Special Thema

나노 패터닝을 이용한 유기광기전소자의 개발

안준호 연구원, 왕용필 팀장, 박민영 연구원 (한국전기산업연구원 기술연구팀)

1. 서 론

빛을 이용하여 전기로 바꿀 수 있다는 사실이 발견된 것은 생각보다 오래 전의 일이다. 프랑스의 Becquerel은 1839년 태양광을 이용하여 전기를 생산해 낼 수 있다는 사실을 밝혀냈고, 이는 전기라는 것이 아직 우리의 일상 속을 파고들기 전부터 많은 사람들의 관심을 끌어왔던 일이었다.

하지만 태양의 빛을 가지고 전기를 만드는 일은 그리 쉽게 이루어지지 않았고, 그로부터 100년이 흐른 후에도 태양광을 전기로 변환시키는 일은 아직 많은 어려움을 가지고 있었다. 하지만 이러한 어려움은 우주시대의 개막을 알리는 1960년대에 들어서자 점차 현실적인 일로 변해갔고, 광을 전기로 변환시키는 광변환효율도 높아져, 상업적인 판매를 위한 기술경쟁이 가속화되기 시작하였다.

그로부터 다시 반세기가 지나, 21세기에 접어들면서 지구촌의 관심은 화석에너지의 급격한 증가로 인한 기후변화를 피부로 느끼기 시작하면서 점차 자연에너지, 지속가능한 에너지, 대체에너지에 관심을 기울이기 시작하였다.

그 중 태양에너지는 유럽과 일본 등 여러 나라에서 관심을 기울이면서 미래 에너지산업의 선점을 위하여 투자를 아끼지 않은 결과, 독일과 일본은 태양광산업에서 선두로 나서며, 관련 기술 및 산업을 이끌고 있다.

마찬가지로 미국 역시 태양광기술 개발에 주력하고 있으나, 지역적인 특성으로 인하여 태양광뿐만 아니라 풍력 등 지역특성에 맞는 지속가능한 에너지의 개발을 서두르고 있다.

뿐만 아니라 중동과 러시아 등과 같은 자원생산국가에서는 자원을 전략무기화 하여 국부를 쌓는 방법으로 활용하고 있는 실정이다. OPEC에서는 석유의 생산량을 조절하며 유가를 통해 국부를 쌓고 있고, 러시아는 몇 해 전 유럽의 천연가스 라인을 걸어잠금으로써 자원이 전략무기가 될 수 있다는 것을 보여주었다. 또한 중남미의 베네주엘라 같은 몇몇 나라들은 반미의 기치를 내걸면서 국가의 부를 되찾기 위해 석유의 국유화를 선언하는 등, 세계는 이미 급격한 에너지의 위기에 한발 더 다가선 모습이다.

또한 21세기에 접어들면서 화석연료의 급격한 증가는 중국과 인도라는 두 신흥공업국의 발전과 맞물리면서 다시 급격한 기후변화를 낳는 등, 악순환을 거듭하고 있는 실정이다. 이에 따라 중국은 신재생에너지에 대한 집중적인 투자를 통해 전 세계가 에너지를 전략 무기화하는 상황에 대처하고 있다.

그러나 대한민국의 에너지 자원의 개발이나 지속가능한 에너지 기술의 개발은 다른 나라들에 비해 많이 부족한 실정이다. 게다가 우리의 에너지기술에 대한 이해 부족은 에너지 과소비의 습관과 맞물리면서 한국의 에너지 과소비는 그 어느 국가보다 높은 실정이다.

특히 이러한 에너지의 과소비는 전체 에너지 사용량의 97 %를 수입에 의존한다는 사실과 비교하면 더욱 더 우리의 에너지의 사용에 대한 문제점이 드

러나게 된다.

최근 정부에서는 그린산업의 육성이라는 화두를 통해 그동안 기술개발에만 머물러 왔던 에너지산업을 수출산업으로의 변화를 통해 부가가치를 창출하는 산업으로 만들려는 계획을 준비 중에 있다. 전체적인 정책의 방향성이나 기술적인 방법론에 대해서는 논의가 더 필요하지만, 약점으로 지적된 에너지산업에 투자하여 부가가치를 창출한다는 것은 필요한 것이라 생각된다.

그리고 이러한 부가가치를 창출할 수 있는 에너지산업의 첨병으로 최근에 관심을 끌고 있는 것이 바로 나노기술을 이용한 태양전지의 개발이다.

그동안 태양전지의 개발은 실리콘 기반의 다층구조 태양전지가 가장 높은 광변환효율을 보여주었다. 그리고 대부분의 실용화된 태양전지는 실리콘 태양전지를 기반으로 제조된 제품이 주를 이루고 있다.

하지만 이러한 기술들은 모두 외국에 그 원천기술들이 개발된 상황이고, 그나마도 태양광 십만호 사업 등 한국에서 지원되고 있는 보급 사업들도 모두 수입 제품들로써 지원 사업이 계속될수록 해외 기업들만이 배를 불리는 외화유출형 사업이 계속되고 있다.

그러나 나노기술을 이용한 태양전지의 개발은 아직까지 선진국에서도 기술의 개발이 초기 개발단계로서 무한한 가능성이 존재하는 분야이다.

태양전지의 개념은 반도체의 개념이 바탕이 된다. 이는 세계적인 반도체 회사들과 이에 관련된 개발인력이 즐비한 대한민국에서 태양전지로의 기술개발에 전력을 쏟게 되면 좀 더 쉽게 뛰어난 기술을 개발하는데 유리한 고지를 선점하게 된다는 장점을 가지고 있다.

특히 유기재료를 이용한 광기전소자의 개발은 세계 최고의 유기디스플레이 제조 기술을 가진 한국이 유기광기전소자의 개발에 좋은 기본 조건들을 가지고 있으며, 또한 이미 광주과학기술원에서는 유기광기전소자에 대한 좋은 결과들을 보여주고 있다.

게다가 유기디스플레이를 제조하는 장비들은 바로 유기광기전소자를 제조하는 장비들로 대체될 수 있어, 유기태양전지가 산업화로 발전하였을 경우, 디스플레이 산업에 종사하는 기업들이 곧바로 이에 뛰어들 수 있다는 많은 장점을 가지고 있다.

또한 디스플레이 소자뿐만 아니라, 한국의 나노기술 역시 세계 최고의 수준을 보유하고 있다. 나노기술은 20세기말부터 세계적으로 여러 기술들이 발표되고 연구되고 있지만, 한국이 그 중 발표된 논문이나 개발된 기술들을 살펴봤을 때, 세계 상위에 올라있다는 것은 이미 나노기술에서 세계적인 경쟁력을 이미 가지고 있다는 것을 의미한다.

따라서 이후 언급될 나노 패터닝을 이용한 유기광기전소자의 개발은 한국이 세계를 상대로 비교우위 또는 절대적인 기술우위를 점하고 있는 분야인 반도체, 유기재료의 응용, 나노기술 등의 첨단기술을 집약한 기술이라 할 수 있으며, 이를 통해 그동안 상용화에 번번이 걸림돌이 된 낮은 효율과 높은 비용을 해결할 방안 중에 하나로 평가될 수 있을 것이라 생각된다.

본고에서는 먼저 태양전지의 기본 개념과 종류, 상태 등을 알아보고, 이러한 기본개념을 이용하여 제조된 실리콘 태양전지, 박막형 태양전지에 대해 간단히 언급하고, 유기광기전소자의 기본 개념과 종류, 특징에 대해 살펴보도록 하겠다.

그리고 이어서 최근 많은 사람들의 관심을 끌고 있는 나노 패터닝의 여러 방법들을 살펴보고, 이에 관한 특징과 제조 방법 등에 대해 살펴볼 예정이다.

마지막으로 나노패터닝을 이용한 유기광기전소자의 개발에 대한 가능성을 언급하며 글을 마치도록 하겠다.

2. 유기광기전소자의 이해

태양전지의 종류에 대해서는 그동안 많은 논고를 통해 소개된 바여서 자세히 다루지는 않고, 그림 1에 나타난 바와 같이 세대별로 살펴보면, 1세대의 단결정 및 다결정 태양전지가 현재 대부분의 상용화된 태양전지로 시장의 95 % 이상을 차지하고 있다.

또한 2세대인 박막형 태양전지는 각각 실리콘형, 화합물형, 염료감응형, 유기형 등으로 나뉠 수 있는데, 최근에는 실리콘형의 박막형 태양전지와 CdTe 및 CIGS 등 화합물형, 염료감응형 태양전지의 몇몇

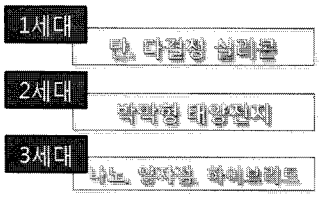


그림 1. 세대별 태양전지 개요.

은 이미 상용화까지 이루어졌다. 그러나 낮은 효율로 아직 시장점유율은 미미한 실정이며, 향후 이들의 효율을 다결정 실리콘 태양전지 정도로 높여야만 시장성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

그림 2에서처럼 유기태양전지는 박막형 태양전지 중에서도 가장 낮은 효율을 나타내고 있으며, 이는 유기재료의 특성인 낮은 전하의 이동도와 산소 및 광으로 인한 열화와 같은 유기재료의 특성을 극복해야만 태양전지 시장에서 살아남을 수 있을 것으로 생각된다.

이를 위해 다양한 기술들을 응용하여 유기광기전소자의 효율을 높이려 하고 있지만, 상용화 문턱인 10 %의 광변환효율을 나타내기엔 아직 많이 부족한 실정이다.

최초의 유기광기전소자는 1987년 Eastman KODAK社의 C.W. Tang [1]에 의해 개발되었다. Tang은 주게물질로 CuPc, 받게물질로 Perylene Tetracarboxylic Derivative의 물질로 구성하여 발표하였는데, 1 % 미만의 낮은 효율을 보이며 그 가능성만을 보여주었다.

이후 그림 2에서 보는 바와 같이 약 10여 년간 진척이 없다가 UCSB의 A.J. Heeger그룹 [2]에서 PPV 계열의 전도성 고분자와 받게물질로 C_{60}과 유기물과 잘 섞이는 C_{60}유도체인 PCBM을 섞어 한 층으로 광기전소자를 구현하였다. 이후 이 소자에 사용된 재료를 이용하여 많은 연구들이 활성화되었는데, 그 중 Cambridge대학교의 Friends그룹 [2]은 고분자를 이용한 유기광기전소자의 제조를 통해 고분자태양전지의 개발을 시도하였다. 이러한 시도를 통해 유기광기전소자는 스핀코팅이나 닥터블레이드와 같은 좀 더 쉬운 제조방법을 가진 광기전소자로 이용할 수 있는 가능성을 넓히게 되고, 이후 더욱 많은 연구결과들이 나타나, 유기광기전소자가 다양한 형태의 소자들로 발전될 수 있는 토대가 되었다.

또한 2000년대에 들어서는 Princeton대학교의 S.R. Forrest 교수팀에 의해 D/A Mixed Layer를 주게와 받게 사이에 도입한 단분자 헤테로접합 bi-layer를 형성하여 넓은 파장 영역의 광변환을 이루어, 약 5 % 이상의 광변환효율을 보여주었다.

2.1 유기광기전소자의 구조 및 메커니즘

태양전지의 구조 및 메커니즘에 관한 내용은 많

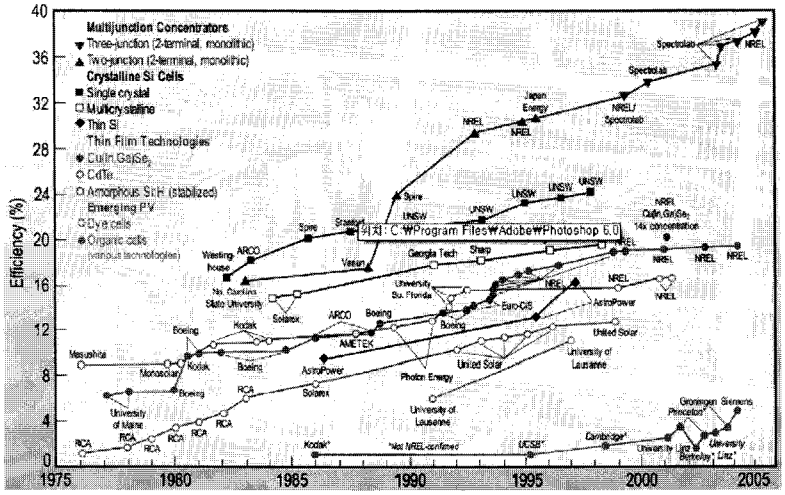


그림 2. 태양전지 종류별 에너지 효율 달성 현황.

은 논저에서 다루었기 때문에 본고에서는 간략히 언급하도록 하겠다.

유기광기전소자의 기본 구조는 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 양극 (Anode)과 음극 (Cathode) 사이에 광활성층으로 구성된 샌드위치 형태의 구조를 가지고 있다. 또 종류에 따라 크게 bi-layer형태와 벌크헤테로접합형태 두 가지로 나눌 수 있다. 여기서 광활성층 재료는 특성에 따라 입사된 광에너지가 다르게 분포되는데, 그림 4에 보는 것처럼 되도록 넓은 흡수파장을 갖는 재료의 선택이 필요하다. 또한 최근에는 효율을 더욱 높이기 위해 광을 흡수하는 전극의 투명도를 최대한 줄이고, 반사되는 광까지 흡수할 수 있도록 고려한 재료도 함께 연구되고 있다.

초기의 광기전소자는 주게와 받게 역할을 하는 두 물질을 p-n접합 형태로 붙여 제조한 형태였으나, 여기된 전자와 정공의 이동 및 확산거리의 문제와 입사된 광자가 주게와 받게 계면에서 분리되기 때문에 그에 따른 비효율적인 광자의 흡수의 문제로 인하여 높은 효율을 나타내지 못하였다.

이에 따라 ITO와 광활성층 사이에 PEDOT:PSS를 넣어 정공의 이동을 돕는 정공이동층을 삽입하는 구조가 많이 사용되었다.

또한 음전극인 Al, Ca 등과 광활성층 사이에는 BCP와 같은 Exciton Blocking Layer (EBL)를 만들어 전자의 이동을 돕고, 계면 가까운 곳에서 정공과의 재결합을 방지하기 위한 층이 도입되었다.

이러한 다양한 층의 도입은 효율을 어느 정도 향상시키기는 하였으나, 높은 효율의 향상을 가져오지는 못하였다.

그러나 고분자를 이용한 광기전소자의 개발이 시작되고 나서 벌크형태의 새로운 광기전소자가 나타나게 되었다. 이러한 구조는 그림 3(b)와 같이 주게와 받게가 넓은 계면을 형성할 수 있도록 재료의 내부에서 혼재하고, 나노크기의 도메인의 계면의 통하여 전자와 정공이 빠르게 전극으로 이동할 수 있도록 함으로써 약 5 %까지의 효율향상을 이루어 내었다.

유기광기전소자는 외부에서 입사되는 광자를 어떻게 효율적으로 전자와 정공으로 분리하여 각 전극으로 이동시켜 전기를 발생할 것인가가 중요하다.

따라서 광기전효과는 광자의 입사에 따라 에너지를 받은 광활성층 재료의 내부에서 전자와 정공으로 분리되는 과정이다. 이 과정에서 광활성재료는 낮은 밴드갭을 가짐으로써 좀 더 효율적인 전자와 정공의 분리를 이룰 수 있다. 그러나 유기재료의 일반적인 밴드갭 에너지는 수 meV 정도인 무기재료에 비해 유기재료가 상당히 높아, 보통 0.1 eV 이상의 에너지를 필요로 한다. 또한 전자, 정공의 분리가 주게와 받게 물질의 계면에서 일어나게 되므로, 이 두 물질의 접촉계면의 넓이가 흡수된 광자를 모두 흡수하지 못하게 되어 낮은 효율을 보이게 된다. 따라서 재료 내부에서 넓은 접촉면을 가진 주게와 받게물질의 계면에서 전자와 정공의 분리가 일어나는 것이 효율의 향상에 더욱 도움이 된다.

또한 그림 4와 같이 넓은 영역에서의 광흡수가 필요한데, 특히 가시광 영역에서의 높은 광흡수는 효율에 직접적인 영향을 주는 요소이다. 그림 4는 ASTM의 기준 스펙트럼으로 가시광에서 높은 에너지를 보여주고 있는데, 그림에서처럼 가시광에서의 높은 에너지 때문에 가시광영역 넓은 범위의 파장을 흡수하는 것이 중요하다. 최근에는 자외선 영역에서

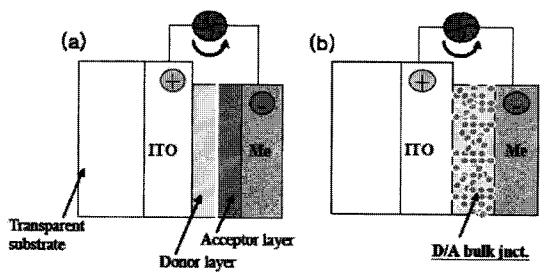


그림 3. 유기태양전지 그림.

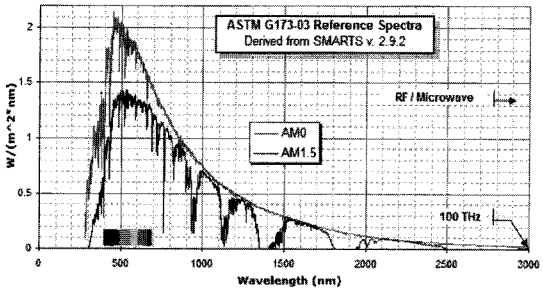


그림 4. ASTM 기준 스펙트럼.

도 광기전효과를 보이는 연구결과가 발표되어 일몰 후에도 태양전지를 사용할 수 있는 가능성을 열어 많은 연구자의 관심을 끌기도 하였다.

두 번째는 분리된 전자와 정공의 이동이다. 분리된 전자와 정공은 각기 양극와 음극으로 이동하게 되는데, 이동하는 전자와 정공을 쉽게 전극으로 이동시키는 것은 재료 내부의 구조와 깊은 관련이 있다. 보통 단분자로 구성된 유기광기전소자가 고분자로 구성된 광기전소자보다 더 빠른 이동도를 보이고 있는데, 이는 바로 단분자와 고분자의 구조적 차이 때문이다. 단분자는 재료 내부에서 에너지를 받아 재료 내부를 호핑하면서 전극으로 이동하게 되고, 고분자는 도메인의 크기에 따라 다르겠지만, 도메인의 계면을 따라 전극으로 이동하기 때문에 단분자 재료가 고분자보다는 빠른 이동도를 보이고 있다.

이처럼 유기광기전소자에서는 반도체 분야와 마찬가지로 유기재료의 이동도가 큰 요소로 작용하게 된다. 이러한 이동도를 올리기 위해 많은 노력들이 있어 왔고, 약 10^{-1}~10^{0} cm/Vs 정도의 이동도를 가진 재료가 개발되었다.

그러나 이동도는 아직 다른 소자에 비해서 느린 편이며, 이동도의 증가가 효율의 개선에 큰 영향을 끼칠 것으로 예상된다.

세 번째로는 분리된 전자와 정공의 이동 거리이다. 이들 여기자의 이동거리는 보통 10~30 nm 정도로 알려져 있다. 따라서 계면에서 분리된 전자와 정공이 전극까지 이동하려면 주게와 받게층의 두께가 각각 계면에서 10~30 nm 내에 있어야 분리된 전자와 정공이 전극으로 이동할 수 있다는 것이다.

그러나 소자의 층이 너무 얇게 되면 광이 소자를 통과하면서 흡수되지 못하고 그냥 통과해 버리는 일이 발생하면서 소자의 효율은 떨어지게 된다. 따라서 광이 통과되면서 에너지를 흡수할 수 있을 만큼의 두께를 가지면서 흡수된 에너지를 통해 분리된 전자와 정공을 전극까지 재결합하지 않고 보낼 수 있는 이동도와 구조를 갖는 것이 필요하다.

하지만 이와 같이 소자의 두께, 이동도 및 적절한 구조라는 세 가지 어려운 문제를 해결하는 것은 결코 쉬운 일이 아니며, 이의 해결을 위해서는 어렵고, 새로운 시도가 이루어져야만 할 것으로 생각된다.

2.2 유기광기전소자의 종류

앞서 이야기한 것처럼 유기광기전소자는 기본적으로 두 가지 종류의 소자로 나뉘어 있다. 하나는 복층 (Bi-layer)형과 벌크헤테로접합 (Bulk Heterojunction)형이다.

복층형은 초기 Tang이 개발한 광기전소자에서 시작하여 지금까지 동일한 형태를 유지하며 개발되어 왔다.

이러한 소자들의 주게물질은 태양광 스펙트럼과 잘 맞고, 매우 강한 광흡수도를 가지고 있어야 하며, 받게물질은 가시광영역에서의 광흡수가 적어야 하며 동시에 받게 물질에 비해 전자친화도가 커야 하는 조건을 가지고 있다.

주로 Princeton대학교의 Forrest 교수 연구팀이 주된 성과를 가지고 있는데, 2000년 ITO/CuPc/PTCBI/BCP/Ag 구조 [4]의 광기전소자를 통해 Exciton Blocking Layer를 도입하므로써 1 % 미만이던 복층구조 (bi-layer) 광기전소자의 효율을 2.4 %로 향상시킨 결과를 보여주었다. 이후 2001년에는 PTCBI가 아닌 풀러렌을 사용하므로써 AM 1.5 조건에서 3.6 %의 광변환효율을 가진 소자를 개발하는 등 괄목할만한 성과를 보여주었다.

복층구조의 유기광기전소자에 주로 사용되는 재료는 주게층으로는 CuPc, ZnPc 등 Phthalocyanine 계열의 재료들이 많이 이용되고 있고, 받게층으로는 Fullerene (C_{60}) 또는 C_{60}이 유기용매에 잘 녹도록 설계된 PCBM 등이 사용되고 있으며, 그 외 단분자로는 Perylene, PTCBI 등이 사용되고 있다. 그림 5는 주로 사용되는 단분자 유기광기전소자의 재료로 쓰이

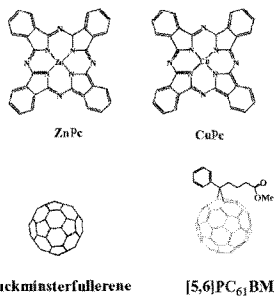


그림 5. 단분자형 유기광기전소자 재료.

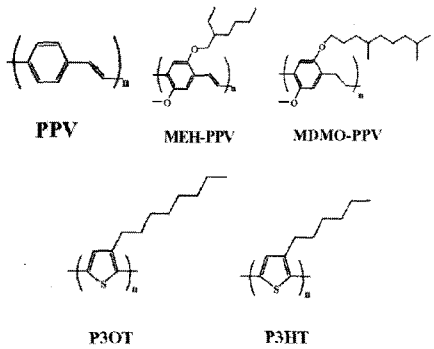


그림 6. 고분자형 유기광기전소자 재료.

는 ZnPc, CuPc, C_{60}, PCBM의 분자구조를 나타낸 그림이다.

또 BHJ로 불리는 벌크헤테로접합형 유기광기전소자는 주게와 받게 사이의 접촉면을 크게 하면서 분리된 전자와 정공이 트랩 없이 전극으로 갈 수 있도록 해야 한다. 따라서 그림 3(b)처럼 적절히 두 재료가 잘 혼합되어 주게와 받게가 효율적으로 광자를 흡수하여 전자와 정공을 분리, 이동시킬 수 있는 구조가 필요하다.

이러한 구조의 유기광기전소자는 1995년 UCSB의 G. Yu [5]에 의해 처음으로 실현되었는데, 기존의 C_{60}은 유기용매에 대한 용해도가 낮아 고분자와 섞였을 때, 상분리가 일어나는 문제점을 극복하여 유기용매에 잘 녹도록 측쇄기(Side Chain)를 붙인 C_{60} 유도체를 사용하여 고분자와 풀러렌의 혼합되는 정도를 매우 높게 만들었다. 이러한 기술적 발전을 통해 제작된 ITO/MEH-PPV:PCBM(1:4)/Ca 구조의 광기전소자는 단색광 하에서 2.9 %의 광변환효율을 나타내었다.

이후 벌크헤테로접합형 광기전소자는 많은 연구자들에 의해 집중적으로 연구되기 시작하였는데, 고분자 설계, 박막 제작 방법의 변화 등을 통해 고분자 박막의 모폴로지를 변화시켜 꾸준한 효율의 향상을 이루어내었다.

특히 F. Padinger [6] 등은 P3HT와 PCBM의 복합재를 이용한 소자를 75 ℃ 정도의 열처리를 통해 박막 내 고분자 사슬의 결정화 (Crystallization)와 방향성을 증가시켜, 3.5 %의 이르는 효율을 보여주었다.

그리고 Heeger그룹은 소자의 구조를 Tandem구조로 제조하여 5 % 이상의 효율을 나타내며, 5 % 이상의 광변환효율을 내는 광기전소자를 제작할 수 있다는 가능성을 열어주었다.

그러나 이러한 유기광기전소자들의 낮은 효율은 실리콘계 태양전지와 염료감응형 태양전지에 비해 턱없이 낮은 광변환효율을 기록함으로써 많은 연구자들이 효율 향상에 대한 기대치가 낮은 원인이 되었다. 하지만 최근 세계적으로 나노기술에 대한 이해와 제조 기술이 발전함에 따라 최근에는 나노기술을 접목하여 유기광기전소자에 응용하려는 움직임이 나타나고 있다.

본래 무기반도체와 유기반도체 재료의 특성은 상반된 점이 있어서 이를 함께 응용하려는 움직임은 이전부터 고려되었다. 하지만 벌크형태의 무기반도체 재료는 가공에 드는 비용문제로 인하여 쉽게 응용되지 못하였다.

그러나 최근 나노기술의 발전으로 유기박막에 나노크기의 무기재료를 혼합하여 두 재료의 장점을 취하려는 움직임이 늘고 있다. 이를 통해 무기재료의 낮은 밴드갭에너지와 높은 이동도를 활용하고, 유기재료의 저가이며, 대량생산이 가능한 특성을 이용한다면 저가이면서 높은 효율을 내는 광기전소자를 제작할 수 있다는 점에서 높은 평가를 받고 있다.

다만 무기재료의 크기에 따른 특성을 파악하고, 나노 결정을 유기재료 내에 고르게 분산시켜 균일한 효과를 얻는 것은 아직 많은 숙제를 안고 있다. 또한 나노재료의 모양 (Shape)에 대해서도 아직 많은 부분 그 특성을 파악하지 못하고 있어, 이에 대한 많은 연구가 필요한 실정이다.

최근 많이 연구되고 개발되고 있는 나노로드나 나노와이어의 경우, 이들이 유기재료 내에서 어떻게 정렬하느냐에 따라서 전체적인 광기전소자의 이동도의 향상이 제한받게 된다. 또 나노재료와 재료 사이에 놓아 유기재료에서의 이동도 역시 광기전소자의 이동도를 제한하는 역할을 하므로 이에 대한 연구도 필요한 상황이다.

태양전지에 사용되는 나노구조의 재료를 분류하면, 네 가지로 나눌 수 있다. (1) 나노복합재 (3D), (2) 양자우물 (2D), (3) 나노선, 막대 또는 나노튜브(1D),

(4) 나노입자 및 양자점 (0D) 등이다. 또한 이들은 각각의 모양에 따라 태양전지의 효율을 높이기도 하고, 낮추기도 한다.

나노복합재를 이용한 광기전소자는 염료감응형 광기전소자에서 먼저 이루어졌다. 스위스의 Gratzel [7]은 TiO_2와 전기화학적인 전하의 이동을 통해 6.5 %의 광변환효율을 갖는 새로운 광기전소자를 만들었다. 이로 인해 많은 연구자들이 쉬운 제조공정과 높은 효율을 갖는 광기전소자의 제조에 접근할 수 있었다. 또 나노결정을 갖는 실리콘 광기전소자 역시 나노 복합재를 이용하여 만든 새로운 광기전소자로 평가받을 만하다. 이들은 플라즈마 처리된 화학기상증착법을 통해 만들어졌는데, 벌크형태의 고가의 가공비용이 들지 않고, 기상증착법을 통해 제조할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 이들의 효율이 벌크형태에 비하면 상당히 낮다는 단점이 있다.

유기광기전소자에서 나노크기의 무기재료를 이용한 하이브리드 광기전소자의 제조는 최근에서야 연구되기 시작하였다.

그 중 CNT를 이용한 유기광기전소자의 제조가 한때 붐을 이뤘는데, 이는 CNT의 특성이 다른 재료보다 높은 이동도를 보여 유기재료와 함께 응용하면 높은 효율을 나타낼 것으로 기대를 모았기 때문이다.

CNT를 이용한 연구는 1999년 Ago가 멀티형인 MWNT와 PPV를 혼합하여 1.8 %의 효율을 가진 소자를 제작하면서 2006년에는 Pradhan이 P3HT:CNT/C_{60}의 구조를 가진 소자를 제조하였고, 2007년에는 Chaudhary가 P3HT와 PCBM 등에 CNT를 각 층에 혼합하여 이에 따른 CNT의 영향을 조사하였는데, 약 4.9 %의 높은 효율을 나타내었다.

그러나 이러한 CNT에 대한 영향은 거의 5 %의 높은 효율을 달성하고도 논란이 남아있었는데, 2008년 옥스퍼드에서 발표된 CNT의 영향에 대한 논문으로 CNT의 한계가 명확히 드러나기도 하였다.

3. 유기광전자 시스템에 이용 가능한 나노 패터닝 기술

1990년대 플라스틱 기판위에 전도성 유기단분자층을 진공 증착하여 제작한 최초의 트랜지스터가 개발된 이후 유기재료를 이용한 디스플레이소자의 개발이 이어지면서 플라스틱 기판위에 롤투롤 (Role to Role)이나 인쇄, 잉크젯 등의 방법을 통해 다양하고 새로운 전자기기의 제작이 가능하게 되었다.

이러한 직접화된 회로를 구현을 견인해 온 패터닝 기술은 1800년대 사진술에서 차용한 가장 오래된 광전사 기술인 투영기법을 이용하여 공정속도의 증가나 해상도의 개선으로 소자의 크기를 현저히 감소시켜 동작속도의 증가나 작동전압의 감소를 가져옴과 동시에 보다 고집적화된 회로를 구현하여 마이크로 전자공학의 발전에 핵심적인 역할을 하였다.

그러나 최소 45 nm의 해상도를 가지는 집적화된 회로를 구성하는데 있어, 세계 최고의 반도체 기술을 보유한 한국의 상황도 "황의 법칙" 등과 같이 신기술, 첨단기술에 대한 담보 없이 시장을 개척하는 일은 어려운 일이다. 그리고 이러한 기술을 유지하고 발전시키는 등 새로운 신기술의 적용이 지속되어야 하는 부담을 안고 있고, 또 이러한 고집적화는 다시 새로운 패터닝 기술을 요구하고 있다.

여기에 나노기술이 접목되면서 신기술에 대한 진보가 시작되려 하고 있다. 하지만 본고에서는 유기광기전소자에 국한하여 이에 응용이 가능한 패터닝 기술을 살펴보고, 이 기술들이 유기광기전소자에 어떻게 응용하는 것이 바람직한 것인가에 대해 살펴보려 한다.

3.1 유기소자용 광기반 패터닝 기술

3.1.1 광 리소그래피

투영 기술 기반의 포토리소그래피 공정은 공정속도와 해상도의 면에서 좋은 평가를 받지만 감광재, 용매, 현상액 및 자외선에 대한 노출로 인해 유기물의 안정성이나 플라스틱 기판의 해상도 저하, 대면적 패턴 형성의 문제 등으로 유기재료에 직접적으로 적용하는 데는 많은 어려움이 있다.

하지만 직접적으로 포토 패터닝이 가능하게 설계된 몇몇 재료가 있는데, 펜타센 (Pentacene) 유도체를 이용하는 방법이 있다.

펜타센은 ~1 cm^2/Vs 정도의 높은 이동도를 가져 가장 많이 연구되어온 대표적인 유기반도체 물질 중

의 하나이다.

그림 7에서와 같이 펜타센 유도체에 UV조사를 통해 선택적으로 고분자화를 유도, 빛에 노출되지 않는 부분을 선택적으로 제거하고, 열공정을 통해 패턴된 펜타센을 얻는 방법이다.

또 폴리아닐린 (Polyaniline)과 폴리씨오펜 (Polythiophene) 계열의 고분자 또한 유기전도성 고분자로 PANI의 경우 도핑된 전도성 PANI는 용매에 잘 녹지만, 비전도성 PANI의 경우는 잘 녹지 않는다. 이러한 점을 이용하여 패턴을 형성할 수 있는데, 이 방법은 기판에서부터 전극에 이르기까지 모두 유기물로 된 소자의 제작 시 매우 유리한 방법이다.

3.1.2 광 소프트 리소그래피

소프트 리소그래피는 부드러운 소재를 몰딩이나 프린팅 방식을 통해 특정한 패턴을 전이하는 방법을 이야기한다.

그림 8(a)에서 요철 구조의 부드러운 탄성체를 마

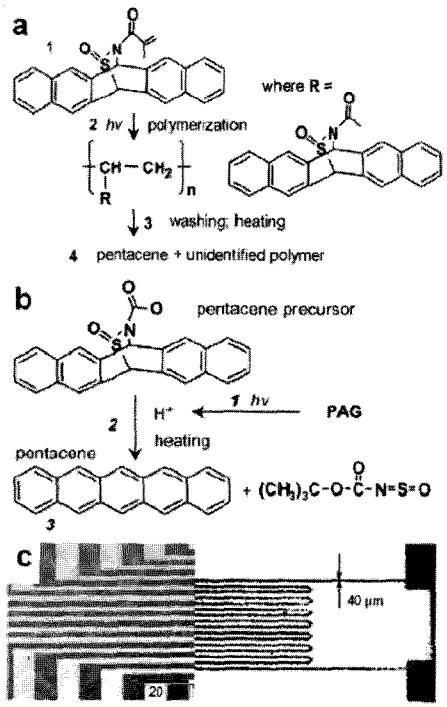


그림 7. (a) 펜타센유도체의 고분자화 과정, (b) UV를 조사한 영역의 광분해를 이용한 펜타센의 광패턴, (c) 위의 방법을 이용해 적용된 펜타센 패턴.

스크처럼 사용하여 감광층 표면에 접촉시켜 빛을 조사하고 현상공정으로 패턴을 형성하는 방법이다. 이 기술의 특징은 마스크와 감광층에 일종의 Van Der Waals 힘에 의한 원자 수준의 완벽한 접촉을 별다른 압력 없이 완벽한 접촉을 재현성 있게 이루어낸다는 것이 특징이다.

만드는 방법은 먼저 자외선에 투명한 PDMS와 같은 투명한 탄성체를 그림 8과 같이 감광층에 PDMS의 요철 표면을 접촉시키고 자외선을 조사시키면, PDMS와 공기 사이의 굴절률 차와 요철 홈의 깊이에 따라 투과되어 감광층에 입사되는 빛의 세기가 달라진다. 이와 같은 방법으로 감광층을 감광시킨 후 현상공정으로 패턴을 형성할 수 있다.

이 현상을 이용해 범용 수은램프를 이용한 365 nm 파장에서 ~100 nm 수준의 너비를 가지는 패턴을 형성할 수 있다.

3.2 엠보싱, 임프린트 리소그래피

유기 소자는 표면에 요철 구조를 가지는 고형물

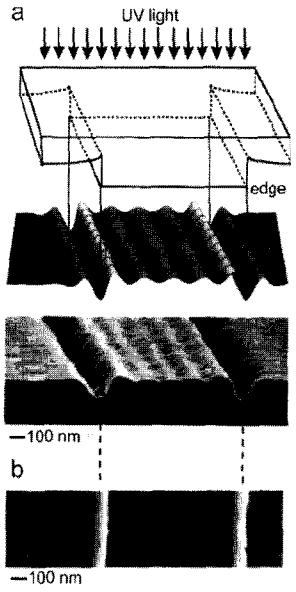


그림 8. (a) 감광층에 밀접한 접촉을 가지는 PDMS 위상 마스트를 투과한 빛의 세기 분포에 대한 계산치와 실제 실험을 통한 감광층에 형성된 패턴, (b) 이 방법을 이용하여 100 nm 너비를 가지는 라인패턴.

을 이용해 다른 물체의 표면에 액체를 주입하거나 고체 표면을 연화시켜 원하는 요철구조를 전이시키는 방법으로 주형기법에 의한 패턴형성에 용이하다.

이 방법을 이용하기 위해서는 주형의 제작이 필요한데, 그림 9와 같이 지지기판에 레지스트 필름과 에칭 마스크로 작용될 층을 형성하고, 레지스트 층에 패턴을 형성 시킨 후, 이를 에칭 마스크로 건식 에칭 공정을 통해 기저 필름에 패턴을 전사하고 최종적으로 잔류하는 레지스트를 제거 하는 방법을 사용한다.

이러한 몰드는 그림 9(b)와 같이 주형방법을 통해 고분자 재료 기반의 소프트 몰드 제작에 원형틀로 사용 될 수도 있다.

3.2.1 엠보싱

전형적인 엠보싱 공정은 그림 10(a)와 같이 필름 물질이 낮은 점도를 가지거나 외부압력이 인가되면 몰드의 돌출된 부분이 필름내로 묻히게 되면서 몰드 표면의 패인 쪽으로 유기물이 흘러 몰드의 표면 구조의 역상으로 유기물 필름의 표면에 요철 구조가 형성된다.

또 하나의 예로, OLED의 패터닝에도 엠보싱 공정이 가능하다. 그림 11은 PPV필름으로 엠보싱과 임프린트 리소그래피를 이용하여 제작한 OLED 발광 현미경 사진이다.

제조 과정은 우선 투명전극, ITO 위에 PPV의 중간 합성물인 p-xylenebis (Tetra-hydrothiphenium Chloride)를 스핀코팅으로 필름을 형성시키고,

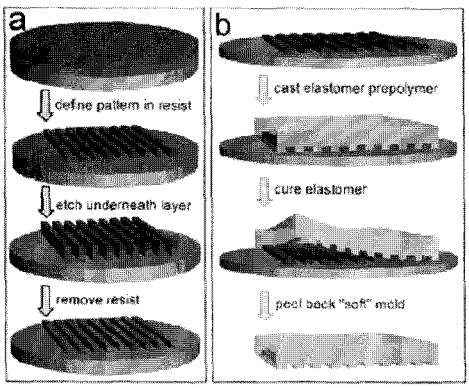


그림 9. (a) 주형제작 방법, (b) 부드러운 몰드형성과정.

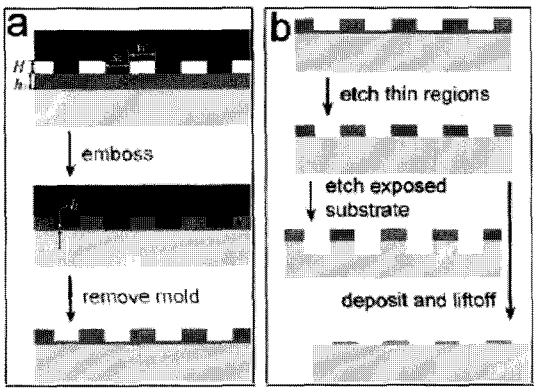


그림 10. (a) 박막의 엠보싱 공정과 (b) 엠보싱으로 처리된 박막패턴의 레지스트 제거과정, 임프린트 리소그래피는 (a)와 (b)의 조합으로 형성.

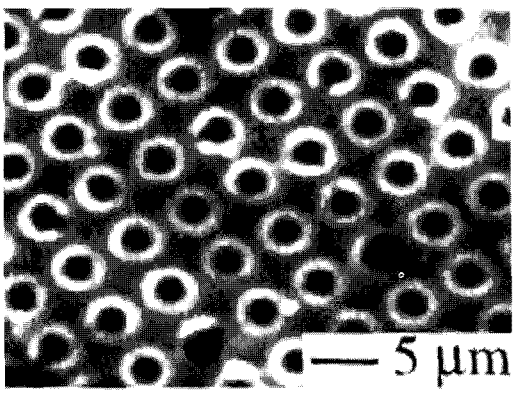


그림 11. PPV필름의 엠보싱과 임프린트 리소그래피를 이용하여 제작한 OLED의 발광 현미경 사진.

PDMS 몰드를 메탄올에 적셔 접촉시킨다. 메탄올은 형성된 필름에 부분적으로 용해시켜 엠보싱 공정을 용이하게 해주며 PDMS를 통해 증발되어 패턴을 형성한다. 이후 진공 하에서 260 ℃로 가열해 주면 이 패턴된 중간 합성물은 PPV로 바뀌게 된다. 최종적으로 전극을 증착하고 나면 LED를 구현할 수 있다.

3.3 임프린트 리소그래피

임프린트 리소그래피는 엠보싱 방법에 의해 생성된 문제점인 몰드 표면의 돌출된 부분에 의해 눌려진 부분에 얇은 레지스트막이 존재할 수밖에 없는데, 이 때문에 엠보싱 공정 후 식각 공정을 통해 패턴

형상들이 서로 독립된 필름구조, 즉 패턴이 형성된 부분에 기저 필름이 드러나 그림 10(b)와 같은 리프트오프 공정을 통해 기저필름에 형성된 패턴을 바탕으로 다른 기능성 재료의 도입을 가능하도록 할 수 있다. 이러한 방법을 임프린트 리소그래피라 한다.

대개 임프린팅 공정에서는 이온 혹은 플라즈마와 같은 건식에칭을 사용하는데, 이는 필름의 수평방향에 비해 수직방향으로 매우 높은 비등방성 에칭 속도를 가지게 된다.

초기 임프린팅 공정은 PMMA와 같은 고분자에 열과 높은 압력을 주어 엠보싱 방법으로 수행되었고, 이후 몇몇 연구그룹에서 임프린트 공정 온도와 압력을 낮추는 연구가 진행되어 SFIL방법이 개발되었다.

이 방법은 기존의 레지스트 필름 위에 낮은 점도를 가진 자외선 경화용 물질을 도입하여 몰드의 요철구조 내부로 빠르게 채운 후, UV조사를 통해 고형화시키는 형태로 낮은 온도와 압력으로도 높은 종횡비를 가진 패턴을 형성시킬 수 있다는 장점을 가진다.

특히 이 방법은 저가로 대면적 혹은 비평면의 굴곡을 가진 기판의 패터닝을 저온, 저압 공정을 통해 유용하게 적용할 수 있다는 점에서 각광을 받아 왔다.

이를 이용한 사례를 한 가지 살펴보면, 그림 11에서처럼 n형 Si (게이트)에 5 nm 두께의 SiO_2 (절연층) 기판 위에 고분자의 임프린팅 공정을 통해 패턴 (70 nm, 채널길이)을 형성하고 Au의 리프트오프 공정을 통해 소스와 드레인 전극을 형성시킨다. 이에 p형 반도체 특성의 고분자 (P3HT) 필름을 스핀코팅으로 형성시켜 주어 그림 17과 같은 I-V특성을 보이는 OTFT 소자를 제작할 수 있다.

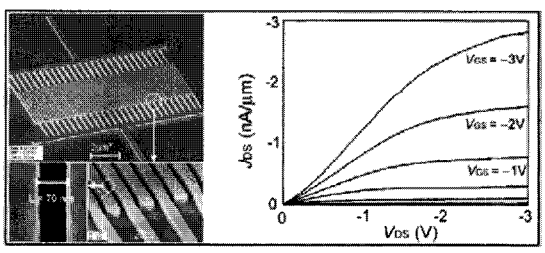


그림 12. 임프린팅 리소그래피를 이용, 제작된 채널.

3.4 프린팅법에 의한 패턴 형성

프린팅은 스탬프나 노즐, 마스크 등을 매개체로 단순한 물리적인 접촉이나 노출을 통해 기판으로 특정 물질을 패턴형상으로 전사시키는 과정을 가리킨다.

유기소자에 프린팅 방법을 사용할 경우, 전극에서 절연층, 발광층 및 전도층에 이르기까지 적층되는 개개의 막을 형성시킬 수 있을 뿐만 아니라 연속, 순차 공정에도 적용이 유리하다. 또 이 방법은 물질의 적용성 및 소자의 제작에 상당한 자유도를 가지기 때문에 저가의 대면적화 공정에 유용하게 적용할 수 있는 등 다양한 장점이 있다.

하지만 프린팅 공정은 패턴에 사용되는 물질의 특성에 의해 매우 민감하게 작용하기 때문에 성공적인 프린팅 공정을 위해서는 물질 특성에 대한 이해와 주의 깊은 공정조건의 확립이 필요하다.

3.4.1 스탬프

스탬프를 이용한 미세 구조 형성은 유기전자 및 광전자 영역의 다양한 분야에서 성공적으로 적용되어왔다. 이러한 스탬프는 도입되는 잉크 물질이 특정소자의 기능성 막, 기저막의 에칭을 위한 레지스트 또는 특정 물질의 성장 또는 코팅을 위한 촉매 등 필요한 특성에 따라 매우 다양하며 사용되는 스탬프 또한 유리, Si와 같은 단단한 물질에서 PDMS와 같이 유연한 점탄성체나 플라스틱 필름 등 다양한 물질을 사용한다.

스탬프를 이용한 패터닝은 상당히 좋은 해상도를 기대할 수 있으며 해상도는 주로 스탬프 자체의 구조나 사용되는 잉크 물질의 화학적 특성에 의해 좌우 된다.

스탬핑 방법에 의한 미세구조 제작 기술 중 하나로 미세접촉 프린팅 (μCP, Microcontact Printing) 방법이 있다. μCP는 스템핑 방법을 통해 적용되는 소자의 기능성 물질의 패턴을 통해 이후 소자 제작 공정에 있어 보다 간단하게 에칭 마스크와 같은 역할을 하는 화학적 주형틀을 형성시킬 수 있는 방법이다.

또 μCP를 이용해 초박막 습식에칭 마스크를 형성시켜 OTFT의 금속전극을 형성시킬 수 있는 "Printing and Etch" 공정에 응용할 수 있다. 그림 13(a)에 나타낸 것과 같이 스탬프를 묽은 Hexade-

canethiol (HDT) 용액에 일정시간 담지시켜 HDT를 도입한 다음 Thiol기와 강한 결합력을 가지는 Au가 증착된 기판에 접촉시킨다. 이때 패턴된 스탬프의 돌출된 부분이 기판과 접촉, 기판으로 패턴된 SAM (Self-assembly Monolayer)을 형성한다.

그림 13(b)는 유연한 플라스틱 기판에 증착된 Au의 μCP와 에칭을 이용해 256개의 Petacene기반의 OTFT 소자 배열을 보여 주며 이 TFT 배열을 이용해 전기이도 (Electrophoretic) 잉크를 적용시켜 구현한 흑백 디스플레이 시제품을 그림 13(c)에서 보여주었다.

3.4.2 전이 프린트

광기전소자와 같은 응용소자에 기능성 능동물질을 스탬프를 통해 기판에 직접 도입하려는 일련의 기술을 "전이 프린팅 (Transfer Printing)"이라고 명명한다. 이 기술은 용매의 노출이나 다른 공정의 개입 없이 소자에 다양한 종류의 물질의 패턴 형성이 가능하며 기존의 μCP 공정에서 보다 높은 해상도를 기대할 수 있다는 장점이 있다.

μCP공정이 전이프린팅과 다른 점은 사용되는 기판들에 특정한 화학적 표면처리를 통해 도입하려는 물질과 기판 사이의 적절한 접착력을 도입한다는 것이다. 이러한 전이 프린트에 적합한 재료로 PDMS가 사용되는데, 이는 일정한 압력이 도입되거나 전이하고자 하는 물질이 소프트한 유기재료일 때 패턴 전

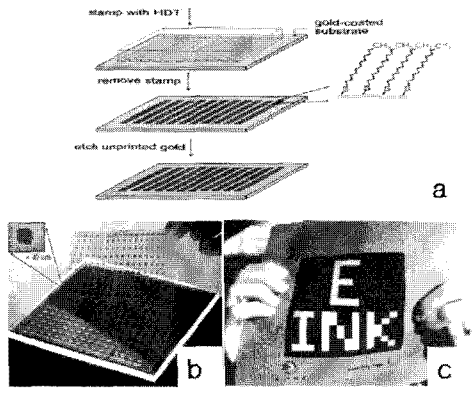


그림 13. (a) μCP와 에칭공정을 이용한 금속패터닝의 개략도, (b) 동일한 방법으로 제작한 Back Plane, (c) μCP와 에칭공정을 이용해 구현한 전자종이 디스플레이.

체의 균일한 접촉을 용이하게 하기 위해서이다. 전이 프린팅에 도입되는 패턴형상은 스탬프의 패턴형상에 기인하며 금속에서 유기물, 절연체에 이르기까지 매우 다양한 물질을 적용할 수 있다.

금속물질을 잉크물질로 사용하여 전이프린팅 하는 경우 주로 Nanotransfer Printing (nTP)라 하며 μCP에 비해 높은 해상도를 얻을 수 있으며 OTFT의 전극형성 및 유기광기전소자의 전극 패턴 형성에도 용이하다. 그림 14와 같이 일반적으로 nTP 공정은 우선 스탬프에 금속을 증착하는데, 필요에 따라 이후 기판에 접촉시켜 스탬프 표면에서 기판으로 금속막이 쉽게 전이되도록 하기 위해 금속증착전에 스탬프에 접착방지층 (Antiadhersion)을 형성시킨다. 또 기판에 접촉하여 금속잉크와 기판의 접착력을 증가시키기 위해 기판에 필수적으로 화학적 표면처리를 수반한다. 이 경우 몇몇 제한이 있지만, ~10 nm 이하의 Edge Roughness와 ~100 nm 정도의 패턴형상 해상도를 가진다.

이러한 방법은 플라스틱 기판이나 기능성 유기필름에 직접적으로 금속 패턴을 전이, 형성시킬 수 있어 진공증착 시 금속입자의 유기층 확산을 막을 수 있어 유리하다. 그러나 nTP 방법이 매우 좋은 해상도와 공정의 단순함으로 상당히 매력적인 패턴 형성 기술임에도 불구하고 그 적용에 있어 단일 소자에 한하여 제한된다는 단점이 있다.

또한 대부분의 단분자 및 고분자 계열의 유기반도체 물질은 스템핑을 이용한 전이 프린팅 공정에

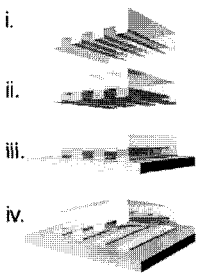


그림 14. 금속의 Nanotransfer Printing (nTP)에 의한 패턴형성 모식도, (i) 스탬프에 금속을 진공증착, (ii) 타깃기판에 접촉, (iii) 공유결합, 금속결합 및 비공유성 표면인력에 의한 스탬프로부터 타깃기판으로의 금속전이, (iv) 기판으로부터 스탬프 제거.

적용될 수 있다. 스탬프 위에 코팅된 α-NPD 발광층을 기저 ITO 기판에 접착 촉진막 (Adhesion Promoter)을 유도하여 그림 15(a)와 같이 프린팅할 수 있으며, 플라스틱 기판에 P3HT를 전이시키거나, 그림 15(b)와 같이 펜타센 필름을 전이 프린팅을 통해 OTFT를 구현할 수 있다.

또한 유연한 기판 위에 SWNT들이 무질서하게 상호 연결된 구조나 정렬된 배열을 가지면 유연한 전자소자의 응용에 효과적이다. 이는 기계적 굽힘 특성이 매우 우수하며, 광학적 투명도, 높은 전하 이동도, 유기전자재료와 좋은 계면을 형성할 뿐만 아니라 스탬프를 이용한 직접 전이프린팅 방법에 적용 가능하다는 장점을 가진다.

3.4.3 물리적 마스크

용액이나 기체 형상의 기능성 물질은 물리적 마스크나 노즐 등의 개방된 영역을 통해 패턴을 형성하여 다양한 전자소자 부품으로 사용될 수 있는데, 스크린 프린팅이나 섀도우 마스트, 노즐 스캔 등이 그것이다.

이 중에서 스크린 프린팅 방법은 프린팅에 관계하는 유체 형태 잉크의 흐름을 제한하여 패턴된 메쉬 형태의 스크린을 이용하여 스크린을 펼쳐 타깃기판 사이를 미세하게 띄운 후, 고무롤러와 같은 스퀴지를 이용해 잉크를 밀어 넣어 타깃기판에 패턴 형태로 형성시키는 방법으로 오래전부터 많이 써왔던 방법이다.

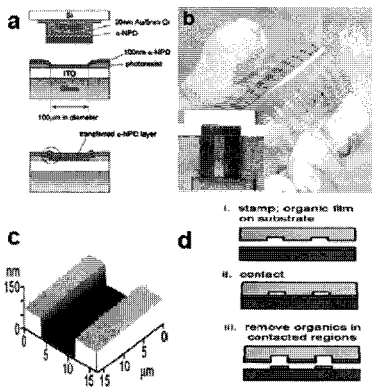


그림 15. 펜타센 필름을 전이프린트 방법을 통한 OTFT 구현 방법 모식도.

이러한 방법은 유기광전자 물질을 이용한 응용에 있어 다양성과 공정의 적합성을 기대할 수 있다. 특히 PCB나 태양전지와 같은 상용화 소자의 적용에 있어 대면적 기판에 수 초 내에 프린팅을 할 수 있는데, 상용화 장비로 30 × 30 cm^2 크기의 기판에 100 μm 간격을 가지는 패턴을 5초에 형성시킬 수 있다.

그러나 이러한 방법은 나노크기의 패턴형성을 통해 광기전소자를 제작하려는 시도에는 상당히 제한적일 수밖에 없는 방법이다.

또 다른 방법으로 노즐스캔 방법을 들 수 있는데, 작은 직경을 가진 노즐의 스캐닝을 통한 기능성 물질의 패터닝은 유기전자 및 광전자 시스템에서 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.

4. 나노패터닝을 이용한 유기광기전소자

그림 16은 유기광기전소자의 종류별 구조를 그림으로 나타내었다. 이 중 (c)그림은 앞서 설명한 나노패터닝된 구조를 가진 유기광기전소자를 설명해 주고 있다.

이 연구에서 저자는 나노임프린트 방법을 이용하여 소자를 제작하였는데, 먼저 PEDOT:PSS를 스핀코팅하고, 주게로 P3HT, 받게로 페릴린 유도체를 사용하였다. 또한 몰딩은 실리콘을 사용하여 제조하였고, 몰드에서 쉽게 박막으로 옮길 수 있도록 실란 처리하여 소자를 제작하였다.

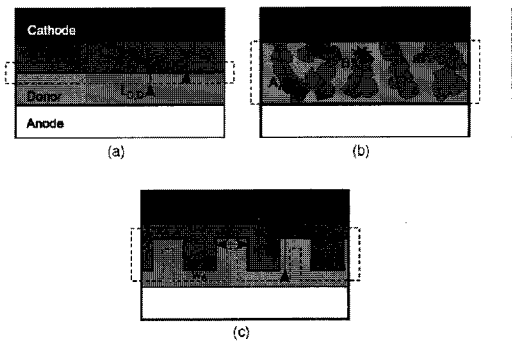


그림 16. 유기광기전소자의 종류별 구조 (a) Bi-layer, (b) BHT, (c) Nano-patterned PV Cell.

그림 17의 구조와 결과를 나타낸 표를 살펴보면 아직까지 새롭게 제조된 광기전소자의 효율은 1 %에 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

한편 버클리대학교의 국가지정연구소인 LBNL에서는 야심찬 프로젝트를 계획 또는 진행 중인데, 그 중 하나가 바로 효율 50 %에 이르는 유기광기전소자를 제작하는 것이다.

이들은 기존의 유기광기전소자에 하이브리드형의 나노막대 또는 튜브를 세우고, 거기에 p-n접합 반도체 구조의 분자체인을 만들어 효율이 50 %에 이르는 유기광기전소자 제조를 연구 중이다.

이처럼 나노패터닝이나 나노기술을 응용하여 새로운 형태의 유기광기전소자를 제조하여 고효율의 태양전지를 개발하는 연구가 속속 진행 중에 있다.

5. 나노패터닝과 만난 유기광기전소자의 미래

최근까지 국내외에서 개발된 유기광기전소자는 다양한 기술들을 이용한 새로운 시도들이 어이지고 있다. 실리콘 태양전지가 19세기에 발견되어 실제로 쓰이는데 반세기, 상용화까지 한 세기가 걸린 것에 비한다면 상당히 빠른 속도로 기술들이 발전하고 있는 상황이다.

하지만 아직까지 갈 길은 멀기만 하다. Tang의 개발 이후 한동안 지지부진하던 유기광기전소자는 최

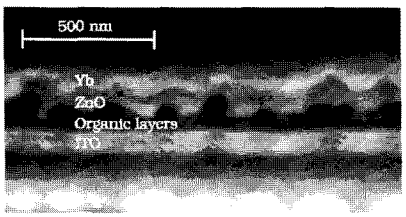


Table 1. Structure, relative interface area A/A_0 and extracted characteristics for different P3HT/PTCDI-C_5 devices.

Structure	A/A_0	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA cm^{-2})	FF (%)	η (%)
Planar	1	406	0.32	53	0.07
70/70 40 nm	1.5	398	0.45	53	0.096
50/50 40 nm	1.7	390	0.48	55	0.104
50/50 100 nm	3	220	0.74	25	0.04

그림 17. 나노패터닝 방법을 이용한 유기광기전소자의 단면 및 실험결과를 보여준 표.

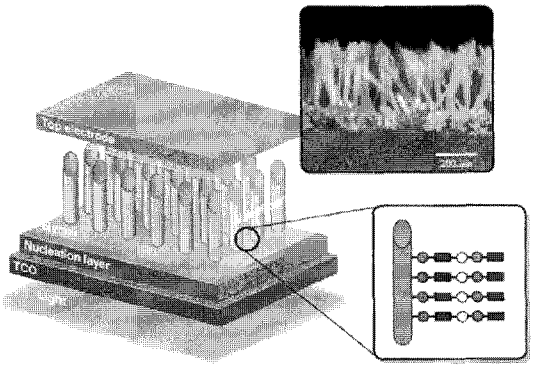


그림 18. 고효율 유기광기전소자의 개념도.

근 들어 부쩍 속도를 내며 급성장하는 기술로 발전하였다. 이는 많은 연구자들의 노력이 결실을 맺은 결과이기도 하지만, 최근 발전을 거듭하고 있는 나노기술의 발전에 힘입은 바 크다.

최근 개발되는 몇몇 연구들은 우리에게 시사점을 던져준다. 그것은 기존에 개발된 기술들을 이용하여 한층 업그레이드된 기술을 개발하는 것보다 세계적으로 인정받는 원천기술의 확보가 그것이다.

다행이 유기광기전 분야는 그 성장성에 비해 아직 세계적으로도 획기적인 기술 개발의 여지가 풍부하게 남아있는 분야이다. 또한 한국은 현재 가장 앞선 유기반도체소자 기술을 앞세워 효율에서는 세계 최고의 기술을 가지고 있기도 하다.

본고에서 소개된 유기광기전소자와 나노패터닝 기술 역시 이러한 조류에 맞춰 기술융합을 통해 새로운 기술과 분야를 창출하고 발전할 수 있는 계기가 되길 바라마지 않으며, 많이 미흡한 글이지만 독자들의 이해를 바라며 글을 마친다.

감사의 글

본 원고의 3장 부분은 KISTI 전문가보고서의 "유기전자/광전자 시스템들의 마이크로, 나노 패터닝 기술"을 발췌, 요약하였습니다. 좋은 내용 감사합니다.

참고 문헌

[1] C.W. Tang and S.A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes", Appl. Phys. Lett., Vol. 51, No.12, p. 913, 1987.

[2] G. Yu and A.J. Heeger, "Charge separation and photovoltaic conversion in polymer composites with internal donor/acceptor heterojunctions", J. Appl. Phys. Vol. 78, No. 4510, 1995.

[3] P. Peumans, S.R. Forrest, "Very-high-efficiency double-heterostructure copper phthalocyanine /C_{60} Photovoltaic cells", Appl. Phys. Lett., Vol. 79, No. 126, 2001.

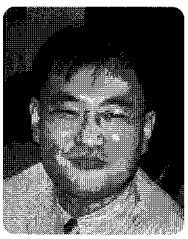
[4] P. Peumans, V. Bulovic, S.R. Forrest, "Efficient photon harvesting at high optical intensities in ultrathin organic double-heterostructure photovoltaic diodes", Appl. Phys. Lett., Vol. 76, pp. 2650-2652, 2000.

[5] G. Yu, J. Gao, J.C. Hummelen, F. Wudl, A.J. Heeger, "Polymer Photovotaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions", Science, Vol. 270, pp.1789-1791, 1995.

[6] F. Padinger, R.S. Rittberger, and S. Sariciftci, "Effects of Polstproduction Treatment on Plastic Solar Cells", Adv. Func. Mater., Vol.13, No.2, 2003.

[7] B. O'regan, M. Gratzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films", Nature, Vol. 353, pp. 737-740, 1991.

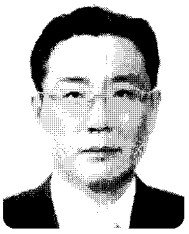
저|자|약|력



성 명 : 안준호

◈ 학 력
- 1992년 광운대 전기공학과 공학사
- 1996년 광운대 산업정보대학원 전기공학과 공학석사
- 2005년 광운대 대학원 전기공학과 공학박사

◈ 경 력
- 2005년 – 2007년 홍익대 과학기술연구소 연구원
- 2007년 – 2008년 KAIST 나노융합연구소 연구교수
- 2009년 – 현재 한국전기산업연구원 기술연구팀 연구원

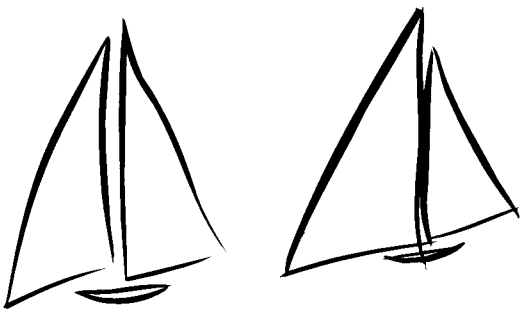


성 명 : 왕용필

◈ 학 력
- 1992년 동아대 전기공학과 공학사
- 1994년 동아대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1998년 동아대 대학원 전기공학과 공학박사

◈ 경 력
- 1999년 – 2001년 뉴질랜드 켄터베리대학 박사 후 연구원
- 2003년 – 2008년 동아대학교 전기공학과 초빙교수
- 현재 한국전기산업연구원 기술연구팀 팀장

성 명 : 박민영

◈ 학 력
- 2001년 호서대 소방학과 공학사
- 2004년 호서대 대학원 소방학과 소방전기 공학석사

◈ 경 력
- 2004년 – 2008년 한국전기연구원 신재생에너지 시스템 센터 연구원
- 현재 한국전기산업연구원 기술연구팀 연구원