소멸광파의 성분을 가지고 있기 때문에 표면 플라즈몬 밴드갭 계산을 위해서, 기존에 널리 사용되고 있는 평면파 전개법(plane-wave expansion method)을 적용하여 계산 할 수 있다. 또한, 광자 밴드갭이 생성되는 원리가 파장보다도 작은 구조에서의 회절현상에 있으므로, 엄밀 결합파 방법(rigorous coupled-wave method)으로 해석될 수 있다. 그림 1은 평면파

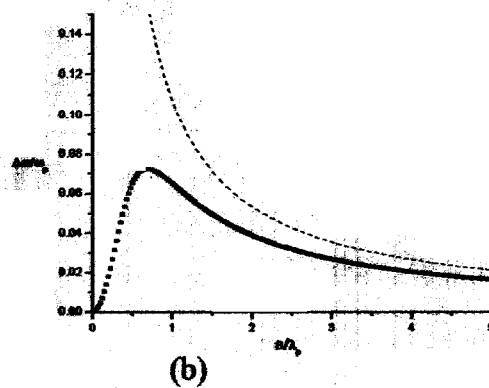
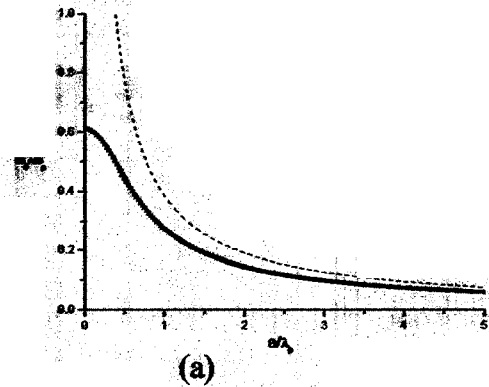
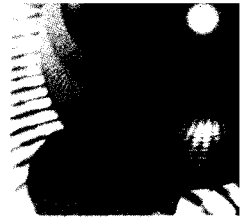


그림 2. 격자의 주기 변화에 따른 밴드의 중앙 주파수(a)와 밴드갭 크기(b)



전개 방법으로 구한 결과와 엄밀 결합과 방법으로 구한 결과를 보여준다. 가로축은 $2\pi/a$ 로 규격화 하였으며 세로축은 플라즈마 주파수, ω_p 로 규격화 하였다. 그림에서 굵은 실선은 평면파 전개방법으로 구한 결과이고 두 점선 안에 있는 네모 표시는 엄밀 결합과 방법으로 구한 결과이며, 1차원 유전체 격자에 대해서 계산 하였다. 유전체의 유전상수는 2.56이며 계산에 사용된 급속은 은(Ag)이며 플라즈마

주파수는 $\omega_p = 1.274 \times 10^{16}$ 이다. 격자의 주기는 256nm였다. 두 결과 모두 밴드 갭이 $0.188\omega_p$ 에서 $0.245\omega_p$ 에 존재한다. 이 주파수에 해당하는 파장은 600nm에서 783nm에 이다.

그림 2는 격자의 주기에 따른 표면 플라즈몬 밴드 구조의 의존성을 보여 준다. 그림 2(a)는 a/λ_p 로 규격화 되어있는 격자주기에 대해서 ω_0/ω_p 로 규격화 되어 있는 밴드갭의 중앙 주파수이다. 점선은 단지 무한한

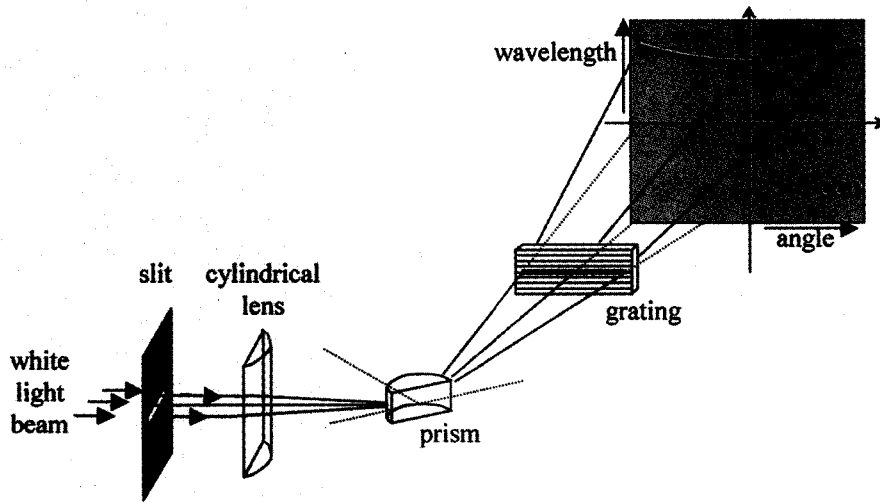


그림 3. 표면 플라즈몬 밴드갭을 보기 위한 실험장치도

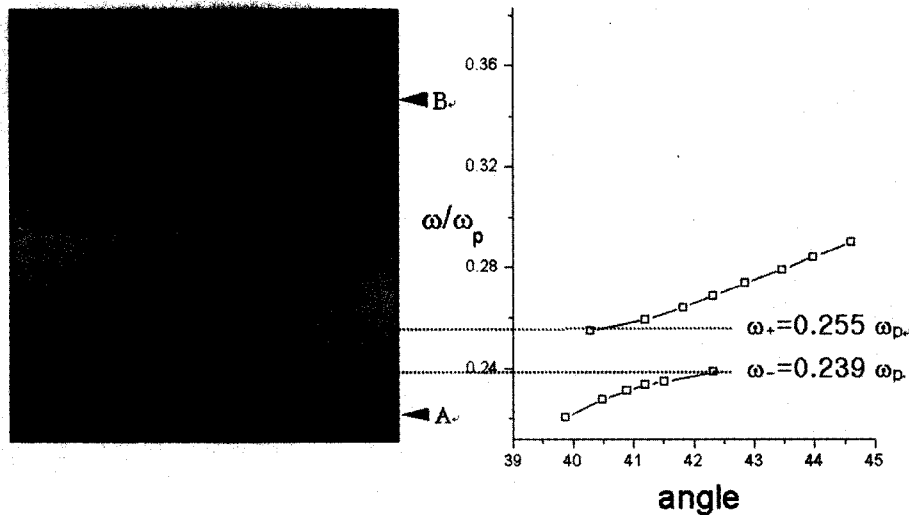


그림 4. 표면 플라즈몬 밴드갭 사진과 엄밀한 결합과 방법에 의해 계산된 결과 간의 비교 (플라즈몬 주파수, $\omega_p = 1.274 \times 10^{16}$ Hz)

유전체 격자에 의한 밴드갭의 중앙 주파수이다. 이 경우 주기가 작아질수록 중앙 주파수의 값도 증가한다. 반면에 표면 플라즈몬 밴드의 중앙 주파수는 최대값인 차단 주파수로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 2(b)는 밴드갭의 크기는 격자의 주기가 $0.7\lambda_p$ 일 때 최대 값을 가지고 표면 플라즈몬 밴드는 더 이상 격자 주기에 따라 크기를 변화시킬 수 없음을 보여준다. 이 결과는 참고문헌 4에 나오는 결과와 일치한다.

4. 표면 플라즈몬 밴드갭 측정

표면 플라즈몬의 분산과 표면 플라즈몬 밴드갭을 직접 보기 위해서 그림 3과 같이 실험 장치를 꾸렸다. 이 방법은 참고문헌^[1]에 있는 방법과 유사한 방법이다. 우선 TM 모드로 편광된 백색광이 수평 방향의 슬릿과 원통형 렌즈를 통과하여 은 박막이 입혀져 있는 프리즘면에 초점이 맺힌다. 프리즘에 초점이 맺힌 광원은 백색광원이기 때문에 다양한 에너지를 가지고 있는 광자이며, 원통형 렌즈에 의해서 초점이 맺히기 때문에 여러 값의 파수벡터를 가지고 있다. 특정한 에너지와 파수벡터를 가지고 있는 광자는 표면 플라즈몬을 여기시켜 은 박막에 흡수되어 반사되지 않으며 나머지 광자들은 전반사를 한다. 이렇게 반사되어 나온 빛은 투과형 회절격자를 통해서 광자의 파장에 따라 수직 방향으로 갈라지고, CCD카메라를 이용하여 사진으로 직접 얻을 수 있다.

그림 4는 측정된 표면 플라즈몬 밴드갭 사진이며, 붉은색 영역에 존재하는 밴드갭을 엄밀 결합과 이론으로 계산한 결과와 비교한 것을 보여준다. 그림에서 보듯이 두 개의 어두운 호들이 표면 플라즈몬의 분산 관계를 나타내며, 이들 사이의 갭, 즉 표면 플라즈몬 밴드갭이 은의 플라즈마 주파수($\omega_p = 1.274 \times 10^{16}$)의 0.016배임을 알 수 있다. 가로축은 백색광원의 입사각을 나타내고(광자의 파수벡터) 세로축은 백색광원에 들어있는 파장(에너지, 주파수)을 나타낸다. A와 B 점은 세로축의 값들을 알 수 있도록 460nm와 633nm에 표시한 점이다. 이점들은 얇은 선폭을 갖는 밴드패스(2nm) 필터를 가지고 얻었다. 은 박막 위에 포토레지스트 물질을 이용하여 주기가 256nm, 깊이가 80nm인 1차원 홀로그래픽 격자를 만들어 얻어진 결과이다.

그림 5는 유전체 격자의 방향이 변화 할 때 표면 플라즈몬 밴드갭이 어떻게 변화 하는지를 보여 준다. 역격자 벡터의 방향과 표면 플라즈몬의 방향이 나란 할 때 밴드갭의 가장 낮고 사이 각이 커질수록 밴드가 높아 지는 것을 알 수 있다. 유전체 격자의 역격자 벡터의 방향이 x축 방향이라고 하고 표면 플라즈몬이 xy 평면에서 진행한다고 하자. 표면 플라즈몬과 역격자 벡터 사이의 각이 커진다는 것은 격자로 진행되는 표면 플라즈몬에 x축 성분뿐만 아니라 y축 성분도 가지고 있기 때문에 밴드갭이 그림 5와 같이 달라진다.

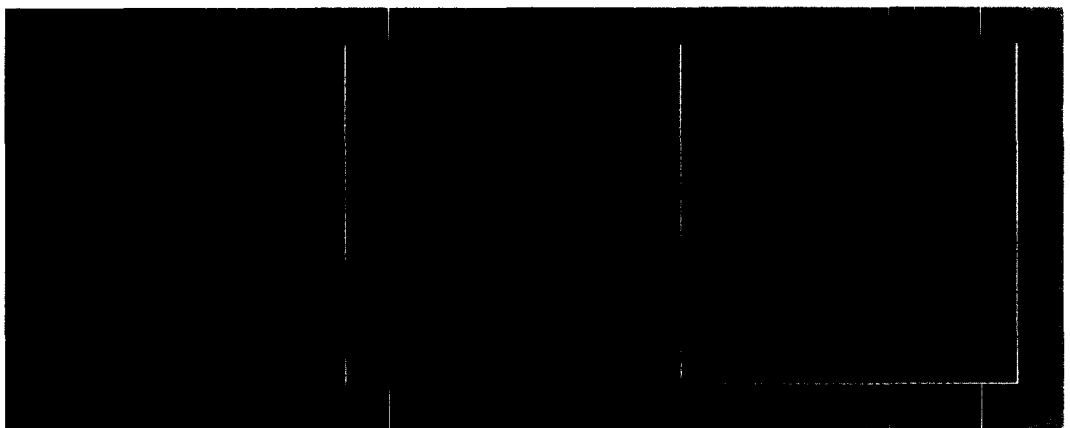
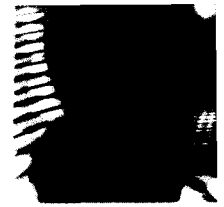


그림 5. 표면 플라즈몬 진행 방향과 회절격자의 역격자 벡터 방향의 각도에 따른 밴드갭의 의존성



5. 결론

일반적인 진행파에 대한 광자 밴드갭과는 다른 특성을 갖는, 표면 플라즈몬에 대한 광자 밴드갭에 대해 알아보았다. 직접적인 결상방법을 이용하여 평평한 금속 위에 1차원 유전체 격자가 있을 때 생성되는 표면 플라즈몬 밴드갭을 실험을 통하여 관측하였다. 비록 격자의 깊이가 수십 nm밖에 되지 않고 격자를 이루고 있는 물질간의 굴절률의 비가 크지 않아도 넓은 밴드갭을 확인 할 수 있었다. 이것은 표면 플라즈몬이 표면에만 구속화 되어 있을 뿐만 아니라 표면에 강한 전기장 분포를 가지기 때문에 가능했다. 그리고 표면 플라즈몬 밴드갭은 다른 광자 밴드갭과는 다르게 격자주기에 따라 비례하여 변할 수 없는 양임을 알 수 있었다. 이러한 표면플라즈몬 밴드갭의 특성은 유전체 격자를 이용해서 분산관계를 조절 할 수 있고, 또한 표면에 강한 전기장이 생기기 때문에, 고감도 센서 및 비선형 광학 효과 등을 연구하는데 매우 적합하다고 볼 수 있다.

- (1) S. C. Kitson, W. L. Barnes, G. W. Bradberry, and J. R. Sambles, "Surface profile dependence of surface plasmon band gaps on metallic gratings", J. Appl. Phys., vol.79, No.9, 1996.
- (2) S. I. Bozhevolnyi, J. Erland, K. Leosson, P. M. W. Skovgaard, and J. M. Hvam, "Waveguiding in Surface plasmon polariton band gap structures", Phys. Rev. Lett., vol.86, No.14, 2001.
- (3) W. L. Barnes, J. D. Preist, and J. R. Sambles, "Physical origin of photonic energy gaps in the propagation of surface plasmon on gratings", Phys. Rev. B, vol.54, No.9, 1996.
- (4) V. M. Agranovich and D. L. Mills, "Surface Polaritons", North-Holland Publishing Company (Chapter 10, p495~p503. 1982).



11984 연세대학교 물리학과, 이학사
 1986 한국과학기술원 물리학과, 이학석사
 1989 한국과학기술원 물리학과, 이학박사
 1989~1997 한국전자통신연구원 선임연구원
 1997~현재 한양대학교 물리학과 부교수
 E-mail : shsong@hanyang.ac.kr
 관심분야 : 회절광학, 광자결정, 광연결