

메타물질과 나노포토닉스

글 타나카 타쿠오 / 국립연구개발법인 이화학연구소 광양자공학연구센터 포톤조작기능연구팀 팀리더
번역 유정훈 / 그린광학 사업개발그룹장

1. 처음

광학에 대한 여러 가지 '한계'중, 가장 대표적인 것을 꼽으라고 하면 주저 없이 '회절한계'를 들겠다. 이것은 광의 파동성에 기인하는 것으로 직접적으로는 광학계의 해상한계를 지배하고 있다. 광학현미경에 대한 분해능의 한계와, 광 리소그래피의 가공선폭, 광디스크의 기록밀도의 최대값 등, 모두 이 회절한계와 연결되고 있다. 가시광 파장은 약 400~800 nm이기 때문에 자색광에서의 회절한계는 약 200 nm정도로 된다. 회절한계가 존재하는 한, 광학현미경은 공간분해능의 점에서 파장이 짧은 전자파를 사용하는 전자현미경에는 이길 수 없다. 이와 같이 회절한계는 광기술에 큰 제한이 있지만, 이것을 잘 이용하면 조금 재미있는 것이 있다.

2. 회절한계를 이용하는 메타물질

메타물질에 대해서는 이미 본지에서도 여러 번 언급했기 때문에 상세는 그것들의 기사와 다른 문헌, 서적에 양보하지만, 먼저 그 포인트만 언급하겠다¹⁻⁵⁾.

1990년대 끝쯤, 마이크로파 영역에서 그 파장보다도 가는 구조(이하 서브파장구조)를 사용해서 물질의 유전율과 투자율을 제어한다는 아이디어가 제안되었다⁶⁾. 물질 그것을 개변하는 것은 아니고, 인공적으로 도입하는 구조에 의해 그 광학특성을 여러 가지 제어하려고하는 시도이다. 포인트는 파장보다 가는 구조를 이용하는'곳에서 이것에 의해 하나하나의 구조가 광파에 직접 감지되지 않고, 메타물질 전체가 마치 하나의 균질한 물질로서 동작한다. 다시 말하면 메타물질에서는 회절한계를 역순으로 이용하는 것에 의해 도입한 서브파장구조의 존재를 광에 보이지 않도록 하고 있다.

메타물질 특징의 하나는 어떤 물질에서도 1.0으로 고정되어 있는 물질의 비투자율을 다른 값으로 조작할 수 있는 것이다. 꼭 메타물질이 제안된 것과 같은 무렵, 부의 굴절률을 가지는 물질을 이용하면 광의 회절한계에 제한되지 않고 얼마라도 적은 것을 가시화할 수 있는 완전한 렌즈를 만들어 낼 수 있는 것을 영국의 Pendry가 지적했다⁷⁾. 이 아이디어 자체는 1960년대에 구소련의 Vessalago에 의해 이미 제안된 것으로 'Vessalago 렌즈'라고도 한다⁸⁾. 이 완전렌즈의 실현에는 자연계에는 존재하지 않는 부의 굴절률을 가지는 물질이 필요하기 때문에 당시는 단순한 탁상 논의로 취급되었다. 그러나 메타물질을 사용해서 물질의 투자율을 제어할 수 있도록 되자, 부의 굴절률을 가지는 물질도 실현가능으로 되어 완전렌즈 실현이 현실미를 띄게 되었다⁹⁾. 이와 같이해서 메타물질은 부의 굴절률을 가지는 물질과, 그것을 이용한 완전렌즈를 창출하는 수단 하나로서 주목되도록 되었다. 이와 같이 회절한계를 역순으로 사용한 메타물질의 기술이 회절한계를 넘는 완전렌즈를 실현하는 그 수단 하나로서 주목되었다. 그 후 이것 이외에도 메타물질은 폭넓은 분야에 응용할 수 있는 것이 명확히 되었다.

3. 메타물질 흡수체

빛을 완전히 흡수하는 물체를 흑체라고 하는데, 여러 파장의 빛을 100% 흡수하는 완전흑체의 실현은 어렵다. 빛 흡수는 복수굴절률의 허수부인 소쇄계수로 기술되고, 빛을 강하게 흡수하는 물질과는 소쇄계수가 큰 물질이다. 그러나 소쇄계수가 큰 물질의 임피던스는 진공(공기)의 임피던스와 크게 다르기 때문에 임피던스 부정합으로 되어 빛은 반사되어 버린다. 그 결과, 소쇄계수가 큰 물질은 완전흑체로는 되지 않는다. 이 현상은 우리들 주변에도 많이 일어난다. 예를 들면 비장탄은 빛을 잘 흡수하는 탄소가 고밀도로 찬 것이지만, 그 단면은 빛을 흡수하기는 커녕 금속광택을 가지고 있다. 또 금속은 빛을 잘 반사하지만, 원래 금속은 큰 소쇄계수를 가지는 물질이다. 확실히 금속에 빛을 조사하면 쉽게 고온으로 된다.

그럼 종래부터 있는 검은 물질/물체는 어떻게 되어 있는가라고 하면, 대부분의 경우, 그 표면에 요철 구조를 만들고, 그곳에 빛을 포착하면서 여러 번 빛을 흡수시켜 토탈의 흡수량을 축적한다. 재봉에 사용하는 바늘을 묶어 정면에서 보면 검게 보이는 것은 잘 알려져 있다¹⁰⁾.

이와 같이 검은 표면을 만드는 것에는 빛을 포착하기 위한 입체적인 구조가 필요하고, 그것만큼 빛 흡수층의 두께는 두껍게 되어 버린다. 그래서 이것들과는 완전히 다른 방법으로서 메타물질에서 물질의 투자율을 제어해서 물질의 임피던스를 공기와 정합시키는 것에서 빛의 반사를 방지하고, 고효율인 빛 흡수체를 만드는 기술이 최근 활발히 연구되고 있다. 그 구조의 하나가 Metal-Insulator-Metal 구조(MIM구조)이다.

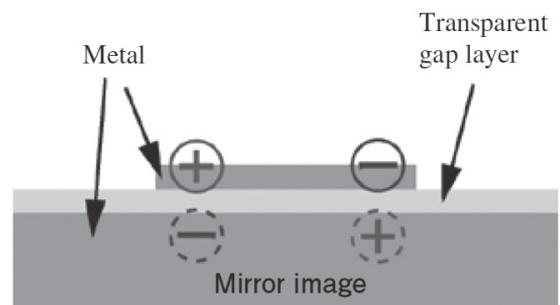


그림1 MIM구조를 사용한 메타물질 흡수체

통상 금속평판의 표면에 빛을 입사시키면 빛은 강하게 반사된다. 예를 들면 금 표면에 파장 1064 nm의 근적외광을 입사하면 약 98%의 빛이 반사된다. 이 금속평판의 표면에 특정 두께의 투명유전체층을 설치하고, 그리고 그 위에 금속의 미세구조를 배치한다. 이것이 MIM구조이다. 이 구조에 빛을 입사시키면, 상부의 금속구조에 분극진동이 여기됨과 함께 하부의 금속평판에 의해 그 거울 이미지로 되는 분극도 여기 된다. 그리고 이들 두개의 분극에서 방사되는 빛의 위상이 역위상으로 되도록 투명갭층의 굴절률과 막 두께를 조정하면 두개 빛의 간섭 결과로서 반사광이 사라진다(그림1). MIM구조에서는 반사광이 사라짐과 동시에 빛은 하부의 금속판을 투과할 수도 없기 때문에 결과로서 빛 에너지는 갭층에 가둬지고, 최종적으로는 모든 금속에 흡수되어 열로 바뀐다.

이 원리를 사용하면 기껏해야 수백 nm 정도의 평면상의 금속구조에서 빛을 완전히 흡수시킬 수 있다. 이것이 '메타물질 흡수체'이다. 예를 들면 파장 3 μm 의 적외광을 흡수하는 메타물질 흡수체에서는 동작파장의 약 1/40에 상당하는 합계 80 nm정도의 요철구조에서 빛을 완전히 흡수할 수 있다.

이와 같이 이 메타물질 흡수체는 파장보다도 얇은 구조에서 빛을 흡수하기 때문에 다른 광흡수표면과 비교해서 얇고 가볍다는 특징이 있다. 이 특징을 살려 광학기구 내벽의 미광제거도장 등에 응용할 수 있다.

4. 메타물질 흡수체를 이용한 발색구조

메타물질 흡수체에서는 금속구조와 광파의 공조상호작용에 의해 빛을 흡수하기 때문에 흡수율과 동작대역 간에는 트레이드오프 관계가 있다. 어느 파장을 강하게 흡수하는 메타물질 흡수체를 만들면 그 동작대역은 좁게 되어 특정 파장의 빛밖에 흡수하지 않게 된다. 이와 같은 메타물질을 그 동작대역이 가시광영역으로 되도록 설계하면 흡수되지 않은 파장의 빛이 반사광으로서 관찰되어 메타물질 흡수체에 색이 붙는다. 이것이 메타물질 흡수체를 사용한 발색구조이다.

그림2에 우리들이 시작한 메타물질 발색체 구조를 나타냈다¹¹⁾. 가공프로세스를 간소화하기 위해 실리콘기판 표면에 투명유전체층

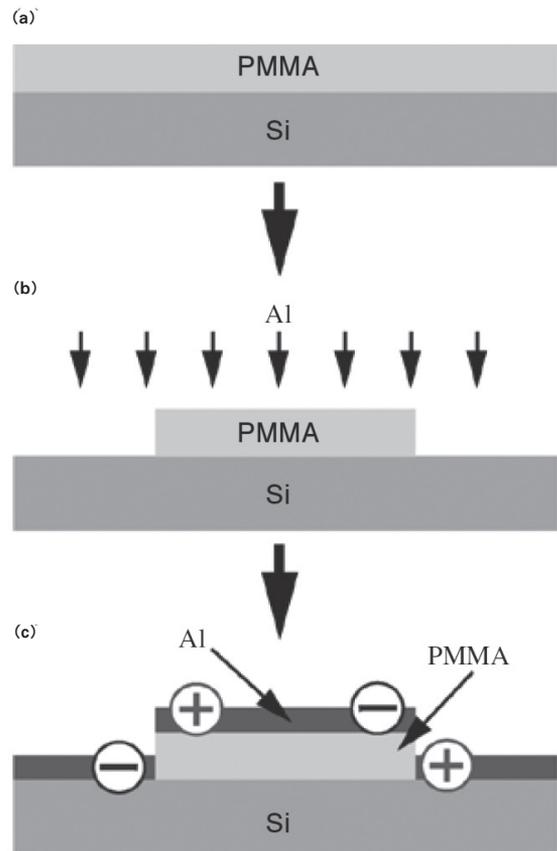


그림2 발색구조를 위한 의사MIM구조 제작프로세스

의 PMMA패턴을 형성하고, 그 위에서 알루미늄박막을 균일히 진공 증착법으로 도포한 의사적인 MIM구조를 만들었다. 이 구조에서는 하부가 완전한 금속박막이 아니기 때문에 PMMA층을 거쳐 이면측에 광이 투과하지만, 우리들이 시작한 시료에서는 기판에 실리콘을 사용했기 때문에 기판이면에 가시광은 투과하지 않는다.

그림3은 메타물질 흡수체에서 제작한 당면구조의 로고마크이다. 그림3(a)가 원래 이미지, 그림3(b)가 만든 메타물질에 백색광을 조사해서 광학현미경에서 관찰한 사진이다. 어느 것도 원래 이미지가 가까운 색이 재현되어 있다. 그림3(c)는 그 미세구조의 전자현미경 사진이다. 사각패치구조가 고밀도로 집적화되어 있고, 이 구조가 색의 기원이다.

그림4(a)는 사각패치구조의 한 변 길이(D)와 배열간격(G)를 변



그림3 메타물질 흡수체를 사용한 발색체로 만든 이화학연구소 로고마크

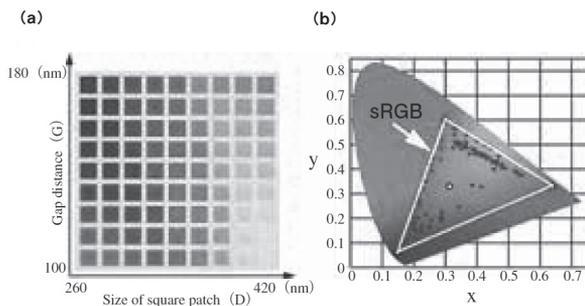


그림4 재현한 색과 색도도상의 매핑

화시키면서 제작한 컬러 팔레트다. 횡축방향에 D, 종축방향에 G를 취하고, 각각 구조에 대해서 관찰되는 색의 현미경상을 배치했다. 이와 같이 적에서 자까지 가시광의 전역을 커버하는 색을 재현할 수 있었다. 그림4(b)는 실험에서 재현한 색을 색도도상에 플로트한 것이다. 흰색 선의 삼각에서 나타낸 sRGB영역을 거의 커버하는 색을 재현할 수 있다.

앞서 말했듯이 MIM구조에서는 광파와의 공조상호작용에 의해 빛을 흡수하기 때문에 하나의 사이즈에서 정하는 구조는 특정의 파장역의 빛을 흡수하고, 그 대역은 넓지 않다. 그러나 여러 사이즈의 구조를 집적화하는 것에서 흡수파장대역을 더하면 확대할 수 있다. 그림5(a)는 각각 적, 청, 녹색을 나타내는 구조를 한곳에 집적화한 것이다. 이 구조에 백색광을 조사해서 관찰하면 흑색으로 보인다(그림 5(b)). 이와 같이 빛의 흡수를 제어하는 메타물질 흡수체에서는 물감 처럼, 각각의 공진기 특성을 더해 대역을 확대할 수 있다.

5. 메타물질 흡수체를 사용한 고감도 적외분광

분자골격의 진동은 적외광의 진동수와 거의 같고, 그 진동수는 골격을 구성하는 원자 종류에 의해 변화하기 때문에 물질의 적외 스펙트럼을 정밀히 측정하는 것에서 그 분자 구조와 분자종의 동정을 할 수 있다. 이것이 적외 분광법이고 예전부터 연구 · 이용되고 있다.

적외 분광법의 신호는 분자가 희박하게 되면 극단이 약하게 되고, 결과로서 S/N비(signal-to-noise ratio)가 저하한다. 더욱더 강한 배경광 중에서 분자흡수에 동반하는 적은 광 강도의 저하를 검출해야 하고, S/B비(signal-to-background ratio)가 낮다는 과제도 있었다. 그래서 신호광을 증강하는 방법으로서 금속나노구조에 여기되는 표면 플라즈몬을 이용해서 핫스팟을 만들고, 그 전장증강작용에서 신호광을 증강하는 표면증강 적외흡수법(Surface Enhanced Infrared Absorption: SEIRA) 등이 제안되어 있지만, 이 방법에서도 아직 강한 배경광을 억제할 수 있지 않다.

이 과제에 대해서 우리들은 메타물질 흡수체를 이용해서 적외분광법에 대한 과제로 되는 배경광을 억제하고, 금속나노구조가 만드는 핫스팟에 의한 신호광의 증강과 맞춘 배경광 억제표면 증강 적외

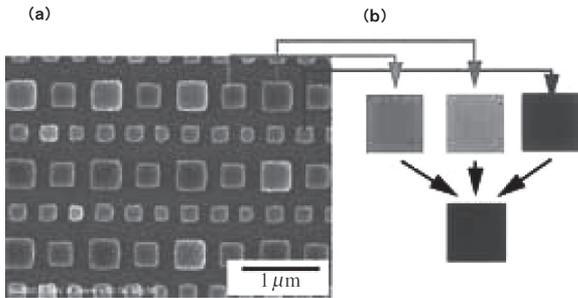


그림5 구조의 집적화에 의한 흡색의 실현

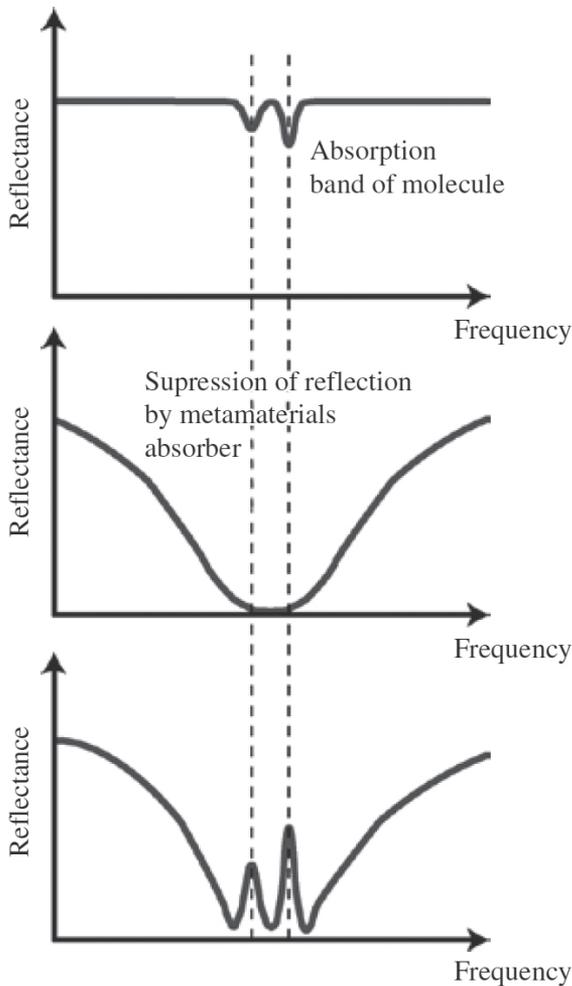


그림6 메타물질 흡수체를 사용한 배경광억제 적외분광법의 원리

분광법을 제안했다¹³⁾. 그림6에 그 원리도를 나타냈다. 앞서 말했듯이 MIM구조를 사용하면 빛을 금속구조 내에 포착해서 반사도 투과도 하지 않는 메타물질 흡수체를 만들 수 있다. 이 무반사상태의 메타물질 흡수체에 같은 파장역에 흡수를 가지는 분자가 부착하면 메타물질의 공진주파수가 시프트해서 무반사상태가 붕괴하고, 반사광이 발생한다. 그 결과, 메타물질 흡수체에서는 부착한 분자의 흡수스펙트럼을 그대로 반전시킨 것 같은 반사스펙트럼이 얻어진다. 이 반사스펙트럼은 메타물질 흡수체에 의해 만들어진 낮은 배경광 중에 나타나기 때문에 이것을 측정하면 높은 S/B비에서 분자의 적외 스펙트럼 정보를 얻을 수 있다.

그림7은 시작한 메타물질 흡수체의 사진이고, 글라스기판의 표면에 막 두께 200 nm의 금속막을 만들고, 그 위에 불화마그네슘과 금의 마이크로 리본구조(선폭 1.5 μm, 주기 3.0 μm)를 적용한 것이다. 불화마그네슘층의 막 두께는 30 nm, 금의 막 두께는 50 nm이다.

이 적외 메타물질 흡수체의 표면에 16-Mercaptohexadecanoic acid의 단분자막을 도포해서, 그 반사스펙트럼을 측정한 결과가 그림8이다. 그림8에는 적외분광법의 하나로서 알려져 있는 반사흡수(RAS: Reflection Absorption Spectroscopy)법에서 측정한 적외스펙트럼의 결과도 곁해 나타났다. RAS법에서는 큰 배경광과 적은 신호광 때문에 분자의 진동스펙트럼을 관찰할 수 없다. 한편 메타물질 흡수체를 사용한 측정결과에서는 메타물질 흡수체가 만들어내는 흡수대역 중에 분자의 흡수스펙트럼에 대응하는 반사광 증가가 상향의 피크로서 관찰되어 있다. 이 스펙트럼을 파노공명함수에서 피팅

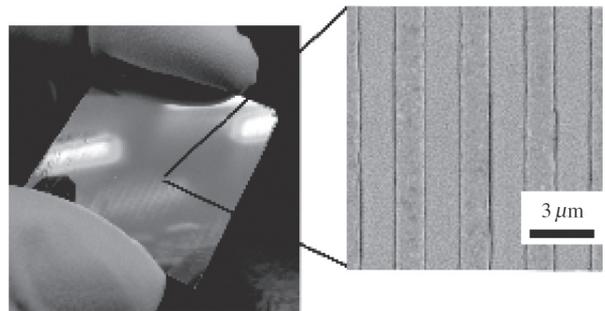


그림7 시작한 적외 메타물질 흡수체

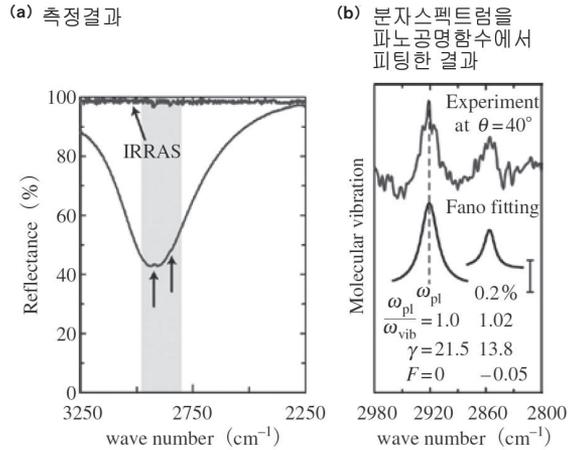


그림8 메타물질 흡수체를 이용한 배경광억제 적외분광법의 측정스펙트럼

한 것이 그림8(b)이다. C-H결합의 대칭 및 비대칭신축진동모드가 명료히 관측되어 있다. 이 실험에서 적외광이 조사되어 있는 영역의 분자 수를 예측한 결과 1.8×10^{18} 개였다. 이와 같이 메타물질 흡수체의 신호광 증강효과와 배경광 억제효과를 겸해 이용하면 아토몰 레벨의 극미량의 분자스펙트럼을 검출할 수 있는 고감도 적외분광기술에 응용할 수 있다.

6. 팁증강 근접장 라만현미경

항두에서 말했듯이 회절한계 때문에 광을 그대로 사용하는 것 만에서는 서브파장구조를 관찰할 수 없다. 그러나 서브파장구조가 또 하나 있으면 이것이 가능으로 된다. 서브파장구조에 광을 조사하면 그 광은 에바네센트장이라는 서브파장구조의 정보를 포함한 국재한 광으로 변환된다. 즉 서브파장구조는 전파광을 에바네센트장으로 변환하는 기능을 가진다. 반대로, 서브파장구조는 에바네센트장을 전파광으로 변화하는 기능도 겸해 가진다. 이것을 이용해서 서브파장구조에 의해 에바네센트장으로 변환된 광을 또 하나의 서브파장구조에 의해 전파광으로 재 변환하면 회절한계를 넘은 물체의 상을 관찰할 수 있다. 혹은 준비한 서브파장구조에서 에바네센트장을

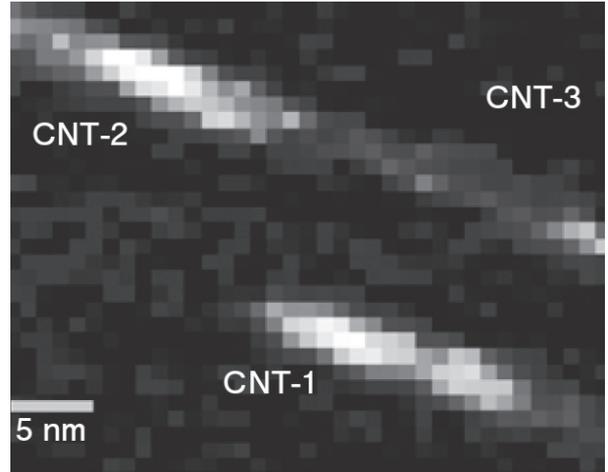


그림9 팁증강 라만산란현미경에서 관찰한 카본나노튜브의 2D모드의 화상

만들어두고, 이것을 물체가 가지는 서브파장구조에 의해 전파광으로 변환해서 검출해도 된다.

서브파장구조로서 선단을 예리하게 한 프로브 팁을 이용해서 이것을 에바네센트장이 존재하는 영역에서 주사하면서 화상을 취득하는 현미경이 주사형 근접장현미경(NSOM: Near-field scanning optical microscope)이다. 이 프로브로서 금속침을 이용하면 그 선단에 국재모드 표면플라즈몬을 여기해서 그 전장증강작용에서 물체에서의 신호를 증강할 수 있다. 예를 들면 물체의 라만산란광을 증강해서 관찰하는 팁증강 라만산란법(TERS: Tip-enhanced Raman Scattering) 등이 제안되어 있다. 그림9는 본 방법에서 관찰된 카본나노튜브의 화상이고, 2D모드라고 불리는 진동모드를 가시화한 결과이다. 파장 633 nm의 광을 사용해도 1 nm정도의 공간분해능을 실현할 수 있었다¹⁴⁾.

7. 결론

메타물질과 NSOM의 프로브 팁과 같이 인공적인 서브파장구조의 가공을 가능으로 하는 소위 나노가공기술의 진보는 광학분야에 새로운 전개를 가져오고, 고전광학에서는 불가능하다고 되어 있던



회절한계를 넘는 이미징과 광가공, 광정보기록을 시작으로 하는 여러 가지 분야에서 새로운 광기술의 창출에 연결된다. 본고에서 언급한 사례는 빙산의 일각이고, 상상도 할 수 없는 기술·분야로의 전개도 포함해서 그 가능성은 헤아릴 수 없다. 이 분야가 지속적으로 발전해 나갈 수 있도록 앞으로도 연구를 계속해 가겠다.

참고문헌

1. 石川 篤, 矢通 拓実, 田中 拓男, 鶴田 健二, "그래펜플라스모닉스," *옵토로닉스* 34, pp. 75-80 (2015).
2. 田中 拓男, "총론 광메타물질의作り方," *옵토로닉스* 33, pp. 48-49 (2014).
3. 田中 拓男, "총설 메타물질," *옵토로닉스* 30, pp. 56-58 (2011).
4. 田中 拓男, "플라스모닉·메타물질과 포토닉 회절구조," *옵토로닉스* 27, pp. 138-143 (2008).
5. 田中 拓男, "광메타물질入門," 丸善出版 (2016).
6. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47, 2075-2084 (1999).
7. J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966-3969 (2000).
8. V. G. Veselago, *Sov. Phys. Usp.* 10, 509 (1968).
9. A. Ishikawa, T. Tanaka, S. Kawata, *Phys. Rev. Lett.* 95, 237401 (2005).
10. 鶴田 臣夫, "光の鉛筆," pp. 296-306 *新技術コミュニケーションズ* (1989).
11. R. Mudachathi and T. Tanaka, *Sci. Rep.* 7, 1199 (2017).
12. F. Neubrech, A. Pucci, T. Cornelius, S. Karim, A. García-Etxarri, J. Aizpurua, *Phys. Rev. Lett.* 101, 157403 (2008).
13. A. Ishikawa and T. Tanaka, *Sci. Rep.* 5, 12570 (2015).
14. C. Chen, N. Hayazawa, and S. Kawata, *Nature Communications* 5, 3312 (2014).