

## 인가 바이어스 조건이 전기화학적 식각정지 특성에 미치는 영향

### Effects of Applied Bias Conditions on Electrochemical Etch-stop Characteristics

정귀상\*, 강경두\*, 김태송\*\*, 이원재\*\*\*, 송재성\*\*\*

(Gwiy-Sang Chung\*, Kyung-Doo Kang\*, Tae-Song Kim\*\*, Won-Jae Lee\*\*\*, Jae-Sung Song\*\*\*)

#### Abstract

This paper describes the effects of applied bias conditions on electrochemical etch-stop characteristics. There are a number of key issues such as diode leakage and ohmic losses which arise when applying the conventional 3-electrochemical etch-stop to fabricate some of the MEMS(micro electro mechanical system) and SOI(Si-on-insulator) structures which employ SDB(Si-wafer direct bonding). This work allows to perform an *in situ* diagnostic to predict whether or not an electrochemical etch-stop would fail due to diode-leakage-induced premature passivation. In addition, it presents technology which takes into account the effects of ohmic losses and allows to calculate the appropriate bias necessary to obtain a successful electrochemical etch-stop.

**Key Words** : SOI, SDB, MEMS, Electrochemical etch-stop, Leakage current

#### 1. 서론

최근, 고도로 발달한 반도체 제조공정기술과 마이크로머시닝기술을 이용한 집적화 마이크로시스템(MEMS : micro electro mechanical system)개발에 관심이 고조되고 있다. 특히, 고성능 MEMS용 능동소자 혹은 표면 미세구조물을 제작하기 위해서는 Si 벌크 마이크로머시닝기술과 기존의 IC제조기술 그리고 Si의 우수한 전기적·기계적 특성뿐만 아니라 전기적 절연체상에 단결정 Si 박막이 존재하는

SOI(Si-on-insulator)구조의 기판을 이용하는 것이 가장 적합한 기술로 전망되고 있다[1, 2].

현재, SOI구조 제작기술중에서 Si기판 직접접합(SDB : Si-wafer direct bonding)기술은 완벽한 단결정 Si 박막과 우수한 절연특성을 갖는 매몰층 산화막뿐만 아니라 대면적의 SOI기판을 제작할 수 있다[3, 4]. 특히, MEMS분야에 있어서 매몰 cavity 혹은 3차원 미세구조물을 갖는 Si 벌크 마이크로머시닝 후막 혹은 박막 다이어프램, 켈티레버, 브릿지 등을 보다 쉽게 제작이 가능하며 단결정 Si의 우수한 전기적·기계적 특성을 이용할 수 있기 때문에 고성능 마이크로 센서(압력센서, 가속도센서)와 마이크로 액츄에이터(밸브, 스위치, 자이로)개발에 이용되고 있다[5, 6].

SDB SOI기술을 MEMS분야에 이용하기 위해서는 매몰 cavity를 갖는 SOI 능동층의 박막화와 정확한 두께제어기술이 무엇보다도 중요하다. 현재, SDB SOI구조의 박막화에는 그라인딩 후 폴리싱에 의한 기계적인 방법이 널리 사용되고 있지만[7], 장

\* : 동서대학교 정보시스템공학부 메카트로닉스전공  
(부산광역시 사상구 주례동 산 69-1번지,

Fax : 051-320-2122,

E-mail : gschung@dongseo.ac.kr)

\*\* : KIST 마이크로시스템연구센터

\*\*\* : KERI 전자기소사연구그룹

2001년 1월 19일 접수, 2001년 2월 15일 1차심사완료

2001년 3월 6일 2차심사완료

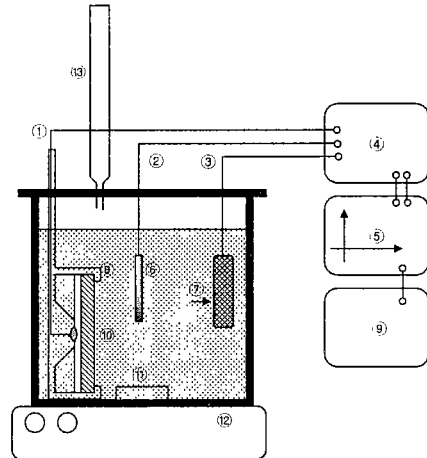
비의 평탄도와 정밀도에 크게 의존하며 대면적의 능동층 박막두께를 정확하게 제어하기가 어렵다. 최근, 저자들은 단결정 Si의 이방성 식각 수용액에서 역바이어스된 pn접합 다이오드의 성질과 양극산화 현상을 이용한 전기화학적 식각정지법으로 평탄도가 우수하며 정확한 SDB SOI의 박막화가 가능함을 보고하였다[8]. 그러나, 역바이어스된 실제 pn접합 다이오드의 I-T(전류-시간) 특성곡선상의 누설전류 밀도( $J_{leak}$ )가 I-V(전류-전압) 특성곡선상에서의 최대 누설전류밀도( $J_{pp}$ )보다 크게 나타날 경우, 빠른 식각 정지가 일어난다. 또한, passivation이 진행되는 동안 n-형층 표면의 큰 전압강하로 n-형의 전위를 passivation 전위 아래로 이동시킴으로써 식각은 n-형 표면에서 정지되지 않고 계속해서 진행된다[9].

따라서, 본 연구에서는 전기화학적 식각정지법을 SDB SOI기판의 박막화에 이용할 때, 전극의 종류와 크기 등 인가 바이어스 조건들이 전기화학적 식각정지 특성에 미치는 영향에 관하여 분석·평가하였다.

## 2. 실험

본 연구에 사용된 기판은 도핑농도가  $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 인 p-형 Si기판과 p-sub/n-epi.(15  $\mu\text{m}$ )가 성장된 기판을 사용하였으며, 시료의 크기는  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 이다. 인가 바이어스를 위한 후면 전극부는 스퍼터링법에 의해 Cr/Au와 Al 박막을 각각 증착했으며, 크기는  $3 \times 3, 2 \times 2$  그리고  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 였다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 전기화학적 식각정지 장치도를 도식적으로 나타낸 것이다. TMAH 20 wt.% 이방성 식각 수용액을 사용하여 80°C로 유지했으며, 식각시 Si기판의 두께변화에 따른 인가전압의 변화를 막기 위하여 WE(working electrode)와 RE(reference electrode)사이의 항상 일정한 전압값을 공급해주기 위한 Potentiostat를 사용하여 WE, RE 및 CE(counter electrode)의 3전극 시스템을 구성하였다[10]. 식각 수용액의 교반효과를 주기 위해서 magnetic stirring을 사용하였으며, 식각 수용액의 온도는  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 전기화학적 식각시 식각용액과 ohmic contact간의 접촉을 방지하기 위하여 Teflon, O-ring 및 wax를 이용하여 샘플 홀더를 제작하였다. 전극의 크기와 종류에 따른 PP(passivation potential)와 OCP(open current potential)의 변화는 I-V 특성곡선으로 분석했으며, 각각의 인가 전압에 따른 전기화학적 식각정지 특성은 I-T 특성곡선과 SEM으로 분석·평가하였다.



1. WE(working electrode)
2. RE(reference electrode)
3. CE(counter electrode)
4. Potentiostat
5. Plotter
6. Ag/AgCl
7. Pt mesh
8. Teflon holder
9. PC
10. Sample
11. Magnetic stir-bar
12. Hot plate
13. Reflux condenser

그림 1. 전기화학적 식각정지용 장치도.

Fig. 1. The configuration for electrochemical etch-stop.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 전기화학적 식각정지시 사용된  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  크기의 Cr/Au 전극을 갖는 p-형 Si에 대한 I-V 특성곡선을 나타낸 것이다. PP점과 OCP점을 분석하기 위해 Potentiostat를 사용하여  $-2 \sim +2 \text{ V}$ 까지의 인가전압 범위에서 scan rate를 5 mV/sec로 scanning하였다. 이때 Si으로부터 식각 수용액으로 흘러나오는 전류값을 측정하여 I-V 특성곡선을 도식하였다. 양극 산화현상이 일어남으로 인해 증가하던 누설전류가 갑자기 감소하는 전압은  $-0.75 \text{ V}$ 로 PP점이며 서서히 증가하던 누설전류가 0이 되는 OCP점은  $-1.3 \text{ V}$ 로 나타났다. 이때의 최대 누설전류밀도는  $2.2815 \text{ mA/cm}^2$ 로 측정되었다.

그림 3은 Al 전극의 면적 크기가  $3 \times 3, 2 \times 2$  그리고  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 일 경우, p-형 Si에 대한 각각의 I-V 특성곡선을 나타낸 것이다. OCP점은 전극의 면적에 상관없이 거의 일정한  $-1.35 \sim -1.3 \text{ V}$ 값을 나타내었다. 이는 동일 물질의 금속이 반도체와 접합될때,

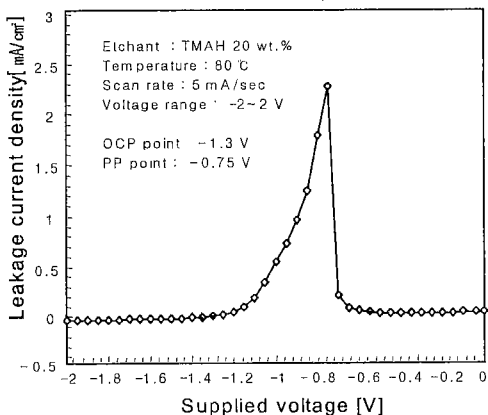


그림 2. 전기화학적 식각정지시 Au/Cr 전극을 사용한 p-형 Si의 I-V 특성곡선.

Fig. 2. I-V characteristic curve of p-type Si with Au/Cr electrode at electrochemical etch-stop.

접합되는 금속의 면적과는 무관하게 반도체와 금속 사이에 에너지 대역도가 형성되기 때문이라고 사료된다. 그러나, PP점은 전극의 면적이 작아지므로 해서 passivation이 일어나는 전위가 변화하는 것을 확인하였다.  $3 \times 3$ ,  $2 \times 2$  그리고  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 에서 나타난 PP점이 각각 0.6, 1, 1.25 V로 전극이 작아질수록 더 높은 전위에서 passivation이 일어났다. 이는 식각 수용액에 노출되는 Si의 면적에 대한 전극의 크기가 상대적으로 작고, 전극부의 면적이 작아지므로 해서 전극부의 저항을 상승시키는 효과를 가져오게 되어 더 많은 전압강하가 발생하기 때문으로 사료된다.

그림 4와 5는 전극의 크기가  $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 인 p-형과 p-sub./n-epi.의 SDB를 전기화학적 식각정지법으로 SOI 박막화했을 경우, 측정된 I-T 특성곡선이다.

그림 4는 Al 전극의 크기가  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 에서 분석된 0.6 V의 PP점을 인가하여 전기화학적 식각정지를 수행했을 경우의 I-T 특성곡선이다. 시료의 전극면적에 따른 전극부의 전압 강하를 고려하지 않고 전기화학적 식각정지를 수행함으로써, 식각 수용액에 노출된 Si의 전면에 충분한 전계가 미치지 못해 passivation이 정확하게 발생하지 않고 식각정지가 일어나지 않음을 알 수 있다.

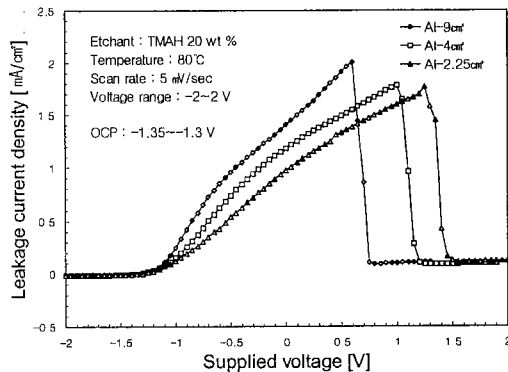


그림 3. 전기화학적 식각정지시 Al 전극의 면적에 따른 p-형 Si의 I-V 특성곡선.

Fig. 3. I-V characteristic curve of p-type Si according to Al electrode size at electrochemical etch-stop.

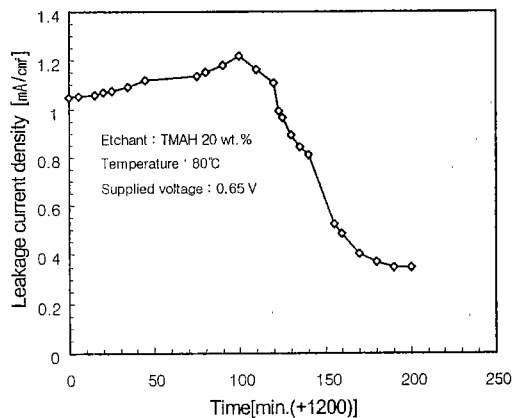


그림 4. 전기화학적 식각정지가 발생하지 않은 대표적인 I-T 특성곡선.

Fig. 4. Typical I-T characteristic curve not occurred electrochemical etch-stop.

그림 5는 Al 전극의 크기가  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 에서 분석된 1.25 V의 PP점을 고려하여 전기화학적 식각정지를 수행했을 경우의 I-T 특성곡선이다. 사용된 시료의 전극면적과 유사한 경우의 PP전위를 공급함으로써 전기화학적 식각정지를 정확히 수행할 수 있으며 식각이 진행되는 동안의 다이오드 누설전류밀도( $J_{\text{diode}}$ )는 I-V 특성곡선상의 최대누설전류밀도( $J_{\text{pp}}$ ) 아래로 유지됨을 확인할 수 있었다.

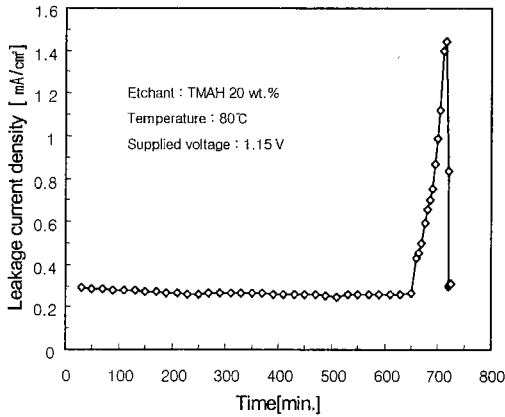


그림 5. 전기화학적 식각정지가 발생한 대표적인 I-T 특성곡선.

Fig. 5. Typical I-T characteristic curve occurred electrochemical etch-stop.

그림 6은  $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$  크기의 Al 전극을 사용한 p-형 Si의 80°C, TMAH 20 wt.% 식각 수용액에서 인가전압에 따른 누설전류 특성곡선을 나타낸 것이다. OCP점은 -1.35 V로 이후 PP점에 도달하기 전까지는 누설전류가 계속해서 증가하다가 1.2 V의 PP점에 도달하게 되면 계속해서 증가하던 누설전류가 Si표면에서 양극산화현상으로 인해 갑자기 감소된다. PP점에서의 최대 전류밀도는 약 2.05 mA/cm<sup>2</sup>로 측정되었고, 식각정지가 일어난 후의 누설전류밀도는 0.135 ~ 0.246 mA/cm<sup>2</sup>를 유지되었다.

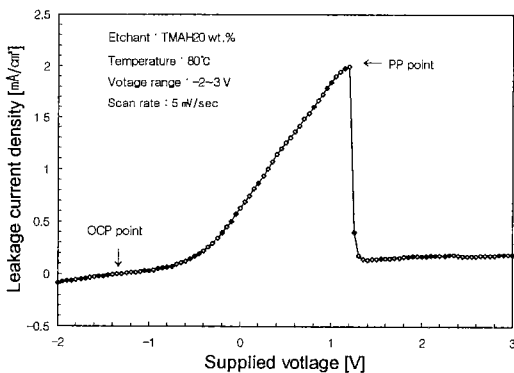


그림 6. 인가전압에 따른 p-형 Si의 대표적인 누설 전류 특성곡선.

Fig. 6. Typical leakage current characteristic curve of p-type Si according to applied voltage.

그림 7은 외부인가전압에 따른 pn접합 다이오드의 누설전류 특성곡선을 나타낸 것이다. 이 경우, OCP점은 약 -1.6 V로 분석되었고, passivation이 일어나는 PP점은 약 1.7V로 분석되었다. 이때 passivation이 일어나는 때의 pn접합 다이오드의 최대 누설전류밀도( $J_{diode}$ )는 1.47 mA/cm<sup>2</sup>로 그림 6에서 분석된 p-형의 최대 누설전류밀도( $J_{pp}$ )보다 낮게 나타났다. 이는 전기화학적 식각정지시 pn접합을 통한 과도한 누설전류에 의해 빠른 식각정지를 방지할 수 있기 때문에 정상적인 식각정지를 통해서 매우 정확한 능동층의 두께제어가 가능하다[10].

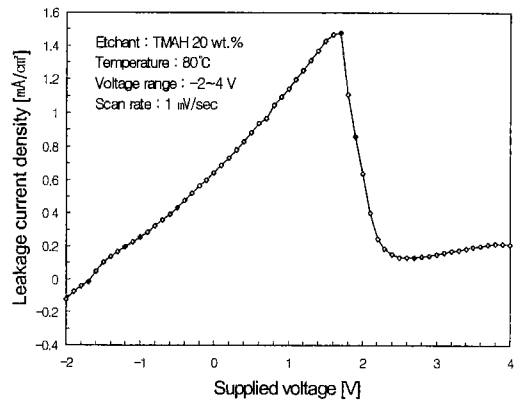


그림 7. 인가전압에 따른 pn접합 다이오드의 대표적인 누설전류 특성곡선.

Fig. 7. Typical leakage current characteristic curve of pn junction diode according to applied voltage.

그림 8(a)는 전기화학적 식각정지시의 I-V 특성곡선을 나타낸 것이다. 3전극 시스템에서는 RE전극 [11]때문 Si의 식각에 대해 누설전류를 일정하게 유지한다. P-형 Si이 식각된후, n-epi. Si이 식각용액에 노출될 때부터 누설전류는 급격히 증가하다가 n-epi. Si이 완전히 노출되면 식각 수용액과의 화학적인 반응에 의한 양극산화현상으로 식각이 중지된다. 그림 8(b)는 전기화학적 식각시 누설전류에 따른 식각정지 진행상태를 도식적으로 나타낸 것이다. 최초 ①은 식각 수용액에 노출된 p-형 Si이 산화·환원반응에 의해서 자연식각되는 상태이며 ②는 p-형 Si의 표면일부가 완전 식각되고, n-epi. Si 표면이 식각 수용액에 노출되면서 pn접합의 누설전류가 급격히 증가하는 상태를 나타낸 것이다. ③은 p-형

Si이 완전히 식각되고, n-epi. Si에서 양극산화현상으로 식각이 완벽하게 정지된 상태를 나타낸 것이다.

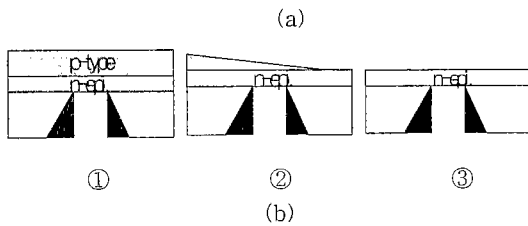
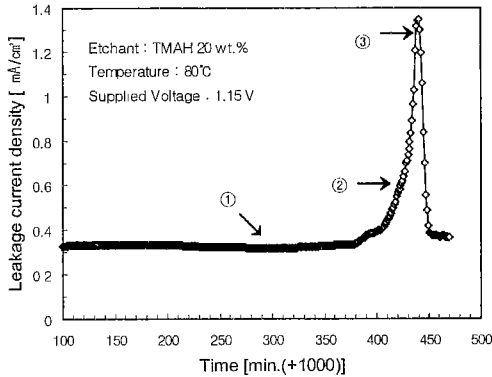


그림 8. (a) 전기화학적 식각정지시 I-T 특성곡선과 (b) 식각정지 단계의 도식적 표현.

Fig. 8. (a) I-T characteristic curve at electrochemical etch-stop and (b) schematic presentation of etch-stop step.

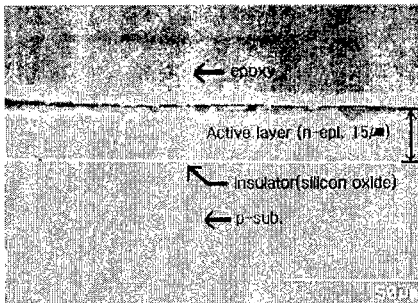


그림 9. 전기화학적 식각정지로 제조된 SDB SOI 구조의 단면 SEM 이미지.

Fig. 9. Cross-sectional SEM image of SDB SOI substrates fabricated by electrochemical etch-stop.

그림 9는 전기화학적 식각정지법에 의해 제조된 SDB SOI기판의 단면도 SEM사진이다. 전기화학적 식각정지법에 의해 p-sub.기판상에 성장된 15  $\mu\text{m}$ 의 n-epi.층에서 식각이 정확하게 정지됨을 알 수 있다. 또한, 식각정지된 SOI기판의 n-epi.층 두께가 15  $\mu\text{m}$ 으로 전체적으로 균일하며 전기화학적 식각정지법은 정확한 SDB SOI의 두께제어가 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인가 바이어스 조건들이 전기화학적 식각정지 특성에 미치는 영향을 분석·평가하였다.

금속-반도체 접합시에 형성되는 고유의 에너지 대역구조때문 거의 모든 조건에서 분석된 OCP점은 -1.35 ~ -1.3 V로 시료에 관계없이 큰 변화를 나타내지 않았다. 한편, 전극부에서의 높은 전압강하에 의해서 passivation 전위가 이동하기 때문에 OCP점을 지난, 이후 PP점 도달하기 전까지는 누설 전류가 계속해서 증가하고, PP점에 도달하게 되면 계속해서 증가하던 누설전류가 Si 표면에서 양극산화현상으로 인해 갑자기 감소된다. 이때의 PP점은 전극 면적에 영향을 받는 것으로 나타났고, 전극의 면적이 작아질수록 더 높은 전위에서 passivation이 발생되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21C 프론티어-지능형 마이크로 시스템 연구개발사업비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] J. Mark Noworolski, et. al., "Process for in-plan and out-of-plane single-crystal-silicon thermal microactuators", *Sensors & Actuators A*, Vol. 55, pp. 65-69, 1996.
- [2] A. Druzhinin, et. al., "Mechanical sensors based on laser-recrystallized SOI structures", *Sensors & Actuators A*, Vol. 61, pp. 400-404, 1997.
- [3] G. S. Chung, et. al., "Application of Si-wafer direct bonding to high-temperature integrated

- pressure sensors", *Sensors & Materials*, Vol. 3, pp. 61-74, 1991.
- [4] C. Harendt, et. al., "Wafer fusion bonding: characteristics of the bond quality", *Sensors & Materials*, Vol. 3, pp. 173-187, 1992.
- [5] Y. Matsumoto, et. al., "A capacitive accelerometer using SDB-SOI structure", *Sensors & Actuators A*, Vol. 53, pp. 267-272, 1996.
- [6] P. Murali, et. al., "Fabrication and characterization of PZT thin-film vibrators for micro-motors", *Sensors & Actuators A*, Vol. 48, pp. 157-165, 1995.
- [7] A. Yamada, et. al., "A computer control polishing system for silicon-on-insulator (SOI)", *5th Int. Workshop on Future Electronics Devices*, pp. 201-205, 1988.
- [8] G. S. Chung, et. al., "The fabrication of SDB SOI substrate by electrochemical etch-stop", *J. KIEEME*, No. 5, Vol. 13, pp. 431-436, 2000.
- [9] V. M. Mcneil, et. al., "An investigation of the electrochemical etching of (100) silicon in CsOH and KOH", *IEEE Solid-State Sensors & Actuators Workshop*, pp. 92-97, 1990.
- [10] G. S. Chung, et. al., "A study on electrochemical etch-stop in TMAH/IPA/pyrazine solutions", *J. Korea Sensors Society*, Vol. 7, pp. 126-131, 1998.
- [11] G. S. Chung et al., "Electrochemical etch-stop characteristics of TMAH/IPA/pyrazine solutions", *Sensors & Materials*, Vol. 4, pp. 103-114, 2000.