

MEMS 기술(마지막회)

유연성 있는 전자 및 MEMS 기술

Flexible electronics and MEMS technology

21세기의 전자 기술 발전 궤도 중의 한 줄기가 휴대형 및 인체 부착형 모델을 지향한다는 점을 고려할 때 유연성 있는 전자 및 MEMS 기술의 파급효과 및 실용화 잠재력은 매우 크다. 이 기술은 기본적으로 유연성 있는 기판 위에 실리콘 등의 반도체 소자들이 조각 형태로 올려져 있으며, 이들 각각이 기계 및 전기적으로 연결되어 있는 구조를 가진다. 따라서 기존 표준 집적회로 기술에서 벗어난 특수 기술들의 개발이 요구되는데, 실리콘을 기반으로 하는 기술과 유기 소재를 기반으로 하는 기술, 그리고 패키징 관련 기술 분야로 구분할 수 있다. 이에 본고에서는 유연성 있는 전자 및 MEMS 기술을 위한 각 기술 분야를 설명하고, 그 응용 분야를 제시한다. <편집자 주>

글: 주병권/KIST 디스플레이 및 나노 소자 연구실
jbk@kist.re.kr, <http://diana.kist.re.kr>

21세기에 이르러 될 수 있는 전자 시스템, 즉 PDA(Personal Data Assistance)를 비롯한 인체 부착형 정보 통신 기기와 컴퓨터(wearable computer), 지능형 표피 및 의복(smart skin and clothes), 전자 종이(electronic paper), 그리고 접을 수 있

는 디스플레이(foldable display) 등의 등장이 기대되면서, 유연성 있는 전자 및 MEMS(flexible electronics and MEMS)와 관련된 기술이 개발되고 있다. 이에 대한 간단한 개념은 그림 1에 보인 바와 같다. 기본적으로 유연성 있는 기판 위에 실리콘 등의 반도체 소자

들이 조각(islands) 형태로 올려져 있으며, 이들 각각이 기계 및 전기적으로 연결되어 있는 구조를 취한다.

이와 같은 유연성 있는 전자 및 MEMS 기술을 완성하기 위해서는 표준 집적회로(IC, Integrated Circuits) 기술에서 벗어난 특수 기술들의 개발이 요구되는데, 이는 실리콘을 기반으로 하는 기술과 유기 소재를 기반으로 하는 기술, 그리고 패키징 관련 기술 분야로 구분할 수 있다. 이를 통하여 제작되는 얇고 유연성 있는 시스템들은 부피가 작고, 가볍고, 굴곡이 있는 표면에 적용 가능하다는 점은 물론, 설계 여유도, 성능, 그리고 기계적인 내구성 측면에서도 잠재적인 장점들을 지니고 있다.

이 글에서는 유연성 있는 전자 및

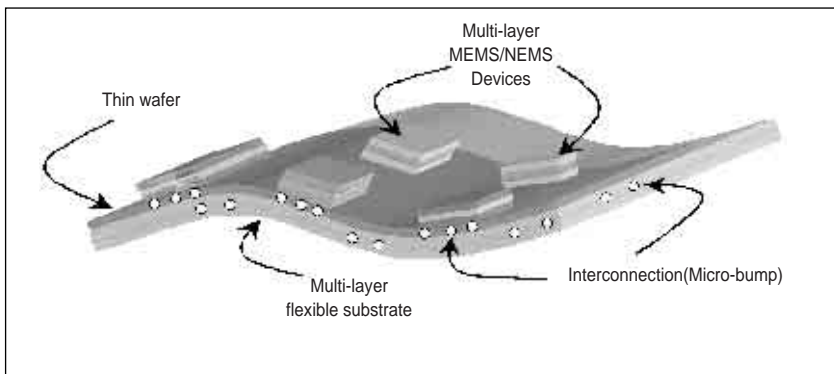


그림 1. 유연성 있는 전자 및 MEMS 기술의 기본 개념

MEMS 기술에 있어서 각 기술 분야를 설명하고, 이에 대한 응용 분야들을 제시하고자 한다.

실리콘 관련 기술

실리콘을 기반으로 하는 기술의 경우, 얇은 실리콘의 가공 및 공정(thin wafer process) 기술, 기판 전달(substrate transfer), 선 및 볼 구조의 반도체(wire and ball semiconductor), 그리고 이러한 구조들 위에 IC와 MEMS를 제조하는 기술 등을 들 수 있다. 이러한 유연성 있는 실리콘 MEMS는 1985년에 Barth 등이 1차원적인 실리콘 다이오드형 온도 센서 어레이를 발표하면서 시작되었으며, 이후 Beebe 등의 폴리이미드 스킨(1994년), Bang 등의 열 센서 어레이(1996년) 등을 거쳐 1997년부터 미국의 CalTech, UCLA, 그리고 독일의 Fraunhofer Institute 등에서 유연성 있는 실리콘 MEMS 및 센서 스킨을 비롯한 유관 분야들을 지속적으로 연구해 오고 있다.

실리콘 웨이퍼의 경우, $30\mu\text{m}$ 이하의 두께가 되면 탄성을 가지고 휘 수 있으며, 현재 미국의 Virginia



그림 2. 얇은 실리콘 기판의 일례 (Fraunhofer Institute)

Semiconductor 등을 통해 공급되고 있다. 이러한 얇은 실리콘 기판을 그림 2에 보였는데, 이는 CMP (Chemical-Mechanical Polishing) 후에 습식 스피ن 에칭 등의 방식을 통해 제조된다. 얇은 실리콘 기판은 chip-on-chip, chip-in-paper, chip-in-foil 등과 같이

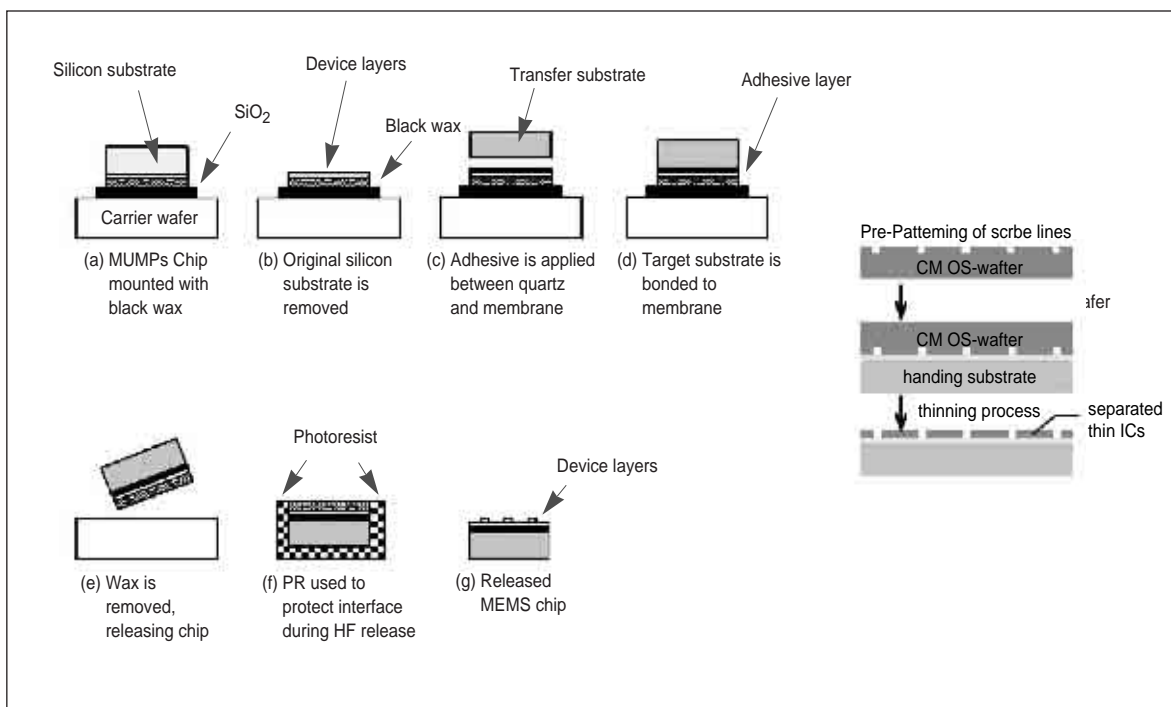


그림 3. 기판 구조체 전달 공정(UCLA) 및 'dicing by thinning' 공정 (Fraunhofer Institute)

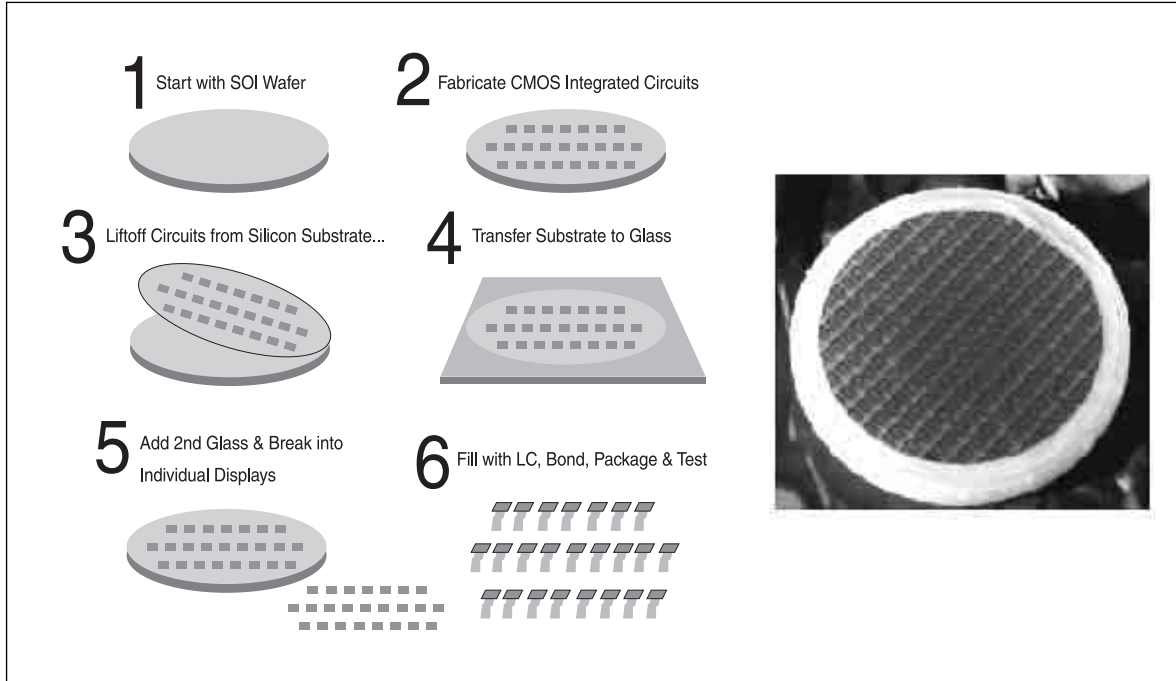


그림 4. SOI 웨이퍼를 통한 기판 전달 공정 (Kopin)

적층 구조나 유연성이 요구되는 공정에 활용할 수 있으나, 특히 핸들링이나 공정 과정에서 별도의 기술이 필요하다. 핸들링의 경우, 휘고 깨지기가 쉬어 캐리어 웨이퍼에 왁스나 특수 테이프 등으로 접착하여 공정을 한 후에 분리하는 방법을 쓰고 있으며, 다이싱(dicing)도 캐리어 웨이퍼 상에서 행하는 경우가 편리하다.

얇은 실리콘 기판의 핸들링 방법 중의 하나로서 기판 전달법을 들 수 있는데, UCLA에서는 그림 3에 보인 바와 같이 표면 마이크로머시닝에 의해 가공된 구조를 접합 공정을 사용하여 목적에 맞는 특수한 용도의 기판으로 전달하는 공정을 발표한 바 있다. 즉, 구조체나 소자 위에 보호막을 형성하고 이를 왁스를 사용하여 캐리어 웨이퍼에 접착한 뒤, 실리콘 기판을 제거한다. 다음으로 전달하고자 하는 기판을 매개물을 사용하여 접합하고 캐리어 기판을 분리한 뒤, 마지막으로 보호막을 제거하고 세정 과정을 거치면 실리콘 기판 위에 제조된 구조체가 다른 기판 위로 전달될 수 있다.

이와 함께 기판 전달법을 이용하여 얇은 실리콘 기판을 다이싱하는 방법으로서 'dicing by thinning' 공정을 들 수 있는데, 이는 그림 3에 보인 바와 같이 소자가

형성된 기판에 트렌치를 형성하고 이를 다른 기판과 접합한 뒤 트렌치에 의해 칩이 다이싱되는 시점까지 기판을 연마하는 공정이다. 이러한 공정을 이용하면, 다이싱 과정에서 얻는 칩의 손상을 최소화할 수 있으며, 아울러 동시에 다수의 웨이퍼를 취급할 수 있고, 소비되는 면적을 최소화할 수 있고, 칩의 모서리가 곡면을 가져 기계적인 강도를 증가시킬 수 있고, 칩의 모양을 여러 형태로 취할 수 있다.

이러한 기판 전달 공정은 웨이퍼 레벨에서도 수행되고 있는데, Kopin에서는 SOI(Silicon-On-Insulator)를 사용하여 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 회로를 제조한 뒤 lift-off에 의해 실리콘 기판을 제거하고, 소자가 형성되어 있는 단결정 실리콘 막을 투명한 유리 기판으로 이동하는 방법을 개발하여 마이크로 디스플레이에 적용하고 있다.(그림 4 참조)

불 구조의 반도체의 경우, 그림 5에 보인 바와 같이 현재 직경 $1\mu\text{m}$ 정도를 갖는 구형 구조가 공급되고 있으며, 향후 $20\mu\text{m}$ 직경에 이르기까지 소형화할 수 있어 선형 반도체와 함께 힘이나 굴곡이 있는 기판에서 탄력적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 또한 구

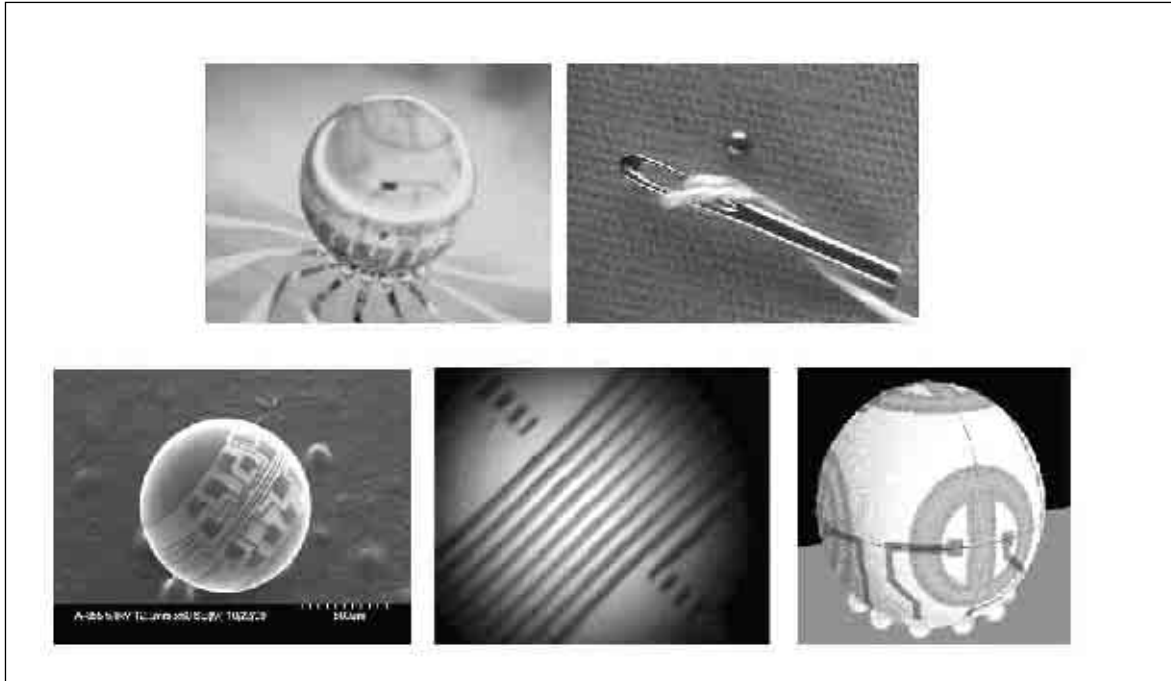


그림 5. 볼 반도체의 모양과 응용 가능성 (Ball Semiconductor)

형 반도체 기판으로서 기존의 평면 기판에 비해 3배 이상의 표면적을 가지므로 집적도를 향상시킬 수 있고, 3차원적인 원형 회로 패턴을 형성을 통해 인덕턴스 및 안테나 기능을 부여할 수 있어 무선 RF(Radio Frequency) 소자 제조에 응용할 수 있으며, 아울러 3차원 MEMS 기술을 접목하여 입체적인 신호를 감지할 수 있는 등의 특징을 가지고 있다. 각각의 용도에 따른 볼 반도체의 적용 일례들을 그림 5에 함께 나타내었다.

유기 소재 관련 기술

유연성 있는 전자 및 MEMS 제조에 있어서 유기 소재는 힘을 주는 매체로 작용하는데, 일반적으로 PCB(Printed Circuit Board)에 유연성을 부여한 기판 형태로 제공된다. 그림 6는 DuPont의 Pyralux VR 모델을 보인 것으로, 이러한 기판 위에 실리콘 조각들을 배치하고 전기적으로 연결하게 되면 유연성 있는 전자 및 MEMS 구조를 얻을 수 있다.

기생 효과와 부피를 줄이기 위해서, 유기 기판을 사용하지 않고 실리콘 조각들을 유기층으로 연결시키는

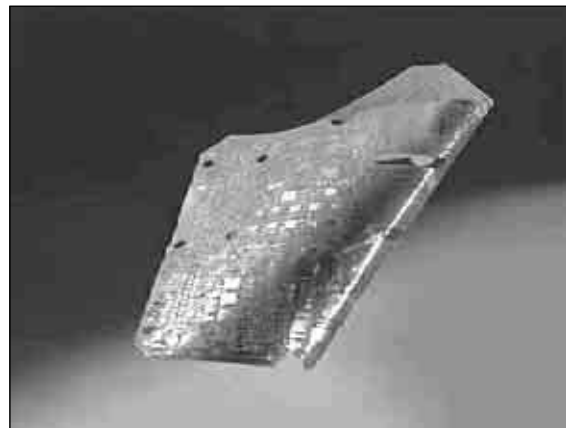


그림 6. 유연성 있는 인쇄 회로 기판의 모양 (DuPont)

공정도 개발되고 있는데, 그림 7에 그 일례를 보였다. 즉, 실리콘 기판을 1차 가공하여 조각들이 형성될 영역을 정의하고, 이 위에 구조나 소자들을 형성하고 전기적인 연결을 위해 금속 선을 배치한다. 다음으로 뒷면으로부터 식각을 통하여 조각들을 정의하고, 양면에 폴리이미드를 코팅하게 되면 실리콘 조각들 사이는 금속 박막 등과 폴리이미드로만 연결되어 있어 유연성을 가지게 된다. 이러한 공정에 의해 제작된 웨이퍼 크기의

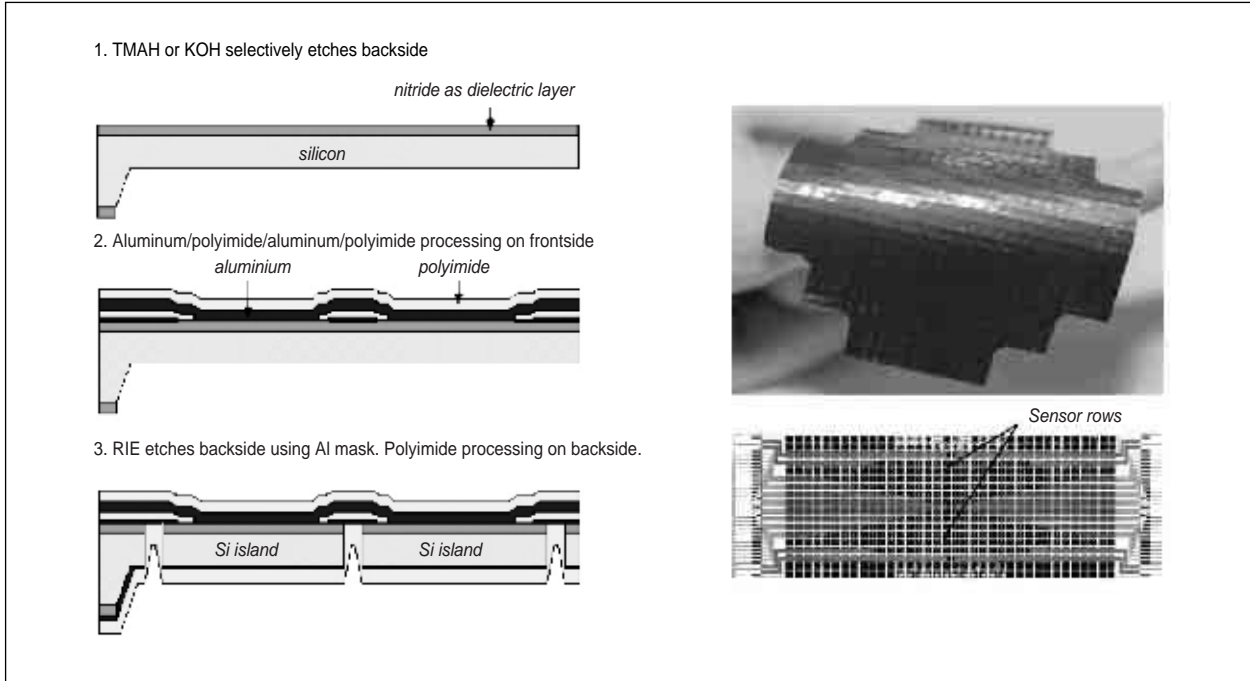


그림 7. 유기층과 실리콘 가공에 의해 제조된 유연성 있는 구조 (CalTech & UCLA)

유연성 있는 전자 표피(flexible electronic skin)의 모양을 함께 나타내었다.

이와 같이 유연성 있는 구조를 위해서는 유기 기판 위에 소자들을 제작하는 방법과 유기층을 형성하고 가공하는 방법을 취할 수 있다. 아울러, 유기 기판이나 층 위에 전기적인 연결선뿐만 아니라 트랜지스터와 같은 능동 소자(active device)를 제조할 수도 있는데, 이는 유기 반도체(organic semiconductor)로 일컬어지는 새로운 기술 분야로 도출되고 있다. 이러한 유기 반도체 소재는 고분자(polymer)와 저분자(monomer)로 구분되는데, 고분자 소재의 경우 공정이 간단하고 대면적 공정이 용이하여 낮은 가격과 높은 생산성을 얻을 수 있으나 이동도가 낮다는 고유의 한계가 있다.

저분자 소재는 캐리어의 이동도가 상대적으로 높아 CMOS 등과 같은 전자 회로를 구성하는데 유리한데, 최근의 연구 결과를 보면 저분자 Pentacene을 이용한 소자의 경우, $0.1 \sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 얻었으며 이는 비정질 실리콘 소자에 필적하는 수치에 해당한다. 그림 8에 실리콘 소자와 비교한 유기 반도체의 이동도 발전 속도와 함께 유기 기판 위에 제조된 Pentacene

TFT(Thin Film Transistor)의 구조와 모양을 나타내었다.

패키징 관련 기술

IC 패키징의 기술 로드 맵을 그림 9에 나타내었다. IC 클럭 주파수가 높아지고 칩 사이즈가 커지고 핀의 수가 증가하면서 패키징의 개념도 가일층 발전하여 BGA(Ball Grid Arrays), FC(Flip-Chip), MCM(Multi-Chip Module), 그리고 3차원 패키징 등의 기술들이 지속적으로 개발, 진보되고 있다. 유연성 있는 전자 및 MEMS 시스템의 경우, 얇은 실리콘(thin silicon)의 특수 패키징 공정, 수직 배선을 위한 BGA 공정 및 와이어가 없는 수평 배선 기술, CSP(Chip Scale Packaging) 및 WLP(Wafer Level Packaging) 관련 기술, 그리고 유기 칩(chip in polymer)의 제조 및 실리콘 칩과의 친화성 등을 긍정적으로 고려하여야 하며, 이들은 공히 21세기 핵심 패키징 기술로서 자리하고 있다.

얇은 실리콘 기판의 경우 현재 기술로는 $20 \sim 10 \mu\text{m}$

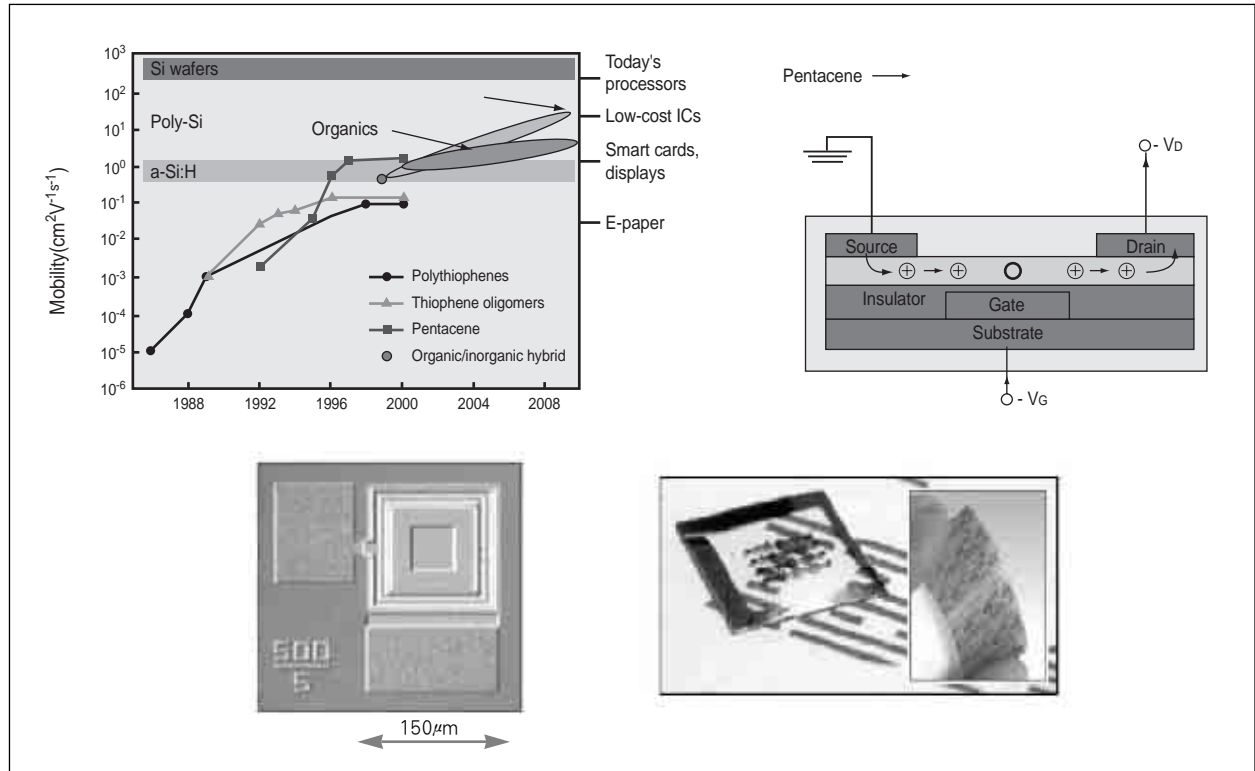


그림 8. 유기 반도체의 이동도 향상 및 저분자 Pentacene TFT 소자 (Penn. State Univ., IBM)

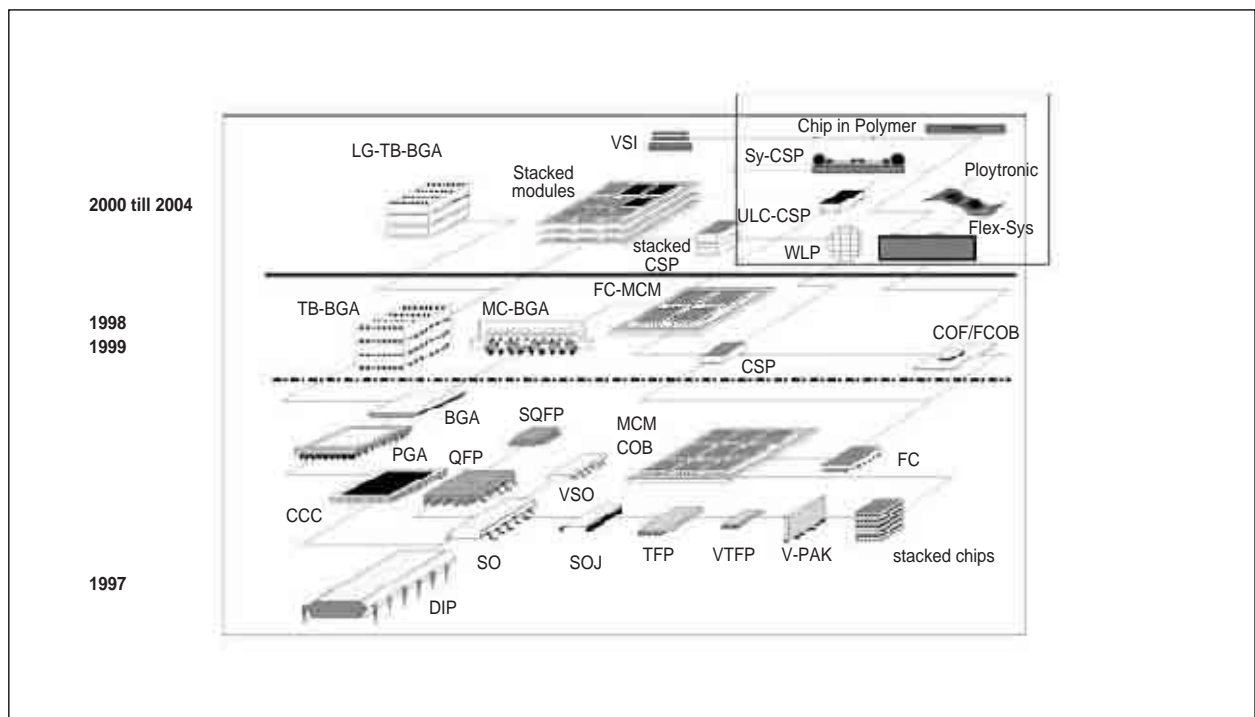


그림 9. IC 패키징의 기술 로드 맵

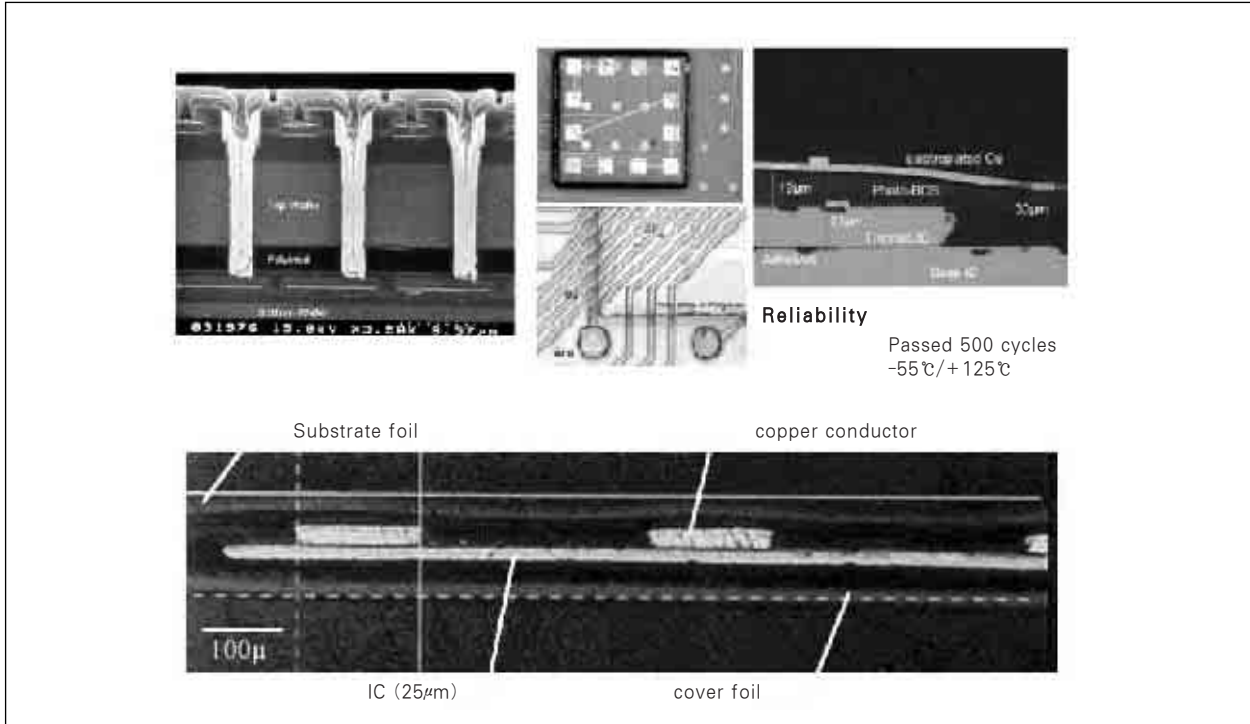


그림 10. 얇은 칩을 이용한 수직 및 수평적 집적 패키징 일례 (Fraunhofer Institute)

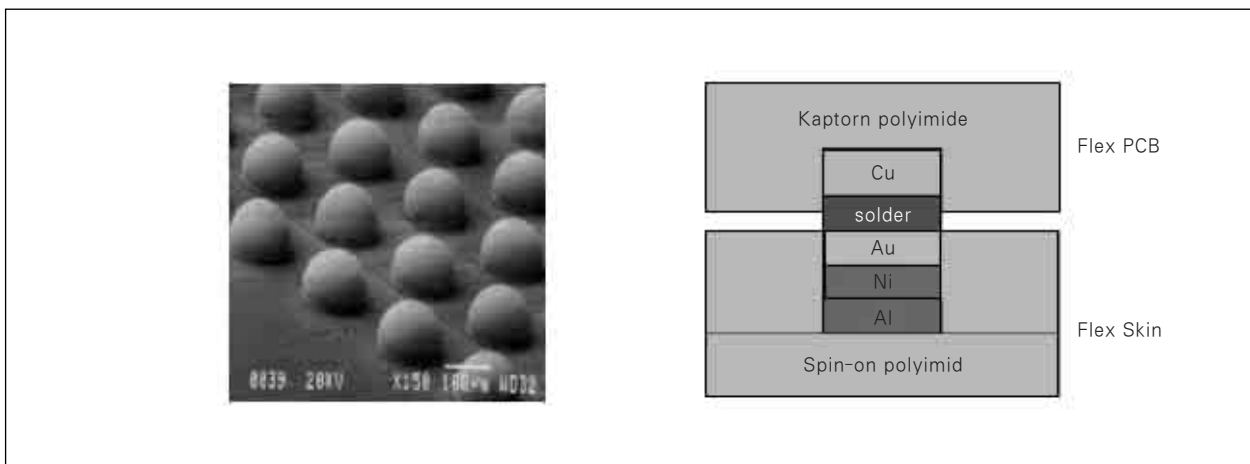


그림 11. Solder ball을 이용한 유기 기판 간의 CSP의 실현(Coronos Integrated Microsystem, CalTech & UCLA)

의 두께까지도 가능한데, 이를 이용하면 칩과 칩, 혹은 칩과 기판 간의 전기적 연결을 후막 전극 등을 통하여 동일선상에서 수평적으로 연결할 수 있어, 와이어가 불필요하고, 부피가 감소하고, 수평 혹은 수직 방향으로의 3차원 연결이 가능하며, 여러 기생 효과들을 줄일 수 있다는 특징이 있다. 그림 10에 약 10~20μm 두께의 얇

은 실리콘 칩에 대해 두 개의 칩 간에 마이크로 홀을 통하여 수직적으로 전기적 연결이 이루어진 경우와 하부 칩과 기판 등으로 전기 도금된 Cu 전극을 이용하여 수평적으로 전기적 연결이 이루어진 경우를 예시했다.

CSP 기술은 칩과 칩, 칩과 기판 간의 전기적 연결을 와이어를 사용하지 않고, 솔더 볼(solder ball) 등을 이

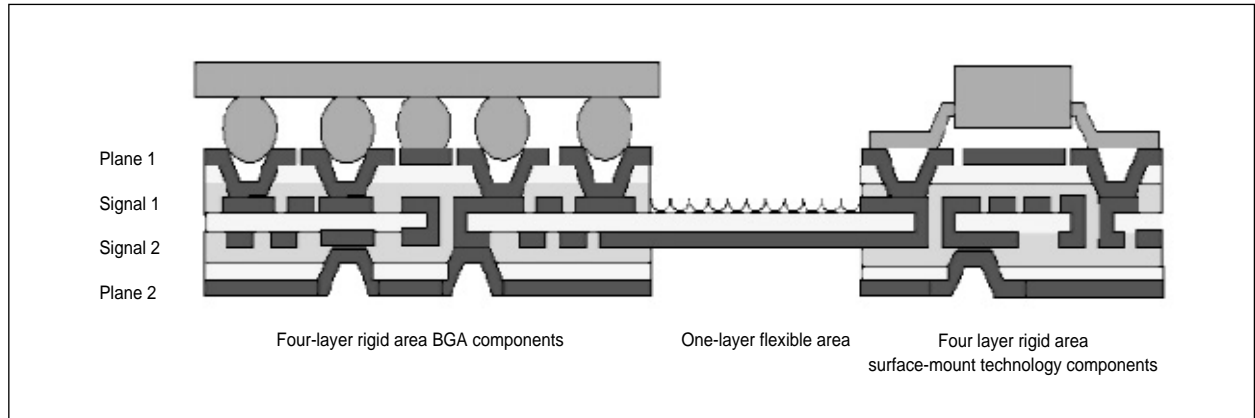


그림 12. 유연성 있는 시스템을 위한 패키징 구조의 기본 개념

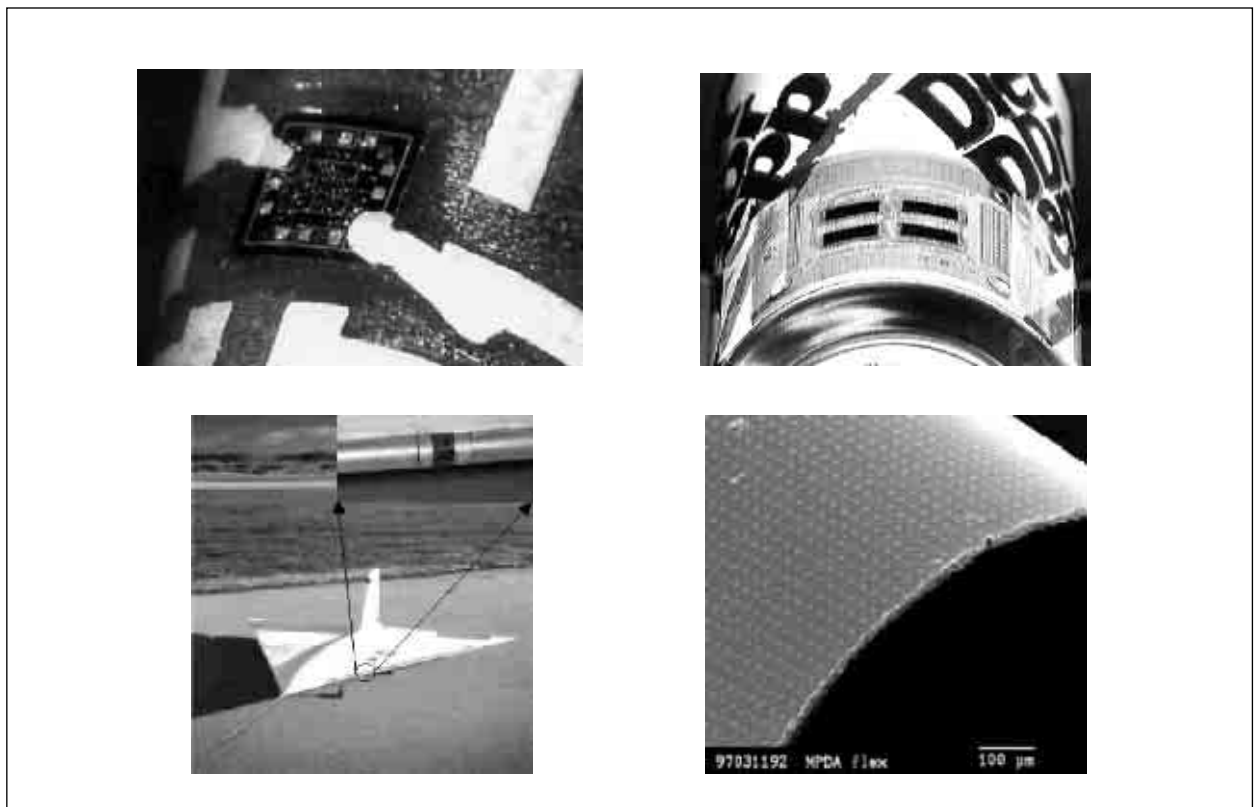


그림 13. 굴곡 표면을 위한 스트레인 게이지(Fraunhofer Institute), 휨이 있는 메모리 모듈(3M), UAV 용 전단 응력 센서(CalTech & UCLA), 그리고 안구용 광 감응 센서 어레이(Stuttgart Univ.)

용하여 수직적으로 연결함으로써 이루어진다. 그림 11은 패드 위에 정렬된 솔더 볼들과 이러한 솔더 범프(solder bump)를 이용하여 두 장의 폴리이미드 칩과 기판을 전기적으로 연결시킨 경우를 보인 것이다. 이와 같이 두 종류 이상의 칩이나 기판들을 3차원적으로 연

결하여 적층 구조를 형성하게 되면 두 종류 이상의 소자에 대한 연결선의 길이를 최소화함으로써 칩의 크기 및 신호 지연을 가능한 줄일 수 있다. CSP 기술을 이용하여 수직 방향으로는 적층형 연결을 하고 수평 방향으로는 유기층을 이용한 연결을 하게 되면 그림 12에 보



그림 14. 전자 종이(E-Ink), 유기 LED(Universal Display, Covion), 그리고 입을 수 있는 컴퓨터와 지능형 의복의 일례

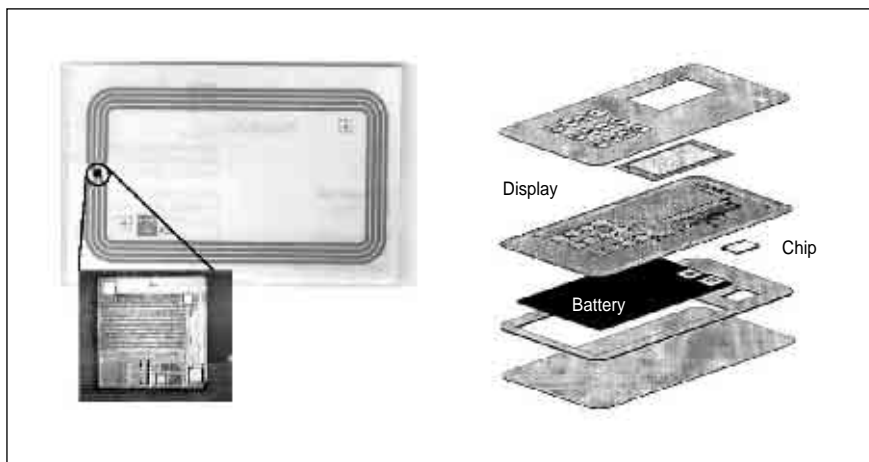


그림 15. 얇고 휘 수 있는 스마트카드의 개념도 (Fraunhofer Institute)

인 바와 같이 유연성 있는 시스템의 기본 구상이 이루어지게 된다.

응용 분야

유연성 있는 전자 및 MEMS 기술은 유연성 있는 시

스템의 구현에 응용되며, 이러한 시스템의 일례로서 3차원 센서 및 액추에이터 시스템, 스마트 카드, 인체 부착형 정보 통신 기기와 컴퓨터, 지능형 의복, 전자 종이, 그리고 접을 수 있는 디스플레이 등을 들 수 있다.

현재 개발되고 있는 센서 및 액추에이터 시스템으로는 그림 13에 보인 바와 같이 굴곡이 있는 물체의 표면에 부착될 수 있는 스트레인 게이지나 메모리 모듈, 무인 비행기(UAV, Unmanned-Aerial Vehicle)의 삼각형 날개의 항공 역학 분석을 위하여 날개에 부착되어 기류 등이 비행체의 표면에 미치는 영향 등을 직접적으로 측정하는 전단 응력 센서 시스템, 그리고 생체 안구의 광 감응부의 재활에 적용되기 위한 광센서 어레이 등을 생각할 수 있다.

그림 14는 미래형 전자 종이로서 전자 잉크(electronic ink)를 이용한 종이 및 잡지와 유기 LED(OLED, Organic Light Emitting Display)를 이용한 유연성 있는 디스플레이를 보인 것이다. 전자 종이의 경우, 출판물과 비슷한 종류의 안료를 사용하여 종이에 글씨가 써진 모습을 전자적으로 재현할 수 있으며, 데이터의 처리 및 저장 기능이 우수하여


종이가 없는 사무실 등을 생각해 볼 수 있다. 전자 종이와 유기 LED와 같이 유연성 있는 디스플레이들은 종이를 대체할 수 있음은 물론, 얇고 가볍고 휘 수 있다는 특징을 토대로 하여, 휴대용 정보 통신 기기의 단말기, 벽지형 스크린, 접거나 입을 수 있는 TV나 컴퓨터 등에 활용이 기대되고 있으며, 이를 위해서는 유기 기판 상

에 IC를 형성하는 유기 반도체 기술이 함께 개발되어야 한다. 유연성 있는 전자 및 MEMS 기술을 이용한 시스템 관련 기술과 디스플레이 기술이 접목되어 실현될 수 있는 의복형 컴퓨터, 지능형 조끼 등의 일례를 그림 14에 함께 나타내었다.

이외에도 유연성 있고 얇은 전자 및 MEMS 기술은 자동차, 항공, 통신, 가전, 보안 등과 같은 제반 분야에 있어서 얇고, 가볍고, 휘 수 있고, 소비 전력이 낮고, 지능적이며, 가격이 저렴하다는 등의 특징을 바탕으로 하여 매우 다양한 응용 분야를 창출할 수 있을 것으로 보인다. 현재 실용화에 근접한 응용 제품으로서 그림 15에 보인 RF 및 스마트카드를 들 수 있는데, 이의 두께는 약 100 μ m 정도로서 플라스틱 기판, 유기 LED, 얇은 배터리, 그리고 얇은 칩 및 패키징 기술로 구성되어 있다. 또한, 휴대용 정보 통신 기기의 경우에도 얇고 휘 수 있는 전자 기술을 적용하면, PCB의 두께를 0.15~0.4mm 정도로 줄일 수 있어 기기의 면적이나 두

께가 75% 이상 줄어들 수 있고, 설계 여유도 등에서 유리하고, 전자기와 간섭 등을 제거하기 위한 회로 구성도 용이하며, 장시간 사용에 대한 내구성도 증가시킬 수 있다.

맺음말

유연성 있는 전자 및 MEMS 시스템 제작을 위한 기본 개념, 요소 기술, 그리고 응용 분야를 분석하였다. 21세기의 전자 기술 발전 궤도 중의 한 줄기가 휴대형 및 인체 부착형 모델을 지향하는 점을 고려할 때, 본 기술의 충격 및 실용화 잠재력은 매우 크다고 볼 수 있다. 이는 기존의 표준형 반도체 및 전자 기술에서 상당 부분 이탈된 기술들에 의해 추진되고 있으며, 유관 연구 기관도 미국 및 유럽의 일부 선진 연구소에 한정되어 있으나, 그 잠재력을 고려할 때 국내에서도 입지가 굳혀졌으면 하는 바람이다. 

참고문헌

- 주병권, "기판 접합 공정 및 응용," 월간 전자부품 (2001.12.)
- R.Cravotta, "Does electronic ink mean the end of paper?," EDN, pp.42-48 (2001.8.)
- 주병권, 김재경, 이윤희, "유기 LED 기술의 등장, 현황, 그리고 발전 방향," 월간 전자산업정보, pp.94-98 (2001.3.)
- H.Reichl et al., "Overview and development trends in the field of MEMS packaging," Proc.IEEE-MEMS'01, Switzerland, pp.1-5 (2001.1.)
- J.M.Shaw et al., "Organic electronics: Introduction," IBM J.Res. & Dev., vol.45, no.1, pp.3-9 (2001.1.)
- C.D.Dimitrakopoulos et al., "Organic thin-film transistors: A review or recent advances," IBM J.Res. & Dev., vol.45, no.1, pp.11-27 (2001.1.)
- M.Angelopoulos, "Conducting polymers in microelectronics," IBM J.Res. & Dev., vol.45, no.1, pp.57-75 (2001.1.)
- G.Klink et al., "Innovative packaging concepts for ultra thin integrated circuits," Proc.Electronic Components and Technology Conference (2001)
- P.Lukowicz et al., "The weararm modular, low-power computing core," IEEE Micro, pp.16-28 (2001)
- H.Klaauk et al., "Pentacene organic thin-film transistors and ICs," Solid State Electronics, pp.63-76 (2000.3.)
- K.Chen et al., "Ultra-thin electronic device package," IEEE Tr. Advanced Packaging, vol.23, no.1, pp.22-26 (2000.2.)
- N.Takeda, "Ball semiconductor technology and its application to MEMS," Proc.IEEE-MEMS'00, Japan, pp.11-16 (2000.1.)
- F.Jiang, Y.Xu, T.Weng, Z.Han and Y.Tai, "Flexible shear stress sensor skin for aerodynamics applications," Proc.IEEE-MEMS'00, Japan, pp.365-369 (2000.1.)
- R.Aschenbrenner, "Concepts for ultra thin packaging technologies," Proc.Electronic Components and Technology Conference, pp.16-19 (2000)
- C.Adler et al., "Assembly of ultra thin and flexible ICs," Proc.Electronic Components and Technology Conference, pp.20-23 (2000)
- F.Jiang, Y.Tai, K.Walsh, T.Tsao, G.Lee and C.Ho, "A flexible MEMS technology and its first application to shear stress sensor skin," Proc.IEEE-MEMS'97, Japan, pp.465-470 (1997.1.)