이광자흡수 광중합현상에서 3차원 미세구조의 제작

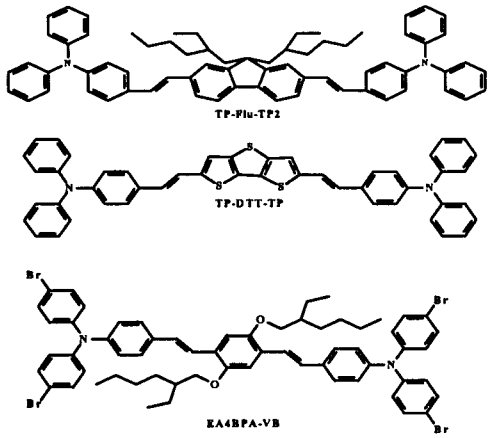
3D Micro-fabrication with Two-Photon Absorption Photopolymerization

강보영, 우정원, 이광섭*, 이범구**
이화여자대학교 물리학과, *한남대학교 고분자공학과, **서강대학교 물리학과
bobo@ewha.ac.kr

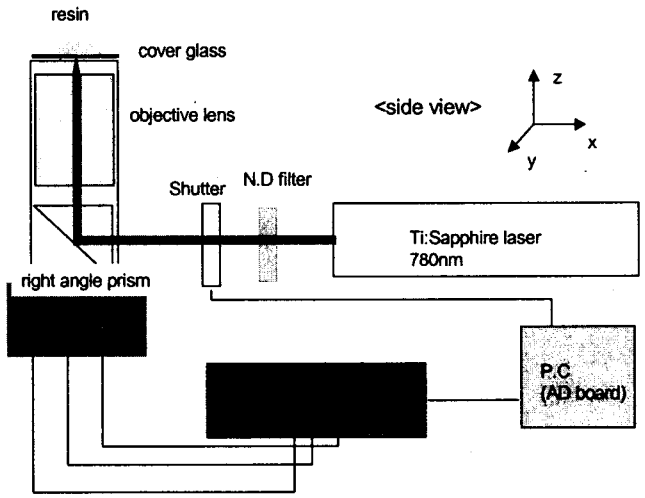
이광자흡수는 $\chi^{(3)}$ 의 허수부로 표현되는 3차 비선형 흡수 효과로, 이광자 흡수확률은 입사빛 세기의 제곱에 비례한다. (1) 특수한 단량체 분자들은 이광자흡수를 통해 빛을 흡수하여 중합과정의 에너지원으로 사용한다. 이 때 에너지의 threshold가 있으므로 초점 부근에서만 반응이 일어나게 되어, 이광자흡수를 통한 광중합과정은 회절효율 한계를 벗어난 미세구조 제작에 응용된다. 또 긴 파장의 빛을 이용하므로 입사 빛이 시료에 깊이 침투하여 3차원 구조제작, 3차원 data 저장 등의 분야에서 높은 응용성을 지닌다. (2),(3)

실험에서 사용한 시료는 TP-Flu-TP2, TP-DTT-TP, EA4BPA-VB 단량체로 각각의 흡수는 410nm, 463nm, 423nm이고 이광자흡수의 중심파장은 740nm, 785nm이다. 또 이 시료의 이광자흡수 면적 (cross section : σ)은 954 $\times 10^{-50}$cm^{4}s/photon, 1141$\times 10^{-50}$cm^{4}s/photon이다. (그림1)

광원은 반복율이 82MHz이고 펄스폭이 175fs인 파장 780nm mode locked Ti: Sapphire 펨토초 레이저를 사용하였다. 이 때 입사하는 단일 펄스의 에너지는 ND필터로 변화시킨다. 직각프리즘으로 입사빛의 경로를 지면에서 수직으로 바꾸고, 대물렌즈로 빛을 집광시킨다. 실험에서는 사용한 대물렌즈의 numerical aperture (N.A.)는 0.65 , 1.25이고 배율은 각각 40배, 100배이다. 대물렌즈위에 시료를 떨어뜨린 커버유리를 놓아 광중합을 일으킨다. 프리즘과 대물렌즈는 컴퓨터로 제어하여 xyz축으로 이동하는 PZT 위에 올려서 3차원의 기록이 가능하게 하였다. PZT와 연동하여 셔터를 컴퓨터로 제어하여 정밀한 구조를 제작할 수 있다. (그림2)



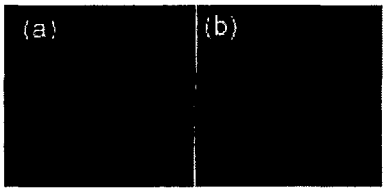
<그림 1> 위로부터 TP-Flu-TP2, TP-DTT-TP, EA4BPA-VB 단량체 분자식



<그림 2> 실험장치도

기록이 끝나면 에탄올을 이용해서 광중합이 일어나지 않은 부분의 시료를 씻어내면 커버 유리표면에 설계된 미세구조가 남는다. 씻어내는 과정 중에 유리표면근처에서 중합되지 않은 물질은 떠내려간다. 이 광자흡수 현상은 초점 부근에서만 일어나게 되므로 결국 유리표면이 아닌 시료 내부에 초점이 맺힌다면 형성된 고분자구조는 모두 잃게 된다. 그러므로 빛의 초점이 유리의 표면위에 정확히 맺히는 것이 중요하다. 본 실험에서 이 문제를 유리표면에서 반사된 빛의 회절무늬를 이용해서 해결하였다.

유리면에서 반사된 빛은 다시 렌즈를 지나면서 회절을 겪게 된다. 이 때 회절 빛은 에어리 무늬를 만들게 되는데, 초점에서 반사된 빛은 에어리(Airy) 무늬의 중심부에 해당하므로 밝기가 밝고 공간적인 퍼짐은 최소가 된다.(4) 이 사실에 기초하여, 반사된 빛을 스크린에서 보면 유리와 렌즈와의 거리에 따라 회절무늬가 변화하는 것을 볼 수 있다. 회절무늬가 가장 밝고 공간적으로 가장 최소가 될 때가 바로 유리면에 초점이 맺힌 위치가 된다. 그림 3에서 (a)는 초점이 유리면에 맺히지 않았을 경우 사진이고, (b)는 유리의 윗면에 초점이 맺혔을 경우 사진이다. (a)에서 왼쪽 아래는 입사하는 빛의 상, 가운데는 유리 윗면에서 반사된 빛의 회절무늬, 오른쪽 위는 유리 아랫면에서의 반사된 빛의 회절무늬이다. (b)에서는 윗면에서 초점이 맺혔기 때문에 윗면의 회절무늬가 입사 빛과 공간적으로 같은 위치에 있으며 크기가 작고 밝기가 밝은 것이 확인된다.



<그림 3 >스크린에 맺힌 유리면에서 반사된 빛의 회절무늬

이 방법으로 초점을 찾아 광중합과정을 유도할 경우, 초점이 유리 아랫면이나 기판 내부에 있다면 광중합이 일어나지 못하고, 유리 윗면에 아닌 시료 내부에 있다면 광중합이 일어났지만 에탄올에 의해 구조물이 떠내려가는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 셔터와 PZT의 정밀한 조작으로 3차원의 상을 기록하며, 기록된 상은 3차원 포토닉 밴드갭 물질제작에 응용될 수 있다. 이 때 만들어진 3차원 포토닉 밴드갭 물질은 기존에 제시된 방법들에서 얻어진 것과 달리, 내부 구조를 간단하면서 정밀하게 제어할 수 있어 포토닉 밴드갭의 defect mode 연구에 활용될 수 있다.(5)

본 연구는 한국학술진흥재단 협동연구지원과제 KRF-2002-042-C00024에 의해 지원되었습니다.

[참고문헌]

1. Y. R. Shen, *"The principles of nonlinear optics"*, Wiley, New York (1984)
2. Kawata, S. et al., "Finer features for functional microdevices", Nature, **412**, 697-698 (2001) Brief Communications
3. Brian H. Cumpston. et al. , "Two-photon polymerization initiators for threedimensional storage and microfabrication", Nature, **398**, 51-54 (1999)
4. M. Born, E. Wolf, *"Principle of Optics"* 7th edn., Cambridge Univ Press, Cambridge (1999)
5. H. B. Sun et al., "Microcavities in polymeric photonic crystals", Appl. Phys. Lett. **79**, 1-3, (2001)