

## 플라즈몬 효과에 의한 실리콘 기판위에 증착된 반도체 박막의 자기저항특성

오데레사<sup>†</sup>

<sup>†</sup>청주대학교 반도체공학과

### Magnetonic Resistance Properties of Semiconductor Thin Films by Plasmon Effect on Fabricated Si(100) Substrates

Teresa Oh<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Semiconductor Engineering, Cheongju University

#### ABSTRACT

Plasmons have conductive properties using the effect of amplifying magnetic and electric fields around metal particles. The collective movement of free electrons in metal particles induces and produces the generation of plasmon. Because the plasmon is concentrated on the surface of the nanoparticles, it is also called the surface plasmon. The polarizing effect of plasma on the surface is similar to the principle of surface currents occurring in insulators. In this study, it was found the conditions under which plasma is produced in SiOC insulators and studied the electrical properties of SiOC insulators that are improved in conductivity by plasmons. Due to the heat treatment temperature of thin film, plasma formation was shown differently, metal particles were used with normal aluminium, SiOC thin films were treated with heat at 60 degrees, conductivity was improved dramatically, and heat treatment at higher temperatures was found to be less conductivity.

**Key Words** : Sputtering, Plasmon, Surface Current, Polarization, Insulator, EM Field

#### 1. 서 론

플라즈몬은 금속의 나노 입자와 빛 사이의 상호작용을 이용하여 나노입자의 공명현상이 일어나도록 미세구조를 제작하여 전도성을 유도할 수 있다. 플라즈몬은 입자의 크기에 영향을 미치며 전파경로를 예측할 수 있도록 나노구조체를 설계하여 빛과 같은 파동을 나노규모의 도선을 따라 전송할 수 있다. 미국 노스웨스턴대(Northwestern University)의 막심 슈카레프(Maxim Sukharev)와 타마르 시드만(Tamar Seideman)에 의해서 2000년도 초에 연구되기 시작하였으며, 파동을 이용한 플라즈몬 에너지의 전송방식은

광스위칭, 광도파로 등 광응용장치에 많이 적용되고 있다 [1-3]. 플라즈몬의 집단적 전도현상의 도입에 의해서 플라즈몬은 빛과 같은 주파수와 전자기장을 갖는다. 따라서 고전적인 전자기역학인 맥스웰방정식을 양자역학으로 해석해야 하는 매우 작은 입자의 나노입자를 전자기적으로 분석할 수 있게 된 것이다. 나노입자에 의한 전자의 전기 자기학적인 집단적 전도현상인 플라즈모닉 효과는 입사 광은 나노입자에 의해 포획되고 입자의 배열에 따라서 파장이 집중되거나 유도될 수 있다. 따라서 플라즈몬의 도입으로 거시세계를 나노세계로 확장할 수 있게 되며 양자역학으로 쉽게 접근할 수 있게 하였다. 플라즈몬은 표면파이다. 표면전도파에 대한 연구는 자기저항소자에 서도 나타난다[4-5]. 자기저항소자는 자기장에 의하여 저

<sup>†</sup>E-mail: teresa@cju.ac.kr

항이 감소하는 특징이 있으며, 자기장효과에 의하여 전기적인 특징은 나타내는 양자홀현상에 의해서 관측되어진다. 양자홀효과에는 양자정수홀효과, 양자분수홀효과와 양자이상홀효과가 있다. 양자정수홀효과는 에너지가 정수화되어 있다는 의미이다. 에너지가 양자화되어 있다는 것은 에너지 값을 아무 값이나 모두 가질 수 있는 것이 아니라 어떤 가장 작은 단위의 정수배의 에너지만 가질 수 있다는 것으로 양자역학의 개념적인 용어이다. 양자분수홀효과는 전자들이 극저온에서 강자기장이 걸리면 강하게 끌어당겨 일종의 유체처럼 행동하는 현상을 의미한다. 전자들이 강한 자기 마당(장) 안에서 서로 작용하여서 전자의 전하의 조각을 갖는 새로운 알갱이(입자)를 형성하는 것이 발견되었으며, 1998년 새로운 형태의 양자유체(量子流體)를 발견하고 이를 분석해 낸 공로로, 로버트 러플린, D.C.추이, H.L.슈퇴르머는 공동으로 “조각 전하(fractional charge)의 들뜸(excitation)을 갖는 새로운 형태의 양자 유체(quantum fluid)의 발견을 기리기 위해서”의 내용으로 노벨물리학상을 수상하였다. 양자이상홀현상은 홀효과는 극저온에서 나타나며, 강한 자기장이 있어야 가능한데, 자기장이 없는데도 양자홀현상이 나타나는 것을 의미한다. 즉 자기장이 없는데도 표면전류가 발생하여 전도현상이 일어나게 된다. 2016년 위상절연체의 표면전류 발생에 대한 이론적인 연구결과로 데이비드 타우레스(David Thouless)와 둔칸 할데인(Duncan Haldane)과 마이클 코스텔리츠(Michael Kosterlitz)는 위상학적으로 물질을 분류하는 방법으로 노벨물리학상을 수상하였다[6-9]. 위상절연체의 특징으로는 절연체에서도 표면전류가 흐른다는 이론적인 결과를 발표하고 있다. 절연체에서도 전류가 흐를 수 있다는 것을 입증하기 위해서는 조건이 있다. 매우 크기가 작아야 하고, 자기장이 있고 교류형태에서 동작한다면, 절연체에서 표면전류가 흐르게 된다는 이론이다. 양자이상홀효과는 플라즈몬의 표면전류발생과 위상절연체에서의 표면전류를 설명할 수 있는 이론적인 배경을 잘 제시해주고 있다.

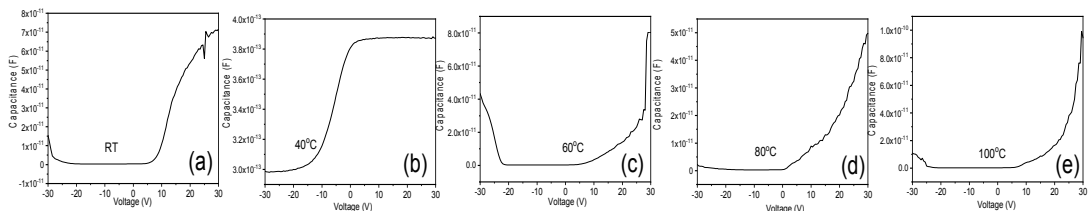
플라즈몬은 금속입자 주변의 자기장과 전기장을 증폭시키는 효과를 이용하여 전도되는 특성을 갖게 된다. 금속입자에 있는 자유전자들의 집단적인 움직임에 의해서 전도성을 갖게 되는 플라즈몬의 생성을 유도하고 생성하게 된다. 플라즈몬이 나노 입자의 표면에 집중되기 때문에 표면플라즈몬이라고도 한다. 플라즈몬이 표면에서 발생하는 분극효과는 절연체에서 발생하는 표면전류가 발생하는 원리와 유사하다. 본 연구에서는 SiOC 절연체에서 플라즈몬이 발생하는 조건을 찾고 플라즈몬에 의해서 전도성이 향상되는 SiOC 절연체에서의 전기적인 특성에 대하여 연구하였다.

## 2. 실험

SiOC 박막을 증착하기 위해서 ST1, ST2과정의클리닝을 한 실리콘 기판을 사용하였으며, 마그네트론 스퍼터링방법에 의해서 증착되었다. 증착한 SiOC 박막은 표면에너지를 변화시키기 위해서 다시 열처리를 하였으며, 전기적인 측정을 위해서 0.02 $\mu\text{m}$  직경의 알루미늄 전극을 금속마스크 공정을 통하여 얻었으며, 전류-전압, 커패시턴스-전압을 측정하여 전기적인 특성을 측정하여 플라즈몬에 의한 표면전류의 형성 메카니즘을 조사 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig 1은 열처리 온도에 따른 SiOC 입자의 박막에 대한 전기적인 특성으로 커패시턴스 값을 보여준다. 커패시턴스는 n형 특성을 보여주면서 열처리온도에 따라서 파형의 유형은 서로 다르게 나타났다. 40도와 60도 열처리 사이에서 가장 큰 변화가 나타났으며, 60도 열처리를 하면서 커패시턴스 값은 크게 증가하고 있다. 커패시턴스의 저주파수 특성이 40도 열처리한 샘플에서 가장 우수하게 나타났다.



**Fig. 1.** Capacitance of thin films using SiOC particles with annealing treatment from 40 °C to 100 °C, (a) RT, (b) 40 °C, (c) 60 °C, (d) 80 °C, (e) 100 °C.

Fig. 2는 커패시턴스의 절대 값을 비교하기 위해서 낮은 영역에서 비교하여 보았다. 열처리온도에 의해서 분극이 달라지기 때문에 40도와 60도 사이에서 변화가 큰 것은 분극에서 큰 변화가 있다는 의미이다.

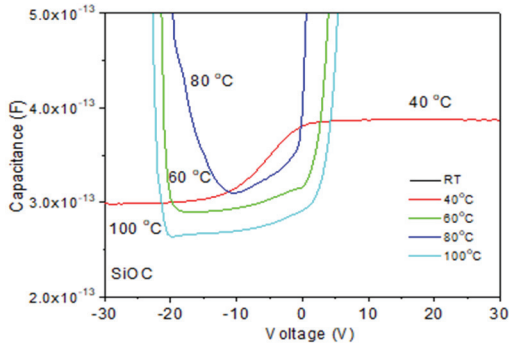


Fig. 2. Capacitance of thin films using annealing of SiOC particles.

Fig. 3은 플라즈몬에 의한 분극의 형성과정을 보여주고 있다. 전기장과 자기장의 형성으로 플라즈몬 공진현상이 일어나고 나노입자에 분극이 일어나면서, 표면전류에 의한 전도성을 띄게 되는 현상을 설명하고 있다. 플라즈몬이라는 유전체를 이용하여 분극을 형성하고 플라즈몬의 표면에 형성되는 집단전하들이 표면전류를 만들고 이러한 표면전류에 의해서 전도성이 증가된다. 플라즈몬의 분극성은 전자기에너지의 영향을 받으며, 나노파티클 태양 전지, 나노 안테나 혹은 전자기적인 광센서의 기능할 수 있어서 이미 응용하여 사용되고 있다. 하지만 플라즈몬의 분극은 유전체의 스핀트로닉스 분야에서 이루어지고 있어서 초전도체, 강자성체 등 스핀이 존재하는 유전체에서의 스핀효과에 의한 경우로 제한적이다. 절연체에서의 플라즈몬효과에 대한 연구는 극히 드물다. 위상절연체를 사용한 경우 표면전류는 일반적이지 않으며, 온도가 올라갈수록 전기적인 특징은 약해지는 현상이 나타나는데 즉 온도가 올라갈수록 전하들이 없어지면서 전류가 낮아지는 효과이다. 전형적인 옴 법칙에 의해서는 온도가 높아지면 열에너지가 증가하기 때문에 전류 값은 더 높아지는 것이 일반적인 현상이다. 위상절연체에서는 온도가 높아지면서 자기장이 세지는 효과 때문에 전기적인 전류의 값은 낮아진다. 따라서 온도가 올라갈수록 전류는 낮아진다.

Fig. 4에서는 열처리온도에 따른 플라즈몬의 형성과 전기적인 특성과의 연관성을 조사하였다. 온도가 올라갈수록 표면전류는 감소하고 있다.

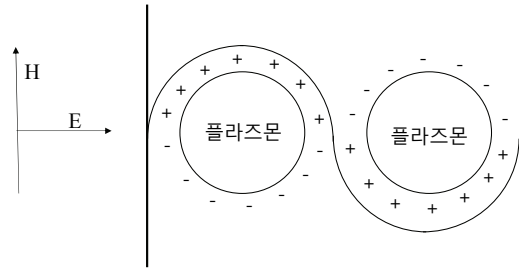


Fig. 3. Plasmon effect for dielectric particles in electric and magnetic fields.

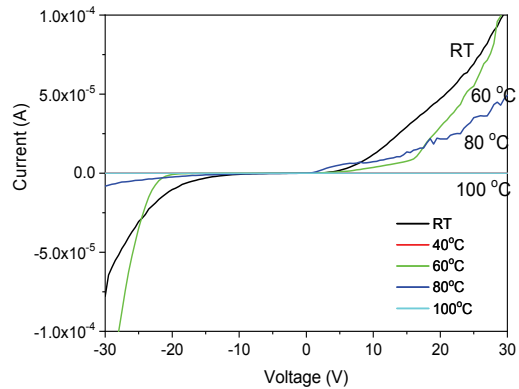


Fig. 4. Electrical characteristics of I-V curves of thin films in accordance with various annealing temperatures.

Fig. 5에서는 미세전류 전압영역에서의 표면전류의 변화를 열처리온도에 따라서 조사하였다. 미세영역에서도 절연체에서 플라즈몬 표면전류는 온도가 증가할수록 감소하고 있다. 이러한 특징은 Fig. 1과 Fig. 2의 결과와 일치한다.

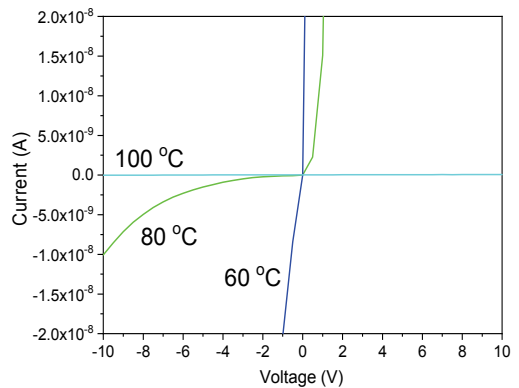
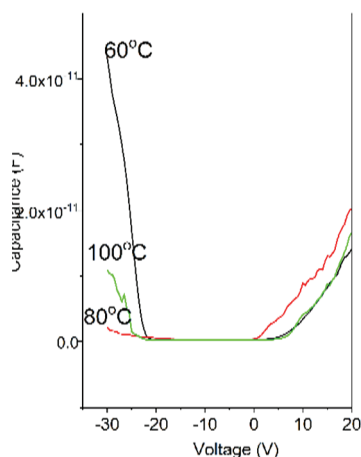


Fig. 5. Current-voltage characteristics of thin films in low ranges of -10V<voltage<10V.

Fig. 6은  $-30V < \text{전압} < 30V$  영역에서 커패시턴스의 값의 변화를 살펴보았다. 전압이 증가할수록 온도가 올라감에 따라서 전하들이 감소하는 특성은 뚜렷하다는 것을 보여준다.

유전율을 가지는 물질로서 유전체는 전압을 인가하면 전기적으로 중성인 원자나 분자가 전압의 극성에 따라 원자핵과 전자 혹은 양이온과 음이온 등이 서로 위치적 변위를 일으키는 물질을 말한다. 유전체는 쌍극자를 가지며, 전압을 인가한 경우 분극을 형성한다. 그런데 강유전체는 전압을 인가하지 않아도 자발분극을 갖는 물질로 유전상수가 매우 큰 경우이며, 자발분극의 원인으로 스핀양자가 있다.



**Fig. 6.** Capacitance characteristics of thin films in long ranges of  $-30V < \text{voltage} < 30V$ .

나노입자에서의 분극은 전압이 인가된 경우 분극이 일어나면서 전류가 증가한다. 위상절연체인 경우 무분극에서 전하들이 감소하게 되면 전류가 증가하고 플라즈몬 표면전류가 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

전기장과 자기장의 상호작용에 의해서 금속입자의 파동에너지가 전도성을 띠면서 표면전류가 흐르는 플라즈몬 현상을 관찰하기 위해서 실리콘 기판위에 절연막을 입히고 알루미늄의 전극을 만들었다. 전극의 패턴에 의한 전도성을 높이는 작업을 하지 않았으며, 오로지 절연막의 특징에 의한 플라즈몬 현상과 전도성에 대하여 관찰하였다. 플라즈몬의 분극에 의하여 표면전류의 발생하므로, 분극에 의한 연관성을 찾기 위해서 절연체를 여러가지

온도에서 열처리를 하여 절연체가 다양한 분극성을 갖도록 하였다. 절연체의 분극은 알루미늄 전극에 의한 플라즈몬형성에 영향을 주었으며, 위상절연체로서의 온도의 존성으로 온도가 올라갈수록 전류가 감소하는 특성이 관찰되었다. 따라서 플라즈몬의 분극이 절연체의 특성에 의존한다는 것을 알 수 있으며, 플라즈몬 전도를 위해서 도파로를 형성하는 것 이외에도 기판의 절연특성에도 플라즈몬의 분극의 형성과 전도성에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. SiOC 절연체의 분극이 가장 낮은 경우 플라즈몬의 전도성은 높아졌으며, 절연체의 분극이 가장 낮게 나타나는 온도는 60도였으며, 60도에서 열처리를 한 경우 금속의 플라즈몬효과는 가장 우수하게 나타난다는 것을 알 수 있었다. 따라서 위상절연체는 분극에 의해서 전류와 전압의 위상변화를 일으키며, 표면전류가 자체 형성되면서 플라즈몬효과를 증대시키고 있다는 것을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1. D. C. Paine, B. Yaglioglu, Z. Beiley, and S. Lee, "Amorphous IZO-based transparent thin film transistors", *Thin Solid Films*, Vol. 516, pp.5894-5898, 2008.
2. T. Oh, Tunneling Phenomenon of amorphous Indium-Gallium-Zinc-Oxide Thin Film Transistors for Flexible Display, *EML*, Vol. 11. pp.853-861, 2015.
3. N. Ito, Y. Sato, P.K. Song, A. Kaijio, K. Inoue, and Y. Shigesato, "Electrical and optical properties of amorphous indium zinc oxide films", *Thin Solid Films*, Vol. 496(1), pp.99-103, 2006.
4. K. K. Banger, Y. Yamashita, K. Mori, R. L. Peterson, T. Leedham, J. Rickard, and H. Sirringhaus, Low-temperature, high-performance solution-processed metal oxide thin-film transistors formed by a 'sol-gel on chip' process, *Nature Materials*, Vol. 10, pp. 45-50, 2011.
5. Y. S. Jung, J. Y. Seo, D. W. Lee, and D. Y. Jeon, Influence of DC magnetron sputtering parameters on the properties of amorphous indium zinc oxide thin film, *Thin Solid Films*, Vol. 445, pp.63-71, 2003.
6. Li. et al., Magnetization switching using topological surface states, *Sci. Adv.* 5, eaaw3415, (2019)
7. L. Raniero, I. Ferreira, A. Pimentel, A. Goncalves, P. Canhola, E. Fortunato, and R. Martins, "Role of hydrogen plasma on electrical and optical properties of ZGO, ITO and IZO transparent and conductive coatings", *Thin Solid Films*, Vol. 511-512, pp. 295-298, 2006.

- 
8. Cui-Zu Chang, Jinsong Zhang, Xiao Feng, Jie Shen, Zuo Cheng Zhang, Minghua Guo, Kang Li, Yunbo Ou, Pang Wei, Li-Li Wang, Zhong-Qing Ji, Yang Feng, Shuaihua Ji, Xi Chen, Jinfeng Jia, Xi Dai, Zhong Fang, Shou-Cheng Zhang, Ke He, Yayu Wang, Li Lu, Xu-Cun Ma, Qi-Kun Xue, Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator, *Science*, Vol. 340(6129), pp.167~237, 2013.
  9. T. Oh and C. K. Choi, Comparison between SiOC thin film fabricated by using plasma enhance chemical vapor deposition and SiO<sub>2</sub> thin film by using fourier transform infrared spectroscopy, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 56, pp. 1150-1155, 2010.
- 
- 접수일: 2019년 9월 13일, 심사일: 2019년 9월 23일,  
게재확정일: 2019년 9월 26일