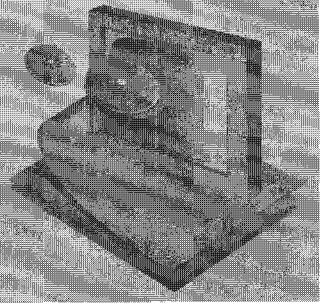


반도체식 가스 센서의 개발 동향



장호원 선임연구원 (한국과학기술연구원 전자재료센터)

1. 서론

센서는 외부의 다양한 물리적, 화학적 신호를 전기적 신호로 변환하는 트랜스듀서이다. 이러한 센서 중에서 가스 센서는 화학 센서의 일종으로서 감지하고자 하는 가스의 존재 여부 및 그 농도를 전기적 신호로 나타내는 소자를 말한다. 가스 센서는 그 작동 방식을 고려할 때 촉매연소식, 전기용량식, 광학식, 전기화학식, 반도체식, 표면음향파식 등 크게 여섯 가지 형태로 분리된다. 현재 가장 널리 이용되는 가스 센서는 전기화학식 가스 센서로서 감지 가스와 센서의 전해질 사이에서 일어나는 전기화학 반응에 기초를 두고 있기 때문에 특정 가스에 대한 선택도와 감도가 좋으며 무엇보다도 장시간 사용에도 그 동작특성이 변하지 않는 내구성 즉 신뢰성이 뛰어나다는 장점이 있다. 한편 반도체식 가스 센서는 전기화학식 가스 센서에 비해 작동원리가 간단하며, 제작 단가가 낮고, 크기가 작을 뿐만 아니라 그 제조 과정이 반도체 생산 공정과 호환성이 뛰어나다는 장점이 있다. 하지만 반도체식 가스 센서는 그 동작 원리 특성상 특정 가스에 대한 선택도가 매우 낮기 때문에 여러 가지 가스를 동시에 감지할 수 없다는 단점이 있으며, 전기화학식 가스 센서에 비해 신뢰성이 떨어진다는 치명적인 약점을 가지고 있다.

이러한 단점에도 불구하고 최근 반도체식 가스 센서에 대한 연구가 크게 각광을 받고 있는 것은 반도체 나노재료에 대한 활발한 연구와 깊은 연관성이 있

다. 그림 1은 반도체식 가스 센서의 동작 원리를 나타낸 그림이다 [1]. 반도체식 가스 센서의 재료로 가장 널리 쓰이는 SnO_2 를 예로 들면 대기 중의 산소가 SnO_2 결정립 표면에 흡착이 되면 표면에 전자 공핍층이 형성되고 그에 의해 결정립 사이에는 전위장벽이 형성된다. 한편 CO와 같은 환원성 가스가 유입되면 표면에 흡착된 산소의 농도가 줄어들게 되고 그에 따라 저자 공핍층의 두께가 줄어들어 전위장벽이 낮아져 전체 저항이 감소하게 된다. 이때 변화된 저항 값을 원래 저항값으로 나눈 값이 가스 감응도로 나타나게 되는데, 그림 2는 규슈 대학에서 보고한 것으로서 이러한 가스 감응도가 결정립의 크기가 감소함에 따라 급격히 증가하는 것을 보여준다 [2]. 이렇게 가스 감응도가 결정립 크기가 작을수록 급격히 증가하는 이유는 SnO_2 의 Debye length(λ_D)가 $\sim 3 \text{ nm}$ 이기 때문이다. 좀 더 자세히 설명하면 표면 산소 흡착에 따라 λ_D 만큼의 범위 내에서는 전도성 전자가 존재하지 않게 되는데, 결정립의 크기가 λ_D 에 접근할수록 전체 저항은 급격히 커지게 된다. 따라서 환원성 가스가 유입되었을 때 저항 변화의 폭은 결정립이 작을수록 커지게 되는 것이다. 결국 반도체식 가스 센서에서 센서 물질의 입자 크기를 줄이게 되면 센서 감응도를 획기적으로 높일 수 있으므로 센서 물질을 나노재료로 가져가고자 하는 연구가 큰 관심을 얻게 되었다. 이에 본고에서는 나노재료를 이용한 반도체식 가스 센서의 연구개발 동향과 향후 전망에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 여러 가지 나노재료를 이용한 가스 센서 개발

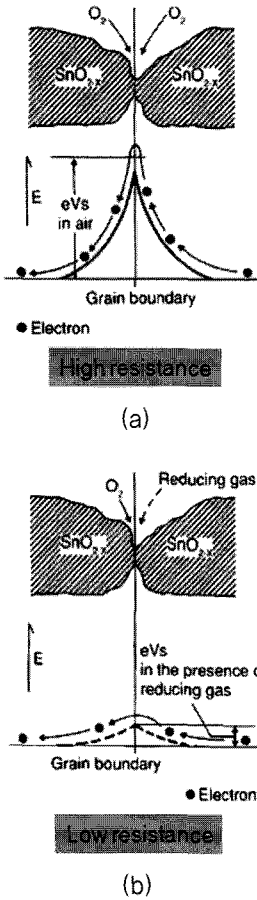


그림 1. 반도체식 가스 센서의 동작 원리 [1].

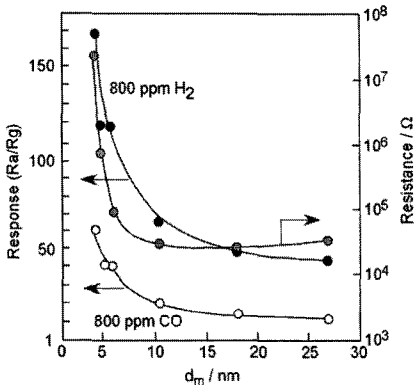


그림 2. SnO₂ 결정립 크기 (dm)에 따른 가스 감응도 (Ra/Rg) 변화 [2].

반도체식 가스 센서에서 가장 널리 쓰이는 물질은 3.6 eV의 밴드갭을 가지는 반도체 물질인 SnO₂이다. 따라서 반도체식 가스 센서의 연구는 SnO₂ 나노재료의 합성에 관한 연구와 밀접한 관련성이 있다. 그림 3은 조지아공대에서 보고한 것으로서 열증착법으로 합성된 SnO₂ 나노피의 투과전자현미경 사진을 보여준다 [3]. 나노피의 두께가 20-40 nm로 매우 얇고 가스 유입이 쉬운 다공성으로 이루어져 있어 가스 센서로 이용되기 매우 적합한 구조이다. 400℃에서 250 ppm 에탄올과 0.5 ppm NO₂ 가스에 대하여 4160%와 -1550%의 높은 감응도를 나타내었다. 한편 캘리포니아 주립대학교에서는 SnO₂나노피 또는 나노선 표면 위에 그림 4와 같이 Pd 촉매를 형성하였을 때 가스 감응도가 더 향상된다는 보고를 하였다 [4]. 이때 Pd 나노입자 촉매는 공기 중의 수소나 산소가 이온화된 상태로 나노피 표면에 흡착될 수 있도록 도와주는 효과 (Spillover effect)뿐만 아니라 Pd/SnO₂ 계면에 추가적인 공핍층을 형성하는 효과 (Electronic effect)를 담당하여 가스 감응도 상승과 함께 가스 센서의 작동 온도 감소시킬 수 있는 효과를 가져온다. 한편 Ag의 경우에는 수

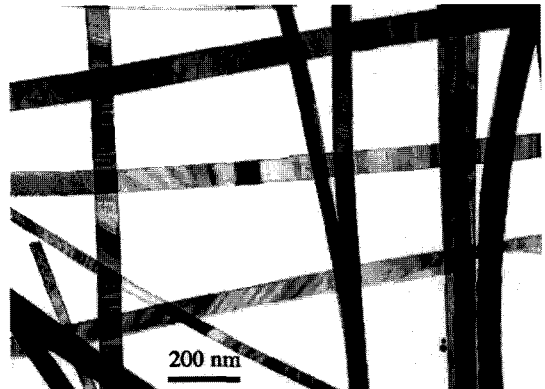


그림 3. 열증착법으로 합성된 SnO₂ 나노피의 전자현미경 사진 [3].

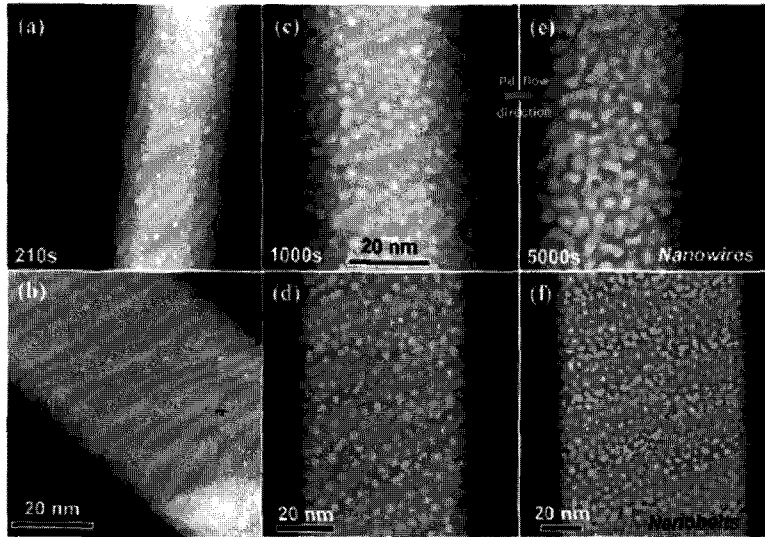


그림 4. Pd 증착 시간 증가에 따른 SnO₂ 나노선과 나노피의 형상 변화를 보여주는 투과전자현미경 사진 [4].

소에 대해서는 촉매 효과 즉 Spillover effect가 거의 없고 산소에 대해서는 그 효과가 더 큰 것으로 보고 되었다 [5].

현재까지 SnO₂ 이외에도 SnO₂, ZnO, TiO₂, WO₃, In₂O₃, Fe₂O₃, CuO, NiO, Ga₂O₃, V₂O₅와 같은 다양한 산화물을 이용하여 나노선, 나노막대, 나노피, 나노튜브, 나노입자 등의 형태로 합성하고 이를 가스 센서에 적용한 대부분의 연구들은 합성된 나노재료를 금속 전극 패턴이 형성된 기판 위에 옮겨 놓는 방법이나 나노선 한 개 또는 여러 가닥을 기판 위에 옮겨 놓고 그 위에 금속 전극 패턴을 형성하는 방법을 이용한다 [6]. 이 경우 센서 제조 공정이 복잡하고 소자마다 똑같은 특성을 기대하기 어려울 뿐만 아니라 대량생산이 힘들다는 단점이 있다. 최근에는 이런 단점을 극복하고자 전극 패턴이 형성된 기판 위에 산화물 나노재료를 직접적으로 형성하여 센서로 응용하고자 하는 연구들이 큰 주목을 받고 있다. 그림 5는 한국과학기술연구원에서 발표한 것으로서 Pt 전극 패턴이 형성된 Si 기판 위에 ZnO 나노선을 직접적으로 형성한 전자현미경 사진을 보여주고 있다 [7]. 두 전극 사이에서 형성된 나노선이 맞닿아 연결됨으로써 전기적으로 연결된 형태를 띤다. 이때 두

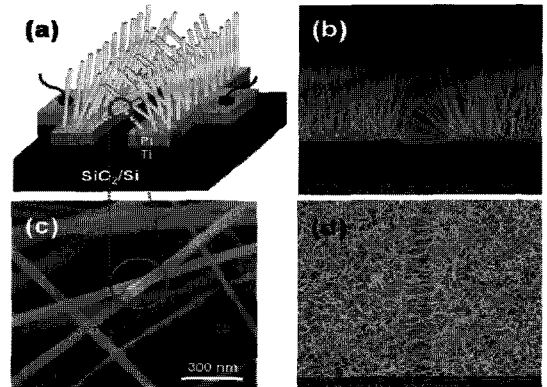


그림 5. In-situ 열증착법으로 형성된 ZnO 나노선 가스 센서의 주사현미경 사진 [7].

나노선의 접촉점에서는 전위장벽이 형성되어 높은 감응도를 나타내게 된다. 이와 같이 in-situ 방법으로 전극 위에 나노구조의 산화물을 형성하는 것이 매우 이상적이긴 하지만 여전히 나노구조의 형상 제어가 쉽지 않다는 점이 극복되어야 할 문제로 남아 있다.

나노구조 산화물 이외에도 나노구조 탄소를 이용한 가스 센서 연구도 큰 각광을 받고 있다. 1991년 탄소 나노튜브가 처음으로 발견된 후 오늘날 탄소 나노튜브는 매우 다양한 분야에서 그 활용에 관한 연



구가 진행되고 있는 가운데, 그림 6과 같이 스탠포드대학교에서는 단일벽 탄소 나노튜브로 가스 센서를 구현하였다 [8]. 일반적으로 결정질 탄소는 반도체라기보다는 금속에 가까운 전도성을 띠고 있기 때문에 가스 센서로서 쓰이기에는 적합하지 않다. 하지만 단일벽 탄소 나노튜브의 경우 그 Chirality 조절을 통해 금속성 또는 반도체성 전도성을 나타낼 수 있어 가스 센서로의 적용이 가능하다. 단일벽 탄소 나노튜브로 센서를 제작한 결과 상온에서 NH₃와 NO₂ 가스에 대하여 산화물 가스 센서보다 더 높은 감응도와 빠른 반응속도를 얻을 수 있었다. 탄소 나노튜브에 인가되는 게이트 전류를 달리함에 따라서 가스를 선택적으로 감지할 수 있다는 매우 흥미로운 결과가 제시되었으며, 탄소 나노튜브 자체가 가지는 큰 비표면적이 높은 감응도에 영향을

미친 것으로 보고되었다. 이러한 탄소 나노튜브의 가스 센서로의 응용은 학계에 큰 관심을 불러 일으켰으며 최근에서 산화물과 탄소 나노튜브를 결합한 하이브리드 형태의 가스 센서에 관한 연구가 보고되고 있다 [9]. 탄소 나노튜브의 가스 센서 응용이 매우 흥미로운 분야임에는 틀림이 없으나 산화물 나노선과 같이 양산성 측면에서 여전히 풀어야 할 숙제가 남아 있다.

탄소 나노튜브가 대표적인 1차원 나노구조라면 최근 학계에서 가장 주목을 받는 물질 중에 하나인 그래핀은 가장 이상적인 2차원 나노구조이다. 2007년 맨체스터대학교에서는 그래핀을 이용하여 NO₂, H₂O, CO, NH₃ 가스 센싱이 가능하다는 것을 보고하였다 [10]. 그래핀을 가스 센서에 적용하게 되면 탄소 나노튜브뿐만 아니라 산화물 나노구조를 이용하는 경우보다 센서 신호의 잡음이 적다는 장점이 있다. 즉 그래핀 내의 전자는 2차원적으로 자유로운 움직임을 가지면서 전하나 결합의 열운동에 의해 영향을 거의 받지 않기 때문에 가스 흡착에 따른 전자 농도의 변화가 Intrinsic하게 관찰될 수 있다는 것이다. 따라서 그래핀을 이용한다면 고품질의 신속 정확한 가스 센서 제작이 가능하다는 것이 제시되었다. 하지만 현재 일반적인 반도체식 센서 소자의 활성층 면적과 맞먹는 크기 (~수백 μm²)의 그래핀을 얻기는 불가능하다. 따라서 고품질의 대면적 그래핀을 확보하는 것은 고성능 센서 소자의 구현과 직결되어 있

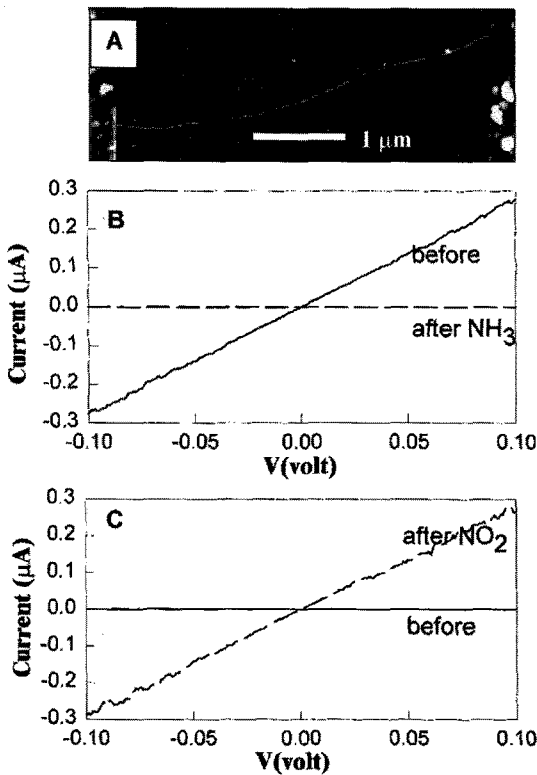


그림 6. 탄소 나노튜브 가스 센서와 NH₃와 NO₂ 가스에 대한 상온 감지 특성 [8].

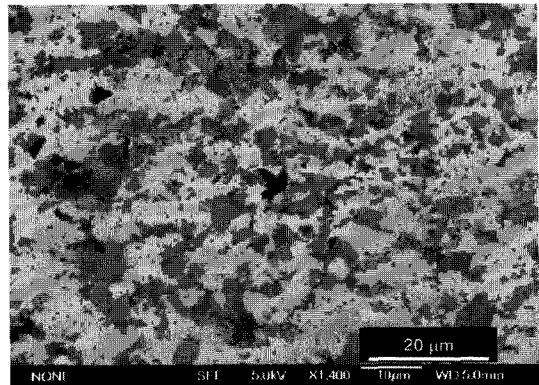


그림 7. 스피ن코팅법으로 형성된 단일층 그래핀 박막 [11].

다고 해도 과언이 아니다.

현실적으로 대면적의 그래핀을 얻기는 어렵지만 비록 그 크기가 균일하지는 않으나 ~수십 μm^2 크기의 그래핀을 합성할 수 있는 몇 가지 기술은 이미 보고된 상태이다. 최근 그림 7에서와 같이 캘리포니아 로스앤젤레스 주립대학교에서는 이러한 마이크로 크기의 그래핀을 이용하여 스피ن 코팅으로 단일층 그래핀 박막을 형성하고 이것을 가스 센서에 적용한 예를 보고하였다 [11].

앞에서 소개한 가스 센서는 주로 저차원의 나노 구조 재료를 통해 소자를 제작하는 방법, 즉 Bottom-up 접근법에 근거한 것들이다. 이러한 Bottom-up 접근법은 개별 나노구조 물질의 크기가 작기 때문에 센서 활성층의 비표면적이 넓어 가스에 대한 감응도가 크다는 장점이 있지만, 여러 차례 언급했듯이 대량생산성 즉 반도체 양산 공정과 호환이 어렵다는 넘지 어려운 큰 장애물이 존재한다.

이에 반해 본 연구실에서 대면적의 나노템플릿을 이용하여 3차원 나노구조 산화물 박막을 제조하고 이를 고감도 가스 센서에 응용하고자 하는 연구를 진행 중에 있다. 그 한 예가 폴리머 구형체 템플릿을 이용한 3차원 나노링크 엠보싱 TiO_2 박막을 이용한 고감도 가스 센서이다. 그림 8는 100 nm 두께

의 평면 구조 TiO_2 박막, 엠보싱 구조 TiO_2 박막(폴리머 구형체 템플릿을 이용하여 제조되었으나 나노링크가 없는 경우), 그리고 나노링크 엠보싱 구조 TiO_2 박막의 평면 및 단면을 보여주는 주사전자현미경 사진이다. 엠보싱 박막에서는 평면상에서 보았을 때 개별 셀이 육각형에 가까운 벌집 형태인 반면에 나노링크 엠보싱 박막에서는 개별 셀이 완벽한 원 형태로 존재함을 알 수 있다. 단면 사진에서 나노링크가 개별 엠보싱 구조 사이에서 공중 연결된 형태임을 확인할 수 있다. 5 μm 간격의 Pt IDE 패턴이 형성된 SiO_2/Si 기판 위에 평면, 엠보싱, 나노링크 엠보싱 구조의 TiO_2 박막 가스 센서들의 제작하고 이들 센서를 250 $^\circ\text{C}$ 에서 1-500 ppm CO 가스에 대해 감응도를 측정하였다. 그 결과 평면 구조 박막 센서와 엠보싱 구조 박막 센서에 비하여 나노링크 엠보싱 구조 박막 센서가 가장 큰 감응도를 나타냈으며, 특히 500 ppm CO 가스에 대하여 나노링크 엠보싱 구조 박막 센서는 평면 구조 박막 센서 대비 15배가 큰 감응도를 보였다 [12]. 제작된 나노링크 구조 박막 센서는 10초 내외의 빠른 반응/응답 속도를 나타내었고 이것은 종래의 여러 산화물 가스 센서에서 보고된 반응/응답속도 (30초~5분 정도)와 비교했을 때 매우 빠른 것이었다. 또한 제작된 나노

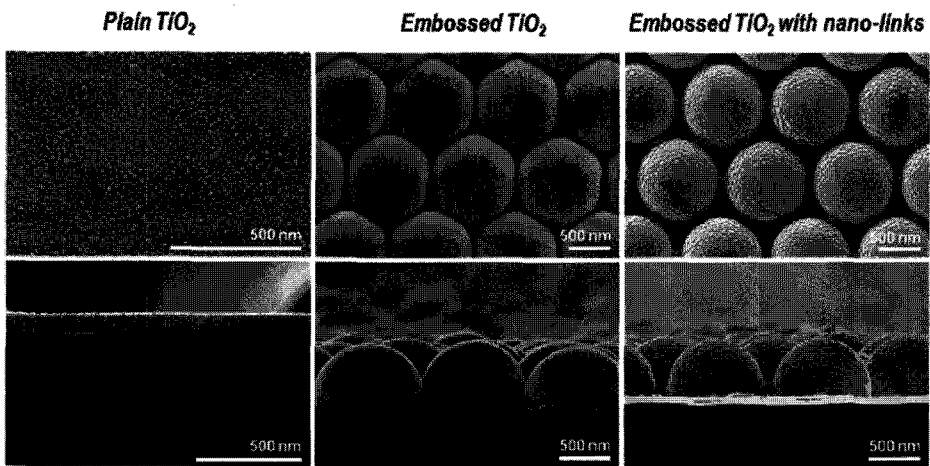


그림 8. 평면 구조, 엠보싱 구조, 나노링크 엠보싱 구조 TiO_2 박막의 평면과 단면 형상을 보여주는 주사전자현미경 사진.



링크 엠보싱 구조 TiO_2 박막 가스 센서의 CO 가스에 대한 감응도와 기준에 보고된 나노구조 TiO_2 가스 센서의 감응도를 비교한 결과 기준에 보고되었던 나노구조 TiO_2 가스 센서보다도 본 연구실에서 제작된 가스 센서가 더 큰 감응도를 나타내었고, 11 ppm 이하의 CO 가스에 대해서도 최고 수준의 감응도를 보여주었다.

제작된 나노링크 엠보싱 구조 TiO_2 박막 센서의 열적 안정성을 평가한 결과, $250^\circ C$ 에서 50 ppm CO 가스를 20,000초 흘려주었을 때 가스 센서가 반응하는 것과 동작하는 특성은 완벽한 스텝 함수를 나타내었고, 7일간 열처리한 후에도 센서 저항의 변화가 측정 시스템의 노이즈 이내에서 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 제작된 센서가 기존 나노 입자 기반의 박막 센서에 비해 우수한 열적 안정성을 가지고 있다는 것을 증명해 주었으며, 제작된 센서의 우수한 열적 안정성은 센서를 구성하는 물질이 열역학적으로 안정한 100% TiO_2 anatase 상이라는 것과 센서 박막이 이미 $550^\circ C$ 에서 Calcination이 되었다는 사실에 기인한 것으로 판단된다. 구조적으로 보았을 때도 장시간 열처리에 의해서 나노링크 폭이 두꺼워진대거나 나노링크 내에서 입자 성장이 일어날 가능성이 없기 때문에 장시간 열처리 후에도 저항 변화가 없는 결과가 도출되었다. 나노링크 엠보싱 구조의 박막 센서가 엠보싱 구조의 박막 센서에 비해 높은 감응도를 나타내는 이유는 나노링크의 폭이 좁고 길기 때문에 개별 엠보싱 구조 사이에 흐르는 전류가 낮아 가스의 흡착에 따라 센서가 더 민감하게 반응하기 때문이다. 게다가 나노링크 표면에서 가스 흡착도 매우 용이하기 때문에 감응도가 더욱 증대되는 효과가 있었다.

3. 가스 선택도 향상을 위한 센서 어레이 개발

반도체식 가스 센서가 가지는 또 하나의 큰 장점은 여러 가지 가스감응 물질을 어레이 형태로 제작하여 가스 감응 선택도를 높일 수 있다는 것이다. 이러한 센서 어레이에 바탕을 두어 인간의 코를 대신

하는 인공지능적인 코 즉 전자코 (Electronic-nose 또는 간단히 e-nose)를 개발하고자 하는 연구가 1982년 이래로 진행되어 오고 있다 [13]. 전자코의 성능은 기본적으로 센서 어레이를 구성하는 개별 센서 어레이의 가스 감응도와 반응 속도에 의존하기 때문에 나노재료의 발전과 함께 이를 이용한 센서 어레이를 제작도 큰 관심을 끌게 되었다. 그 중에서도 가장 대표적인 연구 결과는 그림 9에서와 같이 사라토프주립기술대에서 발표한 것으로서 38개의 개별 SnO_2 나노선으로 구성된 센서 어레이에 80도의 온도 구배 (Gradient)를 주었을 때 에탄올, 2-프로판올, 일산화탄소, 공기가 ppb 수준으로 완벽히 선택적으로 감지될 수 있음을 보여주었다. 또한, SnO_2 나노선의 밀도와 형상 조절로도 가스의 선택적 감응이 가능함을 제시하였다.

한편 최근 그림 10에서와 같이 캘리포니아 산타 바바라 주립대학교에서는 SnO_2 나노선에 서로 다

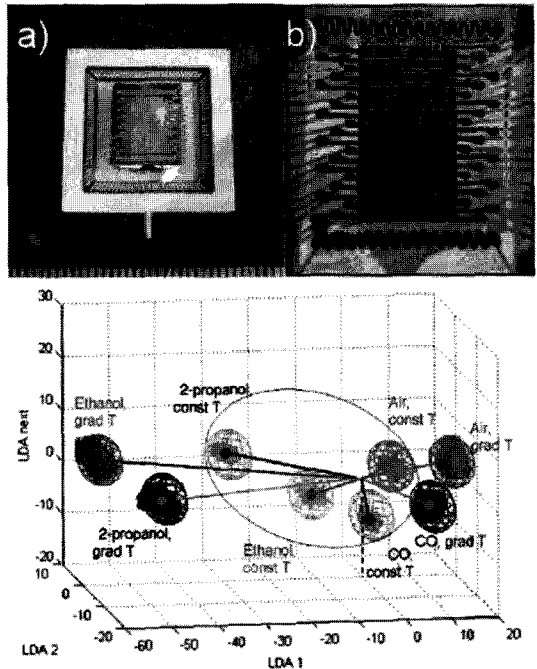


그림 9. SnO_2 나노선과 온도 구배를 이용한 KAMINA 마이크로 센서 어레이와 그것을 이용한 환원성 가스의 선택적 분리 [13].

른 금속 촉매를 증착하여 감지물질에 변화주고 여기에 온도 구배를 도입했을 때 전자코 기능을 재현

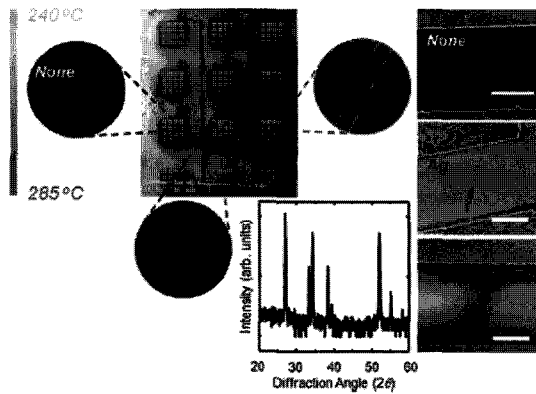


그림 10. SnO₂ 나노선, 금속 촉매, 온도 구배를 이용한 가스 센서 어레이 [14].

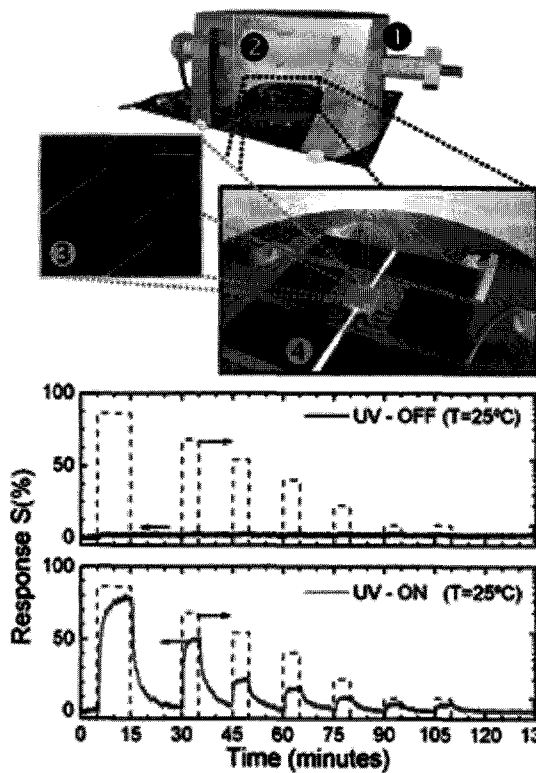


그림 11. UV LED를 이용한 상온 동작 SnO₂ 나노선 센서 [15].

할 수 있다는 것을 보고하였다 [14]. 이미 앞에서도 설명한 바와 같이 금속 입자의 종류에 따라 나노선 표면에서 일어나는 촉매 반응이 달라지기 때문에 Ag, Pd와 같이 다른 촉매를 도입했을 때 같은 가스에 대해서 서로 다른 가스 감지 특성을 기대할 수 있다. 마찬가지로 촉매 반응 또한 온도에 따라 변화하기 때문에 온도 구배를 통해 가스 선택성을 높일 수 있다. 그 결과 수소, 일산화탄소, 에틸렌과 같은 환원성 가스를 선택적으로 분리할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 센서 어레이를 제작함에 있어서 단순히 서로 다른 물질로 센서 어레이를 구성하는 방법보다 이외에 금속 촉매를 달리하는 방법을 도입할 경우 비용면에서나 제조공정면에서 효과적이면서도 센서 어레이의 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 제시하였다.

나노센서 어레이를 이용한 전자코 개발이 활발히 진행되고 있으나, 아직 상용화 단계에 이르기까지 해결해야 될 많은 과제들이 남아 있다. 그러나 신뢰성 있는 개별 나노센서 소자를 대량생산할 수 있는 기술이 개발된다면, 인간의 코를 대신할 수 있는 전자코의 개발도 이루어지리라 확신한다.

4. 상온 가스 센서 개발

석유 자원이 고갈되면서 전자 소자의 에너지 효율을 향상시켜 소비전력을 줄이려는 연구와 노력이 진행되고 있다. 현재 상용화 되어 있는 반도체식 가스 센서의 경우 그 동작온도가 대개 200-400°C로 고온이다. 그 결과 가스 센서를 동작시키는데 있어 대부분의 에너지 소모는 히터에서 일어난다. 따라서 상온에서 동작할 수 있는 가스 센서를 제작하게 되면 가스 센서의 소비전력을 획기적으로 줄일 수 있다. 게다가 상온 가스 센서가 개발된다면 히터가 필요없게 되어 소비전력 감소뿐만 아니라 제작비용과 소자 크기의 감소를 동시에 가져올 수 있다.

기본적으로 나노재료를 이용한 가스 센서는 상온에서 가스와 반응하여 비록 미약할지라도 측정이 가능한 수준의 감응도를 나타낼 수 있다. 하지만 상온에서 표면에 흡착된 가스는 고온과 달리 탈착이 잘

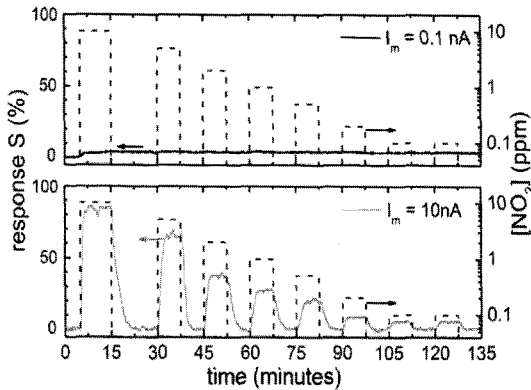


그림 12. 자가 발열을 통한 SnO₂ 나노선 센서의 상온 NO₂ 감지 [16].

되지 않는다는 문제점이 있다. 다시 말해서 상온 가스 센서는 가스 신호의 응답 후에 회복이 쉽지 않다는 것이다. 현재까지 이러한 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 방법으로 제시된 것은 크게 두 가지이다. 첫째 자외선을 이용하여 흡착된 가스를 탈착시키는 방법이다. 그림 11는 바르셀로나대학교에서 발표한 것으로 자외선 LED와 SnO₂ 나노선 센서를 결합하여 상온에서 NO₂ 가스를 감지할 수 있는 센서 시스템을 개발하였다 [15]. 이 방법의 경우 비록 상온 동작을 재현하였지만, 자외선 LED의 소비전력이 수십 mW로 히터의 소비전력과 비교하여 그리 작지 않다는 것과 전체 부피가 늘어난다는 단점이 여전히 존재한다. 또 다른 방법으로 제시된 것이 자가발열방법이다 [16]. 그림 13은 동일한 바르셀로나대학교에서 발표한 것으로서 SnO₂ 나노선에 흐르는 전류를 증가시켰을 때 나노선 자체가 발열을 하게 되어 가스 감지가 이루어지는 것을 보여준다. 비록 나노선 자체는 175°C까지 온도가 상승했지만, 히터를 쓰지 않았기 때문에 상온 동작 가스 센서라고 할 수 있으며, 특히 주목할 만 한 점은 소비전력이 20 μW로 히터의 소비전력 (> 100 mW)보다 극히 작다는 점이다. 발열이 주로 나노선과 전극 사이에 국한되어 일어날 수 있다는 문제점이 있지만, 자가 발열을 이용한 방법은 상온 가스 센서를 실현할 수 있는 매우 유망한 방법으로 사료된다.

5. 결론

나노입자, 나노선, 나노막대, 나노튜브, 나노피, 나노면 등과 같은 산화물 나노재료와 탄소 나노튜브 그래핀과 같은 저차원 탄소 나노재료를 이용하여 고품질의 반도체식 나노 가스 센서의 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 나노 가스 센서의 경우 기존의 박막 센서에 비해 비표면적이 넓어 감응도가 크고 나노재료 자체의 높은 결정성 때문에 신뢰성이 높은 센서 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 금속 입자 또는 산화물 입자를 촉매로 이용하여 나노 가스 센서의 특성을 향상시키는 연구 또한 큰 관심을 받고 있으며, 개별 나노센서를 결합한 센서 어레이를 이용하여 선택적 가스 감지가 가능한 전자코 개발이 이루어지고 있다. 특히 최근의 에너지 절약 및 고효율화 기조에 부합하여 상온 동작 가능한 나노 센서를 개발하는 것은 매우 중요한 과제이다. 결론적으로 여전히 저차원 나노 재료를 이용한 가스 센서 개발은 기술 개발의 초기 단계라고 할 수 있다. 고품질의 나노 센서 즉 신뢰성이 높고 선택도가 뛰어나며 상온에서 동작 가능한 나노 센서를 저비용, 고수율의 대량생산공정과 집적화하는 기술이야말로 미래의 유비쿼터스 센서 네트워크 사회 실현에 있어 큰 도전 과제라 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] <http://www.figarosensor.com/products/general.pdf>
- [2] N. Yamazoe and K. Shimano, "New perspectives of gas sensor technology", Sens. Actuators B, Vol. 138, 100, 2009.
- [3] E. Comini et al., "Stable and highly sensitive gas sensors based on semiconducting oxide nanobelts", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 10, 1869, 2002.
- [4] A. Kolmakov et al., "Enhanced gas sensing by individual SnO₂ nanowires and nanobelts functionalized with Pd catalyst particles", Nano Lett., Vol. 5, No. 4, 667, (2005).
- [5] X. H. Chen and M. Moskovits, "Observing catalysis

through the agency of the participating electrons: Surface-chemistry-induced current changes in a tin oxide nanowire decorated with silver", Nano Lett., Vol. 7, No. 3, 807, 2007.

- [6] K. J. Choi and H. W. Jang, "One-dimensional oxide nanostructures as gas-sensing materials: review and issues", Sensors, Vol. 10, 4083, 2010.
- [7] M. W. Ahn et al., "On-chip fabrication of ZnO-nanowire gas sensor with high gas sensitivity", Sens. Actuators B, Vol. 138, 168, 2009.
- [8] J. Kong et al. "Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors", Science, Vol. 287, 622, 2000.
- [9] G. Lu, L. E. Ocola, and J. Chen, "Room-temperature gas sensing based on electron transfer between discrete tin oxide nanocrystals and multiwalled carbon nanotubes, Adv. Mater., Vol. 21, 2487, 2009.
- [10] F. Schedin et al., "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene", Nat. Mater., Vol. 6, 651, 2007.
- [11] J. D. Fowler et al., "Practical chemical sensors from chemically derived graphene", ACS Nano, Vol. 3, No. 2, 301, 2009.
- [12] H. G. Moon et al., "Highly sensitive CO sensors based on cross-linked TiO₂ hollow hemispheres", Sens. Actuators B, Vol. 149, 116, 2010.
- [13] V. V. Sysoev et al., "A gradient microarray electronic nose based on percolating SnO₂ nanowire sensing elements", Nano Lett., Vol. 7, No. 10, 3182, 2007.
- [14] J. M. Baik et al., "Tin-oxide-nanowire-based electronic nose using heterogeneous catalysis as a functionalization strategy", ACS Nano, Vol. 4, No. 6, 3117, 2010.
- [15] J. D. Prades et al., "Equivalence between thermal and room temperature UV light-modulated responses of gas sensors based on individual SnO₂ nanowires", Sens. Actuators B, Vol. 140, 337, 2009.
- [16] J. D. Prades et al., "Ultralow power consumption gas sensors based on self-heated individual nanowires", Appl. Phys. Lett., Vol. 93, 123110, 2008.

담|당|위|원|



성 명 : 장호원

◆ 학 력

- 1999년 포스텍 재료금속공학과 공학사
- 2001년 포스텍 재료금속공학과 공학석사
- 2004년 포스텍 신소재공학과 공학박사

◆ 경 력

- 2004년 - 2005년 포스텍 신소재공학과 박사후연구원
- 2006년 - 2009년 위스콘신주립대학교 재료공학과 박사후연구원
- 2009년 - 현재 한국과학기술연구원 전자재료센터 선임연구원

