

특집 ■ MEMS

Otto 결합 구조 기반의 표면 플라즈몬 공명 칩 제작

이연수, 김정무*

표면 플라즈몬 공명은 양의 유전상수를 갖는 물질과 음의 유전상수를 갖는 금속의 경계면에서 외부로부터 입사된 빛에 의해 금속 표면의 전자들이 공명하여 특정 파장 대역의 빛이 금속 물질로 흡수되는 현상을 말하며, 이때 공명을 일으킬 수 있는 빛의 입사각은 계면을 이루고 있는 두 물질의 종류와 두께 등에 의해 결정된다. 이러한 SPR 효과를 이용하면 얇은 금속 박막의 표면이나 금속 grating 구조 위의 특정 물질의 흡착 정도를 측정할 수 있어, 특정 가스를 감지하거나 생체 분자들 간의 상호작용을 분석하기 위한 센서를 제작하는데 활용되고 있다.

표면 플라즈몬 공명은 음의 굴절률을 가지는 다양한 금속 물질에서 발생할 수 있지만 그 중에서도 높은 안정성을 가지는 금이나 가장 날카로운 공명 피크를 보이는 은으로 이루어진 금속 박막이 보편적으로 이용되고 있다 [1]. 현재 상용화된 대부분의 표면 플라즈몬 공명 센서들은 제작의 용이성으로 인해 그림 1에 나타난 Kretschmann 결합 구조를 기반으로 하고 있다.

하지만, 이러한 구조를 기반으로 한 센서는 성능을 개선시키는 데에 있어 두 가지 구조적인 제약을 가지고 있다. 그 첫 번째는 접착층으로 인한 표면 플라즈몬 공명 효과의 민감도 저하이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이

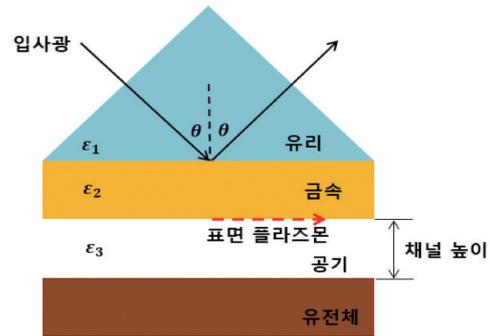


그림 1. 표면 플라즈몬 공명 측정을 위한 Kretschmann 결합 구조

Kretschmann 결합 구조에서는 금이나 은으로 이루어진 금속 박막이 유리 기판의 표면에 위치해 있는 것을 볼 수 있는데 이때 두 물질의 접착력을 높여주기 위해서는 일반적으로 수 nm에서 수십 nm 두께의 크롬 또는 티타늄 박막을 금속과 유리기판 사이에 형성하여 접착층으로 활용해야만 한다. 이 경우, 유리기판을 통해 입사된 빛은 접착층을 통하여 금속 박막으로 진행하게 되므로 접착층이 표면 플라즈몬 공명 현상을 저해하는 요소로 작용하게 된다. 그림 2는 Kretschmann 결합 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 시뮬레이션에서의 접착층에 의한 영향을 보여주고 있다.

Kretschmann 결합 구조의 두번째 구조적 제약은 채

* 전북대학교

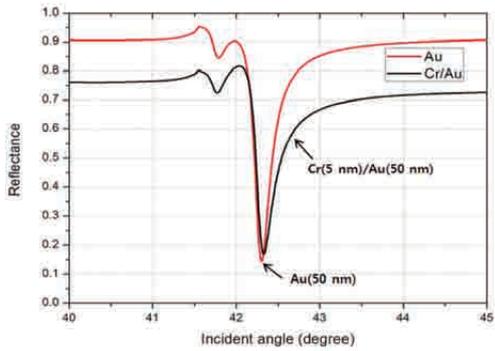
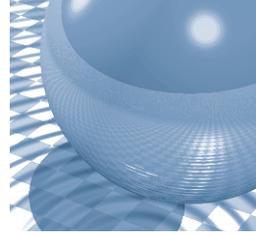


그림 2. Kretschmann 결합 구조에서의 크롬 접착층의 영향

널 높이의 소형화에 있어서의 한계이다. 미세유체 시스템 분야에서는 실험에 쓰이는 고비용 시약의 양을 줄여 궁극적으로는 실험 비용을 줄이는 것이 중요한 요소로 여겨지고 있다 [2][3]. 미세유체 시스템에서 소모되는 시약의 양을 줄이기 위한 가장 효과적인 방법은 유체가 흐르는 채널의 단면적을 소형화하는 것이다. Kretschmann 결합 구조에서의 금속 박막층과 하부의 유전체 기판 사이의 채널의 높이는 하부 기판에

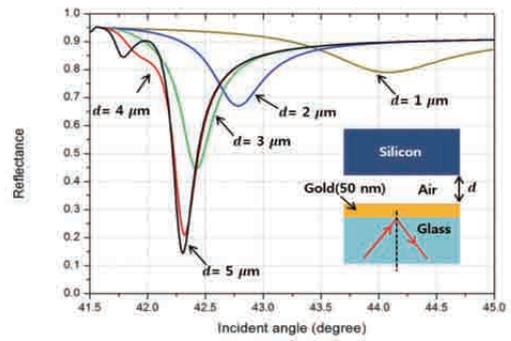


그림 3. Kretschmann 결합 구조에서의 채널 높이의 영향

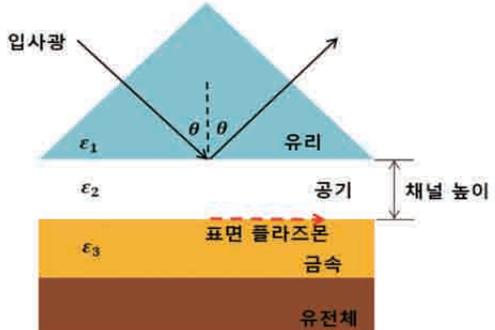


그림 4. 표면 플라즈몬 공명 측정을 위한 Otto 결합 구조

한 영향을 방지하기 위해 실험에 사용되는 입사광의 파장의 길이보다 보다 더욱 길어야 하기 때문에 채널의 단면적을 소형화하기 어렵다는 단점이 있다. 그림 3은 Kretschmann 결합 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 시뮬레이션에서의 채널의 높이 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. 이 결과로부터 높은 해상도의 표면 플라즈몬 공명 현상을 얻기 위해서는 채널의 높이가 입사광의 파장의 길이인 975.1 nm에 비해 약 4 배 이상 길어야 한다는 것을 알 수 있다.

Kretschmann 결합 구조보다 학계에 먼저 발표되었지만 아직까지 광학센서로서 본격적인 연구가 진행되지 않은 Otto 결합 구조는 그림 4에 나타난 바와 같이 금속 박막이 유리 기판의 아랫면이 아닌 하부 유전체 기판의 윗면에 위치해있다.

이러한 구조에서는 하부 기판의 영향을 방지하기 위해 금속 박막의 두께를 입사광의 투과 깊이보다 더 두껍게 설계해야 한다. 따라서, kretschmann 결합 구조의 경우와는 다르게 금속 박막과 하부 기판 사이의 접착층이 표면 플라즈몬 공명 현상에 영향을 미치지 않게 된다. 또한, 채널의 단면적 또한 Kretschmann 결합 구조를 이용한 표면 플라즈몬 공명 센서의 경우보다 더욱 작게 만들 수 있다는 장점이 있다. 본 원고에서는 실리콘-쿼츠 접합 공정을 이용하여 기존의 Kretschmann 결합 구조의 단점을 보완할 수 있는 Otto 결합 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 칩의 제작에 관한 내용을 소개하고자 한다.

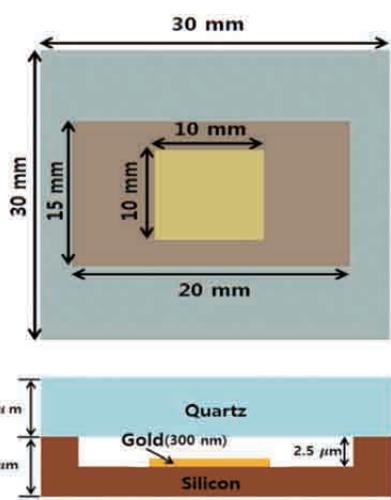


그림 5. 제안된 Otto 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 칩

Otto 결합 구조 기반의 표면 플라즈몬 공명 칩 제작

그림 5는 Otto 결합 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 칩의 개요도를 나타내고 있다. 제안된 표면 플라즈몬 공명 칩은 쿼츠 기판과 2.5 μm 깊이의 단차가 형성된 실리콘 기판이 접합된 형태이다. 최적의 표면 플라즈몬 공명이 발생하기 위한 중요한 요소인 채널의 높이는 Fresnel 방정식을 이용하여 약 2.2 μm 로 계산되었으며, 금 박막의 굴절률은 기존에 보고된 문헌에서 제시한 값(굴절률: 0.27, 소멸상수: 6.005)으로 가정하였다. 따라서, 위의 계산된 채널의 높이를 고려하여 실리콘 기판의 단차에 위치하는 금 박막의 두께는 300 nm로 설계하였다. 설계된 값을 바탕으로 한 표면 플라즈몬 공명의 시뮬레이션 결과 표면 플라즈몬 공명이 일어나는 빛의 입사각은 42.21°이며 이때의 입사된 빛의 반사율은 0.363인 것을 확인하였다.

일반적으로 표면 플라즈몬 공명 칩을 제작 할 경우에는 유리 기판과 실리콘 기판을 양극 접합을 이용해 접합하게 된다. 하지만, 유리 기판과 금속 박막 사이에 약 2 μm 의 매우 좁은 간격의 채널을 가지는 Otto 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 칩의 경우에는 양극 접합 공정 중 수백 V에 달하는 높은 전압으로 인해 절연파괴가 발생하여 금속 박막이 손상될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 양극 접합 공정 대신에 단순히 각 웨이퍼의 표면에 O₂ 플라즈마 처리 후 접합하

는 실리콘-쿼츠 접합 공정을 이용하여 표면 플라즈몬 공명 칩을 제작하였다. 그림 6은 제작된 Otto 구조 기반의 표면 플라즈몬 공명 칩의 모습이다.

제작된 칩의 표면 플라즈몬 효과는 컴퓨터 제어 기반의 반사계를 이용해 측정하였으며 그 개요도를 그림 7에 나타내었다. 제작된 칩은 스텝 모터를 이용해 각도 조절이 가능한 BK7 우각 프리즘의 표면에 위치시켰으며 인텍스 매칭 오일을 이용하여 프리즘과 쿼츠의 불안전 접촉으로 인한 빛의 산란을 방지하였다. 975.1 nm의 파장을 갖는 TM 편광된 입사광은 쿼츠와 공기층의 경계면에서 전반사하게 된다. 이 때 표면 플라즈몬 공명 조건을 만족하는 특정한 입사각에서는 전반사의 결과로 쿼츠와 공기층의 경계면에서 생성된 소멸파를 통해 빛 에너지의 대부분이 금 박막 표면에 존재하는 자유전자의 진동인 표면 플라즈몬 파의 형태로 흡수되어 반사율이 낮아지게 된다.

실제 측정 결과, 표면 플라즈몬 공명으로 인해 반사율이 최소가 되는 입사각은 42.19°이며 그때의 반사율은 0.411로 확인되었다. 제작 이전에 진행했던 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 오차가 발생한 이유는 본 연

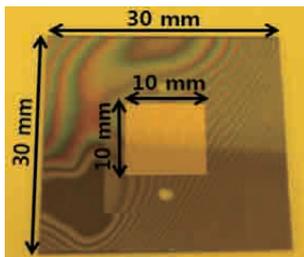


그림 6. 제작된 Otto 결합 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 칩

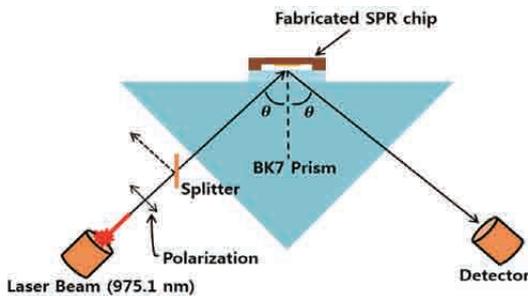


그림 7. 표면 플라즈몬 공명 측정을 위한 시스템의 개요도

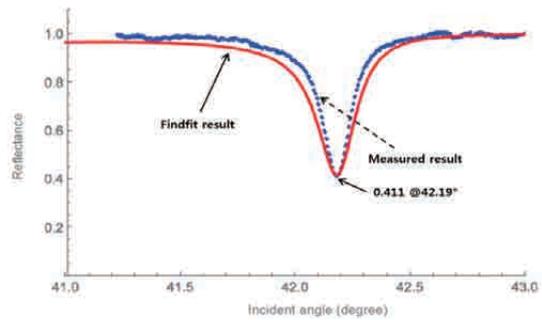


그림 8. 측정된 표면 플라즈몬 공명 효과와 'Findfit' 결과

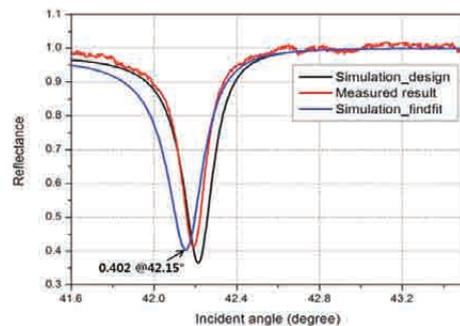
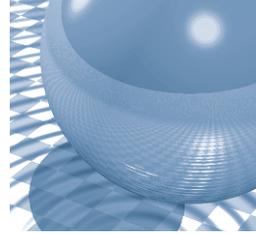


그림 9. 제작된 금 박막의 굴절률 값을 바탕으로 한 시뮬레이션 결과와 기존 시뮬레이션 및 실제 측정 결과와의 비교



구에서 제작된 칩의 금 박막의 굴절률이 시뮬레이션을 위해 가정했던 기존의 문헌에 나와있는 굴절률 값과 차이가 있기 때문인 것으로 보인다. Otto 결합 구조에서는 금속 박막의 굴절률이 공기층의 높이를 결정하는 중요한 값인 것을 고려하여 Mathematica의 'Findfit' 기능을 이용하여 측정결과로부터 본 연구에서 제작된 금 박막의 굴절률을 유추하였으며 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 9는 설계 값을 바탕으로 한 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 결과 그리고 새롭게 얻어진 제작된 금 박막의 굴절률 (굴절률: 0.365, 소멸상수: 6.23)을 이용한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 여기서 반사율이 최소가 되는 입사각은 42.15° 이며 그때의 반사율은 0.402로 확인되었으며 이 값은 실제 측정값과 유사한 값을 알 수 있다.

본 연구에서 제작된 Otto 결합 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 칩은 특정 항체를 금 박막의 표면에 성장 시킬 경우 그림 10에 나타난 것과 같이 시약 내의 특정 생체분자의 상호작용을 검출하기 위한 바이오센서로써 활용될 수 있다. 또한, 그림 11에 나타난 것과 같이 Kretschmann 결합 구조로는 구현할 수 없었던 공

기층의 두께 변화를 이용한 압력센서 등과 같은 새로운 형태의 광학 센서로써 활용될 수 있다. 따라서, Otto 결합 구조를 기반으로 한 표면 플라즈몬 공명 센서는 기존의 Kretschmann 결합 구조를 기반으로 한 센서의 단점을 보완할 수 있을 뿐만 아니라 표면 플라즈몬 공명 효과의 응용 분야를 넓히는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Homola, Jiří, Sinclair S. Yee, and Günter Gauglitz. "Surface plasmon resonance sensors: review." *Sensors and Actuators B: Chemical* 54.1 (1999): 3-15.
- [2] Xiang, Q., Hu, G., Gao, Y., & Li, D. (2006). Miniaturized immunoassay microfluidic system with electrokinetic control. *Biosensors and Bioelectronics*, 21 (10).
- [3] Cesaro-Tadic, S., Dernick, G., Juncker, D., Buurman, G., Kropshofer, H., Michel, B., ... & Delamarche, E. (2004). High-sensitivity miniaturized immunoassays for tumor necrosis factor α using microfluidic systems. *Lab on a Chip*, 4(6), 563-569.

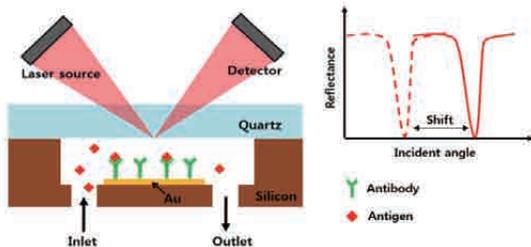


그림 10. 제작된 표면 플라즈몬 공명 칩의 바이오센서로서의 응용

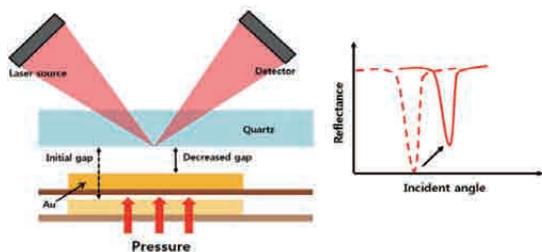


그림 11. 제작된 표면 플라즈몬 공명 칩의 압력센서로서의 응용

약력



이연수

이연수 학사는 전북대학교 전자정보공학부 석박통합과정에 재학중이며, RF MEMS, SPR, IMU, 3D printing 분야에 대해 연구하고 있다.

Email : karma1531@jbnu.ac.kr



김정무

김정무 박사는 2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부에서 MEMS (Microelectromechanical System) 으로 박사학위를 취득하였고, 2007년 9월부터 2008년 3월까지 박사후 연구원으로 UC San Diego의 Gabriel Rebeiz 교수 연구 그룹에서 RF MEMS 연구를 수행하였다. 현재 전북대학교 전자공학부에 부교수로 재직 중이며, 연구 관심 분야는 RF MEMS, SPR, IMU, ink jet printing, 3D printing 등에 대한 설계, 제작 및 분석이다.

Email : jungmukim@jbnu.ac.kr