



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0131127
(43) 공개일자 2023년09월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C08F 297/02 (2006.01) C08F 6/06 (2006.01)
C08F 6/10 (2006.01) C08J 5/18 (2006.01)
C08L 53/00 (2006.01) G02B 1/00 (2022.01)
(52) CPC특허분류
C08F 297/026 (2013.01)
C08F 6/06 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0026469
(22) 출원일자 2023년02월28일
심사청구일자 2023년02월28일
(30) 우선권주장
1020220028288 2022년03월04일 대한민국(KR)

(71) 출원인
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
류두열
서울특별시 송파구 거마로 56, 107동 1401호
이승우
서울특별시 성동구 매봉길 50, 109동 1505호(옥수동, 옥수파크힐스)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인다나

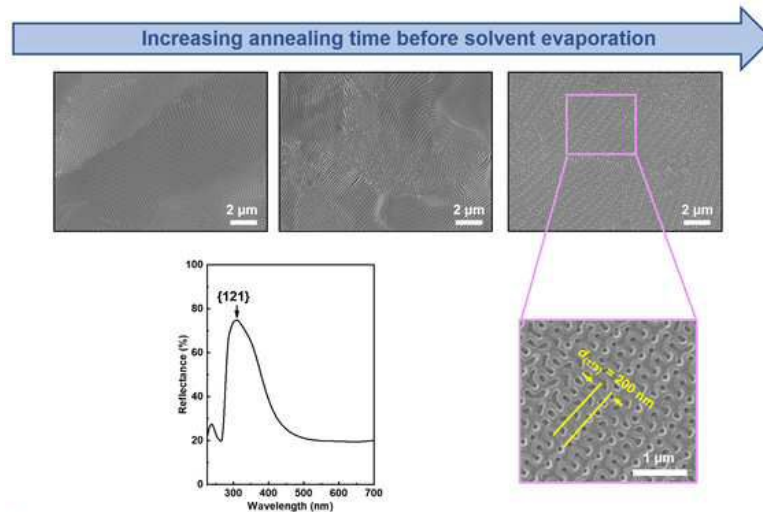
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 용매 증발 전 어닐링을 통한 초거대 분자량 블록공중합체 자기조립 및 자이로이드 광결정 구현

(57) 요약

본 발명은 용매 증발 전 어닐링을 통한 초거대 분자량 블록공중합체 (Block copolymer, BCP)의 자기조립 및 이를 통한 광결정 구현 방법에 관한 것으로, 어닐링 및 솔벤트 캐스팅 방법을 적용하여 큐빅 구조에 가까운 초대형 자이로이드 막을 구현할 수 있으며, 막의 두꺼운 두께 때문에 자이로이드의 주기성이 3차원적으로 확보되어 어떤 방향에서 빛이 반사되어도 빛이 겪는 자이로이드 구조가 많아서 밴드갭 형성에 유리하며, 기존 블록간의 적은 굴절률 차를 고려하여 적용했던 물질 치환 공정 없이도 밴드갭 특성을 띠는 최종 광결정을 제조할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

C08F 6/10 (2013.01)

C08J 5/18 (2021.05)

C08L 53/00 (2013.01)

G02B 1/005 (2013.01)

G02B 2207/101 (2013.01)

(72) 발명자

조승연

서울특별시 송파구 양재대로 1218, 327동 1001호(
방이동, 올림픽선수기자촌 아파트)

전태석

경기도 김포시 김포대로926번길 15, 서광아파트
316동 2001호

명세서

청구범위

청구항 1

다음을 포함하는 블록공중합체 자이로이드 제조방법:

초거대 분자량 고분자 및 중성 용매를 혼합하여 혼합물을 수득하는 솔벤트 캐스팅 (Solvent casting) 단계; 및 상기 혼합물을 어닐링 (annealing)하여 블록공중합체 자이로이드를 수득하는 단계.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 초거대 분자량 고분자는 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트 (Polystyrene-block-poly(methyl methacrylate), PS-*b*-PMMA)인 것인, 블록공중합체 자이로이드 제조방법.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 중성 용매는 트라이클로로에테인 (trichloroethane), 톨루엔 (toluene) 및 테트라하이드로퓨란 (tetrahydrofuran, THF)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상인 것인, 블록공중합체 자이로이드 제조방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 어닐링은 1 내지 4일 동안 수행하는 것인, 블록공중합체 자이로이드 제조방법.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 블록공중합체 자이로이드는 막이 40 내지 100 μm 두께인 것인, 블록공중합체 자이로이드 제조방법.

청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 따라 제조된 블록공중합체 자이로이드를 이용한 광결정 구현 방법.

청구항 7

제6항에 있어서, 상기 광결정은 290 내지 400 nm의 파장의 빛을 반사하는 것인, 광결정 구현 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 용매 증발 전 어닐링을 통한 초거대 분자량 블록공중합체 (Block copolymer, BCP)의 자기조립 및 이를 통한 자이로이드 광결정 구현 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 자이로이드는 3회 주기 최소 표면 (triply periodic minimal surface) 기반의 3차원 구조로, 채널과 매트릭스로 구성되어 있다. 자이로이드 구조는 이연속성 및 넓은 표면적 같은 구조적 우수성 때문에 토폴로지 포토닉스, 음굴절, 고기능성 분리막 등 다양한 첨단응용분야에서 주목되어 왔다. 그 중에서도 더블 자이로이드 구조를 바탕으로 한 Weyl 재료는 물질의 표면 위에서 위상적으로 보호된 상태로 빛을 전달하는 전례 없는 광응용 소재로써 많은 관심을 끌었다.

[0003] 이와 관련하여, 더블 자이로이드 구조를 광결정화하고 대칭과피 시키면 큐빅 자이로이드 내 각 채널의 상반되는 카이랄리티에서 비롯되는 축퇴 (degeneracy)를 들어올릴 수 있고, 이를 통해 Weyl 재료를 구현할 수 있다는 이론적인 결과가 도출되었다. 이에, 3D 프린팅, 2광자 리소그래피 (two-photon lithography, 유전체 패넌의 드릴링 및 스테킹 등 하향식 기법 (top-down method)을 통해 더블 자이로이드를 구현하려고 하는 많은 시도가 있어

왔지만 자이로이드의 복잡한 구조를 구현하는데에는 기술적인 한계가 있고, 이에 따라 도메인 간격 (domain spacing)이 수 마이크로 이상 ($> 1 \mu\text{m}$)인 자이로이드만 확보되었다. 이때, 주기적으로 정렬된 구조가 광결정으로 실용화되기 위해서는 목표 파장대와 유사한 크기의 도메인 간격을 가지는 평면에 의한 빛이 충분히 산란되어야 하기 때문에 하향식 기법으로 제작 가능한 자이로이드는 실용성이 높은 근자외선 및 가시광 영역 (290 내지 700 nm)에서 작동하는 광결정으로는 적합하지 않다.

[0004] 자이로이드 제작을 위한 효율적 대안으로 나노구조의 광대역 형성을 보장하는 상향식 기법(bottom-up method)이 있으며, 실제로 스타, 이중, 삼중 블록공중합체 자기조립을 통해 벌크 (덩어리) 및 박막 형태의 자이로이드를 구현한 것으로 보고되어 왔다. 하지만 상향식 기법은 하향식 기법과는 다르게 40 nm 이하의 비교적 작은 도메인 간격을 가지는 자이로이드를 형성하는데 유리하여, 근자외선 및 가시광 파장대 (290 내지 700 nm)에 반응하기 위한 광결정 물질을 만들기에 어려움이 있었다. 뿐만 아니라 블록공중합체 박막의 경우 기판에 수직인 방향으로의 주기성 (또는 반복단위의 개수)이 적어 광결정 특성 발현에 더 불리하며, 이를 극복하기 위한 방법으로는 한쪽 도메인을 고굴절률 물질로 치환함으로써 구성분간 유전율 차를 증가시키는 방법이 있다.

[0005] 블록공중합체 나노구조의 물질 치환을 위해서 졸겔 (sol-gel) 합성법, 전기도금 (electroplating), 원자층 증착 (atomic layer deposition) 등 다양한 시도가 있어 왔다. 이런 합성 방법을 기반으로 태양광 전지, 광촉매, 전기변색, 광학 메타물질 등에 무기물 또는 금속 자이로이드 구조를 활용하여 왔다. 하지만, 물질치환 과정에서 자이로이드 구조의 규칙성이 불가피하게 저하되기 때문에 물질 치환을 통한 자이로이드 광결정 특성 발현에 관하여는 보고된 바가 없다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 이에, 본 발명자들은 이전 블록공중합체 시스템의 한계를 극복하기 위해서 초거대 분자량 ($>600 \text{ kg/mol}$) 블록공중합체에 최적화된 솔벤트 캐스팅 기법을 적용하여 {211} 평면의 도메인 간격 ($d_{\{211\}}$)이 100 nm이상인 자이로이드 광결정을 제조하는 방법을 예의 연구하였다. 그 결과, 높은 주기성의 초거대 분자량 ($>600 \text{ kg/mol}$) 블록공중합체 자이로이드 막이 빛의 입사방향에 따라 높은 주기성을 띠며, 초대형 블록공중합체 자이로이드를 근자외선에서 반응하는 광결정으로 제공하여 본 발명을 완성하게 되었다.

[0007] 본 발명의 목적은 블록공중합체 자이로이드 제조방법을 제공하기 위한 것이다.

[0008] 본 발명의 다른 목적은 블록공중합체 자이로이드를 이용한 광결정 구현 방법을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 본 발명자들은 초거대 분자량 ($>600 \text{ kg/mol}$) 블록공중합체에 최적화된 솔벤트 캐스팅 기법을 적용하여 {211} 평면의 도메인 간격 ($d_{\{211\}}$)이 100 nm이상인 블록공중합체 자이로이드를 제조하고 이를 이용하여 광결정을 구현하는 방법을 예의 연구하였다.

[0010] 그 결과, 제조된 블록공중합체 자이로이드는 실용화되기 위한 두꺼운 막 두께를 나타내며 광결정 구현시 빛의 입사방향에 따라 높은 주기성을 띠며, 근자외선에서 반응성이 높음을 확인하였다.

[0011] 이하, 본 발명을 더욱 자세히 설명하고자 한다.

[0012] 본 발명의 일 양태는 블록공중합체 자이로이드의 제조방법에 관한 것이다.

[0013] 본 발명에 있어서 블록공중합체 자이로이드의 제조방법은 다음의 방법을 포함한다:

[0014] 초거대 분자량 고분자 및 중성 용매를 혼합하여 수득하는 솔벤트 캐스팅 (Solvent casting) 단계; 및

[0015] 상기 혼합물을 어닐링 (annealing)하여 블록공중합체 자이로이드를 수득하는 단계.

[0016] 본 명세서상 용어 "블록공중합체"는 두 가지 이상의 고분자 사슬이 공유결합으로 이루어진 것으로 자기조립성질 때문에 10 내지 100 nm규모의 나노 구조를 자기 조립 방법으로 만든다. 블록공중합체는 사슬에 충분한 움직임이 부여될 때 각 블록 중의 한 성분의 부피 비율에 따라서 구형, 실린더, 자이로드, 라멜라 형태의 미세 (혹은 나노) 구조를 형성한다.

[0017] 본 명세서상 용어 "자이로이드"는 구멍이 많은 다공성 3차원 나노 구조체이다.

- [0018] 본 발명에 있어서 초거대 분자량 고분자는 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트 (Polystyrene-block-poly(methyl methacrylate), PS-*b*-PMMA), 폴리스타이렌-블록-폴리2바이닐피리딘 (PS-block-poly(2-vinyl pyridine)) 및 폴리스타이렌-블록-폴리아이소프렌 (PS-block-poly(isoprene)), 예를 들어, 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트 (Polystyrene-block-poly(methyl methacrylate), PS-*b*-PMMA)인 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0019] 본 발명에 있어서 초거대 분자량 고분자는 분자량인 600 kg/mol 이상, 예를 들어, 850 kg/mol인 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0020] 본 발명에 있어서 중성 용매는 트라이클로로에테인 (trichloroethane), 톨루엔 (toluene), 테트라하이드로퓨란 (tetrahydrofuran, THF), 벤젠 (Benzene) 및 클로로포름 (Chloroform)으로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상인 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0021] 본 발명에 있어서 혼합물은 15 내지 20 °C 온도로 챔버에서 유지되는 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0022] 본 발명에 있어서 중성 용매는 증발 속도 0.008 내지 0.16 ml/h로 증발 되는 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0023] 본 발명에 있어서 어닐링은 1 내지 4일 동안 수행하는 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0024] 본 발명에 있어서 블록공중합체 자이로이드는 어닐링 반응 후에 진공상태로 건조한 후 수득되는 것일 수 있다.
- [0025] 본 발명에 있어서 블록공중합체 자이로이드는 막이 40 내지 100 μm 두께인 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0026] 본 발명의 다른 일 양태는 블록공중합체 자이로이드를 이용한 광결정 구현 방법이다.
- [0027] 본 발명에 있어서 광결정은 290~400 nm의 파장의 빛을 반사하는 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0028] 본 발명에 있어서 광결정은 자이로이드 구조 내 {110}, {200}, {211}, {220} 및 {321} 으로 이루어진 평면들 중 선택된 1종 이상의 특징을 갖는 것일 수 있으며, 예를 들어, {211}의 평면의 특징을 갖는 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

발명의 효과

- [0029] 본 발명은 용매 증발 전 어닐링을 통한 초거대 분자량 블록공중합체 (Block copolymer, BCP)의 자기조립 및 이를 통한 광결정 구현 방법에 관한 것으로, 어닐링 및 솔벤트 캐스팅 방법을 적용하여 큐빅 구조에 가까운 초대형 자이로이드 막을 구현할 수 있으며, 막의 두꺼운 두께 때문에 자이로이드의 주기성이 3차원적으로 확보되어 어떤 방향에서 빛이 반사되어도 빛이 겪는 자이로이드 구조가 많아서 밴드갭 형성에 유리하며, 기존 블록 간의 적은 굴절률 차를 고려하여 적용했던 물질 치환 공정 없이도 밴드갭 특성을 띠는 최종 광결정을 제조할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0030] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 용매 증발 전 어닐링 시간 증가에 따른 SEM 비교 데이터 및 자이로이드 광결정의 반사 스펙트럼을 보여주는 도 및 그래프이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트의 (a) NMR 및 (b) GPC 데이터를 보여주는 그래프이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 솔벤트 캐스팅 기법에서 용매의 종류에 따른 SEM 데이터를 비교한 결과를 보여주는 도이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 솔벤트 캐스팅 기법에서 테트라하이드로퓨란의 증발 전 어닐링 시간 조절에 따른 SEM 데이터를 비교한 결과를 보여주는 도이다.
- 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 제작된 블록공중합체 자이로이드 막의 SEM 이미지를 고속 푸리에 변환 (FFT)한 결과를 보여주는 도 및 그래프이다.
- 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 블록공중합체 자이로이드 막의 반사 스펙트럼을 보여주는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0031] 이상 본 명세서에 기재된 수치 값은 달리 명시되어 있지 않은 한 균 등범위까지 포함하는 것으로 해석되어야 한다.
- [0032] 이하, 본 발명의 이해를 돕기 위하여 실시예 등을 들어 상세하게 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명에 따른 실시예들은 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 하기 실시예들에 한정되는 것으로 해석되서는 안된다. 본 발명의 실시예들은 당업계에서 평균적인 지식을 가진 자에게 본 발명을 보다 완전하게 설명하기 위해 제공되는 것이다.
- [0034] **제조예 1. 실험 재료 준비 및 실험 설정**
- [0035] **1-1. 사용 용매**
- [0036] 테트라하이드로퓨란 (tetrahydrofuran)/ 구조식 : C_4H_8O / density : 0.8876 g/ml at 20 °C/ b.p. : 66.0 °C / DUKSAN 제품 / Cas no. : 109-99-9;
- [0037] 1,1,2-트라이클로로에테인 (trichloroethane)/ 구조식 : $C_2H_3Cl_3$ / density: 1.44 g/ml at 20 °C/ b.p. : 113.9 °C / Sigma Aldrich 제품/ Cas no. 79-00-5;
- [0038] 톨루엔 (toluene)/ 구조식: C_7H_8 / density: 0.867 g/ml at 20 °C/ b.p. : 110.6 °C/ SAMCHUN 제품/ Cas no. : 108-88-3
- [0040] **1-2. 반응 조건**
- [0041] 용액의 농도: 5 ~ 10wt%, 온도조건: 15 ~ 20 °C, 용매 증발속도: 0.008 ml/h ~ 0.16 ml/h
- [0043] **실시예 1. 블록공중합체 막의 제조방법**
- [0044] 초거대 분자량 (>600 kg/mol)의 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트 고분자 (0.05-0.1g)를 중성 용매인 1,1,2-트라이클로로에테인 (trichloroethane)(0.90-0.95g), 톨루엔 (toluene)(0.90-0.95g), 테트라하이드로퓨란(THF)(0.90-0.95g)에 녹여 10 wt% 용액 1g씩을 확보하였다. 용액 내 불순물 및 먼지를 제거하기 위해 0.50 μ m를 실린지 필터를 사용하여 필터링하고, 10 ml 유리 살레에 담았다. 이 때 발생하는 기포는 최종 막의 물성 저하를 야기하므로 니들 (needle)로 전부 제거하였다.
- [0045] 용액이 담긴 유리살레를 뚜껑에 1 mm 직경의 구멍이 4개 뚫려있는 황동 챔버에 집어넣고 밀폐시켰다. 황동챔버의 온도는 상온보다 낮은 15 내지 20 °C로 유지하였으며, 용매를 증발시켜 제막을 하기 전에 챔버 뚜껑의 모든 구멍을 막은 상태에서 용액을 1 내지 4일 동안 어닐링 (annealing) 시켰다. 어닐링 후 구멍을 개방하여 용매를 증발속도: 0.008 ml/h-0.16 ml/h으로 증발시키고, 용매가 다 증발된 뒤 용매 냄새가 나지 않으면 혹시나 남아 있을 용매의 제거를 위해 상온에서 24시간 진공상태에서 시료를 말렸다. 그 다음, 소수성의 블록공중합체에 아무 영향을 끼치지 못하는 증류수를 유리 살레 속에 6 ml 만큼 넣어 블록공중합체 막과 유리살레 사이 공간을 미세하게 벌려주고, 블록공중합체 막이 유리살레로부터 손상이 없도록 떼어내었다. 블록공중합체 막 위에 남아있는 증류수를 제거하여 주기 위해 다시 상온에서 24시간동안 진공상태에서 시료를 말려 40 내지 100 μ m 두께의 자이로이드 형태의 블록공중합체 막을 확보하였다.
- [0047] **실시예 2. 데이터 분석**
- [0048] 도 2는 본 발명에서 사용되는 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트의 (a) NMR 및 (b) GPR 데이터이다. (a) NMR 데이터는 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트의 부피비를 평가하는데 사용되었다. 7.0 및 3.6 ppm에서 발견되는 피크들은 각각 스타이렌의 벤젠고리에 있는 H, 메틸메타크릴레이트의 카보닐기 말단의 CH_3 의 H에 대응된다. 두 피크 사이의 적분값을 H갯수 고려해서 비교했을 때 통상적인 자이로이드 부피비에 근접한 비대칭적 (PS 부피비: 0.58~0.63) 부피비 범위 내에서 결정되며, 이는 매우 중요한 결정변수로서 본 발명에서는

0.61의 PS 부피비를 사용하였다. (b) GPC 테이터는 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트의 분자량 및 분산도를 측정하는데 사용되었다.

[0049] 분석결과, 블록공중합체 분야 기준 최대급의 수평균 분자량 ($M_n > 600 \text{ kg/mol}$)을 가지고 있는 것으로 측정되었으며, 본 발명에서는 850 kg/mol 의 수평균 분자량을 가진 블록공중합체 박막을 제조하였다. 이는 고정밀 음이온 중합 합성으로 합성된 물질인 만큼 분산도 또한 1.10 이하로 우수한 것을 확인할 수 있다.

[0050] 도 3은 본 발명에 적용된 솔벤트 캐스팅 기법에서 각 블록에 중성적이라고 알려진 1,1,2-트라이클로로에테인(trichloroethane), 톨루엔(toluene) 및 테트라하이드로퓨란(THF) 용매의 종류에 따른 SEM 테이터를 비교한 결과이다. 용매의 종류에 따른 결과를 비교하기 위해 어닐링 과정 없이 모두 같은 0.042 ml/h 의 속도로 용매를 증발시켰다. (a) 1,1,2-트라이클로로에테인의 경우 특정의 morphology가 보이지 않고, 결함(defect)들만 발생한다. (b) 톨루엔의 경우 약간의 육각 패킹된 구조가 관찰되기도 하였지만 그 구조가 확실하지 못하고 이미지 상에서 결함(defect)이 많이 발견된다. (c) 테트라하이드로퓨란을 용매로 사용하였을 때는 육각 패킹된 수직 실린더 및 스트라이프 패턴의 수평 배향된 실린더가 발달된다. 해당 구조는 매우 선명하게 보였으며, 이는 솔벤트 캐스팅 기법에서 구조 발현에 있어서 테트라하이드로퓨란이 다른 용매들에 비해 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

[0051] 도 4는 본 발명의 솔벤트 캐스팅 기법에서 용매인 테트라하이드로퓨란 증발 전 어닐링 시간 조절에 따른 SEM 테이터 비교이다. (a) 1일 동안 어닐링(1-day annealing)을 적용한 경우 어닐링을 하지 않고 용매 증발을 했을 때와 마찬가지로 수직 및 수평 배향된 실린더가 확인되었다. (b) 2.5일 동안 어닐링(2.5-day annealing)으로 어닐링을 적용했을 때는 실린더 및 자이로이드가 섞여 있는 것이 관찰되었다. (c) 4 일 동안 어닐링(4-day annealing)을 적용한 경우 어닐링 시간을 증가에 따라 전면에서 자이로이드가 발달하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 발명에서 도입한 어닐링 기법이 실린더-자이로이드 상변이를 유발하였으며, 이때 확보된 자이로이드의 $d_{\{110\}}$ 은 SEM 이미지 상 약 200 nm 로 측정되며, 이를 통해 $d_{\{211\}} \sim 110 \text{ nm}$ 으로 계산되었다.

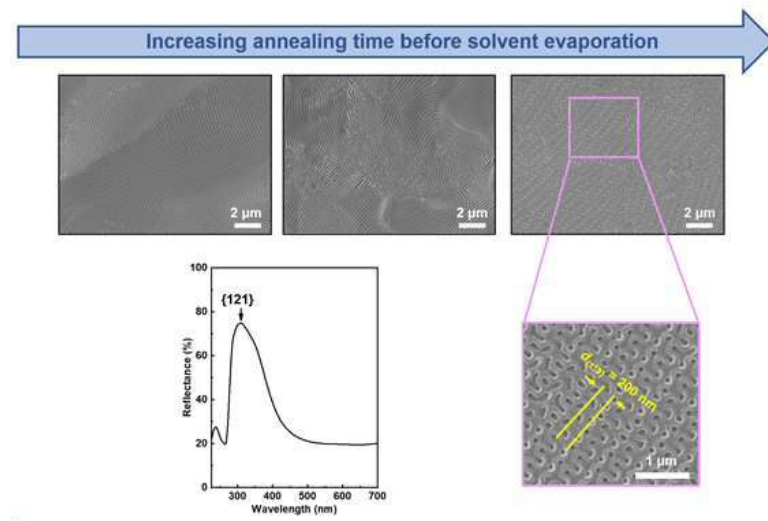
[0052] 도 5는 본 발명을 통해 제작된 자이로이드 막의 SEM 이미지를 고속 푸리에 변환(FFT)한 결과이다. (a) 도 3(c)에서 보여지는 자이로이드 SEM 이미지를 FFT 처리하여 얻은 2D 패턴이다. 해당 2D 패턴의 중심을 기준으로 각도에 따라 FFT 패턴을 스캐닝하고 이를 원형 평균 처리하였다. (b) 거리의 역수(reciprocal distance) 값에 대한 FFT 세기 프로파일을 얻었다. FFT 세기 프로파일에서 각 피크의 거리 역수 값은 $\sqrt{2} : \sqrt{4} : \sqrt{6} : \sqrt{8} : \sqrt{14}$ 의 비율을 가지며, 이는 더블 자이로이드 구조 내 $\{110\}$, $\{200\}$, $\{211\}$, $\{220\}$, $\{321\}$ 평면들의 도메인 간격의 역수 비율과 일치한다.

[0053] 이를 통해서, 본 발명에서 제조한 자이로이드 구조는 잘 정렬된 구조이며, 이 중에서도 $\{100\}$ 및 $\{200\}$ 평면은 대칭 파괴된 자이로이드에서만 확인되는 특징적인 평면이기 때문에 본 발명에서 확보한 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트 막 내 자이로이드 구조의 대칭이 파괴되었음을 간접적으로 확인할 수 있다.

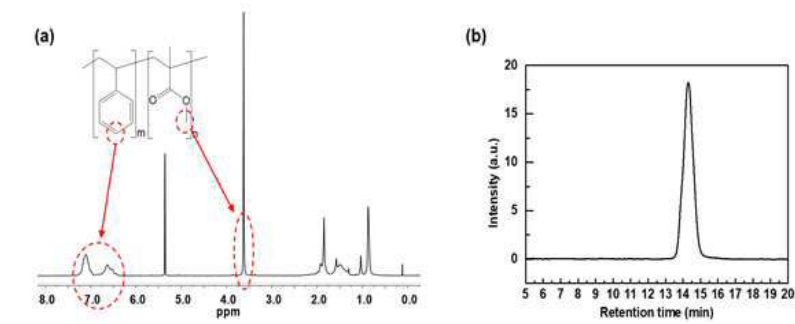
[0054] 도 6은 본 발명을 통해 제작된 자이로이드 막의 반사 스펙트럼에 관한 것으로, 반사 스펙트럼은 적분구라는 악세서리를 부착한 자외선-가시광 분광기를 사용하여 얻었다. 310 nm 의 파장에서 반사 피크가 확인되었다. 이 때, 반사 피크의 크기가 충분히 커서 400 nm 의 파장에서도 반사가 발생하기 때문에 제작된 자이로이드 막의 경우도 스펙트럼 우측 상단의 사진에서 확인할 수 있듯이 파란색을 띤다. 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트의 평균 굴절률($n_{\text{eff}} \sim 1.55$)과 수직으로 입사되는 빛 반사 파장(λ_R)을 계산하는 Bragg 법칙($\lambda_R = 2d_{\{hkl\}}n_{\text{eff}}$)을 고려했을 때, 반사 피크는 $\{211\}$ 평면의 빛 반사에 의한 것으로 계산된다. 이러한 결과는 다른 평면보다 평면보다 $\{211\}$ 평면이 주로 빛의 반사를 일으킨다는 자이로이드의 구조적 특징과 일관되며, 본 발명에서 솔벤트 캐스팅 방법으로 제작한 초거대 분자량 폴리스타이렌-블록-폴리메틸메타크릴레이트 자이로이드가 근자외선에 반응하는 광결정임을 나타낸다. 더 나아가, 도 5(b)에서 언급되었듯이 본 발명에서 확보한 자이로이드 광결정은 대칭 파괴되어 있는 것으로 확인되는데, 이는 본 발명에서 소개한 나노기술이 자이로이드 광결정의 정밀대칭파괴를 통한 Weyl 광결정 구조 구현에 큰 잠재력을 가진다는 것을 보여준다.

도면

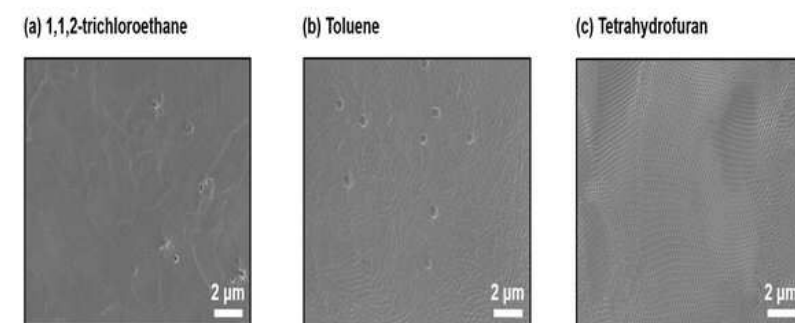
도면1



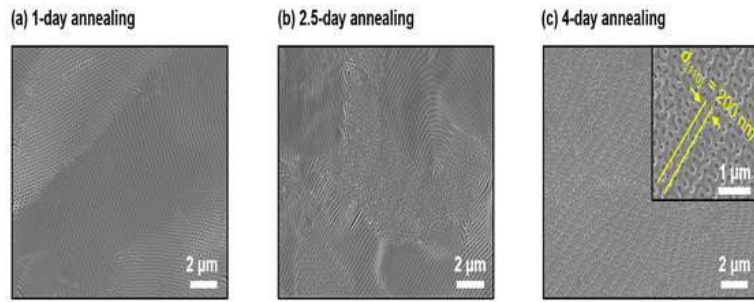
도면2



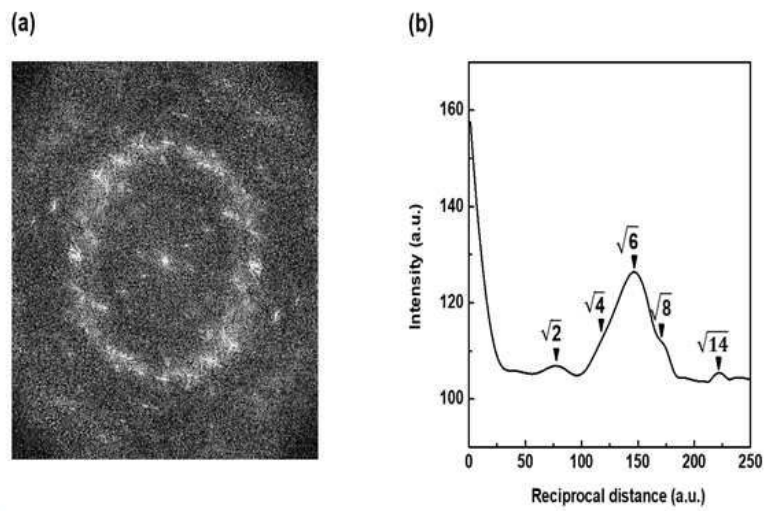
도면3



도면4



도면5



도면6

