나노 재료를 이용한 최신 센서 기술 동향-리뷰

박준식 · 박광범 · 김성동 · 박효덕*

Trends in recent sensor technology using nano materials-Review

Joon-Shik Park, Kwang-Bum Park, Seong-Dong Kim, and Hyo-Derk Park*

Abstract

최근 인류의 삶의 질 향상에 따라 건강하고, 쾌적하고, 편안한 삶을 살기 위한 많은 노력이 진행되고 있다. 센서는 이러한 삶의 질 향상을 위해서 필수불가결한 요소 중 하나이며, 고성능의 지능화된 센서가 요구되고 있어, 앞으로 이에 대한 수요는 더욱 증대될 것으로 생각된다. 최근의 센서 연구 개발 방향은 센서에 기능을 부여하는 기능성 재료가 중요한 요소로 더욱 부각되고 있으며, 특히, 다양한 성분과 형태로 존재하는 나노 기능 재료는 기존의 벌크 재료와는 차별화된 독특한 물리, 화학, 기계, 광학적 특성을 갖고 있어 더욱 주목받고 있다. 최근 기존의 나노 입자 연구에서 더욱 발전하여 센서로 적용하기 위한 나노선이나 CNT를 포함한 나노튜브, 나노 복합재료 등의 연구가 매우 활발하다. 본 논문에서는 이러한 나노 재료를 이용한 가스 센서, 수질 센서, 바이오 센서, 광 센서 그리고 물리 센서 등 최신 나노 센서 연구개발 동향을 살펴보았으며, 미래 센서기술 발전방향 중 하나로서 나노 재료에 의한 센서의 고기능화 및 극소형화가 매우 중요한 부분으로 활용될 것으로 예측되었다.

Key Words : Nano, Materials, Sensor, Review

1. 서 론

최근 나노 입자, 나노선, 나노튜브 등 매우 다양한 조성과 형태의 일반적으로 100 nm 이하의 형상을 갖는 금속, 무기, 유기, 바이오 그리고 복합 재료 등 나노 재료를 이용한 나노 센서에 대한 연구가 활발히 보고되고 있다. 그것은 나노 재료가 갖는 독특한 물리, 화학, 기계, 광학적 특성들 때문이다. 한 가지 예로서 가스 센서에서 넓은 비표면적을 갖는 나노 감지 재료를 사용할 경우 낮은 작동 온도에서도 저농도의 대기 오염원을 감지할 수 있어 소비전력을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 궁극적으로 센서의 소형화가 가능하다는 장점이 있어 최근 나노입자, 나노선, CNT(carbon nano tube) 등과 같이 비표면적이 매우 큰 물질이 사용되고 있다.

본 논문은 크게 두 부분으로 구성하였다. 첫 번째 부분은 나노입자와 나노선과 같은 나노 구조 재료의 제조 방법에 대한 내용이며, 두 번째 부분은 나노 재료를

이용한 최신 나노 센서 기술 동향에 대한 내용이다. 실제로 나노 재료를 이용한 나노 센서 연구 결과들이 많이 발표되고 있어 본 논문에서 다루는 내용은 그 중에 일부가 될 것으로 생각되며, 관련 연구 개발을 수행하려고 하는 연구자나 개발자들에게 참고 자료 중 하나로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 나노 재료

2.1. 나노 입자

나노입자란 일반적으로 직경이 100 nm 이하의 크기를 갖는 입자들을 일컫는다. 일찍부터 나노입자는 주로 서브나 마이크론 또는 극미세라는 용어로 사용되어 왔다. 1990년 후반부터 나노입자에 대한 용어가 본격적으로 언급되어 왔고 CNT나 나노선과 같은 나노소재보다 오래전부터 사용되어 왔으며, 많은 연구 결과들이 발표되었다. 나노입자 제조 공정에는 milling, sol-gel, plasma spray, spray drying, reverse micelles, liquid anti-solvent, supercritical drying, rapid expansion of supercritical solution(RESS), particles from gas saturated solutions(PGSS), supercritical anti-solvent(SAS) 등

전자부품연구원(Korea Electronics Technology Institute)

*Corresponding author : parkhd@keti.re.kr

(Received : August 3, 2009, Accepted : August 25, 2009)

이 발표되었다^[1]. 나노입자는 현재와 미래에 전기전자, 환경 재생, 촉매 및 광촉매, 의학, 센서, 정화 그리고 잉크 등의 다방면의 분야에 적용되어질 수 있다. 나노 입자 제조공정 중에 초임계 유체(supercritical fluid) 방식은 비교적 단순한 공정으로 나노입자의 생산성을 향상시킬 수 있는 기술로 많은 연구가 진행되었다^[2].

2.2. 나노선

나노선은 직경이 100 nm 이하를 갖고 길이가 상대적으로 매우 큰 1차원의 원자 또는 분자 구조를 갖는 나노 구조물을 일컫는다. 나노선은 새로운 전기적, 물리적, 화학적 특성을 갖는 나노 소재의 개발을 가능하게 할 수 있으며, 이와 같은 나노소재는 전자, 광전자, 센서, 바이오, 환경, 에너지, 국방 분야 등 다양한 응용 분야에서 연구 개발되고 있다^[3]. 1D 나노소재들 중에 carbon nanotube, silicon nanowire 그리고 ZnO nanowire에 대해서 많은 연구가 이루어졌다^[3]. 나노와이어 제조 방법에는 크게 top-down 방식과 bottom-up 방식의 제조 방식이 있다. Top-down 방식은 큰 구조물을 식각하여 작은 구조물로 만들어가는 방식이며, 반대로 bottom-up 방식은 아래에서 위로 점진적으로 쌓아 나가는 방식이라고 설명 할 수 있다. Top-down 방식의 단결정 실리콘 나노선의 제조 방법으로 벌크 단결정 실리콘 기판을 이용하여 증착과 식각을 교대로 반복함으로써 직경 크기가 10 nm급 단결정 실리콘 나노선을 제조할 수 있는 기술이 발표되었다^[4].

Bottom-up 방식에 의한 실리콘, 금속산화물, 폴리머

Fig. 1. The size reduction lithography process^[4], reprinted with permission.

Fig. 2. Schematic of VLS growth of Si nanowires (SiNWs). (a) A liquid alloy droplet AuSi is first formed above the eutectic temperature(363 °C) of Au and Si. The continued feeding of Si in the vapour phase into the liquid alloy causes oversaturation of the liquid alloy, resulting in nucleation and directional nanowire growth. (b) Binary phase diagram for Au and Si illustrating the thermodynamics of VLS growth^[5], reprinted with permission.

등의 나노선 제조공정에는 크게 기상법과 액상법으로 나눌 수 있다. 특히, 가장 많이 사용되는 방법 중 하나인 기상법에는 vapor-liquid-solid 기구로 알려진 Fig. 2와 같은 방법을 이용한다^[5]. 예를 들면, 실리콘 기판 상에 미리 준비된 금(Au) 입자 상에 CVD 등의 방법으로 금과 공정 반응(eutectic reaction)을 일으키는 precursor를 공급하게 되면 비교적 낮은 합성 온도에서 금과 분해된 precursor로부터 공급된 실리콘이 공정반응하여 AuSi이 액상으로 존재하게 되는데 지속적으로 precursor를 공급하게 되면 과포화된 실리콘이 금 입자 아래로 석출되어 나노선의 형태로 성장하게 된다. 이와 같은 성장 방법을 이용한 다양한 반도체 및 금속산화물 나노선을 합성할 수 있다.

액상법에 의한 bottom-up 방식중 하나인 supercritical fluid-liquid-solid(SFLS) mechanism을 이용한 나노선 제조방법은 다양한 나노결정을 이용하여 bulk 공정 반응 온도보다 낮은 온도에서 Si과 Ge 나노선을 합성할 수 있다^[6]. 이와 같은 방법을 이용하면 기존의 Au seed

를 사용하면서 발생될 수 있는 Si와 Ge 나노선에서 holes과 electrons를 trap하는 문제를 배제할 수 있으며, 기상법에 비해서 상대적으로 매우 많은 양의 나노선을 제조할 수 있다는 장점이 있다.

이상과 같이 bottom-up 방식의 경우 top-down 방식에 비해서 매우 다양한 조성과 구조의 나노선을 제조할 수 있는 장점이 있으나 top-down 방식에 서와 같이 나노선을 2차원적으로 용이하게 조립 정렬하는 기술에 있어서는 연구가 좀더 필요한 상황이다.

3. 나노 재료를 이용한 나노 센서

3.1. 가스 센서

나노 재료를 이용한 센서 중에 가장 대표적인 예가 대기 중에 있는 오염원을 감지하기 위한 가스 센서라고 할 수 있다.

단일 SnO₂ 나노선을 이용한 5 ppm 이하의 CO감지 및 습도에 대한 안정성 연구 결과가 보고되었다^[7]. Fig. 3은 SnO₂ 나노선 직경에 따른 CO 감도 평가 결과이다. 직경이 25 nm인 경우가 직경이 70 nm로 큰 경우에 비해서 큰 감도 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 동일한 온도에서 단일 SnO₂ 나노선 센서를 이용하여, 각각 200 ppm CO, 50 % 습도, 그리고, 200 ppm CO와 50 % 습도가 동시에 존재하는 환경에서의 감도를 측정할 결과이다. 이 결과에 의하면 습도의 영향도 상당히 크고 CO와 습도가 존재할 경우 산술적으로 각각의 감도의 합과 같지 않게 되는 것에 대해서는 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있다. 발표된 논문에서는 습도의 영향으로 CO와 반응하는 SnO₂ 나노선 표면의 유효한 O⁻ 존재가 변화하기 때문으로 고찰하고 있다^[7].

Fig. 3. Nanowire radius dependence of the nanosensor response against CO^[7, reprinted with permission].

Fig. 4. Comparison between the simultaneous detection of 200 ppm of CO and 50 % of RH at 22 °C and its individual effects on a nanosensor based on a single SnO₂ nanowire. Measurements were performed at 260 °C^[7, reprinted with permission].

Fig. 5. SEM images of: (a, b) the CuO nanowires grown at 400°C for 12 h ((a) top view and (b) side view), (c) the sensor coated with the CuO nanowires, and (d) the sensing surface (at a higher magnification)^[8, reprinted with permission].

자동차 내의 공기질을 관리하기 위해 p-type 반도체 특성을 갖는 CuO 나노선을 이용한 가스 센서가 연구되고 있으며, 일반적으로 자동차 배기가스로부터 가장 많이 배출되는 CO와 NO₂ 감지 특성에 대한 연구 결과가 보고되었다^[8]. Fig. 5에 합성된 CuO 나노선과 알루미늄 기판상의 Au 감지 전극 상에 형성된 나노선의 SEM 이미지를 나타낸 것이다.

Fig. 6에는 CuO 나노선을 이용하여 제조된 가스 센서를 이용한 CO와 NO₂에 대한 동적 가스 감지 특성을 나타낸 것이다. 이 결과에서 특이한 것은 그림(b)와 (d)에서 보는 바와 같이 5 ppm 이하의 NO₂ 가스 농도에서 저항이 증가된다는 것이다. 이 점은 5 ppm보다

Fig. 6. Dynamic gas sensing response of CuO nanowires sensors toward CO and NO₂ at heater powers of 300 and 400 mW: (a) CO at 300 mW, (b) NO₂ at 300 mW, (c) CO at 400 mW, and (d) NO₂ at 400 mW^[8, reprinted with permission].

Fig. 7. (a) The schematic illustration of ZnO-nanowire air bridges over the SiO₂/Si substrate. (b) Side- and (d) top-view SEM images clearly show selective growth of ZnO nanowires on Ti/Pt electrode. (c) The junction between ZnO nanowires grown on both electrodes^[9, reprinted with permission].

큰 NO₂ 농도에서 저항이 감소되는 일반적인 p-type가스 센서가 산화 가스에서 저항이 감소하는 경향과 반대되는 새로운 현상으로 추가적인 연구가 필요한 것으로 보고되었다^[8].

전극 패턴이 이미 형성되어 있는 칩 상에 바로 ZnO 나노선을 제조하여 두 전극에서 성장된 ZnO가 서로 공기 중에서 연결되는 현상을 이용한 가스 센서가 개

Fig. 8. (a) Responses of a nanowire-bridge ZnO gas sensor under as a function of NO₂ concentration(0.5~20 ppm) at the measurement temperature of 225°C. (b) Response vs. NO₂ concentration plot, which shows linear dependence in range of 0.5~20 ppm and then sign of slight saturation behavior at higher concentration^[9, reprinted with permission].

발 되었다^[9]. 이와 같은 공정은 나노선을 감지 전극에 형성하기 위한 후속 공정이 불필요하다는 장점이 있다. Fig. 7에 제조된 나노선 SEM이미지를 나타내었다.

Fig. 8은 제조된 ZnO 나노선 가스 센서를 이용한 NO₂ 감지 특성을 나타낸 것이다. 0.5 ppm의 저농도까지 측정이 가능함을 알 수 있었다^[9].

CNT 재료를 이용한 가스 센서에 대한 연구 또한 활발히 진행되었다^[10,11]. CNT를 활용한 가스 센서의 경우 다양한 가스의 감지가 가능하고 상온에서의 가스 감지가 가능할 만큼 소비전력 면에서 뛰어난 장점을 가지고 있다. 그러나 회복 시간이 긴 문제와 선택성이 낮은 문제는 개선되어야 할 부분이라고 할 수 있다.

3.2. 수질 센서

수질 내의 주요 오염원 중 하나인 중금속을 검지하기 위하여 bismuth-modified carbon nanotube electrode (Bi-CNT electrode)를 이용한 anodic stripping voltammetry 방법에 의하여 납, 카드뮴, 아연을 검출하기 위한 수질 센서에 대한 연구 결과가 보고되었다^[12]. Bi-CNT 전극은 스크린 인쇄된 CNT전극 상에 Bi를 in-situ 도금하여 제조되었다. 이와 같은 수질 센서의 검출 한계는 납에 대해서는 1.3 µg/L, 카드뮴에 대해서는 0.7 µg/L 그리고 아연에 대해서는 12 µg/L의 값을 나타내었다. Fig. 9는 여러 가지 카본 전극 상에 Bi를 in-situ 도금하여 제조된 전극을 이용하여 100 µg/L의 납, 카드뮴 그리고 아연이 포함되어 있는 0.1 M acetate buffer solution(pH 4.5)에서의 stripping voltammograms 결과이다. 이들 중에서 Bi-CNT 전극이 가장 큰 peak 전류를 나타내는 것을 확인할 수 있어, 다른 Bi-glassy carbon, Bi-activated carbon 그리고 Bi-graphite에 비해 우수한 특성을 나타내었다. Bi-CNT전극을 이용하여 국내 하천에서

Fig. 9. Anodic stripping voltammograms of 100 µg/L lead, cadmium and zinc at in-situ plated bismuth film on different carbon electrodes^[12, reprinted with permission].

Fig. 10. (a) Transmission electron microscopy (TEM) image of the synthesized bismuth nanoparticles and (b) square wave anodic stripping voltammograms with a change of the Pb and Cd concentrations^[13, reprinted with permission].

샘플링된 물에 대한 중금속 오염원 검지 실험 결과 납과 카드뮴에 대하여 정량적으로 ICP-MS에서 분석된 결과와 거의 일치하는 결과를 얻었다.

나노 크기의 Bi 입자를 이용하여 제조된 수질 센서는 검출막의 제조가 불필요하기 때문에 사용이 편리하며, 전극면적의 증가로 인한 센서 성능의 향상을 기대할 수 있다^[13]. Bi 나노입자는 levitational gas condensation 방법으로 합성되었으며^[14,15], 그 결과 50 nm의 크기를 갖는 rhombohedral 구조의 구형 나노분말이 제조되었다(Fig. 10(a)). 기지전극의 제조를 위해 폴리에스테르 필름 위에 스크린 프린팅법을 이용하여 카본전극이 형성되었으며, 작동전극의 제조를 위해 10 % 나피온 용액에 Bi 나노입자를 분산시킨 후 마이크로 피펫을 이용하여 카본전극 위에 Bi 나노입자를 코팅하였다. Fig. 10(b)는 제조된 수질 센서를 이용하여 측정된 납과 카드뮴의 농도 변화에 따른 stripping voltammograms 결과이다. 검출 한계는

Fig. 11. (a) Optical image of three SiNW clusters (each cluster has 5 SiNWs). Zoom-in SEM image showing 5 SiNWs in one cluster. (b) Schematic illustration of the surface modification of aldehyde-terminated SiNW clusters (cluster 0) with oligopeptides specific for Pb²⁺ (Cys-Asp-Arg-Val-Tyr-Ile-His-Pro-Phe-His-Leu, cluster 1) and Cu²⁺ (Gly-Gly-His, cluster 2), respectively^[16, reprinted with permission].

납에 대해서는 0.07 µg/L, 카드뮴에 대해서는 0.15 µg/L를 나타냈으며, 반복 측정 시 매우 뛰어난 재현성을 보였는데 20번의 연속 측정 시 납에 대해서는 4.7 %, 카드뮴에 대해서는 1.3 %의 상대표준편차를 보였다.

실시간 다중채널 측정을 위해 실리콘 나노선을 이용하여 제조된 수질 센서가 보고되었다^[16]. 실리콘 웨이퍼 위에 노광공정을 이용하여 40~50 nm의 폭을 갖는 고집적된 실리콘 나노선이 제조되었으며, 납과 구리의 선택적 검출을 위해 실리콘 나노선의 표면을 Pb²⁺-selective oligopeptide와 Cu²⁺-selective oligopeptide로 각각 개질시켰다(Fig. 11).

Fig. 12는 용액 내 납과 구리의 첨가에 따른 수질 센서의 전도도 변화를 나타내는 그래프로서 센서의 전도도는 수질 내 이온의 농도와 선형적 관계를 나타내었다. 서로 다른 종류의 oligopeptide를 사용할 시 측정값의 간섭현상은 나타나지 않았으며, 이는 납과 구리의 선택적 측정이 가능함을 보여준다. 실리콘 나노선 센서는 훌륭한 선택성과 함께 뛰어난 민감도를 보였는데 납에 대해서 1 nM (~0.2 µg/L), 구리에 대해서 10 nM (~0.6 µg/L)를 검출한계를 나타내었다.

3.3. 바이오 센서

Fig. 13과 같이 biotin에 의하여 표면 functionalization된 Si 나노선 field effect transistor (FET) (A의 왼쪽)

Fig. 12. Conductance versus time data recorded simultaneously in three different SiNW clusters. The surfaces of these clusters were modified with (a) Cys-Asp-Arg-Val-Tyr-Ile-His-Pro-Phe-His-Leu, (b) Gly-Gly-His, and (c) aldehyde, respectively. The arrows indicate the sequential introduction of 1 nM Pb^{2+} , MES, 10 nM Pb^{2+} , MES, and then 10 nM Cu^{2+} on the SiNW clusters^[16, reprinted with permission].

를 제작하여 biotin과 단백질인 streptavidin과의 강한 화학적 결합(A의 오른쪽)을 갖는 점을 이용하여 streptavidin을 검출하는 단백질 센서가 개발되었다^[17]. Fig. 10의 B-D는 이와 같이 제조된 FET를 이용한 streptavidin 측정 결과를 biotin으로 표면 처리 하지 않은 Si FET와 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 14와 같이 peptide nucleic acid(PNA)에 의하여 표면 개질된 Si 나노선 FET(A, B)를 제작하여 label-free 방식으로 10 fM~100 fM까지 고감도로 DNA를 검출하는 센서가 연구 보고되었다^[18].

이상과 같이 특정 바이오 물질을 검출하기 위한 receptor를 나노선 표면에 형성된 FET를 제조한 후, 특정 바이오 물질이 receptor에 결합되었을 때 나노선의 source와 drain 사이에서 변화되는 전도도 변화를 측정하는 원리를 이용하며, 측정물질이 언급된 단백질, DNA 이외에도 다양한 질병인자 등도 검출하는 바이오 의료 센서로 활용이 가능하다.

3.4. 광학 센서

금속 나노 클러스터를 이용한 bottom-up 방식으로 성장시킨 직경 50 nm의 p형 실리콘 나노선과 직경 80~150 nm의 n형 CdS 나노선을 미소유체 직접 조립 공정(microfluidic directed assembly)을 이용하여 수직으로 정렬시켜 p-n구조의 APD(avalanched photodiode)를 형성시켰으며, 이를 이용하여 100개의 광자(photon) 이하까지도 감지할 수 있는 초감도 광센서를 제작하였

Fig. 13. Real-time detection of protein binding. (A) Schematic illustrating a biotin-modified SiNW (left) and subsequent binding of streptavidin to the SiNW surface (right). The SiNW and streptavidin are drawn approximately to scale. (B) Plot of conductance versus time for a biotin-modified SiNW, where region 1 corresponds to buffer solution, region 2 corresponds to the addition of 250 nM streptavidin, and region 3 corresponds to pure buffer solution. (C) Conductance versus time for an unmodified SiNW; regions 1 and 2 are the same as in (B). (D) Conductance versus time for a biotin-modified SiNW, where region 1 corresponds to buffer solution and region 2 to the addition of a 250 nM streptavidin solution that was preincubated with 4 equivalents d-biotin. (E) Conductance versus time for a biotin-modified SiNW, where region 1 corresponds to buffer solution, region 2 corresponds to the addition of 25 pM streptavidin, and region 3 corresponds to pure buffer solution. Arrows mark the points when solutions were changed^[17, reprinted with permission from AAAS].

다. 또한 어레이간 간섭이 없는 광센서 어레이 구조를 제안함으로써 초고감도의 이미지 센서가 연구 보고되었다^[19].

서로 다른 두 가지 파장을 빛을 방출할 수 있는 CdS/CdSe core/shell 구조의 나노선 발광 소자를 bot-

Fig. 14. (A) Schematic of a sensor device consisting of a SiNW (yellow) and a microfluidic channel (green), where the arrows indicate the direction of sample flow. (B) The SiNW surface with PNA receptor. (C) PNA-DNA duplex formation [18, reprinted with permission].

Fig. 15. I-V and detection sensitivity (at 400nm) of n-CdS/p-Si crossed nanowire APDs [19, reprinted with permission].

Fig. 16. Optical injection from the CdS semiconductor nanowire into the photonic crystal waveguide [20, reprinted with permission].

tom-up 방식을 이용하여 성장시키고 또한 PMMA/Si₃N₄/SiO₂/Si 구조 기판을 전자빔 리소그래픽 공정과 RIE 식각 공정을 이용한 top-down 방식으로 서로 다른

Fig. 17. Optical image and measured result of the integrated humidity sensor [21, reprinted with permission].

Fig. 18. Schematic of a CNT FET based pressure sensor [23, reprinted with permission from IEEE].

두 개의 파장을 갖는 빛을 서로 반대 방향으로 전파시킬 수 있는 구조의 광필터 역할을 하는 한계할 수 있는 광결정(photonic crystal) 광도파로 구조를 제조하여 하이브리드 결합함으로써 서로 다른 두 파장 빛을 동시에 방출할 수 있는 광소자를 제조하고 향후 저장장치, 디스플레이 그리고 바이오 등의 분야에 적용될 수 있는 초소형 고밀도의 나노 광소자를 발표하였다 [20].

3.5. 물리 센서

나노재료를 이용한 센서제조에 MEMS 기술과 결합된 센서개발이 활발히 진행되고 있으며, 소형화 집적화 등을 목표로 최근, MEMS-SoC(MEMSoC) 기술과 나노기술을 결합시킴으로써 센서의 크기와 제조 비용을 줄일 수 있는 연구 개발들이 진행되고 있다.

마이크로 히터와 증폭회로가 내장 집적된 MEMSoC 플랫폼에 습도 변화에 따른 저항 변화를 갖는 WO₃ 나노선을 졸겔 공정으로 표면적이 큰 감지 필름 막을 형성함으로써 센서 감도를 높일 수 있도록 하였으며, 또한 온도 변화에 민감한 습도센서를 보상하기 위해 MEMSoC 플랫폼에 형성된 마이크로 히터를 이용하여 주변 온도 변화에 따른 나노선 감지 센서의 출력 신호 변동을 최소화할 수 있게 하였다 [21].

CNT의 전기적, 기계적 물성을 이용한 센서 응용에 많은 연구가 진행되고 있으며, 상용화된 니크롬(NiCr) 스트레인 센서의 스트레인 계수가 2 정도인 것과 비교

Fig. 19. Optical image of a chip having two Si nanowire arrays with fluidic channels; zoom-in image shows channel across the NW-array and in/out port formed in SU-8^[24, reprinted with permission].

해 CNT의 스트레인 계수 2,900^[22] 이상을 갖는 우수한 특성을 이용하여 고감도의 압력 센서에 적용하여 40 μm 크기의 MEMS 멤브레인 플랫폼 상에 SWCNT의 압저항 특성을 이용한 초저전력 구동의 FET 소자를 구현하여 고감도의 압력센서 구현을 발표하였다^[23].

Bottom-up에 의해 성장한 나노재료를 이용한 센서 응용에 있어서 정렬을 정확하게 수행할 수 있는 방안이 모색되어야 하는 단점을 갖고 있으나 top-down 방식을 이용한 실리콘 나노선의 경우 보다 손쉽게 센서 적용이 가능할 것으로 여겨지고 있다. 실리콘 나노선을 이용한 CMOS 구현은 바이오, 화학센서, 온도센서 등의 연구에 사용되고 있고 앞으로도 지속적으로 확장될 것이다. 실리콘 나노선의 온도는 저항 변화 방식과 다이오드 방식의 구현되고 있다. 실리콘 나노선의 저항 변화 방식 온도 센서의 경우 선형성은 백금온도 센서보다 낮지만 TCR은 7,500~10,000 ppm/K으로 감도를 얻을 수 있으며, 마이크로 스케일의 온도센서 구현이 가능하기 때문에 lab-on-a-chip, 바이오 센서 등에서 집적화된 센서 시스템 구현을 발표하였다^[24].

4. 결 론

최근 다양한 나노재료를 이용한 센서 연구 개발 기술 동향에 대하여 조사하였다. 비록 전 세계적으로 이루어지는 방대한 연구 결과 보고에 비해 매우 일부 연구 사례만을 다루어 아쉬운 감이 없지 않으나 나노 재료는 나노 입자, 나노선, 나노튜브, 나노 복합재료 등의 형태로 다양한 방법으로 개발되고 있으며, 이를 이용한 가스 센서, 수질 센서, 바이오 센서, 광 센서, 물리 센서 등 매우 다양한 응용 분야로의 확대와 함께 고성능화 되고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이로 부터, 더 나아가 미래의 최첨단 센서 기술은 나노 재료의 고기능화와 극소형화가 더욱 필수 불가결한 요소로 작용될 것으로 예측할 수 있다. 그러나 나노선을 이용한 센서

의 경우 top-down 방식에 비해 매우 다양한 조성과 구조의 나노선을 제조할 수 있는 장점이 있으나 top-down 방식에서와 같이 나노선을 2차원적으로 용이하게 조립 정렬하는 기술에 있어서는 연구가 좀더 필요한 상황이라고 할 수 있다. 또한, 여러 나라의 선진 연구 기관에서 이미 연구 진행 되고 있지만 극미세 나노재료의 인체 및 환경에 미치는 독성 등 그 안정성에 대한 연구도 함께 병행되어야 지속가능한 연구개발 및 산업화가 될 수 있는 기술로 발전될 것으로 보인다.

감사의 글

본 논문의 일부 연구비 지원은 지식경제부 및 정보통신 연구진흥원의 IT 원천 기술 개발 사업의 “2006-S-078-04, 나노선 나노튜브를 이용한 환경 감지 경보 시스템” 과제로 부터 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] H. T. Wu, M. J. Lee, and H.M. Lin, “Nano-particles formation for pigment red 177 via continuous supercritical anti-solvent process”, *J. of Supercritical Fluids* 33, pp. 173-182, 2005.
- [2] E. Lester, P. Blood, J. Denyer, D. Giddings, B. Azzopardi, and M. Poliakoff, “Reaction engineering: The supercritical water hydrothermal synthesis of nano-particles”, *J. of Supercritical Fluids* 37, pp. 209-214, 2006.
- [3] Z. L. Wang, “Theme issue: inorganic nanotubes and nanowires”, *J. Mater. Chem.*, vol. 19, pp. 826-827, 2009.
- [4] Y. K. Choi, J. Zhu, J. Grunes, J. Bokor, and G. A. Somorjai, “Fabrication of sub-10-nm silicon nanowire arrays by size reduction lithography”, *J. Phys. Chem. B*, vol. 107, pp. 3340-3343, 2003.
- [5] W. Lu and C. M. Lieber, “Semiconductor nanowires”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39, pp. R387-R406, 2006.
- [6] H.-Y. Tuan, D. C. Lee, and B. A. Korgel, “Nanocrystal-mediated crystallization of silicon and germanium nanowires in organic solvents: The role of catalysis and solid-phase seeding”, *Angew. Chem.*, vol. 118, pp. 5308-5311, 2006.
- [7] F. Hernandez-Ramirez, A. Tarancon, O. Casals, J. Arbiol, A. Romano-Rodriguez, and J. R. Morante, “High response and stability in CO and humidity measures using a single SnO₂ nanowire”, *Sensors and Actuators B*, vol. 121, pp. 3-7, 2007.
- [8] Y.-S. Kim, I.-S. Hwang, S.-J. Kim, C.-Y. Lee, and J.-H. Lee, “CuO nanowire gas sensors for air qual-

- ity control in automotive cabin”, *Sensors and Actuators B*, vol. 135, pp. 298-303, 2008.
- [9] M.-W. Ahn, K.-S. Park, J.-H. Heo, D.-W. Kim, K. J. Choi, and J.-G. Park, “On-chip fabrication of ZnO nanowire gas sensor with high gas sensitivity”, *Sensors and Actuators B*, vol. 138, pp. 168-173, 2009.
- [10] W.-D. Zhang and W.-H. Zhang, “Carbon nanotubes as active components for gas sensors”, *J. of Sensors, Volume 2009*, Article ID 160698, 16 pages, 2009.
- [11] Ting Zhang, Syed Mubeen, Nosang V Myung, and Marc A Deshusses, “Recent progress in carbon nanotube-based gas sensors”, *Nanotechnology*, vol. 19, p. 332001(14pp), 2008.
- [12] G. H. Hwang, W. K. Han, J. S. Park, and S. G. Kang, “Determination of trace metals by anodic stripping voltammetry using a bismuth-modified carbon nanotube electrode”, *Talanta* 76, pp. 301-308, 2008.
- [13] G.J. Lee, H.M. Lee, and C.K. Rhee, “Bismuth nanopowder electrode for trace analysis of heavy metals using anodic stripping voltammetry”, *Electrochemistry Communications*, vol. 9, 2514-2518, 2007.
- [14] Y.R. Uhm, W.W. Kim, and C.K. Rhee, “Phase control and Mössbauer spectra of nano -Fe₂O₃ particles synthesized by the levitational gas condensation (LGC) method”, *Physica Status Solidi A*, vol. 201, pp. 1934-1937, 2004.
- [15] Y.R. Uhm, B.S. Han, M.K. Lee, S.J. Hong, and C.K. Rhee, “Synthesis and characterization of nanoparticles of ZnO by levitational gas condensation”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 449-451, pp. 813-816, 2007.
- [16] X. Bi, A. Agarwal, and K.L. Yang, “Oligopeptide-modified silicon nanowire arrays as multichannel metal ion sensors”, *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 24, pp. 3248-3251, 2009.
- [17] Y. Cui, Q. Wei, H. Park, and C.M. Lieber “Nanowire nanosensors for highly sensitive and selective detection of biological and chemical species”, *Science* 293, pp. 1289-1292, 2001.
- [18] J. Hahm and C.M. Lieber, “Direct ultrasensitive electrical detection of DNA and DNA sequence variations using nanowire nanosensors”, *Nano Lett.*, vol. 4, pp.51-54, 2004.
- [19] O. Haydeni, R. Agarwal, and C. M. Lieber, “Nanoscale avalanche photodiodes for highly sensitive and spatially resolved photon detection”, *Nature materials*, Vol. 5, pp. 352-356, 2006.
- [20] H. G. Park, C. J. Barrelet, Y. Wu, B. Tian, F. Qian, and C. M. Lieber, “A wavelength selective photonic crystal waveguide coupled to a nanowire light source”, *Nature photonics*, Vol. 2, pp. 622-626, 2008.
- [21] C. L. Dai, M. C. Liu, F. S. Chen, C. C. Wu, and M. W. Chang, “A nanowire WO₃ humidity sensor integrated with micro-heater and inverting amplifier circuit on chip manufactured using CMOS-MEMS technique”, *Sensors and Actuators B* 123, pp. 896-901, 2007.
- [22] C. Stampfer, A. Jungen, R. Linderman, D. Obergefell, S. Roth, and C. Hierold, “Nano electromechanical displacement sensing based on single-walled carbon nanotubes”, *Nano Lett.*, vol. 6, pp. 1449-1453, 2006.
- [23] T. Helbling, S. Drittenbass, L. Durrer, C. Roman, and C. Hierold, “Ultra small single walled carbon nanotube pressure sensor”, *MEMS 2009. IEEE 22nd International Conference on*, pp. 575-578, 2009.
- [24] A. Agarwal, K. Buddharaju, I. K. Lao, N. Singh, N. Balasubramanian, and D. L. Kwong, “Silicon nanowire sensor array using top-down CMOS technology”, *Sensors and Actuators A*, vol. 145-146, pp. 207-213, 2008.

박 준 식

- 2004년 한양대 재료공학과(공학박사)
- 1994년 전자부품연구원 센서 연구실 연구원
- 1996년 전자부품연구원 부품 연구 2팀 선임연구원
- 1999년 전자부품연구원 마이크로 머신 사업단 선임연구원
- 2001년~현재 IEC TC 47(반도체 분야) 국내간사 및 Expert
- 2003년~현재 전자부품연구원 융합센서 소자 연구센터 책임연구원
- 2007년 8월~2009년 8월 스탠포드 대학 재료공학과 파견 방문연구(Visiting Scholar)
- 주관심 분야: 반도체 나노선, 화학센서, 압전 구동기, 마이크로 화학 분석기, 바이오 센서, MEMS 표준화

박 광 범

- 1994년 아주대학교 물리학과(이학석사)
- 1994년~현재 전자부품연구원 융합센서 소자연구센터 책임연구원
- 주관심분야: MEMS 센서/액추에이터, 마이크로 광학분석 시스템, 촉각센서

김 성 동

- 1996년 5월 Texas A&M 대학 컴퓨터 공학 박사
- 2005년 2월 현재 전자부품연구원 메카트로닉스 연구 본부장
- 주관심분야: 무선 통신, 센서 네트워크, 지능형 센서

박 효 덕

- 1993년 경북대학교 대학원 전자공학(반도체공학) 공학박사
- 1993년~현재 전자부품연구원 수석연구원
- 2000년 6월~2005년 6월 과기부 국가지정연구실 마이크로센서연구실 책임자
- 2003년 3월~2007년 11월 전자부품연구원 나노융합연구본부장
- 2007년 12월~2008년 12월 전자부품연구원 바이오나노에너지연구본부장
- 2006년 10~현재 차세대전지 이노베이션센터 센터장
- 2007년 10월~2013년 10월 차세대의료기기 전략산업기술위원회 기술위원
- 2008년 9월~현재 LED융합사업단 단장
- 2008년 11월~2013년 10 kWh급 에너지저장소재 기술개발사업 총괄책임자
- 2009년 1월~현재 전자부품연구원 에너지IT 연구본부장
- 주관심분야: 물리 센서, 바이오 센서, 의료 기기, 에너지 관련 부품 및 시스템