

# 感이온 電場效果 트랜지스트 (Ion Sensitive Field Effect Transistor)

孫 炳 基 \*  
(Sohn, Byung - Ki)

## 要 約

게이트絶緣層을 위한 HCl 熱處理法 텅스텐 metallization 및 fumed silica epoxy를 쓴 多重層 encapsulation 技術을 感이온 電場效果 트랜지스터 (ISFET) 製造에 活用하고 이의 動作特性을 調査하였다. 또 ISFET를 위한 理論的 模型을 提示하고 이것이 實驗事實과 잘 一致함을 보였다. 제조된 ISFET는 빠른 反應, 긴 壽命 및 작은 履歴特性을 나타내었는데, 특히 安定度는 크게 改善되었다.

## Abstract

An ion sensitive field effect transistor employing a special HCl heat treatment for the gate oxide layer along with tungsten metallization and multilayer encapsulation using fumed silica epoxy mixture was fabricated and its performance characteristics have been investigated. A theoretical model for the device operation is discussed, and it is shown that the experimental results are in good agreement with the theory. The fabricated device has excellent performance characteristics showing the fast response, long operation-life, small pH hysteresis, high sensitivity, etc. Especially, its stability has been greatly improved.

## 1. 序 論

感이온 電場效果 트랜지스터 (ISFET = ion sensitive field effect transistor)<sup>[1-5]</sup>란 종래의 感이온 電極 (ISE = ion sensitive electrode)<sup>[6-7]</sup>과 MISFET (metal-insulator-semiconductor FET<sup>[8]</sup>)를 結合하여 만든 感이온 半導體 裝置이다. ISFET는 MISFET의 게이트金屬을 제거하고 그 게이트絶緣層表面에 感이온 膜을 形成시킴으로써, MISFET의 게이트金屬을 ISE로 代置시킨 것이라고 생각할 수 있다. 그러므로 ISFET는 ISE가 가지는 感이온 및 이온 選別能力을 가질 뿐만 아니라, MISFET가 가지는 電場效果動作特性

을 가짐으로써 높은 入力임피던스 및 낮은 出力임피던스를 가진다. 또 ISFET는 集積回路 製造技術에 의해서 만들어지는 것으로 極小形이고 超輕量이며 높은 信頼度를 갖는 精巧한 裝置이다. 따라서 종래의 感이온 裝置에 비하여 그 性能이 월등 優秀하고, 同時에 現場·現時的 測定 및 生物體內 測定이 可能함으로 分析化學의 多樣한 應用, 環境管理의 應用, 특히 生醫學的 應用等 광범한 應用이 기대된다.

1970年 Bergveld<sup>[1]</sup>가 感이온 固體 裝置 研究의 예 比결과를 “短信”으로 보고한 것이 이 ISFET 研究의 始初報告이다. 正規 論文으로는 1972年 Bergveld<sup>[2]</sup>에 의해서 처음 발표되었고, 1974年 Matsuo와 Wise<sup>[3]</sup>에 의해서 두번째로 발표되었다. 뒤이어 Moss 등<sup>[9,10]</sup>은 特殊한 感이온 膜物質을 活用하여 ISFET의 이온 選別能力을 向上시키는 研究를 수행하였으며, 또

\* 正會員, 慶北大學校 工科大學 電子工學科  
(Dept. of Electronics Kyungpook National Univ.)  
接受日字: 1981年 6月 8日

Lundstrom 등<sup>[11,12]</sup>은 水素氣體感知 MOSFET (즉 GASFET) 를 만들어 threshold 電壓이 분위기 氣體內의 水素分壓函數임을 보였다. 한편 ISFET의 動作機構를 밝히려는 研究<sup>[13,15]</sup> 및 實用化 研究가 뒤이어 報告되고 있다.

그러나 電極/電解液/感이온膜/絶緣體/半導體의 複雜한 構造에 대한 感이온 및 이온 選別機構의 理論이 아직 미흡할 뿐 아니라, 현재까지 보고된 ISFET는 反應速度, 溫度依存性 및 履歴特性 등에 問題가 있으며, 특히 安定度가 낮고 壽命이 짧다. 더욱더 작은 裝置로 또 多重으로 만들어 높은 安定度를 가지고 同時에 여러 가지 이온을 現場·現時的으로 測定할 수 있어야 할 것이다.

本論文은 安定度 改善에 力點을 두고 設計로부터 포장에 이르는 製造工程과 性能試驗의 研究報告이다. 제시된 理論의 模型은 實驗値와 잘 一致하였으며, 특히 게이트 絶緣體를 위한 HCl 熱處理, 텅스텐 metallization 및 fumed-silica epoxy encapsulation의 組合으로 安定度를 크게 改善할 수 있었다.

2. 理 論

ISFET는 구조적으로 MISFET와 類似한데, MISFET의 理論은 잘 발전해 있음으로 이를 기초로 하여 ISFET의 理論을 展開해 나가는 것이 바람직하다.

그림 1은 n 채널 MOSFET의 구조와 電壓印加를 개략적으로 나타낸 것이다. 基板에 대한 게이트 電壓( $V_G$ )이  $V_G > 0$  이면 基板 半導體와 게이트 絶緣層의 境界面 부근에 存在하는 正孔은 게이트 電極의 電場에

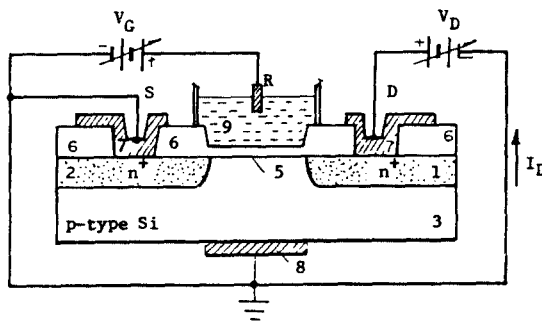


그림 1. MOSFET  
**Fig. 1.** Schematic diagram of MOSFET.  
 1 = drain, 2 = source, 3 = substrate,  
 4 = gate metal, 5 = gate oxide layer,  
 6 = insulator, 7 = metal contacts,  
 8 = substrate metal contact.

하여 밀려나고 電子는 境界面으로 끌려들게 된다. 이  $V_G$ 가 어느 값 이상으로 커지면 境界面에 가까운 領域에서는 電子의 밀도가 더 커져서 正孔의 密度보다 더 크게 되어 半導體極性的 反轉이 일어나게 된다. 이 얇은 反轉層이 생기면 source (S)와 drain (D) 사이에 導電채널이 形成됨으로 쉽게 電流가 흐를 수 있게 된다. 이 때  $V_G$ 의 變化가 채널 콘덕턴스를 變化시킴으로써 drain 電流 ( $I_D$ )의 變化를 誘導한다. MOSFET의 電流-電壓關係式은 이미 主된 두 動作 領域에 대해 잘 誘導되어 있다.<sup>[8]</sup> 第1近似로서  $V_D$ 가 비교적 작은 非飽和 領域( $V_D < V_G - V_T$ )에서는

$$I_D \approx \beta (V_G - V_T - \frac{V_D}{2}) V_D \quad (1)$$

$$\beta = \mu \left(\frac{W}{L}\right) C_0 \quad (2)$$

이다. 여기서  $\mu$ 는 電子移動度, W 및 L은 각각 채널의 幅과 길이이고,  $C_0$ 는 단위면적당의 게이트容量이며  $V_T$ 는 threshold 電壓 (半導體 反轉層이 形成되어 導電채널이 生成되기 위한 最小의  $V_G$ )이다. 또  $V_D$ 가 더 증대하면  $I_D$ 는 포화 영역에 들게 되는데 이때  $I_D$ 는 近似的으로

$$I_D \approx \frac{\beta}{2} (V_G - V_T)^2 \quad (3)$$

과 같아 된다. 그런데 만일  $V_D$ 가 대단히 작아서 식 (1)에서  $V_D$ 의 제곱 項이 무시되면

$$I_D \approx \beta (V_G - V_T) V_D \quad (4)$$

가 된다. 즉  $I_D$ 가  $V_D$ 에 一次的으로 비례하게 되는데 이 작은  $V_D$  ( $V_D \ll V_G - V_T$ ) 領域을 線形域이라 한다.

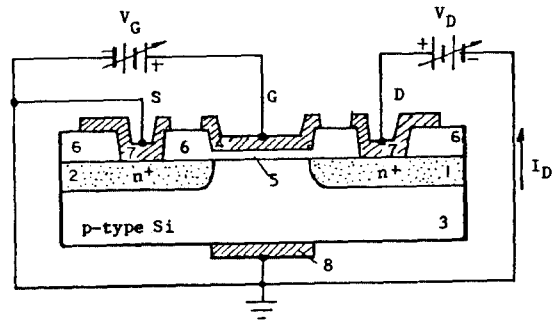


그림 2. ISFET  
**Fig. 2.** Schematic diagram of ISFET.  
 1 = drain, 2 = source, 3 = substrate,  
 5 = gate insulator layer, 6 = field insulator, 7 = metal contacts, 8 = substrate metal contact, 9 = solution to be measured, R = reference electrode.

그림 2는 ISFET의 구조를 MOSFET와 비교하여 개략적으로 나타낸 것이다. 그림 1과 비교하면 게이트 金屬電極이 參考電極(R)과 용액으로 代換되어 있음을 본다. 단일 용액중에 이온의 活性이 있으면 이에 의한 電場效果가 MOSFET에서와 꼭 같은 原理로 導電채널이 生成되어서  $I_D$ 가 이온 活性度에 의해 制御된다.

ISFET의 게이트 電位는 MOSFET와는 달리 分明하게 定義하기 어렵다. 그러나 ISFET의 게이트 電位를 感이온 膜表面에 나타나는 電位로 생각할 수도 있고, 또는 參考電極電壓( $V_R$ )으로 생각할 수도 있을 것이다. 만일 後者를 따른다면 용액과 感이온 膜사이의 電氣化學的 電位差( $V_N$ )를 threshold 電壓의 한 成分으로 생각하여 새로운 有效 threshold 電壓( $V_T^*$ )을 定義해야 한다. 이  $V_T^*$ 는 게이트 絶緣層이 용액없이 金屬電極과 직접 接해 있는 경우의 threshold 電壓( $V_{T0}$ ), 溶液과 絶緣體 사이의 電氣化學的 界面電位差, 및 참고전극과 게이트 絶緣體 사이의 各種 置列抵抗 成分에 의한 電壓降下分을 代數合한 것으로 表面할 수 있을 것이다. 즉,

$$V_T^* = V_{T0} + V_N + K \quad (5)$$

여기서  $K$ 를 常數項으로 보고, 電氣化學的 電位差를 Nernst 方程式

$$V_N = V_0 \pm \frac{kT}{nq} \ln a_i \quad (6)$$

로 表示된다고 假定한다. 여기서  $V_0$ 는 常數이고,  $K$ 는 Boltzmann 常數,  $T$ 는 絶對溫度,  $q$ 는 電子電荷의 絶對值,  $n$ 은 이온 價數,  $a_i$ 는 合成이온 活性度이다. 부호는 이온 電荷의 極性を 따른다. 식 (6)을 (5)에 代入하면

$$V_G - V_T = V_R - V_T^* = V_R - aX - b \quad (7)$$

를 얻을 수 있다. 여기서 +1價 이온을 고려했고,  $a = kT/q$  및  $X = \partial^n a_i$ 라고 했다. 그리고  $b$ 는 이온 活性度를 제외한 flat band voltage ( $V_{FB}$ ), 일極數差, 및 기타  $V_T$ 의 變因들에 의해서 결정되는 것으로서 대체로 常數로 볼 수 있다고 假定한다.

식 (7)을 식 (1), (3), (4)에 代入하면 ISFET를 위한 I-V關係式을 얻을 수 있다. 즉,

$$I_D \approx \beta (V_R - aX - b) V_D \quad (\text{線形域}) \quad (8)$$

$$I_D \approx \frac{\beta}{2} (V_R - aX - b)^2 \quad (\text{飽和域}) \quad (9)$$

이다. 또 transconductance를 다음과 같이 定義한다면

$$g_{mV_R} \equiv \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_R} \right)_X, \quad g_{mX} \equiv \left( \frac{\partial I_D}{\partial X} \right)_{V_R} \quad (10)$$

各 領域에서의 transconductance는 다음과 같다.

$$g_{mV_R} = \beta V_D \quad (11)$$

$$g_{mX} = -a \beta V_D \quad (\text{線形域}) \quad (12)$$

$$g_{mV_R} = \beta (V_R - aX - b) \quad (\text{飽和域}) \quad (13)$$

$$g_{mX} = -a \beta (V_R - aX - b) \quad (14)$$

이  $g_{mX}$ 는  $V_D$  및  $V_R$ 을 固定하여 ISFET를 動作시킬 때 바로 이온 活性度 應答을 주는 重要한 因子이다.

### 3. 設計 및 製造

그림 3은 본 연구에서 設計·製作된 FS-1 pH I-ISFET를 보여 주고 있다.  $Q_1$  및  $Q_2$ 는 ISFET이고,  $G_1$  및  $G_x$ 는 MISFET이다. 즉 1개의 chip의 두 쌍의 ISFET-MISFET가 들어 있고, 각 쌍의 하나의 inverter가 될 수 있다. 이 chip의 크기는  $1.2 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 이고,  $Q_1$  및  $Q_2$ 의 게이트 크기는  $25 \times 380 \mu\text{m}^2$ 이다.

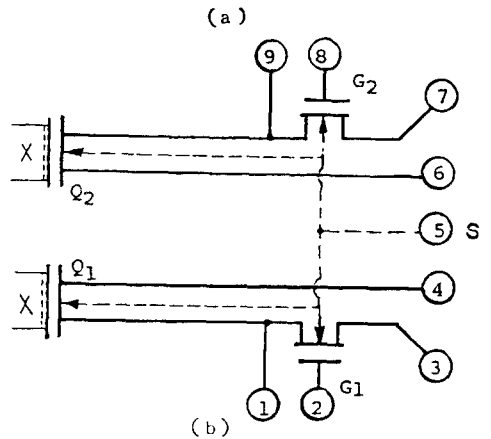
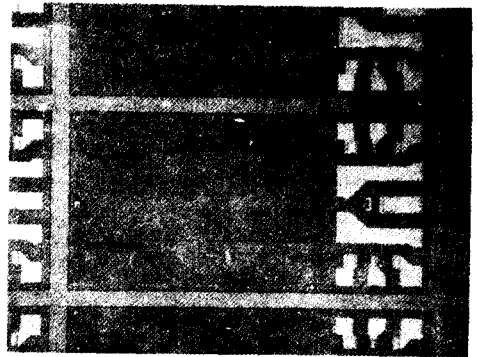


그림 3. (a) ISFET (FS-1)의 현미경 사진  
(b) ISFET (FS-1)의 등가회로  
Fig.3. (a) Microphotograph of the ISFET (FS-1)  
(b) Equivalent circuit of the ISFET (FS-1)  
 $Q_1, Q_2$ : ISFETs,  $G_1, G_2$ : MNOSFETs.

그림 4는 MNOS 工程이 進行되는 동안 繼面構造의 變化를 나타내고 있다. 저항률  $10 (+5, -2) \Omega \cdot \text{cm}$ , 結晶配何  $\langle 100 \rangle$ 인 P形  $S_i$  wafer를 써서 먼저 약

4. 結果 및 考察

4-1. 電流-電壓特性

그림 5는 참고 전극전압  $V_R$  과 PH의 여러 값에 대한  $I_D - V_D$  특성을 나타내고 있다. 이것은 ISFET가 MOSFET처럼 잘 동작하고 있음을 보여 주고 있다. 理論이 가르키는 바와 같이  $I_D$ 는 작은  $V_D$  영역에서는 거의 직선적으로 급속히 상승하다가  $V_D$ 가 커짐에 따라서 遷移域을 넘어 飽和領域으로 들어감을 분명히 볼 수 있다.

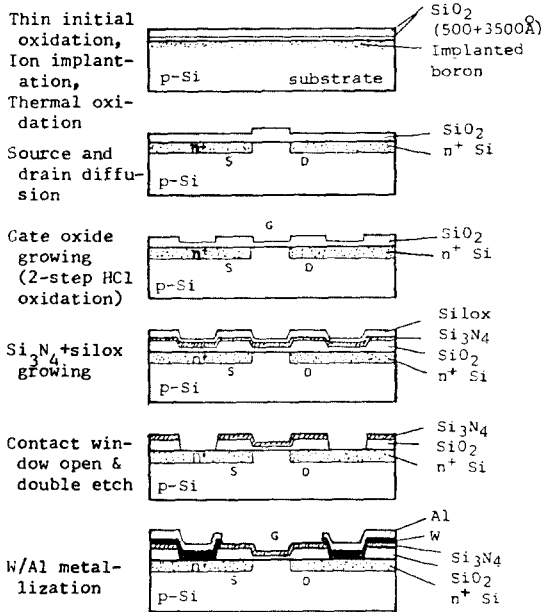


그림 4. Wafer 工程에 따른 斷面構造圖

Fig. 4. Cross-sectional structures for the step of wafer process.

500 Å의 SiO<sub>2</sub> 膜을 成長시켰다.

다음 110 keV의 加速에너지를 가진 B<sup>+</sup>이온을  $1.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  수준으로 射入하여 약 400 Å의 SiO<sub>2</sub> 膜을 成長시켰다. Source와 drain을 擴散시킨 後, 중요한 게이트 絶緣層을 成長시켰는데, 먼저 종래의 HCl 酸化方法으로 약 400 Å의 SiO<sub>2</sub> 膜을 成長시키고 다음 1150 °C, N<sub>2</sub> / HCl / O<sub>2</sub> = 100 / 1 / 1인 분위기에서 약 10 分間 熱處理했다. 이것은 게이트 絶緣層의 質을 向上시키고자 함인데 過擴散의 危險을 안고 있는 새로운 試圖이다. 이는 annealing 과정동안 SiO<sub>2</sub> 層에 균열이 생기면 O<sub>2</sub>가 그 틈으로 露出되는 Si를 酸化하게 하고, HCl이 SiO<sub>2</sub> 內의 移動性 이온인 Na<sup>+</sup>을 뽑아내자는 意圖이다. 이렇게 成長시킨 SiO<sub>2</sub> 層은 현미경 검사와 C-V特性 조사에서 그 質의 優秀함을 보였다. 다음 SiO<sub>2</sub> 層 위에 LPCVD方法으로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 層을 500 Å 成長시켰으며, 電極을 위해서는 LPCVD方法으로 W를 deposit하고 그 위에 Al를 蒸着하는 W-metal-lization法<sup>[19]</sup>을 活用하였다. Wire bonding이 끝나면 ISFET의 게이트 部位만을 남기고 全部分을 fumed silica epoxy로 多重層 encapsulation 하였다.

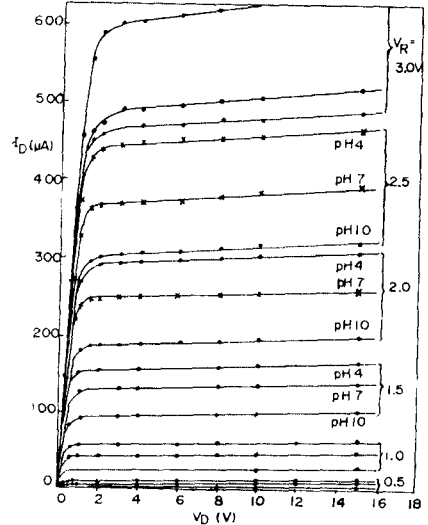


그림 5. 電流-電壓特性

Fig. 5.  $I_D - V_D$  characteristics.

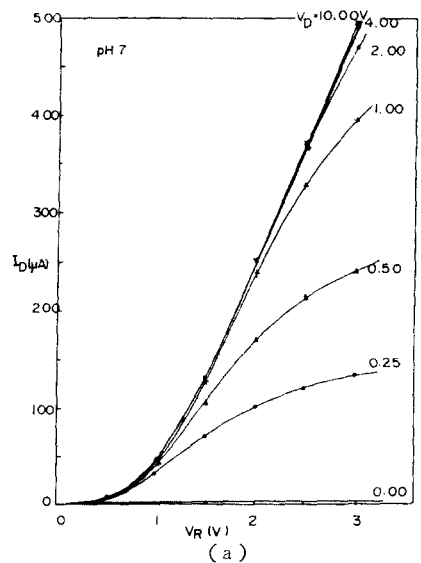
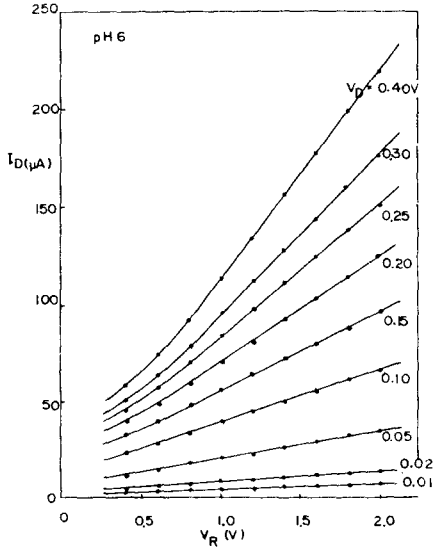
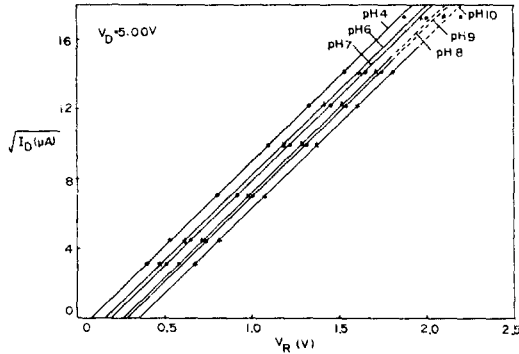


그림 6.

Fig. 6



(b)



(c)

그림 6. (a) 廣域傳達特性, (b) 非飽和域 傳達特性  
(b) 飽和域 傳達特性

Fig. 6. Transfere characteristics.

(a) Wide range of  $v_D$ , (b) In the non-saturation region (c) In the saturation region.

그림 6은 傳達特性 즉,  $I_D - V_D$  關係를 나타내고 있다. 그림 6 (b)는 낮은  $V_D$  영역에서의 傳達特性을 나타내고 있다. 이들 모두가 식 (8) 및 식 (9)를 잘 만족시키고 있다. 이들 直線의 기울기로 부터 trans-conductance  $g_{mV_R}$  (식 (11), (13))를 얻고, 낮은  $V_D$ 에서는  $g_{mV_R}$ 이  $V_D$ 에 線形的으로 比例함을 볼 수 있다. [식 (11) 참조]. 또 이로부터  $\beta$ 값을 결정할 수 있는데 대체로  $240 \mu\Omega/V$ 이다.

4 - 2.  $I_D - pH$  特性

그림 7은  $V_D$ 가 50 mV와 150 mV인 두 경우에 대해서  $V_R$ 을 파라미터로 한  $I_D - pH$  特性을 보여준다.

pH의 실용범위에서는 아주 좋은 直線性을 나타내는데, 그 기울기가  $V_R$ 에는 무관하고  $V_D$ 에 의해서 變化함을 볼 수 있다. 이 기울기 즉 pH-transconductance  $g_{mx}$ 가  $V_D$ 에 의해 變化하는 모양을 그림 8에 나타내었다.

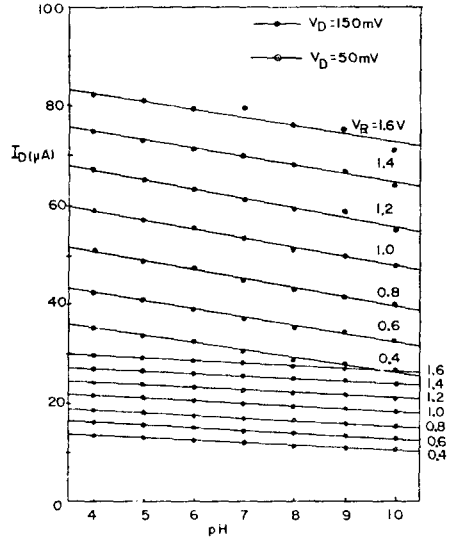


그림 7.  $I_D - pH$  特性

Fig. 7. pH-response of the drain current.

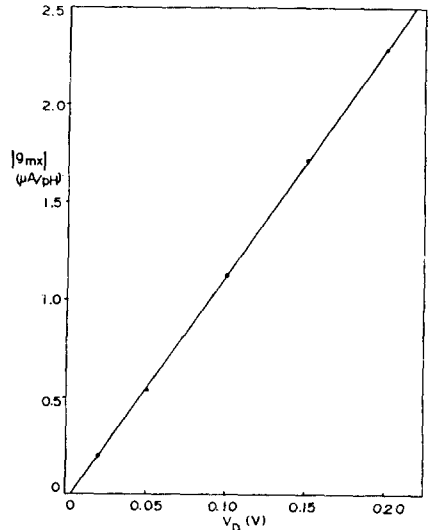


그림 8.  $g_{mx} - V_D$  關係

Fig. 8. Relationship between  $|g_{mx}|$  and  $V_D$

이는 식 (12)로부터 예측되는 바와 같이 좋은直線性を 보이는데, 이 기울기가  $a\beta$ 로서 앞에서 구한  $\beta$ 값을 적용하면  $a$ 는  $52\text{ mV/pH}$ 가 된다. 이는 이론치인  $59\text{ mV/pH}$ 에는 미치지 못한다. 본 실험에서 얻은 최대의  $a$ 값은  $56\text{ mV/pH}$ 였다. 대체적으로 보고된  $a$ 값은  $43\sim 60\text{ mV/pH}$ 이다.<sup>[2, 5, 9, 18.]</sup>

앞에서 考察한 여러 實驗事實, 特히 그림 6(b), 그림 6(c),  $g_{mV_R}(V_D)$ , 그림 7, 그림 8 등은 식 (5) 및 식 (7)의 假定을 강하게 정당화하고 있다. 즉 이온活性度の 數로 表現되는 電氣化學 電位項을 threshold 電壓을 定義할 수 있음과, 本實驗의 범위에서는 식 (5)와 식 (7)의  $K$ 와  $b$ 를 常數로 보는 것은 충분히 타당함을 증명해 준다.

4 - 3. 溫度依存性

그림 9는  $\text{pH} = 7.0$ 인 용액에서의 ISFET 溫度依存性이다.  $14\sim 50^\circ\text{C}$  범위에서는 直線에 가까운 완만한 曲線으로 溫度增加와 함께  $I_D$ 도 증가한다.

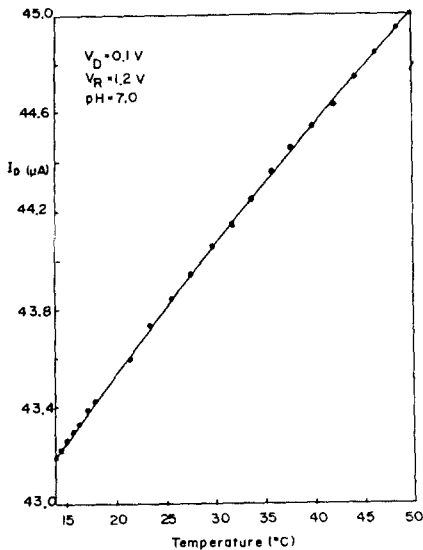


그림 9. 溫度依存性  
Fig. 9. Temperature dependance of the drain current.

平均기울기는  $0.07\text{ pH}/^\circ\text{C}$ 이다. 만일 온도 변화가  $10^\circ\text{C}$  이상이면  $0.7\text{ pH}$  이상의 오차를 유발하게 되나, 生理學的 應用인 경우 변온범위를  $5^\circ\text{C}$  이내로 보아 크게 심각한 것으로는 생각되지 않는다. 그러나 정밀한 측정이 요구되는 이상 이 溫度依存性이 큰 문제로 남는다. 이 溫度依存性은 半導體의 本性일 뿐만 아니라 微細한 채널로 흐르는 電流의 熱作用이 또한 문제를 더

욱 複雜하게 한다.

4 - 4. pH 履歷特性

그림 10은  $\text{pH}$  범위  $3.25\sim 10.50$ 에 걸친 ISFET의  $\text{pH}$ 履歷特性이다.  $V_D = 0.1\text{ V}$  및  $V_R = 1.0\text{ V}$ 를 印加하고,  $\text{pH}$ 가  $7.00 \rightarrow 10.50 \rightarrow 3.25 \rightarrow 7.00$ 으로 연속 변화하는 동안  $I_D$ 變化를 나타낸 것이다. 一循하는 동안 시간은  $150\text{ min}$ 이고,  $\text{pH}$ 變化速度는 거의 一定하게 유지됐다. 여기서  $\text{pH}$ 가  $7.00 \rightarrow 10.50 \rightarrow 7.00$ 變化하는 동안의 履歷效果는 거의 없고,  $7.00 \rightarrow 3.25 \rightarrow 7.00$ 變化하는 동안에 대부분의 履歷效果가 誘發됨을 볼 수 있다.

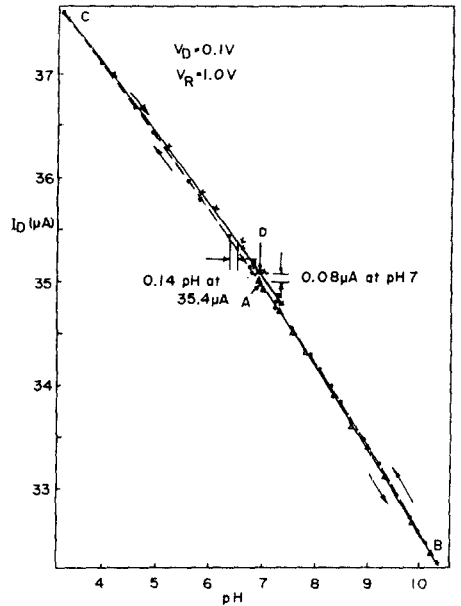


그림 10. pH 履歷特性  
Fig. 10. pH-hysteresis in a wide pH range.

즉  $\text{pH}$ 履歷特性은 주로 強酸反應에 起因함을 알 수 있다. 이  $\text{pH}$ 범위에 대한 1 cycle 동안의 履歷效果는  $\text{pH} = 7.00$ 에서  $0.11\text{ [pH]}$ 이고, 단위  $\text{pH}$ 變化當 평균  $0.014\text{ [pH]}$ 이다. 이것을 生醫學的으로 應用하는 경우라면 이 履歷效果에 起因되는 오차는 거의 무시된다.

4 - 5. 反應速度 및 安定度

그림 11은 ISFET를  $24^\circ\text{C}$ 인 표준  $\text{pH} 7$ 容液에 담그는 순간의  $I_D$ 變化的 記錄이다. 反應時間이 불과  $0.3\text{ sec}$  정도이다. 이는 종래의 유리膜 電極의 反應時間이 대체로  $30\text{ sec}$  이상<sup>[5]</sup>인데 비하면 약 100 배나 빠

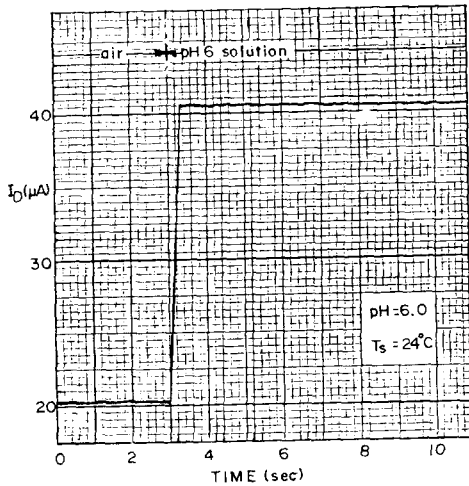


그림 11. 反應速度

Fig. 11. Response time in the standard buffered pH 6 solution.

른 셈이다.

종전의 ISFET 壽命은 대체로 3 期로 구분되는데<sup>[9]</sup>, 급격한 特性變化를 수반하는 初期狀態調整期, 測定에 活用할 수 있는 安定期, 그리고 安定度가 급격히 低下되는 廢衰期이다. 初期에는 약 15 ~ 30 時間 동안 ISFET 를 용액에 담고어 부어 조정해야 비로소 안정된 特性을 나타내며, 약 1 ~ 3 週間 안정된 狀態로 동작하다가 급격한 特性低下를 이끈다. 그러나 본 實驗에서 제조한 device는 初期 狀態調整이 必要없고 바로 安定한 特性을 나타내었다. 또 그 계속적인 動作壽命도 20 週間을 넘는 대단히 優秀한 安定度를 보였다. 이 刮目할 安定度 改善을 ISFET의 實用化에 크게 寄與할 것이다. HCl 熱處理,<sup>[19]</sup> W-metallization 및 多重層 fumed silica epoxy encapsulation 技術의 活用이 安定度를 크게 改善시킨 것으로 생각된다.

HCl 열처리를 試圖한 이유는 앞에서 밝힌 바와 같은데, W-metallization을 試圖한 이유는 대체로 두 가지를 들 수 있다. 첫째로 LPCVD 方法으로 높은 純度の W 層을 형성하고 그 위에 Al 層을 蒸着함으로써 Na 原子가 Al 層으로부터 게이트 SiO<sub>2</sub> 層으로 침입하는 것을 막을 수 있다. 일반적으로 W의 脆性때문에 Na를 添加하여 延性を 부여하는데, 만일 W-boat를 써서 Al를 蒸着하는 경우라면 Na이 Al 層에 들어갈 것이고, 또 W장벽이 없으면 Na이 게이트 SiO<sub>2</sub> 層으로 들어가게 되어 SiO<sub>2</sub> 내에서 移動性인 Na이 문제를 야기하게 될 것이다. 둘째로 W은 N<sup>+</sup>Si 과 좋은 ohmic contact를 形成한다.

Zemel<sup>[4]</sup> 은 ISFET의 가장 중요한 因子로 感度 (sensitivity), 選択度 (selectivity), 및 復歸度 (reversibility)를 들고 있다. 현실적으로 볼 때 感度は 큰 문제가 아니다. 또 選択度도 感度が 優秀하면 이에 따라서 어느 정도 向上된다. 어떤 感이온 膜이든 모든 이온에 敏感하지 않고 어떤 特定이온에 더 敏感하기 때문이다. 그러므로 결국 復歸度 문제가 현실적으로 가장 중요한 것으로 된다. 그런데 이 復歸度 문제는 ISFET의 感이온 機構를 感이온 膜表面에서의 分極이나 吸着과 같은 界面現象으로 보기 보다는 계속적인 水과 나 이온 輸送같은 것을 더 重要視하기 때문인 것으로 생각된다. 본 實驗結果인 빠른 反應速度, 작은 履歷特性 및 긴 動作壽命 등을 미루어 생각할 때 계속적인 水과 나 이온 輸送效果의 模型보다는 오히려 界面反應效果를 더 重要視해야 할 것으로 생각된다. 또 이 復歸度 問題는 壽命과 安定도와 깊은 關係에 있다. 또 같은 IC製造工程을 거쳐 제조된 디바이스의 特性檢査에서 優秀한 再現性을 나타냈다.

### 5. 結 論

게이트 SiO<sub>2</sub> 膜의 HCl 열처리, W-metallization 및 多重層 fumed silica epoxy encapsulation 技術에 의하여 ISFET의 安定度를 크게 改善할 수 있었다. 제조된 ISFET는 높은 安定度, 긴 壽命, 좋은 感度, 빠른 反應, 작은 pH履歷特性, 極小形, 超輕量 등 유리膜 感이온 電極에 비해서 월등 優秀한 成績을 나타냈다. 感이온 機構의 더 明確한 理論的 解明과 溫度 依存性 問題의 解決 등 難題가 많이 남아 있기는 하지만, 현재 종합적으로 봐서 費用 가능한 단계에 이르렀다고 생각된다.

### 參 考 文 獻

1. P. Bergveld, "Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements," IEEE Trans. (Short Comm.), BME-17: 70-71 (1970).
2. P. Bergveld, "Development, operation, and application of the ion-sensitive field-effect transistor as a tool for electrophysiology," IEEE Trans., BME-19: 342-351 (1972).
3. T. Matsuo and K.D. Wise, "An integrated field-effect electrode for biopotential recording," IEEE Trans., BME-21: 485-487 (1974).
4. J.N. Zemel, "Ion-sensitive field effect transistors and related devices," Anal. Chem.,

- 47: 255A-268A (1975).
5. P.W. Cheung, W.H. Ko, D.J. Fung, and S.H. Wong, "Theory, fabrication, testing and chemical response of ion-sensitive field effect transistor devices," Workshop on theory, design, and biomedical applications of solid state chemical sensors, CRC Press, 91-118 (1978).
  6. G. Eisenman, "Cation selective glass electrodes and their mode of operations," *Biophys. J.*, 2: 259-323 (1962).
  7. R.P. Buck, "Electroanalytical chemistry of membranes," *CRC Crit. Rev. in Anal. Chem.*, 5:323-420 (1976).
  8. P. Richman, "MOS field-effect transistors and integrated circuits," John Wiley and Sons, Inc., New York, 1973.
  9. S.D. Moss, J. Janata and C.C. Johnson, "Potassium ion-sensitive field effect transistor," *Anal. Chem.*, 47: 2238-2243 (1975).
  10. S.D. Moss, C.C. Johnson and J. Janata, "Hydrogen, calcium, and potassium ion-sensitive field effect transducers," *IEEE Trans., BME-25*: 49-54 (1977).
  11. I. Lundstrom, S. Shivaraman, C. Svensson and L. Lundkvist, "A hydrogen-sensitive MOS field-effect transistor," *Appl. Phys. Letters*, 26: 55-57 (1975).
  12. I. Lundstrom, M.S. Shivaraman and C. Svensson, "A hydrogen sensitive Pd-gate MOS transistor," *J. Appl. Phys.*, 46: 3876-3881 (1975).
  13. J.N. Zemel, "Chemically sensitive semiconductor devices," *Research/Development*, 28: 38-44 (1977).
  14. J. Janata and S.D. Moss, "Chemically sensitive field-effect transistors," *Biomed. Eng.*, 11: 241-245 (1976).
  15. R.G. Kelly, "Microelectronic approaches to solid state ion selective electrodes," *Electrochimica Acta*, 22: 1-8 (1977).
  16. M. Esashi and T. Matsuo, "Integrated micro multi ion sensor using field effect of semiconductor," *IEEE Trans., BME-25*: 184-191 (1978).
  17. B.A. Mckinley, J. Saffle, W.S. Jordan, J. Janata, S.D. Moss and D.R. Westernskow, "In vivo continuous monitoring of  $K^+$  in animals using ISFET probes," *Med. Instr.*, 14: 93-97 (1980).
  18. Materials for Nato Advanced Study Institute of Chemically Sensitive Electronic Devices held at the Peddie School, Hightstown, New Jersey from 9 June to 21 June 1980.
  19. B.K. Sohn, "ISFET FS-1 Process using a HCl heat treatment technique," *Microelectronics Laboratory, University of Arizona, March, 1980.*

