

Low-k parylene 박막 증착 및 특성에 대한 연구

논문
12-4-6

A study on deposition and characterization of low-k Parylene film

허 현*, 서주원**, 김민수**, 반재경**

(Hyun Huh*, Ju-Won Seo**, Min-Su Kim**, Jae-Kyung Pan**)

Abstract

In this paper, we have dealt with the analysis and fabrication of interconnection structure using low-k parylene dielectrics and copper electrode(Cu/parylene). This structure is superior to traditional SiO₂/aluminium structure on low temperature processes, high speed operation and high density integration. The quasi-static FEM(finite element method) analysis was performed on CPW(coplanar waveguide) electrodes insulated by each SiO₂ and parylene layer. The dependence of CPW capacity as the function of the dielectric constants and thickness of insulator was calculated. Physical adhesive and chemical tests of parylene layer deposited on glass and under various metal layer have been performed. After that, CPW has been formed by traditional photolithographic processes. Parylene has a good adhesive property to glass substrate and Cu, Au better than Al. And patterning and etching of metal on parylene using various chemicals was performed. We have not found any outstanding problems for the post metal process.

Key Words(중요어) : Low dielectric(저유전율), Parylene(파릴렌), Cu chip(구리칩), coplanar waveguide(평판형도파관), Finite element method(유한요소법)

1. 서 론

광통신, 밀리미터파, 그리고 마이크로파(M/W ; microwave) 시스템에서와 같이 전자부품의 동작 주파수가 GHz영역을 넘어서고 고집적 소자개발이 요구됨에 따라 광대역 특성의 전기배선 및 0.25 μ m이하의 미세회로 구현을 위해 low-k(낮은 유전상수) 물질에 대한 연구가 활발하다^[1]. 이러한 재료들은 소자간의 배선에서 혼선(cross talk)을 감소시키고, 집적회로에서는 고속특성을 부여하는 작은 RC 시정수를 제공한다. 기존의 상호연결 금속재료로는 Al 대신 저 저항의 Cu가 실용화되고 있으며^[2]

²⁾, 또한 현재 SiO₂ 절연기술을 대체하기 위해 가장 부상하는 낮은 유전상수 유전체 박막으로는 폴리머류가 유망하고, 특히 parylene계 폴리머는 금속과의 상호연결성과 다른 유전체 박막과의 높은 고착력으로 인하여 차세대 절연체 재료로 부각되고 있다.

본 논문에서는 parylene계 박막의 증착 및 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 특히 고속 광소자 및 M/W 소자분야에서 이용되는 CPW(coplanar waveguide) 전극에서 절연층으로 parylene 박막의 유용성에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 낮은 유전상수 값을 갖는 유전체로서 parylene의 유용성을 확인하기 위해 유전상수에 따른 CPW 전극 구조 소자의 정전용량을 유한요소법으로 모의전산하였다^[3]. 그리고 parylene을 절연층으로 사용한 CPW 전극을 제작하기 위해 기본적인 parylene 증착 및 상위 전극공정을 확립하였으며, 특히 증착된 parylene계 박막과 상위전극의 물리적·화학적 특성을 측정하였고 상위전극으로 기존의 Al 이외에 Cu나 Au등 다양한 금속박막의 적용 가능성에 대

* : 순천청암대학 정보통신과
(전남 순천시 덕월동 224-9, Tel : 0661-740-7313)
** : 전북대학교 전자·정보공학부
(전북 전주시 덕진구 덕진동 664-14, Tel : 0652-270-2397, Fax : 0652-270-2394)

1998년 11월 30일 접수, 1999년 3월 26일 심사완료

한 연구를 수행하였다.

2. Parylene

Parylene(PA)은 지난 10 여년간 차세대 절연체로 많은 연구가 이루어진 폴리이미드와는 달리 높은 열적 안정성(~400℃), 낮은 유전상수(2.2~3.1), 매우 낮은 수분흡수계수, 그리고 금속제 물질과의 우수한 고착특성 등의 장점을 가지고 있으며, 더욱이 spin coating이 아닌 상온에서 열증착이 가능하고 박막의 두께조절이 용이하다. 이와 같은 우수성으로 인해 의학용 보호피막, 인공장기, 그리고 센서와 같은 전자부품의 보호막으로 이용되고 있으며, 최근에는 parylene을 절연층으로 사용한 고속전자회로, VLSI회로, 및 MCM(multichip module)과 같은 분야에서도 적용이 기대되고 있다^[4-6].

Parylene은 화학적 구조에 따라 그림 1과 같이 PA-N, PA-C, PA-D, PA-E, 그리고 PA-F 등 5종류가 발표되어 있으며, 이들중 가장 낮은 유전상수를 가지고 있으며 500℃이상의 높은 열적 안정성을 지닌 PA-F는 현재까지 상용화되고 있지 않으나, 최근들어 초고속, 고집적 VLSI용 절연층(interlayer) 재료로 연구대상이 되고 있다^[4, 5].

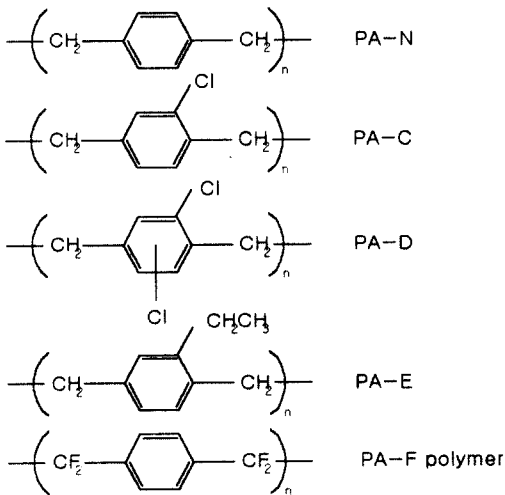


그림 1. parylene N, C, D, E, F 화학구조
 Fig. 1. Chemical structure of parylene, N, C, D, E, F

현재까지 상용화된 것으로는 PA-N이 있으며, 이것은 가장 기본적인 구조를 가지고 있고 낮은 유전손실과 높은 절연특성, 그리고 주파수에 무관한 낮은 유전상수를 가지고 있다. 특히 온도변화에 따른 전기적인 특성변화가 매우 적기 때문에 고속 전자회로분야에서 PA-F와 더불어 그 적용이 기대되고 있다. PA-C는 PA-N의 방향족 H⁺중 하나를 Cl⁻로 대체한 구조로 수분 및 부식성 가스에 매우 강한 특성을 가지고 있으며, 전기적·물리적 특성이 우수한 박막을 형성한다. 그리고 편축이 없고 균일한 박막의 증착이 가능하여 중요한 전자부품의 보호 및 인공장기와 같이 무해성 박막이 필요한 부분에서 이용되고 있다. 표 1은 주요 parylene계 폴리머류와 SiO₂의 전기적·물리적 특성을 비교 요약하였다^[7]. SiO₂에 비해 parylene의 낮은 유전상수는 고속 소자 제작에 매우 유리하며, 특히 낮은 수분 흡수도는 외부 환경적인 영향에 강한 소자의 구현이 가능하다.

표 1. Parylene과 SiO₂의 전기적·물리적 특성 비교^[7]
 Table 1. A comparison of Electrical and physical properties between parylene and SiO₂

특 성		PA-N	PA-C	PA-F	SiO ₂
전기적 특 성	유전상수	2.65	2.95~3.15	2.25	3.9~8
	절연강도(V/cm)	2.8×10 ⁶	2.2×10 ⁶	2.5×10 ⁶	~10 ⁷
	저항률(ohm-cm)	1.4×10 ¹¹	8.8×10 ¹⁰	5.3×10 ¹⁰	10 ¹⁴ ~10 ¹⁶
물리적 특 성	수분흡수도(%)	~(0.1)	~(0.1)	~(0.1)	-
	끓는점(°C)	420	290	~)500	~1,600
	밀도(g/cm ³)	1.1~1.12	1.289	1.58	2.2
	굴절률	1.661	1.639	-	1.46

이상과 같은 특성 이외에 parylene은 가시광선 영역에서 우수한 광투과성을 나타내며, 적외선 영역에서는 1mil의 parylene 박막에서 80%~90% 이상의 투과성을 나타내기 때문에 높은 광투과성이 요구되는 광표시장치 및 센서 분야에서 보호박막으로 이용이 가능하다.

3. 절연층의 유전상수에 따른 CPW전극의 유효요소법 해석

고속 전자소자 및 광소자에서 낮은 유전상수를 가

진 parylene의 유용성을 확인하기 위해 그림 2와 같은 상부 및 단면구조를 갖는 CPW 전극에서 다양한 유전상수의 절연물질에 따른 전극특성을 모의 전산 하였다.

공정온도에 따라 결정되는 유전상수값을 각각 8과 4로 가정하였으며^[6], parylene의 경우 PA-F와 PA-N으로 구분하여 계산하였다. 그리고 유전체 기판은 CPW 전극형 외부 집적광학 변조기에서 주로 이용되는 이방성 매질인 z-cut LiNbO₃로 가정하였다. 이 경우 절연층의 낮은 유전상수는 z-cut LiNbO₃의 높은 유전상수($\epsilon_x=43$, $\epsilon_y=28$)를 보상하여 정전용량을 감소시키는 효과를 나타낼 것이다. 각각의 모의전산은 충분히 수렴된 해가 도출될 때까지 수행하였으며, 결국 각 절연층의 유전상수 및 두께에 따라 그림 3과 같은 계산결과를 얻게 되었다.

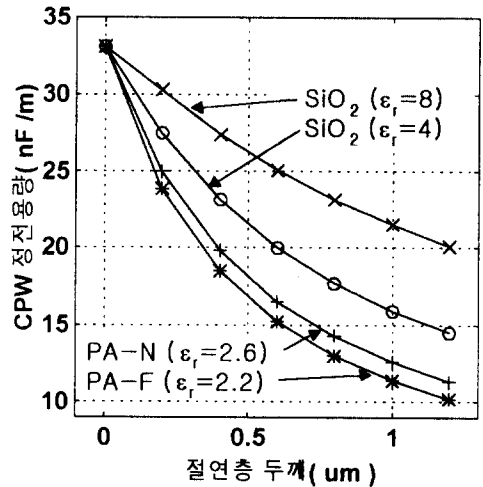


그림 3. 절연층 종류 및 두께에 따른 정전용량 모의 전산 결과

Fig. 3. Computer simulation results as the function of sorts and thickness of interlayer

그림 2에서 나타낸 바와 같이 CPW 전극을 설계하기 위해 필요한 파라미터에는 중심전극 폭(W), 중심전극과 접지전극의 사이간격(S), 절연층의 두께(t_b) 및 전극의 두께(t) 등이 있다. 이와 같은 설계인자들은 상호 복합적인 작용으로 인하여 소자의 전기적 특성에 영향을 미친다. CPW 전극의 정전용량을 계산하기 위해 본 논문에서는 비등방성 매질이거나, 전극구조가 복잡한 경우에도 정확한 계산이 가능하도록 유한요소법을 이용하여 모의전산을 수행하였다.

기존의 SiO₂ 절연층 구조와 본 논문에서 제안한 parylene 절연층 구조의 특성비교를 위해 CPW 중심전극 폭(W)을 8μm, 전극간격(S)을 16μm, 그리고 전극두께(t)를 1μm 로 고정시킨 뒤 각 절연층의 두께를 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2μm 로 각각 변화시키면서 CPW 전극의 단위길이당 정전용량을 계산하였다. 특히 SiO₂의 경우에는 PECVD

결국 절연층의 두께가 증가할수록 CPW 전극의 정전용량이 감소함을 알 수 있었고, 특히 기존의 SiO₂에 비하여 소자의 고속·고집적 설계를 위해서는 본 논문에서 제안한 parylene이 유리함을 알 수 있다. 즉 상호연결 선폭을 고정시킨 경우 동일한 절연층 두께에 해당되므로 낮은 유전상수 값을 갖는 parylene이 이용되는 경우 작은 정전용량을 나타냄으로 고속 소자의 설계가 훨씬 용이하며, 그리고 같은 정전용량에 의한 동일한 성능의 소자를 설계하는 경우에도 parylene을 적용함으로써 더욱 좁은 선폭의 고집적 소자설계가 가능함을 알

수 있다.

4. Parylene증착 및 박막특성

Parylene 박막은 기존 금속박막 증착법과 같이 증기상태로 증착되지만 금속박막의 경우 10^{-6} torr 이하의 진공상태가 요구되는 반면에 parylene의 경우에는 0.1 torr 정도의 저진공에서 수행된다. 또한 금속박막의 경우 가스분자의 직선형태운동에 의해 단면증착만 이루어지는 반면에 parylene 가스분자의 평균자유경로는 약 0.1cm 정도로 물체의 모든 면에서 균일한 증착이 가능하다.

Parylene의 증착을 위해 본 논문에서는 SCS의 Lab. Coter(PDS2010)를 사용하였으며, 현재 상용화된 PA-N과 PA-C를 이용하여 각각 증착하였다. 그림 4는 parylene 증착을 위해 사용한 Gorham process의 공정도이다. 먼저 2량체(dimer)상태의 초기 parylene 분말을 120℃ 정도로 가열하여 증기화 시킨 뒤, 중간 전기로에서 약 650℃ 정도의 추가적인 가열을 통해 안정된 단량체(monomer) 상태로 변화시킨다. 가열된 단량체는 상온의 챔버로 증기상태로 공급되어 폴리화 과정에 의해 박막증착이 이루어진다. 무엇보다도 parylene 박막의 상온 증착이 가능하여 우수한 박막특성과 정밀한 박막두께 조절이 용이하여 재현성 있는 소자제작 및 공정개선에 유리할 것으로 생각된다.

다.

증착시간 및 초기 2량체의 양을 바꿔가며 실험한 결과 본 논문에서 사용된 Lab. Coter는 PA-N의 경우 약 40A/min의 비율로 증착됨을 알 수 있었다. 그러나 PA-C의 경우에는 훨씬 빠른 80~100 A/min 정도의 증착속도를 보였다. 먼저 약 5,000A 두께의 parylene 박막을 유리기판에 증착하였으며, CPW 전극 제작공정과 관련된 parylene 박막의 유용성을 확인하기 위해 물리적·화학적 특성실험을 수행하였다. 즉 parylene 박막과 유리기판, 그리고 parylene 위의 금속박막에 대한 고착력특성, 절연층 이후 공정들에 의해 요구되는 열적 안정성, 부식성 및 화학약품에 대한 내화학성을 실험하였다.

4.1. 고착력 실험

일반적으로 기판위에 증착된 parylene 박막의 고착력이 불완전할 경우 절연층 이후의 다양한 물리적·화학적 공정과정에서 박막이 들뜨는 현상이 나타난다. 또한 parylene 절연층 위에서 전극으로 사용될 금속박막의 경우에도 신뢰성을 갖는 소자로 제작하기 위해 우수한 고착력 특성이 요구된다. 먼저 유리기판 위에 증착된 parylene 박막의 고착력을 시험 하였다. parylene 박막의 고착력을 측정하기 위해 ASTM("Measuring Adhesion by Tape Test", 1984 ASTM Standards)표준 측정법을 이용하였다. 즉 박막을 그리드 형태로 자른 뒤, 3M 테이프를 이용하여 여러 각도 및 시간으로 잡아당겨 박막의 상태를 측정하였다. 측정결과 5000A 두께로 증착된 parylene-N과 parylene-C 박막의 경우 모두 다음 공정들에 요구되는 충분한 고착력을 가지고 있음이 확인되었다. 그러나 기판 세정이 불충분한 경우 parylene 박막은 부분적으로 불완전하게 고착되고 이런 부분은 다음공정에서 사용되는 각종 화학물질에 의해 침식되어 박막이 들뜨게 된다.

그리고 CPW 전극 제작을 위해 parylene이 증착된 기판 위에 다양한 방법에 의해 금속박막을 증착하였고 비슷한 방법으로 테이프를 이용한 금속박막의 고착력 시험을 실시하였다. 일반적으로 고속광소자용 CPW 전극으로는 고주파특성 및 외부전극과의 접촉특성이 우수하고 산소나 습도에 낮은 감도를 가지고 있으며, 전기도금에 의해 두꺼운 전극형성이 용이한 Au가 주로 이용되고 있다. 그러나 기존 SiO₂를 절연층으로 사용하는 경우 고착력 특성이 나쁘기 때문에 이를 극복하기 위해 Cr이나

NiCr을 베이스 금속으로 증착한 뒤 Au박막을 증착해야하는 불편함을 가지고 있다. 또한 반도체 공정에서 사용되는 Al 도 CPW전극으로 이용되고 있으나 힐록(hillock) 등에 의한 고주파신호의 산란, 산소나 습기에 매우 민감한 특성, 그리고 두꺼운 전극제작이 어렵기 때문에 고속 소자용 CPW 전극으로는 부적합하다. 반면에 Cu는 상대적으로 낮은 저항율($1.67\mu\Omega \cdot \text{cm}$; $2.7\mu\Omega \cdot \text{cm}$ (Al), $2.125\mu\Omega \cdot \text{cm}$ (Au))을 가지고 있으며, 전해 및 무전해 도금에 의해 두꺼운 박막 제작이 용이함에도 불구하고 VLS나 집적광학 분야에서 이용되지 않았다. 그러나 submicron 이하의 차세대 집적회로에서는 기존의 Al을 대체할 재료개발이 요구되고 있으며, 최근 $0.18\mu\text{m}$ 이하의 고집적 회로 및 초고속 전자회로 구현을 위해 IBM, 모토롤라, TI(Texas Instrument)등에서는 차세대 반도체 공정으로 Cu를 전극으로 사용하여 집적회로에 적용할 수 있는 기술을 발표하였다^[1, 2].

이상과 같은 배경에서 parylene 절연층 위의 상부전극으로 적절한 금속박막을 찾기위해 다양한 금속재료를 다양한 방법으로 증착하였고, 각각의 고착력 특성을 측정하였다.

표 2. 금속 박막 종류에 따른 고착력 시험 결과
Table 2. Results of adhesive strength test as the class of metal

금속 종류	박막증착방법	고착력 특성
Au	스퍼터링법	very good
	열증착법	good
Cu	스퍼터링법	very good
	열증착법	good
Ag	열증착법	poor
Al	스퍼터링법	good
	전자빔 증착법	poor
Cr	전자빔 증착법	poor
NiCr	전자빔 증착법	poor
Ti	스퍼터링법	good
	전자빔 증착법	poor

Parylene박막 위에 다양한 금속 박막을 증착한 뒤 테이프 테스트에 의해 측정된 결과를 표 2에 나타내었다. 각각의 박막은 공정방법에 따라 고착력 특성이 다르게 나타남을 확인하였다. 금속 박막증

착을 위해 parylene이 증착된 기판은 충분한 세정 과정을 통해 준비되었고, 각각의 금속박막들은 스퍼터링법, 열증착법 및 전자빔 증착법 등으로 제작하였다.

전반적으로 스퍼터링법에 의한 금속박막은 고착력이 우수하였고 전자빔이나 열증착법에 의한 박막은 모두 테이프 테스트에서 박리되었다. 그러나 Au와 Cu는 열증착법에 의한 박막도 충분한 고착력을 확인하였다. 이와 같은 고착력 특성 결과 Au나 Cu가 parylene 절연층 구조 소자, 특히 집적 광학소자의 제작에 적합함을 알 수 있었다.

4.2. 열처리 실험

열처리에 따라 Au가 증착된 parylene박막 기판의 변화를 실험하기 위해 200°C 에서 2시간 가열하였고, 가열전·후의 Au의 박막두께 및 표면상태를 비교하였다. 박막의 상태변화를 광학현미경과 박막 두께측정기를 이용하여 측정한 결과 가열전·후 parylene 및 Au박막의 두께 및 표면상태의 변화가 일어나지 않았음을 확인하였다. 그러나 parylene이 증착된 기판을 300°C 까지 가열한 상태에서 스퍼터링으로 Au를 증착한 경우에는 광학현미경으로 그림 5와 같이 표면이 갈라지는 결과를 확인하였다. 이와 같은 결과는 Au와 parylene의 열팽창 특성이 다르기 때문에 발생하는 것으로 생각되며, 기존의 고착력 향상을 위해 박막증착과정에서 열처리는 유용하지 않음을 알 수 있다.

4.3. 내화학성 실험

다양한 금속박막의 식각 및 사진공정에 따라 parylene박막은 많은 부식성 물질에 노출되며, 이에 따른 박막의 변화 유무는 parylene의 유용성을 결정하는 매우 중요한 사항이다. 일반적인 폴리머의 경우 부식성 화학물질에 노출되는 경우 박막의 표면이 부풀어오르는 특성을 나타낸다. 따라서 박막의 변화 유무를 판단하기 위해 박막표면을 관찰하고 그 두께를 측정함으로써 판단할 수 있다.

먼저 기판 세정과정에서 사용되는 물질로서 DI water, IPA, 알콜, 아세톤과 사진공정에서 사용되는 유기물질인 PR, PR현상액 및 stripper, 그리고 다양한 금속 박막의 식각액으로 사용되는 부식성 화학물질인 HF, HCl, H₂SO₄, HNO₃에 대한 반응특성을 실험하였다. 모든 실험은 parylene박막이 증착된 기판을 10분이상 용액에 담귀서 수행하였고 가열은 이루어지지 않았다. 반응여부를 확인하기 위해 표면관찰 및 박막 두께변화를 측정하였으며, 결과적으로 사용된 모든 화학물질에 대해 parylene박막이 계속해서 안정된 상태를 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.

5. CPW 전극 제작

Parylene박막 위에 증착할 수 있는 전극재료로는 물리적·화학적으로 Au, Cu가 다른 금속에 비해 적합함을 확인하였으므로 본 논문에서는 CPW 전극을 제작하기 위해 스퍼터링법이나 열증착법에 의한 Au 및 Cu박막을 증착하였고, 사진식각공정을 통해 CPW전극을 성공적으로 제작하였다. 특히 광변조기와 같은 고속 광소자용 CPW전극은 가로·세로의 비가 매우 큰 구조로써 Lift-off공정보다는 식각공정에 의한 패턴형성이 용이하였다. 사용된 금속박막은 약 2000Å정도 증착하였으며 PR 및 금속식각공정 후에도 우수한 전극 패턴을 관찰할 수 있었다.

그림 6은 CPW 전극 제작을 위한 공정도이다.

- 기판세척 및 Au, Cu증착(2,000Å) : parylene 절연층이 형성된 기판의 세정을 위해 DI water와 IPA를 이용하였으며, 건조후 약 2,000Å의 Au나 Cu 박막을 스퍼터링법에 의해 증착하였다. 특히 세정과정에서 초음파를 사용할 때 parylene 박막의 고착특성 변화가 예상되기 때문에 주의를 요한다.

- CPW 전극 사진식각 : 금속박막위에 약 1 μ m

CPW 상위 전극을 제작하여 최적의 상위 전극 재료와 각 박막에 대한 고착력 특성등에 대하여 알아보았다. SCS의 Lab. Coter를 사용하여 PA-C와 PA-N을 증착하였고 PA-C의 경우 80~100 Å/min, 그리고 PA-N 는 40Å/min 정도의 증착속도를 나타내었다. 그리고 CPW 상위전극을 제작하기 위해 다양한 금속박막을 증착하였으며, 각 박막에 대한 고착력을 측정하였다. parylene 박막의 상위전극으로는 Au와 Cu가 적합한 재료임을 알 수 있었다. 특히 기존 SiO₂ 절연층 구조의 경우 Au나 Cu 상위 전극과의 고착력을 높이기 위해 Cr 이나 Ni과 같은 완충박막을 삽입하고, 또한 추가적으로 열처리 및 금속 사진식각공정이 요구되지만 parylene을 절연층으로 사용하는 경우에는 상위 Au나 Cu 전극과의 고착력 특성이 우수하여 별도의 완충박막이 필요없어 전극공정의 단순화를 가져올 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. P. Singer, "Copper goes mainstream : Low k to follow", Semiconductor International, vol. 20, no. 11, p. 67, 1997.
2. P. Singer, "Copper has enormous benefits when compared to aluminum, but its imple-

mentation requires some fundamental changes in process technologies", Semiconductor International, vol. 21, no. 6, p. 91, 1998.

3. 허 현, 김희주, 반재경, "Ridge형 도파로구조 X-cut LiNbO₃ 광변조기의 광대역 설계", 한국통신학회 논문지, vol. 22, no. 1, p. 89-95, 1997.
4. S. Dabral et. al, " α α' α'' α''' Poly-tetrafluoro-p-xylylene as an interlayer dielectric for thin film multichip modules and integrated circuits", J. Vac. Sci. Technol., vol. B11(5), p. 1825, 1993.
5. L. You and G. R. Yang, et. al, "Vapor deposition of parylene-F by pyrolysis of dibromotetrafluoro-p-xylene", J. Vac. Sci. Technol. vol. 11, p. 3047, 1993.
6. G. R. Yang et. al, "Surface Reaction and Stability of parylene N and F Thin Films at Elevated Temperatures", J. Vac. Sic. Technol., vol. 24, p. 53, 1995.
7. W. F. Beach, C. Lee, D. R. Basset, T. M. Austin, and R. Olson, Encyclopedia of Polymer Science Engineering, 2nd ed. Wiley, New York, p. 990, 1989.
8. M. F. Ceiler, Jr., P. A. Kohl, S. A. Bidstrup, "Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Silicon Dioxide Deposited at Low Temperatures", JES, vol. 142, no. 6, p. 2067, 1995.