

분자 전자 재료

박 수 영 · 김 낙 중

1. 분자 전자의 개념

단결정 실리콘 반도체를 핵심 소재로 하는 금세기의 정보, 전자 기술은 눈부신 발전을 거듭해온 바, 인류의 생활 자체를 혁신적으로 개선해가고 있다. 역사적으로는, 1948년 미국의 벨 전화 연구소에서 과거 전자 기술의 핵심 부품이던 진공관을 대체할 수 있는 소형, 고체상태의 트랜지스터를 개발한 것이 근대 전자기술, 특히 실리콘 반도체 전자 기술의 모태가 되었다. 이후 십여년간 반도체 기술은 전자 회로의 구성 및 제품 생산에서 과거의 진공관 회로를 완전히 대체하는 신산업으로 등장하게 되었다. 그러나 반도체 기술의 발전은 전자 회로의 개별 부품인 트랜지스터, 다이오드, 저항기 등의 생산에 그치지 않고 이러한 핵심 부품들과 이를 연결하는 전자 회로를 한 개의 반도체 칩(chip) 위에 직접 제조하는 집적화 회로(IC)의 실용화에 이르게 되어 현대 미세 전자 기술의 시대를 열게 되었다. 반도체 메모리 소자를 일례로 들면, 1960년 포토레지스트를 이용한 미세 가공기술의 발명에 기반을 둔 이러한 IC는 한개의 반도체 칩 위에 천여개의 트랜지스터를 집적화 하는 과정(LSI)을 거쳐 이제는 사백만개의 트랜지스터가 한개의 칩위에 집적화된 4M DRAM의 시대를 맞게 되었다. 그러나 이러한 혁신적인 집적도의 발전도 대용량 화상 정보, 고속 통신, 초고속 연산 등을 관건으로 하는 고도 정보화 산업용 전자 부품으로는 아직 그 성능에 이르지 못하며, 더우기 실리콘 반도체를 이용한 미세 전자 기술은 이미 그 성능 한계에 근접한 것으로 판단되고 있다.

따라서 이러한 집적화의 기술적 한계를 극복할 수 있는 돌파구로서 “분자 전자” 라는 새로운 개념이 1979년 최초로 제창되었고 이에 대한 후속 연구 개발이 큰 관심을 끌고 있다. 분자 전자라는 개념은 나노미터(nanometer)의 크기를 갖는 기능성 유기분자를 단위 전자 소자로 이용한다는 기본적 개념에서 시작하였다. 즉, 메모리 소자를 일례로

들면, 1 나노미터의 단위 분자가 스위칭 또는 메모리 기능을 갖는 경우 이들 분자들을 이차원적 규칙 배열화 하고 분자 배선함으로써 얻을 수 있는 이론적 메모리 용량은 10^{14} bit/cm²으로서 기존의 수 메가 DRAM 반도체 메모리 보다 백만배 이상의 고용량화가 가능하다는 결론에 이르게 된다.

이러한 분자 전자의 가능성은 기존 반도체 전자 재료의 최신 연구방향과 비교하면 쉽게 이해할 수 있다. 양자역학적인 관점에서 볼 때, 반도체 재료는 결정내 모든 원소 물질들로부터의 파동함수의 중첩에 의해 형성되는 에너지 준위가 전도대와 가전자대로 분리되고, 이들 간의 에너지 차에 해당하는 band gap에 의해 반도체 특성이 좌우된다. 반도체 재료를 이용하는 전자 소자의 고속화, 고집적화의



박수영
 1980 서울대학교 공과대학 섬유공학과 (공학사)
 1988 서울대학교 대학원 섬유공학과 (공학박사)
 1992~1993 일본이화학연구소 연구원
 1985~ 현재 KIST 고분자부 선임연구원



김낙중
 1973 서울대학교 문리대 화학과 (이학사)
 1978 서울대학교 대학원 화학과(이학석사)
 1983 Dept. of Chem. Univ. of Texas at Austin(이학박사)
 1983~ 현재 KIST 고분자부 책임연구원

Molecular Electronics

한국과학기술연구원 고분자연구부(Soo Young Park and Nakjoong Kim, Division of Polymer Research, Korea Institute of Science and Technology)

한계는 이러한 에너지대 구조에 기인하는 것으로서, 이의 한계를 극복하는 방법으로서 양자화의 수법이 동원되고 있다. 구체적으로, 반도체 재료의 공간적 차원성을 줄여가는 나노미터 반도체에 대한 최신 연구가 바로 그것으로서 다중 양자 우물 구조, 양자 세션, 양자점 구조의 반도체가 차세대 초고속화, 고집적화 전자 소자로의 돌파구라는 것이 이미 이론적, 실험적으로 잘 알려져 있고 이에 대한 첨단 연구가 급속히 진전되고 있다.

이러한 관점에서 볼 때, 물질 기능의 최소 단위인 분자 하나 하나가 양자 구조를 이루고 있는 것을 특징으로 하는 분자성 유기 물질은 미래 고성능 전자 소자로서 가장 큰 가능성을 갖고 있다고 할 수 있다. 이러한 분자 전자의 실현을 위해서는 기능성을 갖는 분자 설계, 이의 공간적 규칙 배열, 그리고 분자 배선의 단계가 필요하다. 기능 분자로서는 쌍안정성, 광변색성 등의 스위칭 재료를 그 예로 들 수 있으며 이의 공간적인 배열, 즉, 초격자의 제조에는 이온빔 증착, 분자선 에피택시, Langmuir-Blodgett 박막, 분자 자기 조립(self assembly) 등의 새로운 방법들이 개발되었다. 그러나 각 개별 분자 소자에의 배선은 아직 난관을 겪고 있는 실정으로서 나노미터 수준의 초미세 lithography, 전도성 고분자의 lithography적 ion-implantation에 의한 분자 배선, STM을 이용한 방법 등이 가능성있는 방법으로 대두되고 있는데 이러한 초미세 가공은 분자 전자 재료 뿐만 아니라 나노미터 반도체 개발에 있어서도 핵심적인 기술로서 "Nano-technology"라는 90년대 신조어를 탄생시켰다. 이러한 분자 전자 연구의 전개는 전자의 거동만을 이용하는 소자로의 경우는 분자 배선의 문제와 addressing의 난이성으로 다소 비관적인 것이 현실이나, 전자와 광(photon)의 상호 작용을 그 동작 원리로 하는 "분자 광전자 재료"로의 새로운 전개가 실용화 정보, 전자 재료로의 실용화 가능성을 열고 있어 이에 대한 연구 노력이 활기를 띄고 있다.

2. 넓은 의미의 분자 전자 재료

과거 전자 산업에서의 분자, 고분자 재료의 사용은 주로 IC 제조용 포토레지스트, 봉지재, 절연물 등의 수동적, 부차적 기능 소재로의 사용에 한정되어 왔으나 최근 분자 재료를 주기능 물질로 이용한 전자, 광전자 부품 또는 소자가 다수 등장하게 되었다. 따라서 이러한 정보, 전자산업의 핵심 소재로 사용되는 분자성 물질을 넓은 의미의 "분자 전자" 재료라 칭하게 되었다.

특히, 이러한 분자 전자 재료의 개발은 70년대 폴리아세틸렌을 필두로하는 전도성 고분자의 출현에 의해 크게 자극되어 그 관심이 현재까지 지속적으로 이어오고 있다. 초기 전도성 고분자 개발의 관심사는 금속성 전도성을 보이는 새로운 전자 재료로서의 기능성에 초점이 맞추어져 왔고,

수치적으로는 이미 그 뛰어난 성능이 입증되었으나 재료의 안정성 및 부차 특성의 문제점으로 인하여 고분자 이차 전지 전극, 고분자 전해질, 센서 등에서의 부분적인 적용이 이루어 졌다. 그러나 집적화, 고속화를 특징으로하는 현대 전자 기술에의 대규모 적용에는 수 많은 난점을 드러내었다. 이의 돌파구로서 80년대 부터는 도핑되지 않은 π -전자 공역계 전도성 고분자의 반도체성을 이용한 유기 전자 소자들에 대한 연구가 개시되어 큰 관심을 끌고 있다. 즉, 이들 고분자를 활성 반도체 층으로 사용하는 반도체 다이오드나 트랜지스터 등의 집적화 기능 소자에 대한 연구가 진행되어 평판 디스플레이 구동용 flexible FET array 등은 그 상업화 가능성이 매우 큰 것으로 평가되고 있다.

물론 전자 소자로서의 분자성 물질은 이와같은 -전자 공역계 고분자의 전도성, 반도체성의 이용 외에도 전하 이동 착체 결정이나 풀러렌 화합물의 초전도성, 유기 강유전체 재료의 압전, 초전성의 이용이 대두되나 이들의 특성은 대부분 기존의 반도체 또는 금속, 무기물의 재료 특성을 쫓아가는, 즉 기존 재료를 가공성 및 경량 특성이 우수한 분자성(고분자) 재료로 대체하고자 하는데 그 특징이 있으나 아직까지는 상대적 성능 열세로 인하여 실용 소자 제작에 이르지 못하고 있는 것이 현실이다.

반면, 본질적인 양자점 구조를 갖고 있는 분자 재료의 우수한 광특성을 이용한 "광전자 재료 또는 소자"의 경우는 기존의 반도체나 무기계 소재의 대체 뿐만 아니라 그들의 성능을 대폭 상회하는 분자 재료 및 신기능 광전자 재료로서의 특성으로 인해 차세대 광전자 기술의 핵으로 등장하고 있다. 구체적으로 현대 정보, 전자 산업의 핵심인 정보의 연산, 표시, 기록, 통신 등에서 분자성 유기 고분자 재료의 장점이 점점 대두되고 있다.

실용 광전자 제품에 사용되는 대표적 분자 재료로는 액정 표시 소자와 유기 광전도성 감광체(OPC)로서 이미 현대의 평판 표시 소자와 복사기용 감광 드럼 시장을 석권하고 있으며 홀로그래피용 감광 필름, 고성능 편광 필름, 컬러 필터, 선택 투광막 등의 수많은 광학 소자로의 응용도 확대 일로에 있다.

이러한 초보적 기능의 광전자 제품외에 초고속, 고밀도, 대용량 정보 처리를 특징으로하는 차세대 고도 정보 산업의 핵심 집적화 광전자 기술(OEIC) 또는 광기술(Photonics)의 중심 소재로서 비선형 광학 특성 분자성 유기 물질이 초미의 관심사가 되어있고, 유기 광변색성 화합물이나 광화학 hole burning(PHB)를 이용한 초고밀도 광 메모리 소자, 고휘도 전계 발광 유기 소자, 광굴절을 고분자를 이용한 dynamic hologram 등이 대표적인 분자 전자의 응용 분야로 등장하였고 이미 이들 분자 전자 재료, 특히 고분자를 모체로하는 집적화 가능 유기 재료의 광전자 특성은 반도체나 무기계 재료의 특성을 크게 상회하고 있어 21세기 고도 정보화 산업의 핵으로 등장하리라 판단된다.