

Layer-by-Layer 흡착을 통한 MWNT를 갖는 다층 고분자전해질에 관한 연구

이현¹, 강미선^{2*}

¹청주대학교 에너지광기술융합학부 응용화학과, ²한국과학기술연구원 물질구조제어연구센터

Polyelectrolyte Multilayer with MWNT via Layer-by-Layer Self-assembly

Hun Lee¹, Misun Kang^{2*}

¹Division of Energy & Optical Technology Convergence, Cheongju University

²Materials Architecting Research Center, Korea Institute of Science and Technology

요약 본 연구에서는 고분자전해질의 다층흡착을 통하여 카본나노튜브(CNT)를 함유하는 multilayer를 형성하였다. 다층흡착 기법은 정전기적 인력을 이용하여 간단하면서도 효과적으로 다층 구조의 물질을 만들수 있는 방법이다. 양이온성과 음이온성 고분자전해질로 Polyallylamine hydrochloride(PAH)와 polystyrene sulfonate sodium salt(PSS)를 사용하였으며, 산처리된 multiwalled carbon nanotube(MWNT)를 도입하였다. 다층흡착으로 얻어진 시료의 두께와 층 수를 분석하였으며, 그 표면의 특징을 살펴보았다. 시료의 층 수가 증가할수록 적층된 고분자전해질의 양이 증가하여 전체 두께가 증가함을 보였다. 적층이 진행될수록 표면의 구조와 거칠기가 달라짐에 따라 접촉각 특성이 변화하였다. 고분자전해질의 적층 시간은 표면의 거칠기를 빠르게 최대치에 도달하게 만드는 반면에 MWNT의 노출 시간은 적층 두께에 영향을 없었다. 최종 층에 MWNT의 도입에 있어 표면의 거칠기가 최대인 지점까지 고분자전해질의 적층이 이루어지는 것이 유리하였다. 이에 따라 표면 특성의 효과를 고려하여 적층된 MWNT가 최대일 때 형성된 multilayer의 전기적인 특성이 가장 높게 나타났다.

Abstract Polyelectrolyte multilayers with multiwalled carbon nanotubes (MWNT) were prepared by layer-by-layer (LbL) self-assembly, which is a simple and effective method for fabricating thin multilayers. Polyallylamine hydrochloride (PAH) and polystyrene sulfonate sodium salt (PSS) were used as the cationic polymer and anionic polymer, respectively. The PAH and PSS polymer layers were deposited alternately on a silicon wafer via electrostatic self-assembly. The MWNTs functionalized with carboxylic acid were deposited on top of the cationic surface. The thickness of the multilayer increased linearly with increasing number of deposition layers. When the number of layers increased, the contact angle increased until the critical point due to surface roughness. The dipping time of the polyelectrolyte solution influenced the contact angle of the surface, but the thickness of the MWNT layer had no effect on the deposition time. The polyelectrolyte multilayer obtained at the optimal point for introducing MWNTs exhibited electrical properties suitable for various applications. This study demonstrates that a polyelectrolyte multilayer with MWNTs was developed using LbL self-assembly.

Keywords : APolyelectrolyte, Multilayer, MWNT, Layer-By-Layer, Self-Assmbly

*Corresponding Author : Misun Kang(Korea Institute of Science and Technology)

email: misun.kang@gmail.com

Received March 17, 2021

Revised May 4, 2021

Accepted July 2, 2021

Published July 31, 2021

1. 서론

Layer-by-Layer(LbL) 다층흡착은 다양한 매질에 나노 사이즈 두께의 층을 만드는데 간단하고 효과적인 방법으로 널리 사용되어지고 있다. 이러한 LbL은 다양한 종류의 물질을 활용하여 특정 물질의 표면 개질에 사용되며, 바이오센서, 의약품, 촉매, 광학 등 여러 분야에 응용되고 있다[1,2].

LbL 기법은 특정 물질간의 정전기적 인력을 이용하여 그 물질들이 self-assembly하는 성질을 이용하는 방법이다. 전기적인 성질을 띠는 기질을 양이온성 고분자전해질과 음이온성 고분자전해질에 번갈아가면서 노출하여 여러층의 흡착을 만들 수 있다. 고분자전해질의 적층은 다양한 노출 조건과 도입 물질에 따라 그 표면의 구조와 특성이 달라지는 것을 많이 연구되어져 왔다. J.B. Schlenoff와 S.T. Dubas는 흡착 표면에서 다층흡착을 형성하는데 있어 고분자전해질의 전하 밀도와 균형이 적층에 미치는 영향성을 연구하였다[3]. 고분자전해질 종류에 따른 표면 구조의 차이점은 S. Zapotoczny 등에 의해 연구되었다[4]. 또한 고분자전해질 다층흡착의 형성에서 열적 조건이 그 구조의 두께와 형태에 영향을 미치는 것이 연구되었다[5,6]. W.C. Mak 등은 다양한 고분자 물질로 다층흡착을 형성할 때 나타나는 적층의 효율성과 두께의 변화, 열적 안정성을 나타내었다[7]. 고분자전해질 다층흡착이 도입되는 기질의 표면 상태에 따른 안정성과 구조의 특징도 연구되어 효과적으로 활용되었다[8]. B. Schoeler 등은 고분자전해질의 농도와 고분자 분자량이 다층흡착 형성의 구조와 두께에 미치는 영향성을 연구하였다[9,10].

육각벌집 구조의 흑연판이 나노 사이즈의 지름을 갖는 실린더 형태로 둥글게 감겨져 있는 탄소나노튜브(carbon nanotube)의 발견은 수많은 활용법과 구조적, 물리적, 화학적, 전기적 응용 연구가 가능하도록 하였다[11]. 탄소나노튜브는 하나의 관으로 이루어진 단일벽(Singwalled carbon nanotube, SWNT)과 여러 개의 관이 동심원을 이루는 다중벽(Multiwalled carbon nanotube, MWNT) 형태가 있으며 여러가지 우수한 성질을 갖는다. 이러한 나노 사이즈의 탄소 구조물은 열 및 전기 전도도가 우수하고, 기계적 강도와 탄성계수가 매우 뛰어나서 다양한 분야에 응용되고 있다. 또한 길이 방향의 안정성과 더불어 특히 뛰어난 전기 전도성으로 인하여 허용전류량 측면에서 매우 우수한 재료이다[12]. 이와 같은 특성으로 탄소나노튜브는 복합재료에 전기적인

성질을 부여하고, 고분자 물질을 이용한 유연하고 강한 전자소자의 개발에 응용 가능할 것이라 기대된다.

이에 본 연구에서는 간단하고 효과적인 LbL 다층흡착을 이용하여 고분자 층을 형성하고 여기에 탄소나노튜브를 결합하였다. 탄소나노튜브는 기본적으로 용액상에서 높은 반데르발스 인력에 의한 아주 낮은 분산성을 보이고, 전기적인 인력은 존재하지 않는다[13]. 이를 해결하고 정전기적 다층흡착에 이용하기 위해 MWNT의 산처리를 통하여 표면에 카르복실기를 도입하여 사용하였다. 전기적인 성질을 띠는 기질 위에 정전기적 인력을 이용하여 양이온과 음이온 고분자전해질로 다층흡착을 형성하고, 그 위에 산처리된 MWNT를 적층하였다. 이러한 고분자 다층과 탄소나노튜브 사이의 복합체를 형성하여 그 표면 구조와 특성을 살펴보았다.

2. 본론

2.1 실험

2.1.1 시료

Silicon wafer는 P-type (100) 방향의 시료를 4사이언스사로부터 구매하여 실험에 사용하였다.

Silicon wafer를 실험에 사용하기에 앞서 시편의 유기물을 제거하고, 표면에 수산화기(-OH)를 도입하기 위하여 Piranha 처리를 하였다. Piranha 용액은 98% H₂SO₄와 30% H₂O₂를 7:3 비율로 혼합하여 사용하였다. 제조된 Piranha 용액은 반응이 매우 격렬하므로 주의하여 바로 실험에 사용하도록 한다. Silicon wafer를 실험에 알맞게 10 x 10 mm 크기로 잘라서 130 °C에서 1시간 동안 Piranha 처리하였다. 그 후 증류수로 여러 번의 세정을 실시하고, 잔여 수분은 질소 기체를 이용하여 완전히 제거하였다.

고분자전해질로 사용할 양이온성 고분자는 polyallylamine hydrochloride (PAH, Mw=15,000 g/mol), 음이온성 고분자는 polystyrene sodium sulfonate (PSS, Mw=13,800 g/mol)를 Aldrich사에서 구입하여 사용하였다. Fig. 1에 각각 고분자 물질의 화학 구조식을 나타내었다.

실험에 사용할 MWNT는 화학증기증착법(CVD)으로 제조한 순도 95 % 이상의 제품을 일진나노텍사에서 구입하여 사용하였다. MWNT는 표면 개질을 통하여 수용액 상에서 전기적인 성질과 분산 성질을 부여하기 위하여 산처리를 실시하였다. 98% H₂SO₄와 70% HNO₃를

3:1 비율로 70 °C에서 MWNT를 처리하여 표면에 카복실기(-COOH)를 도입하여 사용하였다.

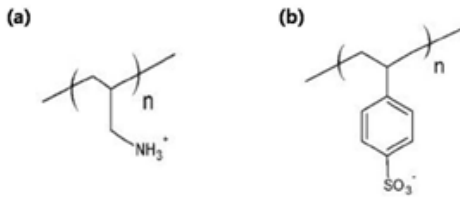


Fig. 1. Chemical structures of (a) cationic polyelectrolyte (PAH) (b) anionic polyelectrolyte (PSS) in this study

2.1.2 고분자전해질 다층흡착 제조

양이온성 고분자전해질은 PAH를 0.5% w/w, 음이온성 고분자전해질은 PSS 0.5% w/w 각각 0.1 M NaCl과 함께 수용액으로 제조하여 다층흡착 처리에 사용하였다. Piranha 처리로 표면에 산화기가 도입된 silicon wafer 시편을 먼저 양이온성 고분자전해질에 일정시간 담가서 PAH를 기질에 흡착시켜서 첫번째 layer 층을 형성시켰다. 이후 시편을 증류수로 여러 번 수세하고 질소 기체로 건조시킨다. 양이온성의 첫번째 층 형성 후에 이 시편을 음이온성 고분자전해질에 일정시간 동안 담가서 PSS를 흡착시키고, 동일하게 세정과 건조를 거쳐서 두번째 층을 형성하였다. 위의 과정을 반복함으로써 원하는 수의 최종 층을 조절하였다. 목표 층을 형성 후에 다층흡착과 동일한 방식으로 산처리된 MWNT를 최종 표면에 도입하였다. Fig. 2는 고분자 다층흡착 제조와 MWNT의 도입 과정을 나타내었다.

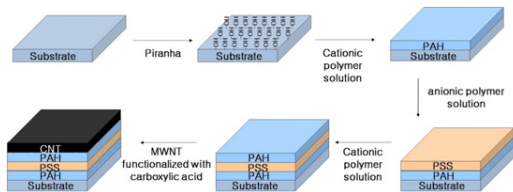


Fig. 2. Schematics of polyelectrolyte multilayer with MWNT by using layer-by-layer electrostatic self-assembly

2.1.3 분석

IR 분석에는 Jasco사 FT-IR 6300를 사용하여 적층의 진행에 따른 고분자전해질의 적층을 확인하였다. 다층흡착이 이루어진 시료의 두께를 J.A. Woollam사 V-VASE ellipsometer를 사용하여 분석하였다. 고분자전해질의 적층된 표면의 분석은 Jeol사의 JSM-6360A

Scanning Electron Microscopy(SEM)를 사용하였다. 다층흡착이 형성된 시료의 표면 특성을 분석하기 위하여 Holmarc사 HO-IAD를 사용하여 표면에서 접촉각을 측정하였다. Park systems사 Park NX Atomic Force Microscopes(AFM)를 이용하여 다층흡착 표면의 이미지와 거칠기를 분석하였다. 다층흡착으로 도입된 MWNT의 효과를 확인하기 위하여 Fluke사 4 point probe tester를 이용하여 표면 저항을 평가하였다.

2.2 결과 및 고찰

Piranha 처리를 통한 산화기가 표면에 도입된 silicon wafer에 고분자 물질의 층이 효과적으로 흡착되었는지 확인하였다. Silicon 표면에 다양한 층 수의 다층흡착 과정을 거친 후 사용한 PAH 고분자전해질 용액을 FT-IR 분석을 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

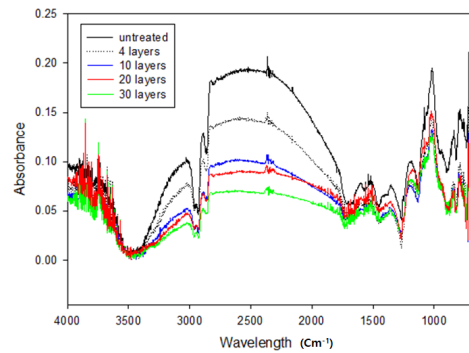


Fig. 3. FT-IR spectra of cationic polymer solutions after self-assembly

PAH는 수용액상에서 암모니아기(-NH₃)를 가지고 있어 3100-3200와 2500-2600에서 IR 흡광도 피크를 보인다[14]. 흡착된 층 수가 증가할수록 고분자전해질 용액에 남은 고분자 물질의 양이 줄어들어 해당 영역대에서 피크의 세기가 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 이는 여러층이 형성됨에 따라 고분자 물질이 Silicon 표면에 더 많이 흡착되었다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 흡착된 층 수를 증가시키면서 다층의 두께를 측정할 결과이다. Wafer 표면에 흡착된 층 수가 증가할수록 층의 두께가 일정하게 늘어남을 확인할 수 있었다. 즉, 고분자전해질의 반복적인 흡착과정을 통해서 wafer 표면에 안정적인고 일정한 두께의 층을 효과적으로 쌓을 수 있었다.

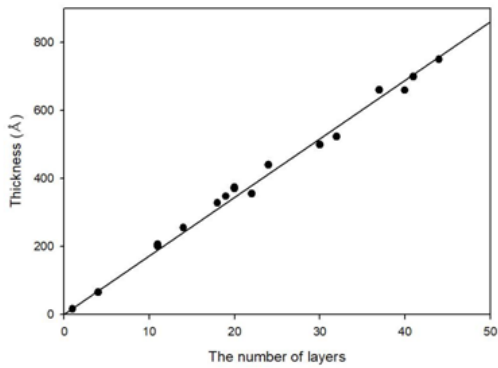


Fig. 4. Thickness as a function of the number of layers for PAH/PSS multilayer deposited on silicon wafer

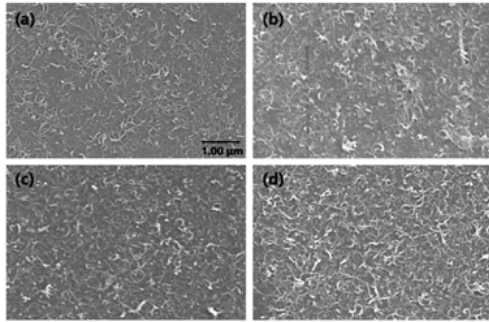


Fig. 5. SEM images of various multilayer (a) 3 layers, (b) 11 layers, (c) 21 layers w/o MWNT, (d) 21 layers with 4 MWNT layers

다양한 층 수의 고분자 다층을 형성한 후에 그 표면의 상태를 SEM 이미지를 활용하여 확인하였다. Fig. 5의 (a), (b), (c)는 wafer 표면에 고분자 물질만을 적층한 경우이고, (d)는 최종 층에 MWNT를 적층한 것이다. MWNT가 없는 시료의 경우에도 층의 수가 늘어날수록 표면에 달라붙은 고분자 물질이 많아짐이 확인되고, 그에 따라 roughness도 증가되었을 것으로 추정된다. 최종 층에 아주 작은 사이즈의 MWNT가 적층됨에 따라 그 표면의 roughness가 증가됨을 알 수 있었다. 이와 같이 최종 층의 형성에 있어 더 많은 MWNT의 도입을 위해서는 표면 roughness의 증가로 인한 최대한의 표면적이 유리하다고 할 수 있다.

흡착된 층 수의 증가에 따른 roughness의 증가를 확인하기 위하여 다양한 수의 층을 형성하여 표면의 접촉각을 측정하였다. 또한 한 층의 흡착 시간을 10분, 20분으로 달리하여 그 결과를 Fig. 6에 비교하였다.

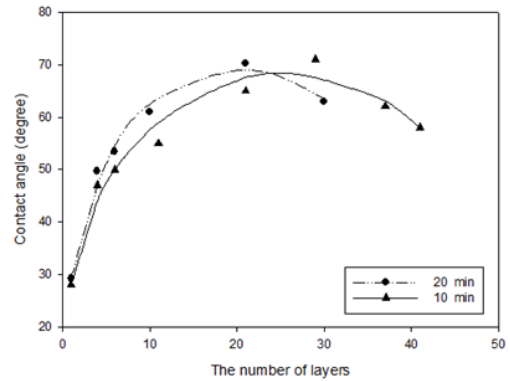


Fig. 6. Contact angle as a function of the number of layers with different dipping time

표면의 적층 수가 일정 수준까지 증가에서는 접촉각이 증가함을 나타냈다. 이는 표면의 roughness가 증가하므로 접촉각이 증가하는 것으로 생각할 수 있다[15]. 반면에 특정 층 수 이상으로 갈수록 접촉각이 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 층 수가 증가할수록 표면에 과도한 고분자 물질의 흡착으로 인해 오히려 평탄화가 일어나고 표면적이 줄어들어서 roughness 감소를 유발하는 것으로 판단된다. 이러한 효과는 고분자전해질을 더 긴 시간 동안 적층하는 조건인 20분의 결과에서 적은 층 수에서 더 일찍 나타났다. 이것은 시료를 고분자전해질에 더 오랜 시간 담글수록 고분자 물질이 적층하는 기회를 많이 부여하여 표면에 고분자가 더 달라붙어 평탄화 효과를 일찍 유발하는 것이라 할 수 있다. 따라서 높은 표면적으로 최대한의 MWNT를 표면에 도입하기 위해서는 roughness가 최대인 적층 수를 만들 필요가 있다.

다층흡착을 형성한 시료의 표면 이미지를 AFM을 이용하여 확인하였다. Fig. 7은 각각의 다른 층 수로 만들어진 시료를 AFM으로 표면을 확인하고 그 roughness를 측정하여 비교하였다. (a), (b), (c)는 MWNT가 최종 층에 도입되기 전의 시료이고, (d)는 최종 층에 MWNT가 여러 층 도입된 시료이다. 4가지 시료의 측정된 RMS(root mean square) roughness는 각각 1.28, 2.96, 3.27, 8.82 nm로 층 수가 증가할수록 증가하였음을 알 수 있었다. 앞서 접촉각에서 확인한 표면적의 최대치 층 수까지는 roughness가 증가하여 MWNT의 도입에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

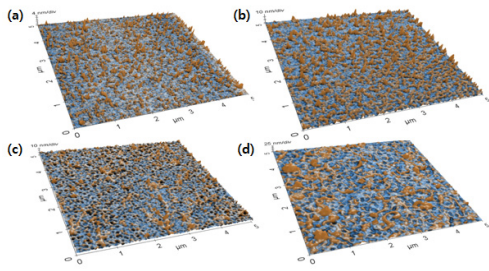


Fig. 7. AFM images of various multilayer (a) 3 layers (RMS roughness=1.28 nm), (b) 11 layers (2.96 nm), (c) 21 layers w/o MWNT (3.27 nm), (d) 21 layers with 4 MWNT layers (8.85 nm)

Table 1. Polyelectrolyte multilayer including a MWNT layer with various dipping time

Sample	Polymer	Dipping time	MWNT layer
1	11 layers	5 min	1
2	11 layers	10 min	1
3	11 layers	20 min	1
4	11 layers	30 min	1
5	11 layers	60 min	1

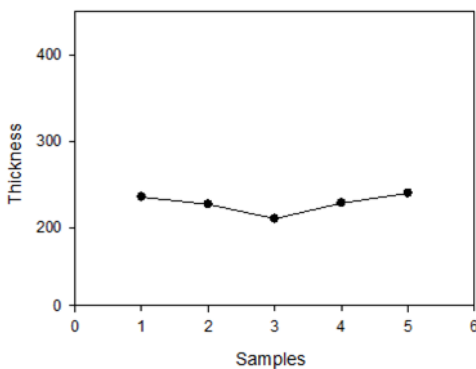


Fig. 8. Thickness of multilayer samples with a MWNT layer

최종 층에 MWNT의 도입에 있어 MWNT 수용액에 담그는 시간에 따른 결과를 Table 1과 Fig. 8에 나타내었다. Wafer 표면에 흡착된 고분자 층 수를 고정하고, 최종 MWNT의 흡착 시간을 달리하여 흡착되는 두께의 차이를 비교하였다. MWNT의 흡착 시간을 5, 10, 20, 30, 60분으로 증가하여도 시료의 두께는 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이로 인해 최종 MWNT의 적층에 있어 흡착시간은 영향성이 없다고 할 수 있다.

앞서 도출한 적층의 조건을 토대로 최종 MWNT의 도

입에 있어 최대의 효과를 볼 수 있는 여러 층 수를 형성하였다. 만들어진 다양한 층 수의 시료에 도입된 MWNT의 전기적인 효과를 확인하기 위하여 그 표면의 저항값을 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기에 표기되지 않은 적은 수의 층에 MWNT가 도입된 경우의 시료는 저항값이 측정되지 않았다. 이는 전기적인 성질을 띄기에 충분하지 않은 MWNT가 표면에 도입되었음을 말한다. 표에 나타난 저항값의 결과는 표면 roughness가 가장 높은 경우의 시료가 저항값이 약간 낮게 나오므로써 표면에 MWNT가 좀 더 많이 효과적으로 도입되었다고 할 수 있다. 이는 앞서 확인한 표면적과 roughness의 결과와 일치하는 내용으로 MWNT를 표면에 효과적으로 도입하기 위해서는 최대한의 roughness를 갖는 표면 적층 수를 찾아 도입해야 함을 뜻한다.

Table 2. Electrical property of multilayer with various MWNT layers

Sample	Polymer	MWNT	Total	Resistance
1	21 layers	1 layer	22 layers	5~20 mΩ
2	21 layers	2 layers	24 layers	10~30 mΩ
3	21 layers	3 layers	26 layers	2~10 mΩ
4	21 layers	4 layers	28 layers	4~10 mΩ

3. 결론

본 연구는 고분자전해질의 다층흡착을 이용하여 카본나노튜브를 도입하는 연구를 진행하였다. 양이온성 고분자전해질로 PAH와 음이온성 고분자전해질로 PSS를 사용하여 정전기적 인력을 이용한 다층흡착 기법으로 적층하였다. 고분자전해질의 다층이 형성된 위에 산처리된 MWNT를 도입하여 그 전기적 특성과 다층 형성에 있어서의 특성과 조건을 살펴보았다.

다층흡착된 시료의 두께는 적층된 층의 수가 증가할수록 선형으로 증가하는 특성을 확인하였다. 적층된 층의 표면 특성은 층의 수가 증가에 따라 표면 roughness도 증가하는 경향을 보였으며, 그 증가는 일정 적층 수 이상에서는 오히려 감소하는 임계점을 보였다. 최종 도입되는 MWNT 층의 효과를 최대화하기 위한 적층 수를 표면 특성으로 확인하고 전기적 저항값을 측정하였다. 높은 roughness를 갖는 큰 표면적의 적층 시료에 MWNT를 도입한 경우에 표면 저항값이 낮은 결과로 나타나 전기적 특성이 유리함을 확인할 수 있었다.

References

- [1] B. Schoeler, G. Kuaraswamy, F. Carruso, "Investigation of the Influence of Polyelectrolyte Charge Density on the Growth of Multilayer Thin Films Prepared by the Layer-by-Layer Technique", *Macromolecules*, 35, pp. 889-897, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ma011349p>
- [2] Y. Wang, E. Stedronsky, S.L. Regen, "Defects in a Polyelectrolyte Multilayer: The Inside Story", *J. Am. Chem. Soc.*, 130, pp. 16510-16511, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja808135e>
- [3] J.B. Schlenoff, S.T. Dubas, "Mechanism of Polyelectrolyte Multilayer Growth: Charge Overcompensation and Distribution", *Macromolecules*, 34, pp. 592-598, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ma0003093>
- [4] S. Zapotoczny, M. Golonka, M. Nowakowska, "Nanostructured Micellar Films Formed via Layer-by-Layer Deposition of Photoactive Polymer", *Langmuir*, 34, pp. 5868-5876, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1021/la800098r>
- [5] K. Kohler, H. Mohwald, G.B. Sukhorukov, "Thermal Behavior of Polyelectrolyte Multilayer Microcapsules: 2. Insight into Molecular Mechanisms for the PDADMAC/PSS System", *J. Phys. Chem. B*, 110, pp. 24002-24010, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1021/jp062907a>
- [6] K. Kohler, D.G. Shehukin, G.B. Sukhorukov, H. Mohwald, "Drastic Morphological Modification of Polyelectrolyte Microcapsules Induced by High Temperature", *Macromolecules*, 37, pp. 9546-9550, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ma048474w>
- [7] W.C. Mak, K.Y. Cheung, D. Trau, "Influence of Different Polyelectrolytes on Layer-by-Layer Microcapsule Properties: Encapsulation Efficiency and Colloidal and Temperature Stability", *Chem. Mater.*, 20, pp. 5475-5485, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1021/cm702254h>
- [8] J. Park, P.T. Hammond, "Polyelectrolyte Multilayer Formation on Neutral Hydrophobic Surfaces", *Macromolecules*, 38, pp. 10542-10550, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ma051158c>
- [9] W. Dong, J.K. Ferri, T. Adalsteinsson, M. Schonhoff, "Influence of Shell Structure on Stability, Integrity, and Mesh Size of Polyelectrolyte Capsules: Mechanism and Strategy for Improved Preparation", *Chem. Mater.*, 17, pp. 2603-2611, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1021/cm050103m>
- [10] B. Schoeler, S. Sharpe, T.A. Hatton, F. Caruso, "Polyelectrolyte Multilayer Films of Different Charge Density Copolymers with Synergistic Nonelectrostatic Interactions Prepared by the Layer-by-Layer Technique", *Langmuir*, 20, pp. 2730-2738, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1021/la035909k>
- [11] K.J. Loh, J. Kim, J.P. Lynch, N.W.S. Kam, N.A. Kotov, "Influence of Shell Structure on Stability, Integrity, and Mesh Size of Polyelectrolyte Capsules: Mechanism and Strategy for Improved Preparation", *Smart Mater. Struct.*, 16, pp. 429-438, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1021/cm050103m>
- [12] X. Wang, P.D. Bradford, W. Liu, H. Zhao, Y. Inoue, J. Maria, Q. Li, F. Yuan, Y. Zhu, "Mechanical and Electrical Property Improvement in CNT/Nylon Composites through Drawing and Stretching", *Composites Science and Technology*, 71, pp. 1677-1683, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.023>
- [13] R.H. Bauhman, A.A. Zakhidov, and W.A. de Heer, "Carbon Nanotube the Route Toward Application", *Science*, 297, pp. 787-792, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1060928>
- [14] M.D. Albaqami, A.M. Ellis, "Infrared Spectroscopy of Ca(NH₃)_n Complexes", *Chem. Phys. Letters*, 706, pp. 736-740, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2018.06.048>
- [15] C. Luo, X. Zuo, E. Wang, S. Song, J. Wang, J. Wang, C. Fan, Y. Cao, "Flexible Carbon Nanotube-Polymer Composite Films with High Conductivity and Superhydrophobicity Made by Solution Process", *Nano Letters*, 8, pp. 4454-4458, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1021/nl802411d>

이 현(Hun Lee)

[중신회원]



- 2007년 8월 : 숭실대학교 유기신소재공학과 (공학석사)
- 2013년 5월 : 노스캐롤라이나 고분자화학과 (공학박사)
- 2013년 8월 ~ 2016년 2월 : 삼성 전자 반도체연구소 책임연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 응용화학과 조교수

〈관심분야〉

고분자 소재, 응용화학

강 미 선(Misun Kang)

[정회원]



- 2006년 2월 : 성균관대학교 물리학과 (이학석사)
- 2016년 5월 : 노스캐롤라이나 주립대학교 화학과 (이학박사)
- 2017년 11월 ~ 2020년 10월 : 한국과학기술연구원 연구원
- 2021년 7월 ~ 현재 : 계명대학교 화학과 연구원

〈관심분야〉

나노소재, 나노입자