테라헤르츠 나노갭 능동 소자

DOI: 10.3938/PhiT.19.009

김대식·서민아

Terahertz Nanogap Active Device

Dai Sik KIM and Min Ah SEO

Metamaterial research has been at the core of modern science and technology due to their unique optical properties and rich phenomena.^[1-3] They are based on a single resonance behavior determined by feature size and controlled by dielectric environment. The desirable frequency filtering with wideband and high tolerances are much required for promising applications. Here, we demonstrate active terahertz nanoantennas on VO₂ (vanadium dioxide) which transform themselves from being transparent, to being completely reflective with transmission of only 0.01% when the underlying thin film makes phase transition. We introduce rectangular slot antennas of length L and width w by electron beam lithography using a negative photo-resist, on top of the VO₂ thin film. When the thin film is in the insulator state, this nano slot-antenna attracts light from the surrounding area at half wavelength resonance, and the attracted light funnels through the slot-antenna and is re-emitted towards the forward direction. Therefore, provided that these antennas are lined-up close enough so that the average distance between adjacent antennas is significantly smaller than L , the nano-antenna patterned thin film is as transparent to

the resonant electromagnetic wave as the un-patterned sample, creating a nano-metamaterial equivalent of the insulating VO₂ thin film.

서론

현재를 이끄는 정보통신 전반의 기본이 되고 있는 전자 소자와 광소자는 이미 수십 나노미터 (10^{-9} m) 크기 스케일에서 이루어지고 있으나, 빛의 회절 한계로 인해 광학적 측정에는 그 제약이 있다. 빛의 회절 한계를 극복하려는 노력의 하나로 빛의 집속을 이용한 근접장 현미경^[4]을 들 수 있으나, 이는 효율면에서 여전히 한계를 지니고 있다 (대략 10배 이내의 집속도). 빛의 집속도를 극대화하고 이를 소자 등의 개발에 응용하기 위해서 상대적으로 긴 파장대인 테라헤르츠 영역 (주파수 = $0.1 \sim 10$ THz, 파장 = $0.03 \sim 3$ 밀리미터)으로 관심 영역을 확대시켜 볼 수 있다. 주로 가시광에서 이루어졌던 표면 플라즈몬을 이용한 투과 특성 향상^[5]에 관한 연구도 최근 테라헤르츠 및 마이크로 파장대^[6]로 확장되어 왔다. 테라파는 고체 물리의 elementary excitation에 해당될 뿐 아니라, 분자의 회전운동에너지 영역을 포함하면서 또한 인체에 무해한 파장대역이기 때문에, 물리학뿐 아니라 의료 장비나 보안, 검색 장비와 같은 응용 사례도 점점 늘어나고 있다.

저자약력

김대식 교수는 U. C. Berkeley 이학박사(물리학)로서(1990), 미국 AT&T Bell 연구소 박사후 연구원(1991-1993), Oklahoma State Univ., Center for Laser and Photonics Research 선임연구원(1993-1994)을 거쳐 현재 서울대학교 물리학과 교수(1994-현재)로 재직 중이다. (dsk@phya.snu.ac.kr)

서민아 박사는 서울대학교 테라파 분광에 관한 연구로 물리학 박사학위를 받고(2010), 미국 Los Alamos National Laboratory에서 박사후 연구원으로 재직할 예정(2010)이다. (minahseo@gmail.com)

REFERENCES

- [1] T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang, D. C. Vier, D. R. Smith, J. B. Pendry, D. N. Basov and X. Zhang, *Science* **303**, 1494 (2004).
- [2] N. Liu, H. Guo, L. Fu, S. Kaiser, H. Schweizer and H. Giessen, *Nat Mater.* **7**, 31 (2008).
- [3] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr and D. R. Smith, *Science* **314**, 977 (2006).
- [4] L. Novotny, D. W. Pohl and P. Regli, *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 1768 (1994).
- [5] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio and P. A. Wolff, *Nature* **391**, 667 (1998).
- [6] J. W. Lee, M. A. Seo, J. Y. Sohn, Y. H. Ahn, D. S. Kim, S. C. Jeoung, C. Lienau and Q. H. Park, *Opt. Express* **13**, 10681 (2005).

Fig. 1. Electric field funneling through single rectangle holes.

현재 크게 어렵지 않게 만들 수 있는 10~100나노미터 영역의 구조만 하더라도 테라파 영역에서는 $\lambda/10,000$ 에 달하는 미세 구조이다. 이 원고에서는 $\lambda/10,000$ 의 극한에서는 광학이 간단한 전자회로의 관점에서 이해될 수 있다는 점을 바탕으로 빛의 초집속을 구현하고 이를 응용하여 테라헤르츠에서 동작하는 일종의 메타 물질 능동 소자를 만들 수 있음을 보이고자 한다. 능동 소자를 만들기 위해 먼저 주된 관심 영역인 테라헤르츠 파장에서 공명 현상을 잘 보이는 메타 물질 구조를 제작해 그 매커니즘을 이해하고 이를 상전이 물질 위에 올려 공명 현상을 능동적으로 조절할 수 있는지 여부를 조사한다.

빛의 집속 및 증폭 효과

빛은 회절 한계 때문에 파장보다 훨씬 좁은 구멍을 통과하기 힘든 것으로 알려져 왔지만 최근 금속에 뚫어진 $\lambda/10$ 크기의 주기적으로 배열된 좁은 구멍 혹은 슬릿을 빛이 플라즈몬 효과에 힘입어 잘 통과한다는 사실이 알려지게 되었다.^[7] 이때 입사하는 빛은 갈매기처럼 구멍에 모였다가 다시 퍼지게 되면서 면적당 세기 면에서 입사하는 빛의 세기보다 훨씬 커진다. 이러한 현상은 플라즈몬의 도움 없이, 구멍의 기하학적인 구조에 의해서도 일어나며 구멍의 면적이 전체 면적의 10% 정도 밖에 안 되어도 100%에 가까운 투과가 가능하다

Fig. 2. a. Schematic of electric field transmission through gold thin film with narrow gap. b. 60 nm thick gold film. c. The experimental scheme and SEM of gold thin film with 70 nm width slit.

는 것이 이론적,^[8] 실험적^[9]으로 보여졌다. 특히 이러한 사각 구조물의 길이에 의해 결정되는 공명 현상은 구조의 폭이 좁아져도 같은 양의 빛이 통과한다는 상식에 벗어나 보이는 예측을 가능케 하는데 이러한 현상이 가능하려면 폭이 작아질수록 빛의 세기가 더 커져야 한다 (Fig. 1).

이를 실험적으로 보이기 위해 나노 공정으로 쉽게 접근할 수 있는 100 nm 크기의 슬릿 구조물을 이의 10,000배 이상인 테라파 파장을 투과시키는 실험을 고안하였다. 금속 막의 두께는 침투 깊이 이하인 60 nm, 슬릿의 폭은 70 nm이다 (Fig. 2).

이때 구멍에서의 전기장 크기(amplitude)는 면적당 크기 면에서 10배 정도로 ‘증폭’된다. 그러나 이러한 현상을 보이는 대부분의 경우, 수십 마이크로 두께의 금속 막은 금속에 대한 빛의 침투 깊이보다 훨씬 크기 때문에, 금속이 ‘완벽한 도체’로 근사된 경우이다. 그렇다면, 증폭 효과를 극대화시키기 위해 금속 막의 두께와 슬릿의 폭을 줄여간다면, 즉 금속에 대한 빛의 침투 깊이 이하로 줄인다면 이러한 현상은 어떻게 달라질까. 금속 막이 침투 깊이 이하로 얇아진다면 금속 막 내부에도 전류가 흐르게 되며, 표면전류의 개념은 더 이상

REFERENCES

- [7] C. Genet and T. W. Ebbesen, *Nature* **445**, 39 (2007).
- [8] F. J. Garcia-Vidal, E. Moreno, J. A. Porto and L. Martin-Moreno, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 103901 (2005).
- [9] M. A. Seo, A. J. L. Adam, J. H. Kang, J. W. Lee, K. J. Ahn, Q. H. Park, P. C. M. Planken and D. S. Kim, *Optics Express* **16**, 20484 (2008).

Fig. 3. Electric field enhancements through various nano gap.

Fig. 4. (a) Time traces for 70 nm nanogap and 500 nm nano antenna. (b) Fourier transformed field amplitudes for the nano-gap and nano antenna.

적용되지 않는다. 물론 이 사실이 몇몇 사람들이 생각하는 것처럼 손실이 크다는 것을 자동적으로 의미하지는 않는데, ‘완벽한 도체’ 근사의 경우보다도 전류가 흐르는 부피가 작으므로 실제 손실은 오히려 더 작다. 빛이 유도한 전류는 침투 깊이 100 nm 영역(= 금속의 두께나 슬릿의 폭)에 분포하는 반면 이러한 전류에 의하여 생기는 전하는 표면으로부터 1 nm 이하의 깊이에만 존재한다.

빛이 파장의 1/10,000 크기의 슬릿을 지날 때, 슬릿 양단에는 전하가 모이게 되며 금속표면에 유도된 전류가 슬릿 끝으로 전하를 모으고, 이렇게 모인 전하는 매우 큰 전기장을 형성하게 된다. 이 현상은 슬릿의 폭이 좁아수록 더욱 강하게 일어나며, 70 nm의 슬릿의 경우 약 1000배나 전기장이 증폭된 것을 볼 수 있다 (Fig. 3). 이 연구는 네이처 포토닉스 2009년 3월호에 자세하게 소개되어 있다.^[10]

앞서 보인 나노 슬릿을 투과하는 테라파의 강한 증폭은 공명이 일어나는 사각 구멍 구조에서도 보일 수 있다 (Fig. 4). 그림에서 양단이 정해져 공명 구조를 일으키는 나노 구멍 구조와 양단이 없어 공명은 없고 증폭만 일어나는 나노 슬릿을 투과하는 테라파의 집속 및 증폭 현상을 함께 볼 수 있다. 샘플의 전체 면적 대비 구멍의 면적이 불과 3% 이내인 경우에도 구조물의 10,000배가 넘는 길이의 파장이 충분한 투과 증폭이 일어난다는 점은 무척 놀랍다. 다음 장에서는 이러한 테라파의 투과 증폭 현상을 일으키는 테라파 메타 물질의 정성적/정량적인 조절을 위해 상전이 물질과 결합(hybrid)하는 시스템을 소개하고자 한다.

상전이 박막과 나노메타 물질의 결합

현대 과학 및 산업 전반에 걸쳐 모든 소자 및 물질의 크기가 나노미터 스케일로 줄어드는 추세에 맞춰 반도체, 초전도체, 강하게 결합된 전자 구조물, 폴리머 등 그 핵심 분야에서 박막에 대한 연구는 그 중요성이 더해가고 있다. 박막의 유전율은 보통 광학적, 전기적, 혹은 열적 방법을 이용하여 바꿀 수 있으며, 얇은 막과 공명 구조가 있는 메타 물질과의 결합은 여러 소자로의 응용을 가능하게 하는 좋은 예가 될 수 있다. 그러나 산업, 과학 전반에 걸쳐 가장 많이 연구되고 있는 수십에서 수백 나노 두께의 박막은 테라파 영역에서 볼 때 $\lambda/100 \sim \lambda/100,000$ 에 해당하여, 보강간섭을 일으켜 빛을 대부분 투과시킨다. 이러한 극한 상황에서는 더 이상 박막의 다양한 유전 특성이 그 역할을 할 수 없다. 우리는 다양한 유전 상수값을 주는 박막을 추가적으로 메타 물질과 결합시킴으로써, 긴 파장에서도 반응하게 하여 여러 가지 소자로의 응용을 가능케 할 방법을 모색하였다. 다양한 투과율의 조절을 시도하기 위해 외부의 전기적, 광학적, 열적 변화에 능동적으로 반응하는 상전이 물질을 이용하도록 한다. 예를 들어,

REFERENCES

- [10] M. A. Seo, H. R. Park, S. M. Koo, D. J. Park, J. H. Kang, O. K. Suwal, S. S. Choi, P. C. M. Planken, G. S. Park, N. K. Park, Q. H. Park and D. S. Kim, Nature Photonics **3**, 152 (2009).

Fig. 5. The hybrid system with phase transition film and nano resonator at insulating and metallic state, respectively.

상전이를 일으킨다고 알려진 바나듐 다이옥사이드 필름은 테라파에서는 보통 그 투과율의 변화 정도가 20%에 불과하지만, 나노 메타 물질과 결합한 후에 투과율의 변화 정도는 10,000배를 넘어서는 놀라운 결과를 준다 (Fig. 5).

바나듐 다이옥사이드(Vanadium Dioxide, 이하 VO_2) 박막은 온도가 올라가면 유전 상수값이 증가하는 특성을 가지고 있다. 이는 점진적인 변화는 아니며, 물질이 특이 임계 온도 (T_c)보다 높은 온도에서 갑자기 상변이를 일으켜 금속과 같은 성질을 띠게 된다. 이러한 특성이 테라파에서도 유지되는지 알아보기 위하여 온도를 올려가면서 테라파의 투과 특성을 먼저 조사하였다.

340 K 근처에서 상변이를 일으키는 VO_2 박막은 테라파 투과 실험에서도 임계 온도를 중심으로 급격한 테라파의 투과 감소 현상을 보인다 (Fig. 6). 이는 임계 온도 이상에서 금속의 성질을 띠는 VO_2 박막 고유의 특성에서 따라 금속의 성질을 띠는 박막의 표면이 테라파를 대부분 반사시킨 것으로 이해할 수 있다. 또한 이 상변이는 알려진 대로 온도를 올리느냐 내리느냐에 따라 약간의 임계 온도 값의 차이를 나는 이력 특성을 보여준다. 임계 온도보다 훨씬 높은 온도에서도 여전히 테라파의 필드 투과 크기가 30%가 넘는 것은 앞서

Fig. 6. Terahertz transmitted field amplitude through VO_2 thin film with hysteresis.

Fig. 7. Terahertz field amplitudes through 1 μm width nano antenna array at various temperature from room temperature to 375 K.

설명한 대로, 이 박막의 두께가 100 nm이고, 테라파 파장의 길이가 두께의 10,000배에 해당하는 1 mm 근방인 것을 감안할 때, 얇은 막에서 일어나는 보강간섭 때문이라고 이해할 수 있다. 그렇다면 이렇게 온도로 조절이 가능한 능동적인 박막 위에 앞 장에서 논의되었던 나노 크기의 메타 물질을 결합시키면 이 투과 양상이 어떻게 달라질까.

그림(Fig. 7)에서 보이듯이, VO_2 박막 위에 1 μm 폭을 가진 공명 구조물을 만들었을 때, 박막이 상전이를 일으킨 후에도 여전히 30% 근처이던 테라파의 필드 투과 크기는 이제 거의 0으로 떨어지게 된다. 이 같은 투과율의 급격한 감소 현상은 갭이 좁은 메타 물질 구조를 지나는 전자기파가 강하게 집중, 증폭되면서 상변이가 일어난 박막의 효과를 더욱 극대화 시킨 것으로 해석할 수 있다.

이러한 현상은 갭을 좁히면 좁힐수록 더욱 강하게 일어나, 그 세기 면에서 박막의 상변이 전후 투과율이 1/100,000 오

Fig. 8. Transmissions through terahertz active device without and with 27 μm , 1 μm , and 450 nm width nano antennas as various temperature are shown.

더로 줄어드는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 8).

이처럼 전자기파의 강한 집속과 증폭을 유발하는 나노 메타 물질과 상변이 박막의 결합은 전자기파의 투과율을 넓은 범위에서 자유롭게 조절할 수 있다는 측면에서 그 응용 가능성이 무한하다고 할 수 있다. 임계 온도보다 낮은 온도에서 박막은 유전체 역할을 하므로 이 결합 시스템은 나노 메타 물질의 기하학적 구조에 의한 공명만을 일으키고, 임계 온도보다 높은 온도가 되어 박막이 상전이를 겪은 후에는, 결합 구조는 더욱 강력한 반사체처럼 행동하여 전자기파를 완벽하게 차단하는 역할을 한다. 이러한 완벽한 투과, 완벽한 차단 시스템은 기존의 메타물질만으로, 혹은 기존의 상변이 박막만으로 구현하였던 투과율 조절 범위를 최대 10,000배 이상 늘렸다는 점에서 무척 놀라운 결과이다. 이 시스템의 테라파 투과율이 동작하는 시스템의 온도에 의해서 바뀌고, 큰 조율 범위 내에서 자유롭게 조절된다는 점에서 이 시스템을 곧바로 테라파에서 작동하는 능동적인 소자로 이용할 수 있다. 또한 이런 재미있는 현상은 외부에서 변화시키는 온도뿐만 아

니라, 전기적인 자극이나, 광학적인 자극으로도 구현할 수 있어 그 방법적인 측면에서의 활용 또한 무한대이다. 공명 구조의 기하학적인 모양을 이용하여 원하는 주파수 내에서 작동을 가능하게 할 수 있고, 상변이 박막 기판의 온도, 전기적 자극, 광학적 자극 정도에 따라 투과율을 바꿀 수 있어서 소자의 동작 목적에 따라 자유롭게 그 성능을 구현할 수 있다.

결론

본 원고에서는 mm 정도의 파장을 가진 테라파 전자기파가 파장의 1만분의 1 밖에 되지 않는 나노 구조를 지나면서 집속되고 증폭되는 현상과 이러한 나노 구조와 상변이 물질을 결합하였을 때, 테라파에서 작동하는 능동 소자를 만들 수 있음을 보였다. 이 테라파 능동 소자는 온도에 따라 상이 변화하는 물질에 기반하여 작동하며, 상변이 물질이 유전체일 때와 임계 온도 이상에서 금속과 같이 행동할 때, 각각 투과되는 테라파의 투과 비율은 10,000배 이상이 됨을 보인다. 이는 상변이 물질만 투과시켰을 때 그 조절 범위가 2배인 것에 비해 실로 놀라운 발전이라고 볼 수 있다. 이 조절 범위는 능동 소자의 온도를 변화시키기에 따라 자유롭게 바꿀 수 있으며, 이러한 상변이 특성이 온도 이외에도, 전기적인 자극이나 광학적 자극에 의해서도 가능하다는 점에서 또 다른 응용을 모색하게 한다. 이러한 전기장의 집속, 증폭 등의 특성을 가지는 구조와 상변이 물질의 결합은 완벽한 스위칭, 비선형성 극대화, 필터링, 원격외선 능동 소자 등으로의 그 응용 가능성을 넓힐 수 있을 것이다.

감사의 글

기판을 보내주신 ETRI의 김현탁 박사님께 감사드립니다.