

저유전성 폴리이미드 연구 동향

Research Trends in Low-Dielectric Polyimides

김지영¹ · 남기호^{1,2} | Jiyoung Kim · Ki-Ho Nam

¹Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University,
²School of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Kyungpook National University,
 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea
 E-mail: knam@knu.ac.kr

1. 서론

인공지능(AI), 자율주행차, 사물인터넷(IoT), 항공우주 기술에 대한 수요가 급격히 증가함에 따라, 통신 시스템과 집적회로(IC) 기술은 빠른 속도로 발전하고 있다. 이에 따라 지속적으로 IC의 소형화와 고집적화가 요구되며, 이를 통해 더욱 빠르고 효율적인 데이터 처리 및 전송이 가능케 된다.¹⁻⁴ 이러한 기술적 이정표를 달성하고 고밀도로 배치된 반도체 소자 간의 신호 간섭(crosstalk)을 억제하기 위해서는, 본질적으로 낮은 유전율(dielectric constant, D_k)을 갖는 층간 절연체(interlayer dielectric, ILD)의 개발이 핵심적인 연구 과제로 부상했다.⁵⁻⁷ 동시에, 초고속 데이터 통신을 위한 고주파 신호 활용이 증가함에 따라, 전파 지연을 줄이고, 전력 소모를 최소화하며, 고성능 소자의 신호 무결성(signal integrity)을 보장하기 위해 낮은 유전손실(dielectric loss, D_l)을 만족해야 한다.⁸

유전체는 교류 전기장이 인가될 때 전하 분극(charge polarization)을 겪으며, 이는 재료 구조 내 전하 변위 정도를 반영한다.⁹ 이러한 거동은 식 (1)로 정의되는 복소 유전율(complex permittivity, ϵ)로 설명된다.^{9,10}

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1)$$

여기서 ϵ' 은 유전율(D_k)에 해당하며, i 는 허수 단위, ϵ'' 은 유전손실(D_l)과 연관된다. 유전손실은 ϵ''/ϵ' 의 무차원 비율로 정의되며, 이는 유전체가 저장하는 에너지 대비 손실되는 에너지의 비율을 나타낸다.^{9,10} ϵ' 값은 외부 전기장에 의해 쌍극자 정렬 또는 전하 변위가 발생할 때 전기 에너지를 저장할 수 있는 능력을 정량화하는 반면, ϵ'' 값은 신호 전송 과정에서 열이나 기타 형태로 소실되는 에너지를 정량적으로 나타낸다.¹¹ 고성능 IC 배선재에서는 D_k 와 D_l 를 모두 최소화하는 것이 신호 손실을 줄이고 고속·저전력 동작을 구현하는 데 핵심이라 할 수 있다.

저유전 재료는 크게 무기계와 유기계로 구분할 수 있다. 무기계 재료(이산화규소 및 기타 금속 산화물)는 널리 활용되어 왔으나, 취약한 기계적 물성, 복잡한 공정 요구, 유연 소자 및 다층 소자 구조와의 낮은 호환성 등의 한계를 가진다.^{4,7} 이와 비교하여, 방향족 폴리이미드(polyimide, PI)는 뛰어난 열적 안정성, 우수한 기계적

Author



김지영

2024

경북대학교 섬유시스템공학과 (학사)

2024-현재

경북대학교 섬유시스템공학과 (석사과정)



남기호

2012

2020

2015-2018

2020-2021

2021-2025

2025-현재

연세대학교 응용과학부 (학사)

연세대학교 화학생명공학과 (박사)

한국과학기술연구원 연구원

University of Pittsburgh

(Post-Doc.)

경북대학교 섬유시스템공학과 조교수

경북대학교 섬유시스템공학과 부교수

강도, 내화학적, 절연 특성으로 차세대 고분자 유전체로써 주목받고 있다.^{7,12} 그러나 종래의 폴리이미드는 일반적으로 10 GHz에서 D_k 값은 3.1-3.5, D_f 값은 0.008-0.02 범위이며, 이는 향후 고주파 대응 저유전 재료 응용을 위한 산업적 요구 목표($D_k < 2.5$, $D_f < 0.002$)를 충족하지 못하는 수준이다.¹³ 이에 따라 차세대 저유전성 폴리이미드 합성을 위한 다양한 분자 설계 전략이 제안되었다. 예를 들어, (i) 높은 전기음성도와 약한 분자간 상호작용을 가지는 불소계 치환기를 도입하여 분극성을 낮추는 방법,¹⁴⁻¹⁹ (ii) 지방족 단량체를 공중합하여 극성 이미징 함량을 줄이는 방법,²⁰⁻²³ (iii) 부피가 큰 치환기 또는 뒤튼린 비공평 구조를 도입하여 사슬 간 패킹을 방해하고 분자간 분극을 억제하는 방법 등이 있다.²⁴⁻²⁷

이에 본 총설에서는 급격히 발전하는 초고속 통신 및 IC 기술의 요구를 충족하기 위한 저유전성 폴리이미드 연구의 최근 동향을 조망하고자 한다. 특히 폴리이미드의 D_k 와 D_f 에 영향을 미치는 화학적 구조 인자에 대한 이론을 고찰하고, 불소화(fluorination)와 에스터 구조 도입이 폴리이미드의 유전 특성에 미치는 상관관계를 중심으로 논의한다.

2. 본론

2.1 D_k 와 폴리이미드 주쇄 극성 간의 상관성

Clausius-Mossotti 방정식은 재료의 분자 분극률(molecular polarizability)과 D_k 값 간의 관계를 설명하는 잘 확립된 이론적 모델로, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$(\epsilon' - 1) / (\epsilon'' + 2) = (Na) / (3\epsilon_0) \quad (2)$$

여기서, ϵ_0 는 자유공간의 유전율(permittivity of free space), N 은 분극 가능한 분자의 수밀도(number density), a 는 분자 분극률(molecular polarizability)을 의미한다.²⁸ 식 (2)에 따르면, N 또는 a 를 감소시키는 것은 전체적인 ϵ' 을 효과적으로 낮출 수 있음을 보여준다. 따라서 폴리이미드의 쌍극자 밀도를 최소화하거나 쌍극자 배열을 방해하는 분자 설계가 유전상수를

낮추는 핵심이다.

그림 1에서 볼 수 있듯이, 유전 분극(dielectric polarization)은 크게 전자 분극(electronic polarization), 이온 분극(ionic polarization), 쌍극자(배향) 분극(dipolar/orientation polarization)의 세 가지 주요 메커니즘에서 기인한다.²⁹ 전자 분극은 모든 유전체에서 나타나며, 외부 전기장이 인가되었을 때 전자 구름이 원자핵에 대해 변위되는 현상이다. 전자의 질량이 매우 작기 때문에 이 과정은 거의 순간적으로 일어나며, 약 10^{14} Hz 이상의 고주파 영역에서 지배적이다.^{31,32} 이온 분극은 가동성 이온을 포함한 재료에서 관찰된다. 외부 전기장 하에서 양이온과 음이온이 반대 방향으로 이동하면서 분극이 발생하며, 이는 주로 10^9 - 10^{13} Hz 범위의 중간 주파수 영역에서 작동한다.^{32,33} 쌍극자(배향) 분극은 영구 쌍극자를 가진 분자에서 나타나는 현상으로, 전기장에 노출되면 쌍극자가 전기장 방향에 따라 정렬하려 한다. 그러나 상대적으로 반응 속도가 느리기 때문에, 이 메커니즘은 10^3 - 10^9 Hz의 저주파 영역에 국한된다.^{32,33} 따라서 저주파에서는 세 가지 분극 메커니즘이 모두 작동하여 상대적으로 높은 D_k 값을 보이지만, 주파수가 증가함에 따라 쌍극자 분극 및 이온 분극은 외부 전기장 변화에 충분히 대응하지 못하고 전자 분극만이 남아 작동하게 된다. 이로 인해 고주파수 영역에서는 D_k 값이 크게 감소하게 된다.^{31,33}

이러한 이론적 메커니즘을 바탕으로, 폴리이미드의 D_k 값을 낮추기 위한 여러 분자 설계 전략이 제시되어 왔으며, 대표적으로 (i) 플루오르 치환기의 도입,¹⁴⁻¹⁹ (ii) 부피가 크고 비공평(non-coplanar)한 분자 구조 설계,²⁴⁻²⁷ (iii) 지방족 또는 시클로지방족(cycloaliphatic) 구조의 도입²⁰⁻²³ 등이 있다. 한편, 다음 절에서는 폴리이미드의 D_f 값에 영향을 미치는 쌍극자 이완(dipole relaxation) 및 분자 운동성(molecular mobility)의 효과를 논의하고자 한다.

2.2 D_f 와 폴리이미드 분자 운동성의 상관성

유전체가 교류 전기장에 노출되면, 저장된 전기 에너지의 일부는 불가피하게 열로 전환된다. 이 현상은 D_f 값으로 정량화되며, 특히 고주파 응용에서 고분자 유전체의 성능을 좌우하는 핵심 인자라 할 수 있다.³⁴ D_f 는 주로 반복적인 분극-탈분극 과정에서 쌍극자 및 이온 종의 지연된 반응에 의해 발생한다.^{29,34} 교류 전기장에서는 분극 방향이 지속적으로 반전되며, 이에 따라 유전체 내부의 전하 운반자와 쌍극자 그룹은 반복적으로 진동한다. 그러나 이들이 이동하는 과정에서 저항(마찰) 힘을 받게 되고, 이로 인해 에너지가 열 형태로 소산된다.³⁰ 따라서 영구 쌍극자 모멘트가 큰 재료일수록 D_f 값이 높아지는 경향을 보이는데, 이는 분극은 쉽게 일어나지만 전기장 변화에 따른 재배향 과정에서 에너지 소실이 더 크게 발생하기 때문이다.^{16,35}

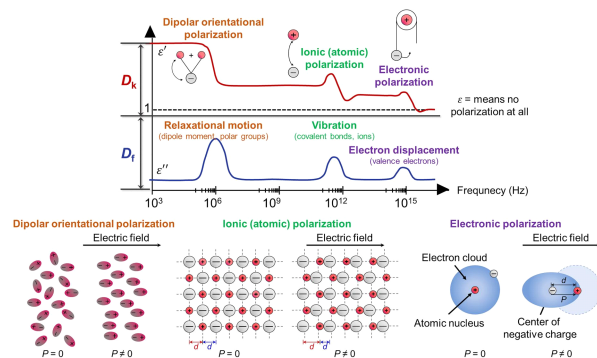


그림 1. 세 가지 주요 유전 분극 메커니즘과 주파수와의 상관성.

D_k 는 또한 주파수 의존성이 강하다. 고주파 영역에서는 전기장의 반전 주기가 너무 짧아 쌍극자가 외부 전기장의 변화에 완전히 따라가지 못한다. 이로 인해 외부 전기장과 분극 반응 간 위상 지연(phase delay)이 발생하고, 히스테리시스(hysteresis) 효과가 추가적인 에너지 손실을 유발한다.²⁹

쌍극자 거동 외에도, 고분자 내 분자 운동성(molecular mobility) 역시 D_k 값을 결정하는 중요한 요인이다. 사슬 운동성과 분절 운동(segmental motion)이 증가하면 쌍극자의 재배향은 용이해지지만, 동시에 분자 간 마찰이 강화되어 열 소산이 더욱 증가한다.³⁶ 이러한 경향은 특히 무정형(amorphous) 구조나 사슬이 느슨하게 패키된 구조에서 두드러지는데, 이 경우 사슬 간 상호작용이 상대적으로 약하기 때문이다.³⁷ 이러한 점을 고려할 때, 폴리이미드의 D_k 값을 최소화하기 위한 전략으로 (i) 분자 분극률을 낮추어 쌍극자 발생 자체를 억제하는 방법, (ii) 강직한 주쇄 구조 또는 가교결합을 통해 사슬 운동성을 제한하는 방법, (iii) 부피가 큰 치환기를 도입하여 사슬 간 패키를 억제함으로써 분자 간 마찰을 줄이는 방법 등을 활용할 수 있다.

2.3 불소화에 의한 폴리이미드의 유전 특성

불소화(fluorination)는 기공 형성제, 무기 나노필러 등의 외제적 접근 없이도 폴리이미드의 D_k 와 D_f 값을 동시에 낮출 수 있는 효과적인 방법 중 하나이다. 불소 원자 도입의 근본적 효과는 높은 전기음성도에 기인하며, 이는 전자 구름의 공명(conjugation)을 억제하고 전하 전이 복합화(charge transfer complex, CTC) 형성을 억제시켜 고분자 사슬의 분극률(polarizability)을 현저히 감소시킨다.^{29,38} 또한, 불소 원자 또는 트리플루오로메틸기($-CF_3$)와 같은 불소 치환기는 부피가 큰 입체 구조(steric bulk)를 형성하고 분자 부피(molar volume)를 증가시켜 큰 자유부피(free volume)를 갖는다. 이로 인해 고분자 사슬 간의 조밀한 패키가 방해되고, 쌍극자 배향(dipolar orientation)이 교란되어 결과적으로 유전 응답(dielectric response)을 낮추게 된다.^{28,29} 그 결과, 불소화된 폴리이미드는 일반적으로 낮은 D_k 값을 나타내며, D_f 값은 사슬 동역학(chain dynamics) 및 쌍극자 상호작용 정도에 따라 다르다. 대표적인 불소화된 폴리이미드의 화학 구조는 그림 2에 도시했으며, 이들의 유전 특성은 그림 3에 도시했다.

Chen 교수 연구팀은 다양한 작용기를 도입한 폴리이미드를 비교하여, 불소 함량(F%)과 D_k , 분극률/부피 비(P/V_{DFT})와 F% 간의 강한 상관성을 확인했다(그림 3a,b).¹⁶ 또한 D_f 는 이미드기 함량과 밀접하게 연관됨을 보고했으며(그림 3c), 특히 6FDA 기반 불소화 폴리이미드는 $D_k = 2.37$ –2.85, $D_f = 0.0042$ –0.0110과 우수한 열적 안정성($T_{d5\%} > 490^\circ\text{C}$)을 나타냈다.

Zhao 교수 연구팀은 불소 치환 위치에 따른 PEI 및

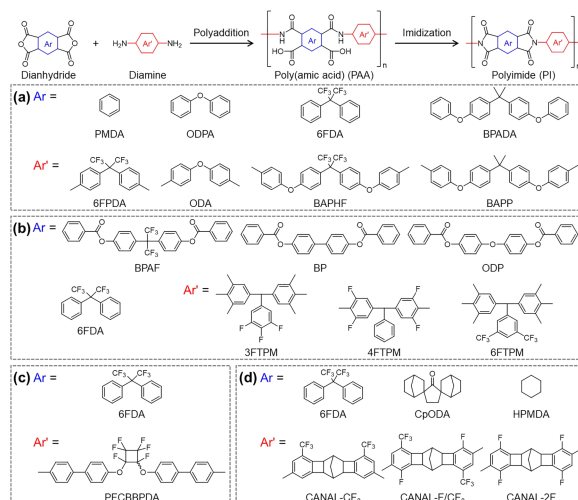


그림 2. 불소화된 폴리이미드의 대표적인 화학 구조. (a) Chen 교수 연구팀,¹⁶ (b) Zhao 교수 연구팀,¹⁷ (c) Huang 박사 연구팀,¹⁸ Yan 박사 연구팀.¹⁹

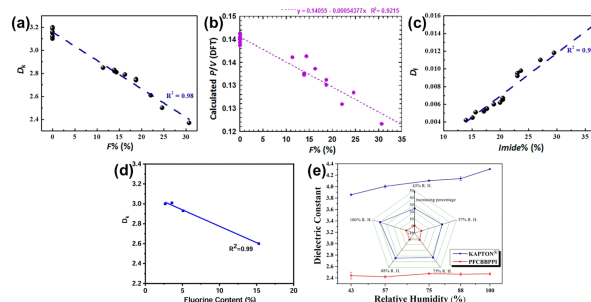


그림 3. 대표적인 불소화 폴리이미드의 유전 거동 그래프. (a) 불소 함량(F%)에 따른 D_k 값 거동, (b) P/V_{DFT} 와 F% 간의 상관관계, (c) 이미드 함량에 따른 D_f ,¹⁶ (d) 다양한 PEI에서 F%에 따른 D_k 값 거동.¹⁷ (e) PFCBBPI의 상대습도 조건에 따른 D_k 값 거동.¹⁸

LCPEI의 유전 특성을 조사했으며, $-CF_3$ 치환체에 의해 분자 부피가 증가하고 D_k 가 낮아짐을 확인했다(LCPEI-6F, $D_k = 3.04$; PEI-6F25AF, $D_k = 2.67$).¹⁷ 불소화 PEI의 D_k 는 0.0067–0.0141 범위로, 전통적 방향족 PI($D_k \approx 0.014$)와 LCPEI($D_k \approx 0.0028$) 사이의 값을 나타냈다(그림 3d).

Huang 박사 연구팀은 PFCB(perfluorocyclobutyl) 비페닐 에터 작용기를 포함하는 PI를 합성하여, 낮은 D_k (2.43 at 1 MHz)와 우수한 내습성 및 소수성을 확보했다(그림 3e).¹⁸ 또한 강직한 비페닐 세그먼트로 인해 높은 열 안정성($T_{d5\%} = 510.5^\circ\text{C}$, $T_g = 310.3^\circ\text{C}$)을 달성했다.

마지막으로, Yan 박사 연구팀은 불소화 CANAL(catalytic arene-norbornene annulation) PI를 합성했으며, 특히 6FDA 기반 구조에서 $D_k = 2.59$ –2.76, $D_f = 0.004$ –0.007로 가장 우수한 성능을 보였다.¹⁹ N2BC(norbornyl benzocyclobutene) 세그먼트 도입은 높은 분자 부피를 제공하여 유전 특성을 개선했으며, CANAL-2F 기반 폴리이미드는 T_g 443–479 $^\circ\text{C}$ 의 가장 높은 값을 나타냈다.

2.4 에스터기를 갖는 폴리이미드의 유전 특성

D_k 는 본질적으로 분자 간 마찰 및 쌍극자 운동(dipolar motion)에 기인하는데, 이는 분자 운동성을 억제하고 구조적 규칙성을 강화함으로써 효과적으로 감소시킬 수 있다.

에스터 작용기는 강직하고 평면적인 기하학적 특성을 가지므로, 사슬 결정성(chain crystallinity)과 분자 간 응집력을 촉진하여 쌍극자의 재배향을 억제하고, 결과적으로 분극 관련 에너지 손실을 줄이는 역할을 한다.³⁹ 최근 연구들에 따르면, 에스터 구조를 포함한 폴리이미드가 10 GHz에서 약 0.001–0.002 수준의 매우 낮은 저손실 특성을 보이는 것으로 보고되었다. 대표적인 에스터기를 갖는 폴리이미드의 화학 구조는 그림 4에 도시했으며, 이들의 유전 특성은 그림 5에 도시했다.

Liu 교수 연구팀은 TAHQ-TFMB 기반 에스터화된 폴리이미드를 합성하여, 최적 반응 조건에서 높은 결정화도(41.4%)와 액정 유사 구조를 형성함으로써 10 GHz에서 매우

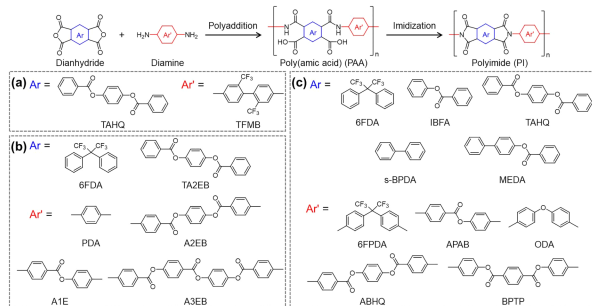


그림 4. 에스터기를 갖는 폴리이미드의 대표적인 화학 구조. (a) Liu 교수 연구팀,⁴⁰ (b) Lu 교수 연구팀,⁴¹ (c) Lu 교수 연구팀.³⁵

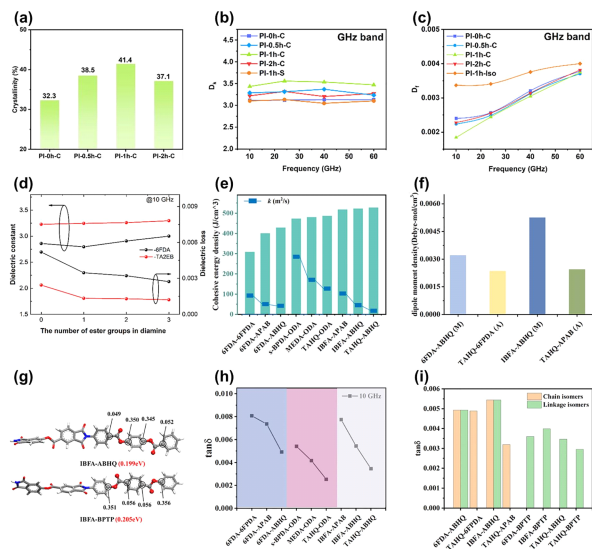


그림 5. (a) 서로 다른 조건에서 합성된 TAHQ/TFMB 시료의 결정화도, 주파수에 따른 (b) D_k 값과 (c) D_f 값.⁴⁰ (d) 에스터기 함량에 따른 다양한 폴리이미드의 D_k 및 D_f 값.⁴¹ (e) 에스터기 도입 위치(디아민, 산이무수물, 또는 모두)에 따른 응집 에너지 밀도, (f) 쌍극자 모멘트 밀도, (g) 평균 양전하 밀도, (h) D_k 값 경향, (i) 에스터 결합을 포함하는 폴리이미드의 이성질체에 따른 D_k 값 경향.³⁵

낮은 $D_f = 0.00184$ 를 달성했다.⁴⁰

Lu 교수 연구팀은 에스터기의 수가 다른 디아민(A1E, A2EB, A3EB)으로 폴리이미드를 합성하고, 에스터기 함량 증가에 따라 결정화도(27.3–36.8%)와 응집 에너지 밀도(CED)가 향상되며, A3EB-TA2EB 기반 폴리이미드가 10 GHz에서 가장 낮은 $D_k = 0.00127$ 를 기록함을 보고했다.⁴¹

이후 이 연구팀은 에스터의 위치, 함량, 이성질체 효과를 비교한 결과, 에스터기 도입이 CED를 높여 일관된 D_k 저감을 유도함을 확인했다.³⁵ 특히 에스터기를 포함한 산이무수물 구조로 합성된 폴리이미드(TAHQ-6FPDA)에서 D_k 저감 효과가 더 뚜렷했으며, IBFA-BPTP는 전하 비편재화 억제로 IBFA-ABHQ보다 낮은 D_k 를 나타냈다.

3. 결론

본 총설에서는 폴리이미드의 유전 특성 발현 원리를 화학 구조적 관점에서 고찰하고, 최근 연구 동향을 정리하였다. 특히, 불소화는 전기음성도가 큰 불소 치환기를 도입하여 분자 분극률을 억제하고 자유부피를 증가시킴으로써 D_k 를 효과적으로 낮출 수 있었다. 한편, 에스터 구조 도입은 강직하고 평면적인 기하학적 구조를 바탕으로 사슬 규칙성과 사슬 간 응집력을 향상시킴으로써 쌍극자 재배향을 억제하고 D_k 를 크게 저감하는 데 탁월한 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 D_k 와 D_f 의 저감을 위해서는 단일 요인에 집중하기보다, 분자 분극률, 사슬 규칙성, 응집 에너지 밀도, 자유부피 제어 등 다차원적 구조-물성 상관성을 고려한 통합적 분자 설계가 필요함을 시사한다. 또한, 최근에는 분자동역학 시뮬레이션과 전자구조 계산 등 계산 기반 예측 기법이 병행되면서, 효율적인 분자 설계와 합성 방향 설정에 중요한 역할을 하고 있다. 향후 연구는 불소화, 에스터화 방법 외에도, 비평면 구조, 지환족 구조, 가교결합 제어 등 다양한 분자구조의 적용을 통해 D_k 와 D_f 를 동시에 극소화하는 방향으로 확장될 것으로 전망된다. 더 나아가, 수분 흡수 억제, 기계적 유연성 확보, 대면적 가공 공정과의 호환성 등 실용적 과제 해결이 병행되어야 하며, 이를 통해 궁극적으로 초고주파·저손실 소자에 최적화된 차세대 폴리이미드 기반 유전체 개발이 가속화될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. J. Hecht, *Nature*, **536**, 139, (2016).
2. M. A. Bolanos, *IEEE 2005 International Symposium on Electronics Materials and Packaging*, **6** (2005).
3. A. Lancaster and M. Keswani, *Integr.*, **60**, 204 (2018).
4. W. Volksen, R. D. Miller, and G. Dubois, *Chem. Rev.*, **110**, 56 (2010).

5. J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **32**, 1065 (2014).
6. H. Treichel, *J. Electron. Mater.*, **30**, 290 (2001).
7. G. Maier, *Prog. Polym. Sci.*, **26**, 3 (2001).
8. Z. Hu, X. Liu, T. Ren, H. A. M. Saeed, Q. Wang, X. Cui, K. Huai, S. Huang, Y. Xia, K. Fu, J. Zhang, and Y. Chen, *J. Polym. Eng.*, **42**, 677 (2022).
9. O. S. Bakam Nguenouho, A. Chevalier, B. Potelon, J. Benedicto, and C. Quendo, *Sci. Rep.*, **12**, 1 (2022).
10. D. Pringle, G. Dubuis, and H. Eicken, *J. Glaciol.*, **55**, 81 (2009).
11. M. Qin, L. Zhang, and H. Wu, *Adv. Sci.*, **9**, 1 (2022).
12. X.-Y. Zhao and H.-J. Liu, *Polym. Int.*, **59**, 597 (2010).
13. U. Ray, *5G/6G mmWave Materials and Electrical Test Technology Roadmap*, **41** (2023).
14. I. K. Shundrina, T. A. Vaganova, S. Z. Kusov, V. I. Rodionov, E. V. Karpova, and E. V. Malykhin, *J. Fluor. Chem.*, **132**, 207 (2011).
15. S.-H. Hsiao, W. Guo, C.-L. Chung, and W.-T. Chen, *Eur. Polym. J.*, **46**, 1878 (2010).
16. C.-C. Kuo, Y.-C. Lin, Y.-C. Chen, P.-H. Wu, S. Ando, M. Ueda, and W.-C. Chen, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **3**, 362 (2021).
17. W. Zhang, Z. Peng, Q. Pan, S. Liu, and J. Zhao, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **5**, 141 (2023).
18. M. Jia, Y. Li, C. He, and X. Huang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 26352 (2016).
19. M. Zhang, J. Miao, Y. Xu, Z. Wang, and J. Yan, *Macromolecules*, **55**, 7992 (2022).
20. R. Sawada and S. Ando, *Macromolecules*, **55**, 6787 (2022).
21. M.-C. Mi, F.-E. Szu, Y.-C. Cheng, C.-H. Tsai, J.-H. Chen, J.-H. Huang, C.-C. Kuo, Y.-C. Lin, M.-K. Leung, and W.-C. Chen, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **6**, 11137 (2024).
22. Y. Watanabe, Y. Shibasaki, S. Ando, and M. Ueda, *J. Polym. Sci. Part A. Polym. Chem.*, **42**, 144 (2004).
23. S. Miyane, C.-K. Chen, Y.-C. Lin, M. Ueda, and W.-C. Chen, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **3**, 3153 (2021).
24. Z. Ning, Y. Yan, J. Wang, C. Zhao, L. Chen, L. Zong, and Y. Xiao, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **6**, 5434 (2024).
25. J. Lu, Y. Zhang, J. Li, M. Fu, G. Zou, S. Ando, and Y. Zhuang, *Macromolecules*, **56**, 2164 (2023).
26. Y.-H. Lee, J.-W. Lin, Y.-C. Huang, Y.-J. Huang, M.R. Busireddy, J.-T. Chen, and C.-S. Hsu, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **5**, 10196 (2023).
27. R. Bei, K. Chen, Q. Liu, Y. He, C. Li, H. Huang, Q. Guo, Z. Chi, J. Xu, Z. Chen, S. Liu, and Y. Zhang, *Macromolecules*, **57**, 2142 (2024).
28. W. Dou, T. Li, X. Zhang, and A. He, *Prog. Org. Coat.*, **196**, 108708 (2024).
29. X. Dong, B. Wan, and J.-W. Zha, *Chem. Rev.*, **124**, 7674 (2024).
30. Y. Li, G. Sun, Y. Zhou, G. Liu, J. Wang, and S. Han, *Prog. Org. Coatings*, **172**, 107 (2022).
31. T. W. Dakin, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, **22**, 11 (2006).
32. J. O. Simpson and A. K. St. Clair, *Thin Solid Films*, **308**, 480 (1997).
33. L. Lai, Y. Bi, B. Niu, G. Yu, Y. Li, G. Ding, and Q. Xu, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **63**, 2024 (2024).
34. L. Wang, J. Yang, W. Cheng, J. Zou, D. Zhao, *Front. Mater.*, **8**, 774 (2021).
35. X. He, S. Zhang, C. Zhang, P. Xiao, F. Zheng, and Q. Lu, *Polymer*, **308**, 127 (2024).
36. M.A. Sattar and A. Patnaik, *ACS Omega*, **5**, 21191 (2020).
37. Y.-C. Cheng, Y.-C. Chen, Y.-C. Lin, C.-C. Kuo, and W.-C. Chen, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **5**, 7907 (2023).
38. C. Yao, Y. Zhu, K. Gu, J. Zhao, J. Ning, D. F. Perepichka, Y.-L. Loo, and H. Meng, *J. Mater. Chem. A*, **8**, 12149 (2020).
39. W. Xu, X. He, Y. Zhou, L. Jiang, W. Yang, Q. Lu, and P. Xiao, *Polymers*, **17**, 1505 (2025).
40. Q. Yin, Y. Qin, J. Lv, X. Wang, L. Luo, and X. Liu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **61**, 17894 (2021).
41. C. Zhang, X. He, and Q. Lu, *Eur. Polym. J.*, **200**, 112544 (2023).