

전송선로에 적용한 Low-k 고분자 복합 잉크 개발

남현진 · 정재웅 · 서덕진 · 김지수 · 유종인 · 박세훈[†]

한국전자기술연구원 ICT디바이스패키징연구센터

Low-k Polymer Composite Ink Applied to Transmission Line

Hyun Jin Nam, Jae-Woong Jung, Deokjin Seo, Jisoo Kim, Jong-In Ryu, and Se-Hoon Park[†]

ICT device packaging Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI),
Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea

(Received June 10, 2022; Revised June 20, 2022; Accepted June 21, 2022)

초 록: 칩사이즈가 작아짐에 따라 선폭 또한 미세화되면서 인터커넥션의 밀집정도가 증가하고 있다. 그로 인해 캐패시터 층과 전기전도층의 저항 차이로 인해 RC delay가 문제되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 높은 전기전도도의 전극과 낮은 유전율의 유전체 개발이 요구된다. 본 연구에서는 PCB (Print Circuit Board)의 회로를 외부요인으로부터 보호하는 상용 PSR (photo solder resist)과 우수한 내열 및 저유전 특성을 보유한 PI (polyimide)를 혼합하여 저유전체 잉크 개발을 진행하였다. 그 결과 PSR과 PI를 10:3으로 혼합한 잉크가 가장 우수한 결과를 보였으며 20 GHz와 28 GHz에서 각각 유전 상수 약 2.6, 2.37을 보였고, 유전손실은 약 0.022, 0.016으로 측정되었다. 차후 어플리케이션 적용 가능성 검증을 위해 테프론에 제작된 다양한 선폭의 전송선로에 평가하였으며 그 결과, PSR만 사용했을 때보다 PI와 혼합한 저유전체 잉크를 사용한 전송선로의 손실이 S21에서 평균 0.12 dB 덜 감소한 결과를 보였다.

Abstract: As the chip size gets smaller, the width of the electrode line is also fine, and the density of interconnections is increasing. As a result, RC delay is becoming a problem due to the difference in resistance between the capacitor layer and the electrical conductivity layer. To solve this problem, the development of electrodes with high electrical conductivity and dielectric materials with low dielectric constant is required. In this study, we developed low dielectric ink by mixing commercial PSR which protect PCB's circuits from external factors and PI with excellent thermal property and low-k characteristics. As a result, the ink mixture of PSR and PI 10:3 showed the best results, with a dielectric constant of about 2.6 and 2.37 at 20 GHz and 28 GHz, respectively, and dielectric dissipation was measured at about 0.022 and 0.016. In order to verify the applicability of future applications, various line-width transmission lines produced on Teflon were evaluated, and as a result, the loss of transmission lines using low dielectric ink mixed with PI was 0.12 dB less on average in S21 than when only PSR was used.

Keywords: dielectric materials(low-k), transmission line, dielectric constant, PSR/PI hybrid polymer ink

1. 서 론

집적회로의 소형화로 5세대(5G) 이동통신 시대가 가속화되고 있으며 그로 인한 interlayer의 고성능화가 과거부터 현재까지 요구되고 있다.¹⁻⁵⁾ 회로의 크기가 작아지면서 전극과 interlayer 사이에 금속 저항과 유전층에 의해 RC delay, crosstalk noise, 전력 손실 등의 문제로 칩 성능의 향상을 저해하는 요소로 자리 잡고 있다.⁶⁻⁸⁾ 저유전체는 전류가 흐르는 통로에 유전율이 낮은 소재를 통해 전류 이동 중 손실이 발생하지 않게 한다. 이를 해결

하기 위해서는 유전율이 낮은 소재 개발이 필수적으로 요구된다.^{9,10)} 유전체는 전기장 안에서 극성을 띄며 전기장의 전위차 감소를 통해 전위차만큼의 에너지를 저장한다.¹¹⁾ 이런 유전체는 현재 반도체, micro-electronics, TFT 등과 같은 많은 어플리케이션에 사용된다.¹²⁾ 현재 가장 많이 사용되고 있는 유전체 소재는 SiO₂로 유전 상수는 3.9-4.2 정도로 나타난다.⁹⁾ 그 외에도 SiOF,¹³⁾ SiCOH (k ~ 2.5)¹⁴⁾ 등 많은 연구가 진행되고 있다.

무기 재료 외에도 유기 고분자 재료의 연구가 진행되고 있는데 그 이유로는 유기 재료의 장점인 고유의 저

[†]Corresponding author
E-mail: psh104@keti.re.kr

© 2022, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분자 극성, 다양한 단량체 선택성, 우수한 가공성 및 기존 무기 재료와의 편리한 혼합으로 인해 다양한 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 연구되는 유기 고분자 재료들은 polyarylether (PAE, $k \sim 2.4$),¹⁵⁾ polyimide (PI, $k \sim 4.5$),¹⁶⁾ parylenes-c,¹⁷⁾ polytetrafluoroethylene (PTFE),¹⁸⁾ and benzocyclobutene resin (BCB, $k \sim 2.3-2.8$)¹⁹⁻²¹⁾ 등이 있다. 산화물 기반의 무기 재료가 유기 재료에 비해 높은 경도, 저장용량 및 낮은 누설 특성으로 유전체 특성이 우수하지만,²²⁻²³⁾ 차세대로 떠오르고 있는 롤러블, 웨어러블 그리고 플렉서블 전자소자까지 적용이 한계가 있다.²⁴⁾ 따라서 기존의 높은 경도와 낮은 플렉서블 특성을 보이는 산화물 소재와 달리 플렉서블하고 신축성을 보유한 유기 소재의 유전체가 더욱 주목받고 있다.²⁵⁻²⁶⁾

본 논문에서는 낮은 유전율을 보유한 소재를 향후 PCB에 간단하고 빠르게 적용할 수 있게 액상으로 개발을 진행하였다.²⁷⁾ PCB에 전자부품을 탑재하는 곳 이외의 부품을 보호하고 솔더링 공정 진행시 Solder Bridge를 방지하는 역할을 하는 기능성 잉크인 PSR을 내열 특성과 유전체 특성이 우수한 PI를 혼합하여 저유전 잉크 개발을 진행하였다. 차후 플렉서블 특성을 보여야 하므로 유연한 PSR과 PI 잉크를 사용했다. PSR과 PI 잉크의 혼합 비율은 10:0(P1), 10:1(P2), 10:2(P3), 10:3(P4)으로 총 4가지 배합에 따라 진행하였으며 인쇄전자 공정 중 코팅 공정을 적용하여 필름으로 제작하였다. 필름으로 제조 공정을 진행할 때 간편한 공정인 열 경화와 광 경화 방식을 통해 필름으로 제작하였다. 제작된 필름을 20 GHz와 28 GHz에서 유전율과 유전손실 값을 측정하였고 차후 어플리케이션 적용을 검토하기 위해 전송선로에 적용하여 VNA (Vector Network Analyzer)를 통해 평가를 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1. Low-k 고분자 잉크 제작

코팅 공정으로 필름을 제작하기 위해서는 유동성을 보유한 고분자를 사용해야 한다. 먼저 유동성을 보유한 두 고분자를 사용하여 제작하였다. 첫 번째로 Low-k 잉크에서 주체 역할의 고분자는 (주)서울화학연구소의 PSR (Photoimageable Solder Resist) 잉크이며 2액형 타입의 SPI-606G 모델로 유연 특성을 보유하고 있다. PSR은 주체와 경화제를 3:1의 비율로 혼합하였고 첨가제로는 (주)호전에이블에서 제공받은 PI 잉크를 사용하였다. PSR과 PI를 총 4가지 배합비율(10:0, 10:1, 10:2, 10:3)로 혼합하여 Table 1에 표시하였다. 혼합 방식은 고속 페이스트 믹서로 진행하였다.

2.2. Low-k 경화 및 평가

이형 필름 위에 두께 100 μm 의 바코터로 잉크를 고르게 도포한 후 경화 공정을 통해 필름으로 제작하였다. 도포 직후 120°C에서 10분간 soft bake를 진행하였다. 그 후

Table 1. Mixing ratio of PSR/PI hybrid ink.

	PSR-A	Hardner	PI
P1	7.5	2.5	0
P2	7.5	2.5	1
P3	7.5	2.5	2
P4	7.5	2.5	3

UV lamp를 통해 700 mJ의 에너지로 광 경화를 진행하였다. 마지막으로 150°C에서 50분간 hard bake를 진행한 뒤 이형 필름에서 low-k 필름을 분리하였다. 분리한 필름을 KEYSIGHT PNA Network Analyzer N5224B로 20 GHz와 28 GHz 영역에서 유전율과 유전손실을 측정하였다. 여기서 주 분석 방향은 PI 함량에 따른 필름의 유전율과 유전손실의 변화를 주로 관찰하였다. 또한 FTIR을 통하여 내부 구조 변화를 분석하였다. 경화 전후 PSR, PSR/PI, PI의 peak 변화를 관찰하였으며, 변화한 peak와 유전율 및 유전손실의 관계를 관찰하였다.

마지막으로 가장 우수한 특성을 나타내는 low-k 폴리머 잉크를 전송선로에 코팅 후 향후 어플리케이션에 적용 가능성을 검증하였다. 테프론 기판에 제작된 전송선로 선폭 295 μm 로 레퍼런스로서 지정하였으며, 비교군으로 선폭 240~290 μm 로 다양한 선폭에 적용하였다. 이때 각각 low-k 잉크와 PSR만 코팅한 전송선로와 코팅하지 않은 전송선로를 비교하였다. 여기서 encapsulation 공정으로 전송선로 및 소자를 쇼트나 외력으로부터 보호할 때 PI가 혼합된 low-k 폴리머 잉크가 혼합되지 않은 PSR 잉크에 비해 전송선로의 손실 값이 얼마나 변화하는지를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Low-k 20GHz/28GHz 유전율 및 유전손실 결과와 FTIR 분석

Table 2에는 PSR과 PI를 혼합한 순서대로 P1, P2, P3, P4로 명명하였다. P1부터 P4까지 20 GHz에서 유전 상수는 순서대로 약 3.26, 3.18, 2.79, 2.60으로 측정되었고, 유전손실은 각각 약 0.038, 0.037, 0.023, 0.022정도로 측정되었다. 또한 28 GHz에서는 유전 상수는 순서대로 3.07,

Table 2. Value of dielectric constant and dielectric dissipation (20 GHz and 28 GHz).

	20 GHz (dielectric constant)	20 GHz (dielectric dissipation)	20 GHz (dielectric constant)	28 GHz (dielectric dissipation)
P1	3.261649	0.037607	3.072618	0.02469
P2	3.17988	0.036801	2.843553	0.021063
P3	2.788225	0.023369	2.754326	0.017124
P4	2.598156	0.02238	2.368852	0.015748

2.84, 2.75, 2.37로 측정되었으며, 유전손실은 각각 약 0.025, 0.021, 0.017, 0.016으로 20 GHz와 28 GHz 모두 PI 함량이 높아질수록 유전율과 유전손실 값이 주파수 영역 상관없이 감소하는 경향을 나타냈다. PSR에 PI를 혼합하여 경화 과정을 수행할 때 특정 반응이 추가로 진행되어 특정 결합의 변화로 유전율과 유전손실의 변화가 발생한 것으로 유추하고 FTIR로 peak 분석을 진행하였다. Fig. 1(a)는 실험에 사용된 소재들의 peak 결과이다. PSRC는 경화 공정이 끝난 PSR 필름이고, P3C는 PSR과 PI을 3:1로 혼합한 P4변을 경화된 필름을 뜻한다.

먼저 PSR로만 제작된 필름의 경화 전후 peak 변화 관찰을 해보면 상당수 peak가 감소한 것을 알 수 있다(Fig. 1(b)). 1,660-1,690 cm^{-1} 에서 alkene group에 근거한 C=C peak를 확인할 수 있다. UV 광에 의해 생성된 라디칼이 상대적으로 약한 결합인 C=C bond의 결합을 공격하고 그로 인해 구조가 틀어지면서 전체적인 peak에 변화를 준 것이라 유추한다. Fig. 1(c)는 PSR과 PI를 10:3으로 혼합한 P4 필름의 경화 전후의 peak를 비교하였다. 앞선 결과와 마찬가지로 전체적인 분석된 peak가 상당수 감소하였으며 Fig. 1(d)에서 확인한 결과 기존 PSR만 사용한 필름보다도 peak가 더 적게 확인되었다. Fig. 1(e)에서 PI와 P4의 peak를 비교해본 결과, PI가 PSR보다 더 많은 C=C을 많이 가지고 있었으며, 광 경화 후 PSR보다 더 많은 반응이 발생하여 peak가 감소한 것을 유추할 수 있다. 현재 결과에서는 FTIR 측정시 peak 검출량이 작아지면 유전율과 유전손실이 감소하는 것을 연관 지을 수 있다.

3.2. 다양한 길이의 전송선로 평가

20~40 GHz 주파수 영역인 VNA로 측정을 진행하였다(Fig. 2(a)). 총 20 GHz 구간을 1601개의 포인트로 나타냈다. 사용된 probe 타입은 250 μm 의 pitch를 보유한 GSG (GROUND-SIGNAL-GROUND) probe를 사용하였고, Cal method는 TOSM (through, open, short and match)로 진행하였다.²⁸⁾ Fig. 2(b)는 PSR로만 제작된 P1으로 encapsulation한 전송선로의 사진이고, Fig. 2(c)는 PSR과 PI를 10:3으로 혼합한 P4로 encapsulation한 전송선로의 사진이다. Fig. 2(d)는 PSR만으로 encapsulation 공정 전후 설정한 calibration 결과를 비교하기 위한 샘플 사진이다. 선폭 295 μm 를 레퍼런스로 지정하였으며 그 결과를 Fig. 3(a-b)에 나타냈다. 1012로 표기된 것은 encapsulation 공정을 하지 않은 전송선로이고, 1025로 표기된 것은 encapsulation 공정을 진행한 전송선로이다. 그 결과 28 GHz에서 S11은 16.78 dB에서 15.47 dB로 감소하였고, S21도 2.514dB에서 2.512 dB로 감소하였다. 유전체를 encapsulation하면 전극의 전체 공간 중 가장 윗부분의 전자 이동이 제약이 생겨 전기전도도가 감소하게 된다. 이로 인해 손실 값이 많이 발생하게 된다.

Fig. 4(a-d)는 전송선로의 선폭별 encapsulation 공정 후 S11의 insertion loss 값을 비교하였다. P1으로 encapsulation한 전송선로의 선폭 240 μm , 270 μm , 290 μm 에서 각각 -11.34 dB, -13.52 dB, -14.48 dB로 측정되었고, P4로 encapsulation한 동일선폭에서는 각각 -10.55 dB, -11.67 dB, -13.67 dB로 P1보다 P4의 감소량이 더 적었다.

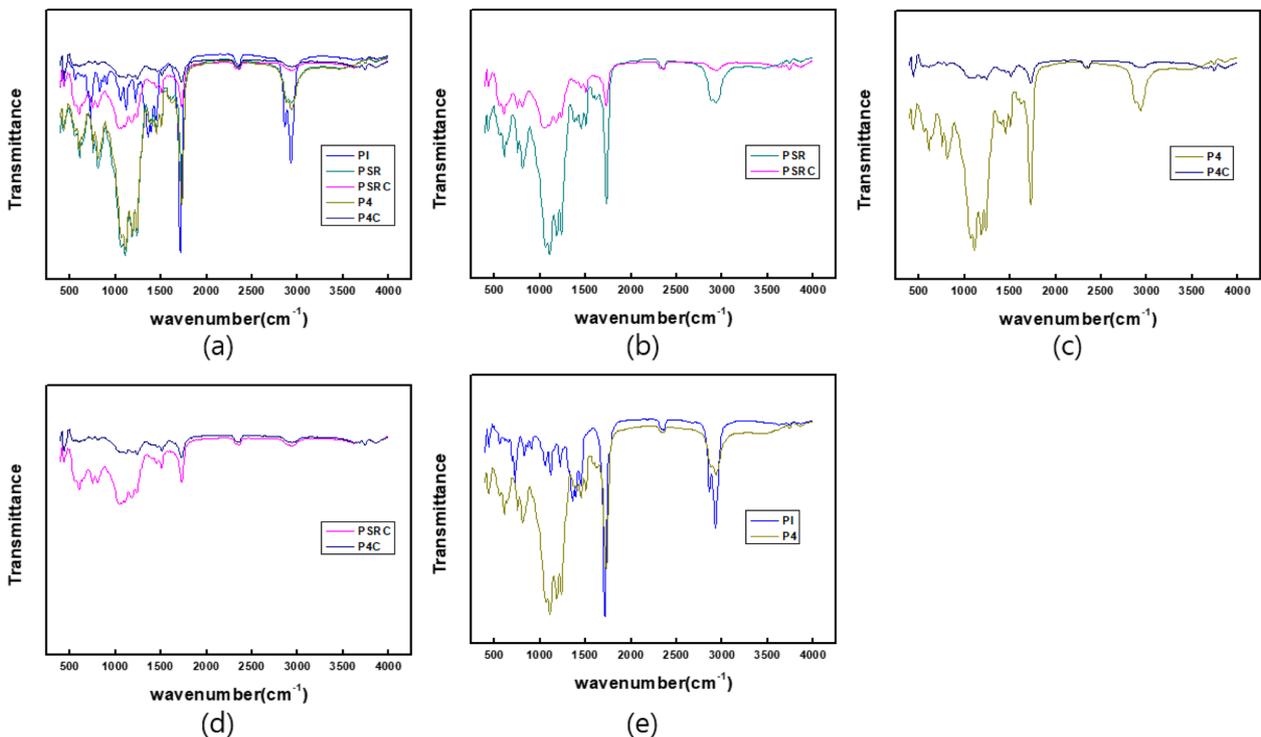


Fig. 1. FTIR measurement results of low-k hybrid polymer ink. (a) all materials, (b) non-cured and cured of P1 ink, (c) non-cured and cured of P4 ink, (d) cured P1 and P4 ink, (e) PI and P4 ink.

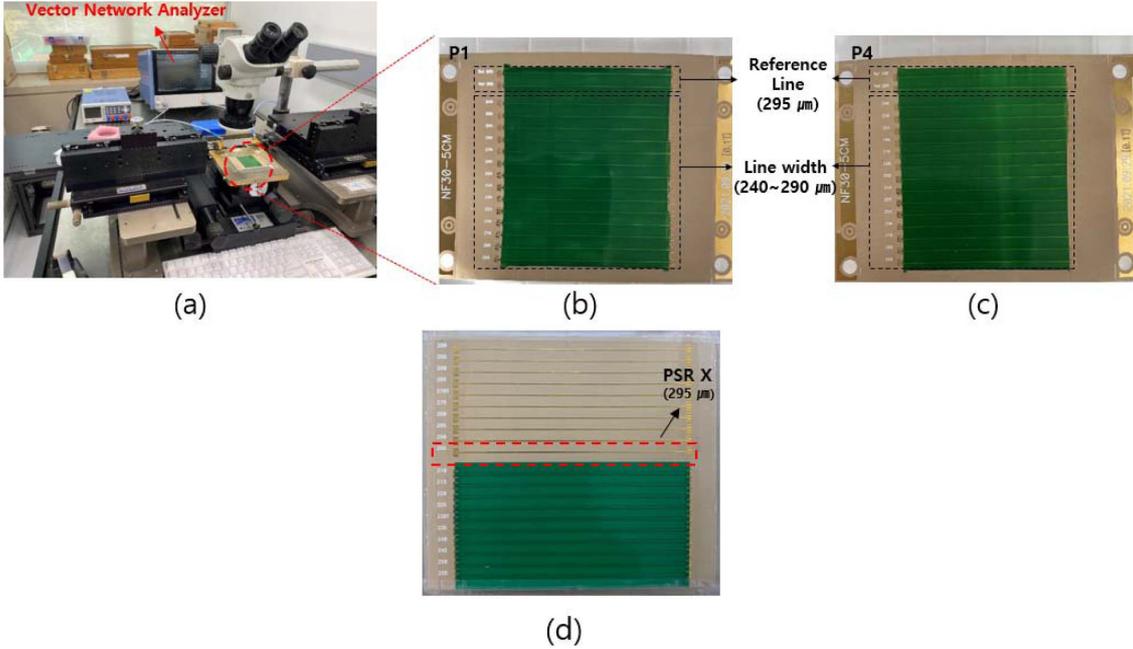


Fig. 2. Image of (a) Vector network analyzer, Transmission lines encapsulated with (b) P1 ink and (c) P4 ink, (d) samples for calibration.

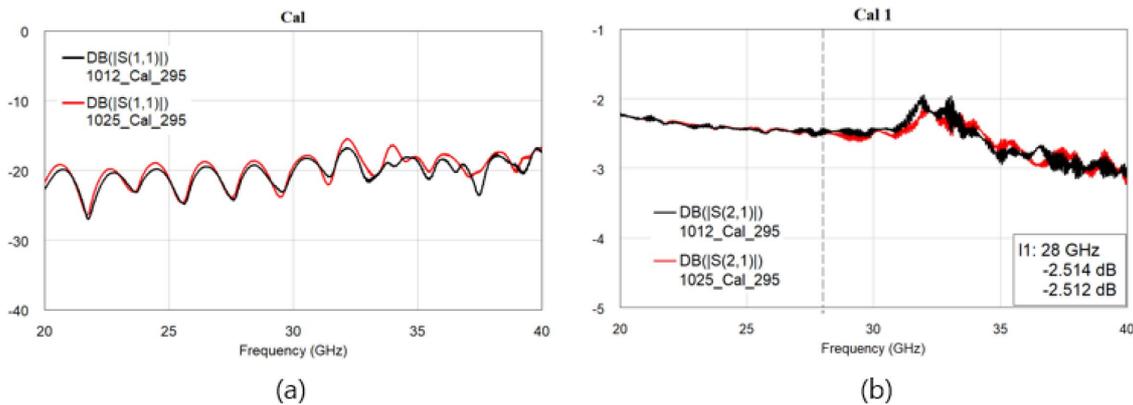


Fig. 3. Calibration results of VNA. (a) S11, (b) S21.

전송선로의 선폭별 encapsulation 공정 후 S21의 insertion loss 값을 Table 3에 표시하여 나타냈다. P1 encapsulation 소재는 평균 0.72 dB의 손실이 발생했고, P4 encapsulation 소재는 평균 0.6 dB의 손실이 발생했다. 전체적으로

encapsulation 공정 전보다 후에 손실이 모두 증가하였으나 유전율이 낮은 P4로 encapsulation한 전송선로의 경우 insertion loss의 변화가 적었다. 앞선 S11의 결과를 참고하여 전송선로의 선폭이 증가할수록 S11의 최대 peak가

Table 3. VNA measurement value by line width of transmission line according to encapsulation materials.

S21 width	P1 encapsulation			P4 encapsulation		
	Before	After	Delta	Before	After	Delta
240μm	-3.01dB	-3.82dB	-0.81dB	-2.98dB	-3.60dB	-0.62dB
250μm	-2.92dB	-3.66dB	-0.74dB	-2.90dB	-3.51dB	-0.61dB
255μm	-2.86dB	-3.56dB	-0.70dB	-2.85dB	-3.46dB	-0.61dB
260μm	-2.86dB	-3.59dB	-0.73dB	-2.86dB	-3.49dB	-0.63dB
270μm	-2.84dB	-3.52dB	-0.68dB	-2.81dB	-3.41dB	-0.60dB
280μm	-2.76dB	-3.45dB	-0.69dB	-2.77dB	-3.35dB	-0.58dB
290μm	-2.74dB	-3.41dB	-0.67dB	-2.69dB	-3.24dB	-0.55dB

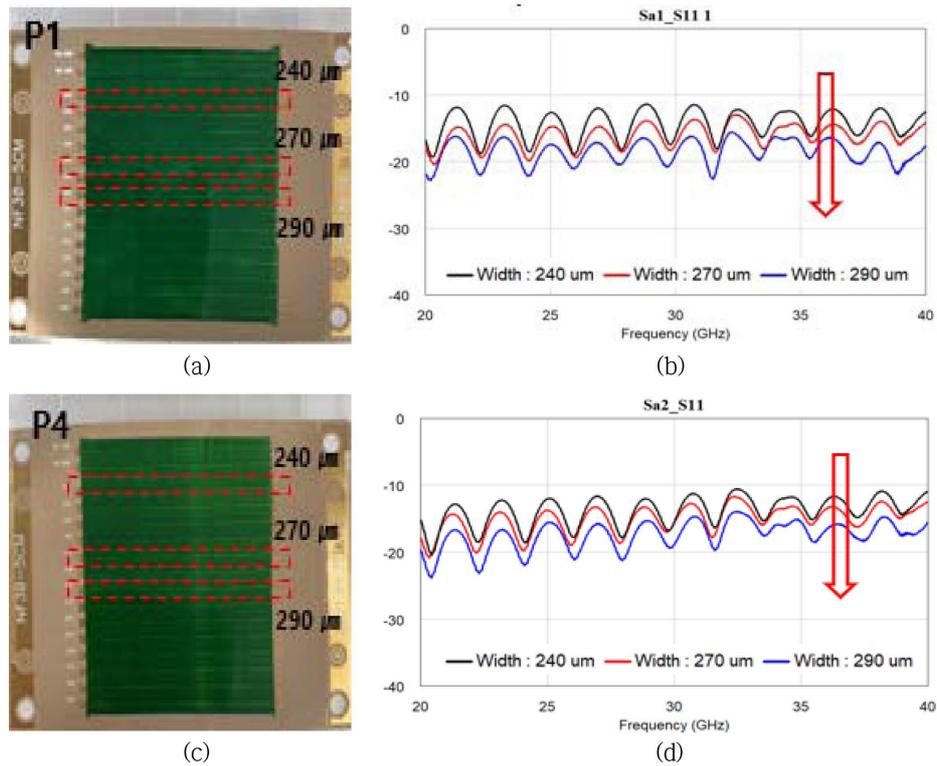


Fig. 4. Transmission line encapsulated of P1 ink (a) image, (b) S11 measurement results and P4 ink (c) image, (d) S11 measurement results.

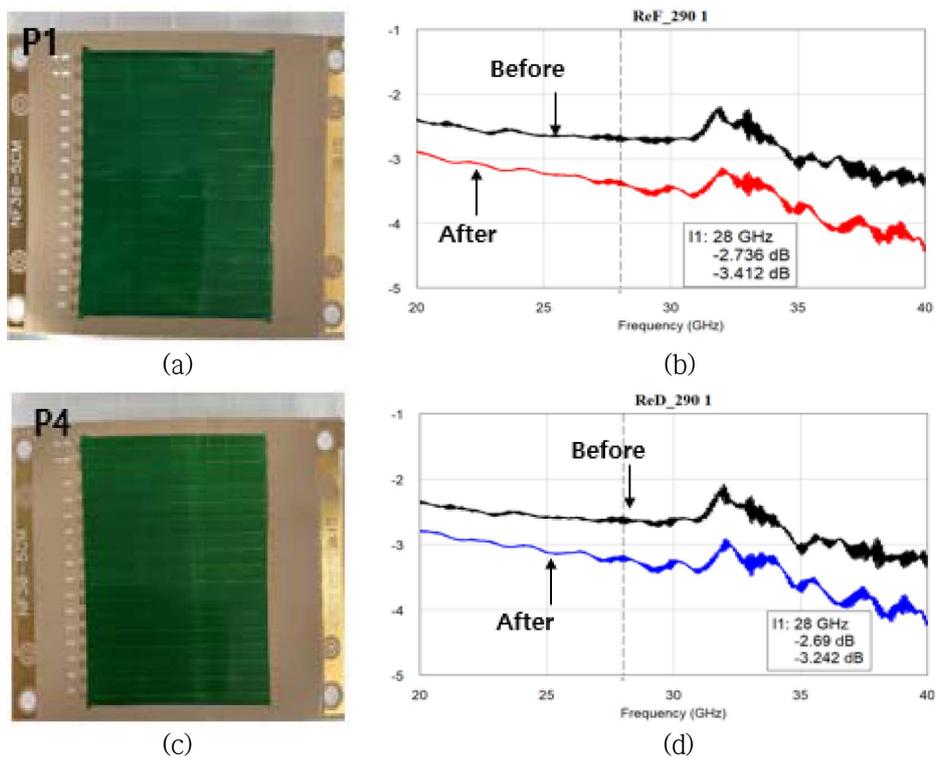


Fig. 5. Transmission line encapsulated of P1 ink (a) image, (b) S21 measurement results and P4 ink (c) image, (d) S21 measurement results.

감소하는 것을 적용하여 S21 결과 중 290 μm 선폭의 결과를 Fig. 5(a-d)로 나타냈다. S21에서 P1 encapsulation 공정을 진행한 것의 최대 peak의 변화는 -2.74 dB에서

-3.41 dB로 -0.67 dB의 차이가 났고, P4 encapsulation 공정을 진행한 것은 -2.69 dB에서 -3.24 dB로 -0.55 dB의 변화가 나타났다. 차후 어플리케이션 적용을 위해서는 낮

은 유전율의 encapsulation 소재를 적용해야 한다.

5. 결 론

이처럼 전송선로 외에도 안테나, 반도체, 자율주행자동차 등등 다양한 소재에 적용할 때는 전극의 특성을 최대한 유지하기 위해 유전율이 낮은 소재가 필수적으로 사용되어야 한다. 간편하게 코팅 또는 인쇄 가능한 고분자 잉크 타입으로 개발된 저유전 PSR/PI hybrid 소재를 개발하였다. 개발된 소재는 20GHz와 28GHz에서 각각 유전 상수 약 2.6, 2.37을 보였고, 유전손실은 약 0.022, 0.016으로 나타났다. 차후 어플리케이션 적용 가능 여부를 확인하기 위해 다양한 선폭의 전송선로에 적용하여 VNA를 통해 측정하였다. 그 결과 유전율이 더 낮은 P4로 encapsulation한 전송선로의 결과가 평균 0.12 dB 덜 감소하였다. 차후에는 첨가제를 추가해 insertion loss 차이를 더 줄일 수 있는 소재 개발을 진행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 산업기술혁신사업의 일환인 “인쇄전자공법이 적용된 30 μ m급 선폭의 고속신호 전송용 초고다층 PCB 기판 개발”지원으로 수행되었습니다(과제번호 20010022).

References

1. M. Zhang, P. Xu, H. Peng, F. Qin, “A Rational Design of Core-Shell-Satellite Structured BaTiO₃ Fillers for Epoxy-Based Composites with Enhanced Microwave Dielectric Constant and Low Loss”, *Compos. B. Eng.*, 215, 108764 (2021).
2. W. Zhao, X. Cao, J. Huang, J. Wen, Y. He, J. Zha, R. K. Y. Li, W. Wu, “Construction of Micro-Branched Crosslink Fluorinated Polyimide with Ultra-Low Dielectric Permittivity and Enhanced Mechanical Properties”, *Express Polym. Lett.*, 16(2), 142-151 (2022).
3. C. C. Chiu, C. C. Lee, T. L. Chou, C. C. Hsia, K. N. Chiang, “Analysis of Cu/Low-k Structure under Back End of Line Process”, *Microelectron. Eng.*, 85(10), 2150-2154 (2008).
4. L. Broussous, W. Puyrenier, D. Rebiscoul, V. Rouessac, A. Ayril, “Porosity and Structure Evolution of a SiOCH Low k Material During Post-Etch Cleaning Process”, *Microelectron. Eng.*, 84(11), 2600-2605 (2007).
5. L. L. Chapelon, E. Petitprez, P. Brun, A. Farcy, J. Torres, “Evaluation of a PECVD Advanced Barrier ($k = 3.7$) for 32 nm CMOS Technology and Below”, *Microelectron. Eng.*, 84(11), 2624-2628 (2007).
6. M. B. Yu, J. Ning, S. Balakumar, V. N. Bliznetsov, G. Q. Lo, N. Balasubramanian, D. L. Kwong, “A Method of Fabricating Metal-Insulator-Metal (MIM) Capacitor in Cu/low-k Backend Interconnection Process for RF Application”, *Thin Solid Films*, 504(1-2), 257-260 (2006).
7. T. S. Chang, T. C. Chang, P. T. Liu, C. Y. Chiang, S. C. Chen, F. S. Yeh, “Application of the Low Dielectric Methyl-Silsequiazane (MSZ) as a Passivation Layer on TFT-LCD”, *Thin Solid Films*, 515(3), 1117-1120 (2006).
8. C. Charles-Alfred, V. Jousseau, “a-SiC:H Low-k Deposition as Copper Diffusion Barrier Layer in Advanced Micro-electronic Interconnections”, *Surf. Coat.*, 201(22-23), 9260-9263 (2007).
9. G. Maier, “Low Dielectric Constant Polymers for Microelectronics”, *Prog. Polym. Sci.*, 26(1), 3-65 (2001).
10. R. K. Hallani, M. Moser, H. Bristow, M. V. C. Jenart, H. Faber, M. Neophytou, E. Yarali, A. F. Paterson, T. D. Anthopoulos, L. McCulloch, “Low-Temperature Cross-Linking Benzocyclobutene Based Polymer Dielectric for Organic Thin Film Transistors on Plastic Substrates”, *J. Org. Chem.*, 85(1), 277-283 (2020).
11. M. Hollerer, D. Lüftner, P. Hurdax, T. Ules, S. Soubatch, F. S. Tautz, G. Koller, P. Puschnig, M. Sterrer, M. G. Ramsey, “Charge Transfer and Orbital Level Alignment at Inorganic/Organic Interfaces: The Role of Dielectric Interlayers”, *ACS Nano*, 11(6), 6252-6260 (2017).
12. A. Liu, G. Liu, H. Zhu, B. Shin, E. Fortunato, R. Martins, F. Shan, “Eco-Friendly Water Induced-Aluminum Oxide Dielectrics and Their Application in a Hybrid Metal Oxide/Polymer TFT”, *RSC Advances*, 5(105), 86606-86613 (2015).
13. P. Xue, J. Feng, C. Xie, L. Wang, A. Tudi, E. V. Tikhonov, K. T. Butler, “Revealing the Crystal Structures and Relative Dielectric Constants of Fluorinated Silicon Oxides”, *J. Mater. Chem. C*, 9(44), 15983-15989 (2021).
14. J. Comeaux, W. Wirth, J. Courville, N. W. Baek, D. Jung, S. Jang, “Etching Characteristics of Low-k SiCOH Thin Films under Fluorocarbon-Based Plasmas”, *Vacuum*, 202, 111165 (2022).
15. Z. Wang, B. Jiang, Y. Zhang, X. Li, Y. Wang, Y. Shang, H. Zhang, “Influence of Crosslink Density on Thermal, Mechanical and Dielectric Properties of Cross-Linked Fluorinated Poly(Aryl Ether)s”, *Eur. Polym. J.*, 172, 111244 (2022).
16. S. Kumar, H. Arumugham, D. Roy, D. Kannaliyan, “Synthesis and Characterization of Fluorine Functionalized Graphene Oxide Dispersed Quinoline-Based Polyimide Composites Having Low-k and UV Shielding Properties”, *Polym. Adv. Technol.*, 33(1), 472-439 (2022).
17. M. Shefali, K. Fatima, U. Sathyakam, “Performance Analysis of CNT Bundle Interconnects in Various Low-k Dielectric Media”, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, (2022).
18. M. Brownell, A. K. Nair, “Deformation mechanisms of polytetrafluoroethylene at the nano- and microscales”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 21(1), 490-503(2019).
19. F. Iervolino, R. Suriano, M. Scolari, I. Gelmi, L. Castoldi, M. Levi, “Inkjet Printing of a Benzocyclobutene-Based Polymer as a Low-k Material for Electronic Applications”, *ACS Omega*, 6(24), 15892-15902 (2021).
20. J. Li, Z. Zhang, T. Zhu, Z. Li, J. Wang, Y. Cheng, “Multi-benzocyclobutene Functionalized Siloxane Monomers Prepared by Piers-Rubinsztajn Reaction for Low-k Materials”, *Eur. Polym. J.*, 126, 109562 (2020).
21. R. K. S. Levchenko, K. A. Chudov, D. Y. Demin, G. E. Adamov, N. O. Poroshin, P. S. Shmelin, E. P. Grebennikov, S. N. Chvalun, V. P. Zubov, “Synthesis of Photo and Thermosetting Monomers and Polymers Based on Benzocyclobutene”, 68(7), 1321-1342 (2019).
22. K. K. Banger, Y. Yamashita, K. Mori, R. L. Peterson, T. Leed-

- ham, J. Rickard and H. Siringhaus, "Low-Temperature, High Performance Solution Processed Metal Oxide Thin-Film Transistors Formed by a 'Sol-Gel on Chip' Process", *Nature Mater.*, 10(1), 45-50 (2011).
23. A. Liu, H. Zhu, H. Sun, Y. Xu and Y.-Y. Noh, "Solution Processed Metal Oxide High-k Dielectrics for Emerging Transistors and Circuits", *Adv. Mater.*, 30(33), 1706364(1)-1706364(39) (2018).
24. B. Nketia-Yawson, Y.-Y. Noh, "Recent Progress on High-Capacitance Polymer Gate Dielectrics for Flexible Low-Voltage Transistors", *Adv. Mater.*, 28(42), 1802201(1)-1802201(27) (2018).
25. A. Azizi, M. R. Gadinski, Q. Li, M. A. AlSaud, J. Wang, Y. Wang, B. Wang, F. Liu, L. Q. Chen, N. Alem and Q. Wang, "High-Performance Polymers Sandwiched with Chemical Vapor Deposited Hexagonal Boron Nitrides as Scalable High-Temperature Dielectric Materials", *Adv. Mater.*, 29(35), 1701864(1)-1701864(7) (2017).
26. Y. Zhou and Q. Wang, "Advanced Polymer Dielectrics for High Temperature Capacitive Energy Storage", *J. Appl. Phys.*, 127(24), 240902(1)-240902(18) (2020).
27. W. Wu, "Inorganic Nanomaterials for Printed Electronics: A Review", *Nanoscale*, 9(22), 7342-7372 (2017).
28. A. Alshabo, D. Stirling, M. Ros, P. J. Vial, B. Wysocki, T. Wysocki, "An Approach to Ultra-Wideband Channel Calibration using a Vector Network Analyser", *Aust. J. Electr. Electron.*, 11(4), 347-356 (2014).