

# MOS 소자 반전층의 전자 이동도에 대한 해석적 모델

논문
9-2-7

## An Analytical Model for Inversion Layer Electron Mobility in MOSFET

신형순

(Hyungsoon Shin)

### Abstract

We present a new physically based analytical equation for electron effective mobility in MOS inversion layers. The new semi-empirical model is accounting explicitly for surface roughness scattering and screened Coulomb scattering in addition to phonon scattering. This model shows excellent agreement with experimentally measured effective mobility data from three different published sources for a wide range of effective transverse field, channel doping and temperature. By accounting for screened Coulomb scattering due to doping impurities in the channel, our model describes very well the roll-off of effective mobility in the low field (threshold) region for a wide range of channel doping level ( $N_a = 3.0 \times 10^{14} - 2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ).

**Key Words (중요용어)** : Electron Mobility (전자이동도), Phonon Scattering (포논산란), Screened Coulomb Scattering (차폐쿨롱산란), Surface Roughness Scattering (표면요철산란)

### 용어정의

$E_s$	산화막과 실리콘 계면에서의 수직전계 (V/cm)	$N_a$	채널 불순물농도( $\text{cm}^{-3}$ )
$E_o$	반전층 끝에서의 수직전계 (V/cm)	$N_f$	단위면적당 산화막 전하량( $\text{cm}^{-2}$ )
$E_{\text{eff}}$	실효 수직전계(effective transverse electric field) (V/cm)	$N_i$	반전층내의 단위면적당 전자량( $\text{cm}^{-2}$ )
$k$	Boltzman 상수 (eV/K)	$p$	Fuchs 상수 (단위없음)
$\mu_{\text{bph}}$	벌크 포논산란(bulk phonon scattering)에 의한 전자이동도( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$T$	온도(K)
$\mu_c$	차폐 쿨롱산란(screened Coulomb scattering)에 의한 전자이동도( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$T_n$	300K에 대하여 표준화된 온도 (단위없음)
$\mu_{\text{eff}}$	실효 (혹은 평균) 전자이동도(effective electron mobility)( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$V_{\text{th}}$	열속도( $\text{cm/s}$ )
$\mu_{\text{ph}}$	벌크 및 표면 포논산란에 의한 전자이동도( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$Z$	양자역학에 의한 채널두께 증가를 고려한 평균 반전층두께(cm)
$\mu_s$	표면 포논산란 (surface phonon scattering)에 의한 전자이동도( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )		
$\mu_{\text{sr}}$	표면요철산란 (surface roughness scattering)에 의한 전자이동도( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )		
$m^*$	전자 실효질량 (electron effective mass) (g)		

### 1. 서론

MOS소자 반전층에서 수직전계에 따른 전자이동도의 변화는 매우 중요한 현상으로서 이것을 정확하게 모델하여야 MOS소자의 전기적 특성의 정확한 시뮬레이션이 가능하다. Submicron의 소자에서는 정확한 이동도 모델이 더욱 중요한데 이는 단채널효과(short channel effect)를 감소시키기 위하여 얇은 산화막과 높은 채널 불순물농도를 사용하므로 반전층의 수직전계가 증가하기 때문이다.

기존에 발표된 수직전계에 따른 전자이동도의 모델<sup>1)</sup>은 양자역학에 의한 채널 반전층두께의 증가를 고려하여 낮은 수직전계 영역에서의 전자이동도 변화의 만능곡선(universal curve)을 설명할 수 있었다. 그러나 최근에 발표된 Takagi<sup>2)</sup>의 측정값

\* : 이화여자대학교 전자공학과

접수일자 : 1995년 8월 7일

심사완료 : 1995년 12월 7일

은 높은 수직전계 영역에서 ( $E_{\perp eff} \geq 5 \times 10^5$  V/cm) 표면요철에 의한 산란<sup>3-5)</sup>으로 실효 전자이동도가 급격히 감소함을 보이고 있다. 또한 Takagi는 그의 논문에서 낮은 전계(문턱전압 부근)에서 실효이동도가 만능곡선과 차이를 보이는 것이 Brews<sup>6)</sup>와 Wikstrom<sup>7)</sup>이 설명한 바와 같이 산화막전하에 의한 전하요동(charge fluctuation)에 의한 것이 아니라 채널 불순물에 의한 쿨롱산란에 의한 것임을 보였다. 그림 1에서 볼수 있듯이 Schwarz의 모델<sup>1)</sup>은 채널 불순물에 의한 쿨롱산란과 표면요철산란을 고려하지 않으므로 높은 전계영역에서 측정값과 일치하지 않고 있다. 최근에 산화막전하에 의한 쿨롱산란과 표면요철산란을 고려한 모델들이<sup>8,9)</sup> 발표되었으나 본문에서 설명한 것과 같이 이 모델들은 불순물에 의한 쿨롱산란을 고려하지 않았으므로 채널 불순물 농도에 따른 전자이동도 감소를 재현할 수 없다.

본 논문에서는 실효 수직전계에 따른 MOS소자 반전층에서의 실효 전자이동도 변화를 설명하기 위하여 포논산란 뿐만 아니라 표면요철에 의한 산

## 2. 새로운 전자이동도 모델

Schwarz<sup>1)</sup>의 모델은 다음에 제시된 바와 같이 벌크 포논산란에 의한 벌크 전자이동도( $\mu_{bph}$ ) 및 표면포논과 산화막전하에 의한 표면 전자이동도( $\mu_s$ )를 고려하였다.

$$\mu_{\perp eff} = \left[ \frac{1}{\mu_{bph}} + \frac{1}{\mu_s} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$\mu_{bph} = 1150 T_n^{-2.5} \quad (2)$$

$$\mu_s = \frac{2qZ}{pm^*v_{th}} = \frac{Z}{3.2 \times 10^{-9} p T_n^{1/2}} \quad (3)$$

$$p = 0.09 T_n^{1.5} + 1.5 \times 10^{-8} \left( \frac{N_i}{Z} \right)^{-0.25} T_n^{-1} N_i \quad (4)$$

$$Z = Z_{cl} + Z_{qm} \quad (5)$$

$$Z_{cl} = \frac{\frac{3}{2} kT}{qE_{\perp eff}} = 0.0388 T_n E_{\perp eff}^{-1} \quad (6)$$

$$Z_{qm} = \left[ \frac{9(h/2\pi)^2}{4m^*qE_{\perp eff}} \right]^{1/3} = 1.24 \times 10^{-5} E_{\perp eff}^{-1/3} \quad (7)$$

위의 모델에서 표면 전자이동도,  $\mu_s$  (식3)는 다음과 같은 식에서 유도되었다.

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} = \frac{qL}{m^*v_{th}} \quad (8)$$

여기서  $\tau$ 는 산란시간이고  $L$ 은 산란거리이다. 이 모델은 표면에서의 확산산란<sup>10)</sup> (diffusion scattering)을 고려하여  $L$ 은 반전층두께( $Z$ )의 두배로 가정하였으며, 표면포논 및 표면전하 단면적(surface charge cross-section)에 비례하는 확산산란의 확률을 고려하기 위하여 Fuchs 산란계수<sup>11)</sup>  $p$ 를 추가하였다. 또한 양자역학에 의한 채널증가 효과<sup>12)</sup>를 고려하기 위하여  $Z$ 는 고전역학에 의한 채널 두께  $Z_{cl}$  (식6)과 반전층 에너지 준위의 양자화에 의한 채널 두께증가  $Z_{qm}$  (식7)의 합으로 표시하였다.

위에서 설명한것과 같이 Schwarz의 모델은 표면요철에 의한 산란과 쿨롱산란을 고려하지 않았다. 그러나 이러한 산란현상은 높은 수직전계와 높은 채널 불순물농도를 사용하는 submicron소자를 위한 전자이동도 모델에 필수적으로 고려되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 이런 산란현상을 고려한 새로운 모델을 다음과 같이 제시한다.

$$\mu_{\perp eff} = \left[ \frac{1}{\mu_{ph}} + \frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{\mu_c} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\mu_{ph} = \left[ (K_B T_n^{K_T})^{-1} + \left( \frac{2qZ}{pm^*v_{th}} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

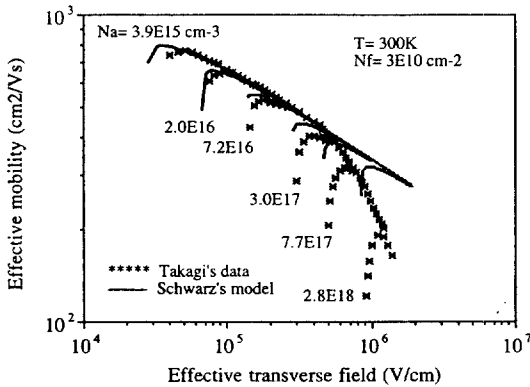


그림 1. Schwarz<sup>1)</sup>의 모델과 측정값<sup>2)</sup>의 비교.

Fig. 1. Comparison of calculated (Schwarz<sup>1)</sup> equation) vs. measured<sup>2)</sup>  $\mu_{\perp eff}$  vs.  $E_{\perp eff}$  for several channel doping levels.

란 및 불순물에 의한 쿨롱산란등의 물리적현상을 추가로 고려한 새로운 전자이동도 모델을 제시하였다. 이 모델은 넓은 영역의 실효 수직전계, 채널 불순물농도 및 온도에 대한 전자 이동도의 측정값과 뛰어난 일치를 보여준다. 특히 최근에 발표된 모델에<sup>8,9)</sup> 비하여 새 모델은 채널 불순물에 의한 차폐 쿨롱산란을 고려하여, 넓은 영역의 ( $N_a = 3.0 \times 10^{14} - 2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 채널 불순물농도에 대하여 낮은 수직전계 영역에서 실효 전자이동도가 만능곡선으로부터 급격히 감소하는 것을 재현할 수 있다.

$$= \left[ (1150 T_n^{-2.5})^{-1} + \left( \frac{Z_{qm} + Z_{cl}}{3.2 \times 10^{-9} p T_n^{1/2}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (10)$$

$$p = 0.14 T_n^{1.4} \quad (11)$$

$$Z_{cl} = \frac{3}{2} \frac{kT}{q E_{\perp \text{eff}}} = 0.0388 T_n E_{\perp \text{eff}}^{-1} \quad (12)$$

$$Z_{qm} = K_{qm} E_{\perp \text{eff}}^{-1/3} = 1.73 \times 10^{-5} E_{\perp \text{eff}}^{-1/3} \quad (13)$$

$$\mu_{sr} = K_{sr} E_{\perp \text{eff}}^{-2} = 1 \times 10^{15} E_{\perp \text{eff}}^{-2} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mu_c &= \frac{K_c T_n^{1.5}}{\ln(1 + \gamma_{BH}^2) - \frac{\gamma_{BH}^2}{1 + \gamma_{BH}^2}} \frac{1}{N_a} \quad (15) \\ &= \frac{5 \times 10^{19} T_n^{1.5}}{\ln(1 + \gamma_{BH}^2) - \frac{\gamma_{BH}^2}{1 + \gamma_{BH}^2}} \frac{1}{N_a} \end{aligned}$$

$$\gamma_{BH}^2 = \frac{K_\gamma}{N_i} T_n^2 = \frac{3 \times 10^{17}}{N_i} T_n^2 \quad (16)$$

여기서

$$T_n = \frac{T(K)}{300} \quad N_i = \frac{2 \epsilon_{si}}{q} (E_{\perp \text{eff}} - E_o)$$

$$m^* = 0.92 m_o \quad E_{\perp \text{eff}} = \frac{E_s + E_o}{2} \quad (17)$$

새 모델은 벌크 및 포면 포논산란( $\mu_{ph}$ ), 표면요철에 의한 산란( $\mu_{sr}$ ) 및 채널 불순물에 의한 차폐 쿨롱산란( $\mu_c$ )을 모두 고려 하였다. 단순히 측정값을 재현하기 위한 수식이 아니라 각 산란현상에 대한 물리적 현상을 고려한 수식이 사용되었으며 몇개의 fitting 파라미터 ( $K_B$ ,  $K_T$ ,  $K_{qm}$ ,  $K_{sr}$ ,  $K_c$ ,  $K_\gamma$ )를 최적화하여 다양한 측정값과 모델이 일치함을 확인하였다. 다음의 각 절에서 각각의 산란현상을 자세히 설명하겠다.

### 2.1 포논산란, $\mu_{ph}$

전자이동도의 측정값<sup>2,13,14</sup>과 모델의 일치도를 위하여  $K_B$ 와  $K_T$ 를 최적화한 결과,  $K_B=1150$   $K_T=2.5$ 를 얻을 수 있었다.  $K_T=2.5$ 는 벌크포논의 영향을 가장 많이 받는 낮은 불순물농도에서의 온도의존성<sup>15,16</sup>과 일치한다.  $K_B=1150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 는 벌크 실리콘에서 보통으로 사용되는 값인  $1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ <sup>17</sup>과는 차이를 보이지만, 이는 산화막과 실리콘 계면의 stress에 의한 전자이동도의 변화 때문이다.

Schwarz는 대부분의 전자가 가장 낮은 sub-band에 위치하는 0K 조건에서 유도된 값인  $K_{qm} = 1.24 \times 10^{-5}$ 을 사용하였다. 그러나 상온에서는 많은 전자들이 높은 sub-band에 분포하므로  $K_{qm}$

은 증가하게 된다. 따라서 Schwarz가 사용한  $Z_{qm}$  값은 상온에서 계산한 Stern<sup>11</sup>의 계산값보다  $E_{\perp \text{eff}} = 10^5 - 10^6 \text{ V/cm}$  영역에서 작은 값을 갖는다. 새 모델을 전자이동도의 측정값<sup>2,13,14</sup>에 대하여 최적화하여  $K_{qm} = 1.73 \times 10^{-5}$ 을 사용하면 모델이 측정값과 일치함을 알 수 있었고, 또한 그림2에서 볼수 있듯이 새로운  $Z_{qm}$  식이 Schwarz의 식보다 계산값과의 일치도가 뛰어난 것을 알 수 있었다. 특히 submicron 소자에서 사용되는  $10^5 - 10^6 \text{ V/cm}$ 영역에서 일치도가 가장 향상된 것을 보인다.

Schwarz의 모델은 산화막전하의 영향을 Fuchs 상수  $p$  (식4)에서 고려하였다. 그러나 식(11)에 보인 바와 같이 새로운 모델은 Schwarz의 모델과 다르게 산화막전하에 의한 산란을 고려하지 않았다. 그 이유는 그림 3에서 볼수 있듯이 넓은 영역의 산화막 전하량( $N_f = 2 \times 10^{10} - 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ )을 갖는 MOS소자에서 측정된 전자 이동도가 거의 변화가 없이 일치하며 현재의 공정기술 수준으로 산화막 전하량을  $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  이하로 조절할 수 있기 때문이다. 식(11)의 상수는 측정값<sup>2,13,14</sup>를 이용하여 최적화하였으며 특히 온도의존계수는 Sabnis의 측정값(그림6)과의 일치도를 향상시키기 위하여 최적화하였다.

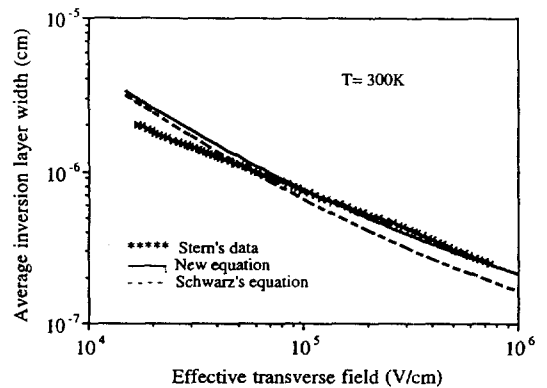


그림 2. 상온에서의 평균 반전층 두께의 비교.

Fig. 2. Comparison of average inversion layer widths at room temperature calculated using different equations.

### 2.2 표면요철에 의한 산란, $\mu_{sr}$

submicron소자의 경우 얇은 산화막 두께, 높은 채널 불순물농도 그리고 감소되지 않은 전원전압을 사용하기 때문에 실효 수직전계가  $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 를 초과하게 된다. 이렇게 높은 전계 영역에서는 전자이동도가 표면요철에 의한 산란의 영향으로  $E_{\perp \text{eff}}^{-2}$  전계의존도를 갖으며 감소하는 것이 다수의 논문<sup>2-5</sup>에 발표되었다. 새 모델을 측정값<sup>2,13,14</sup>과 비

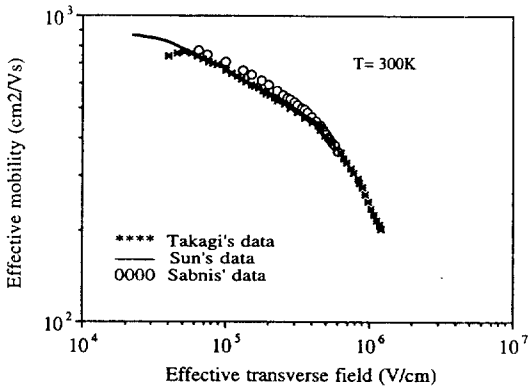


그림 3. 산화막 전하량이 다른 MOS소자에서 측정된 전자이동도의 비교.

Fig. 3. Comparison of measured  $\mu_{i,eff}$  vs.  $E_{i,eff}$  data at room temperature. Sabnis and Clemens<sup>14)</sup>:  $N_a = 1.13 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_f = 2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  Takagi<sup>2)</sup>:  $N_a = 3.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_f = 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  Sun<sup>13)</sup>:  $N_a = 1.22 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_f = 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

교한 결과  $\mu_{sr} = K_{sr} E_{i,eff}^{-2} = 1 \times 10^{13} E_{i,eff}^{-2}$ 이 측정값과 일치도를 가장 향상 시키는 것을 알 수 있었다.

### 2.3 쿨롱산란, $\mu_c$

Brews<sup>6)</sup> 및 Wikstrom<sup>7)</sup>은 낮은 수직전계영역(문턱전압영역)에서 전자이동도가 만능곡선보다 감소하는 현상이 계면전하와 산화막전하에 의한 소수캐리어의 변동때문인 것으로 해석하였다. 그러나 이러한 해석은 낮은 불순물농도에서는 적용될 수 있지만 높은 불순물농도에서는 소수캐리어의 변화량이 캐리어의 절대량에 비하여 매우 적기 때문에 적용할 수 없다. 또한 Takagi<sup>2)</sup>는 문턱전압 부근에서의 전자이동도 감소량이 채널 불순물농도와 반비례하므로 채널 불순물에 의한 쿨롱산란의 영향임을 보였다. 따라서 새 모델은 산화막전하에 의한 산란대신 채널 불순물농도에 따른 차폐 쿨롱산란을 고려하여 문턱전압 부근에서 전자이동도가 만능곡선보다 급격히 감소하는 현상을 설명하였다. 최근에 발표된 모델들은<sup>8,9)</sup> 불순물에 의한 차폐 쿨롱산란을 고려하지 않았으므로 Takagi의 논문<sup>2)</sup>에서 보인 바와 같은 불순물농도에 따른 전자이동도 감소량 변화를 설명할 수 없다.

반전층에서의 차폐 쿨롱산란은 높은 전자농도때문에 전리된 불순물(ionized impurity)로부터 캐리어가 차폐되는 정도가 높으므로 벌크 실리콘에서의 경우와 다르게 모델하여야 한다. 이러한 것을 고려하기 위하여 새 모델에서는 Brooks-Herring의<sup>18)</sup> 차폐 쿨롱산란 식을 사용하였다.

$$\mu_c = \frac{128\sqrt{2\pi} \epsilon_{si} (kT)^{1.5}}{q^3 \sqrt{m^*} N_a \left[ \ln(1 + \gamma_{BH}^2) - \frac{\gamma_{BH}^2}{1 + \gamma_{BH}^2} \right]} \quad (18)$$

$$\gamma_{BH} = 4\pi \frac{L_D}{h} \sqrt{6m^* kT} \quad L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_{si} kT}{q^2 n}} \quad (19)$$

위의 식에서 T,  $N_a$  그리고 n을 독립변수로 가정하면 식 (15), (16)과 같이 단순화 할 수 있다. 여기서 상수  $K_c$ 와  $K_Y$ 를 전자이동도의 측정값에 대하여 최적화하여  $K_c = 5 \times 10^{19} (\text{cm}^2 \text{Vs})^{-1}$ 와  $K_Y = 3 \times 10^{17} (\text{cm}^3)$ 를 구하였다.

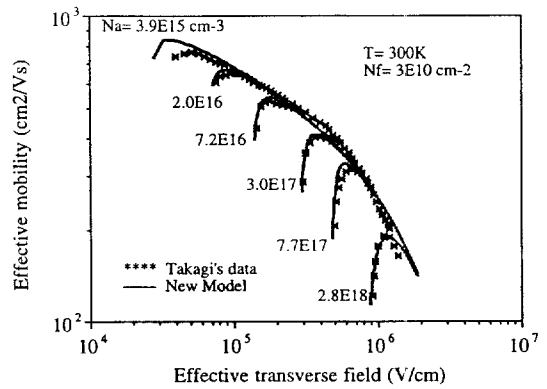


그림 4. 새 모델과 측정값<sup>2)</sup>의 비교.

Fig. 4. Comparison of calculated (new semi-empirical equation) vs. measured<sup>2)</sup>  $\mu_{i,eff}$  vs.  $E_{i,eff}$  for several channel doping levels.

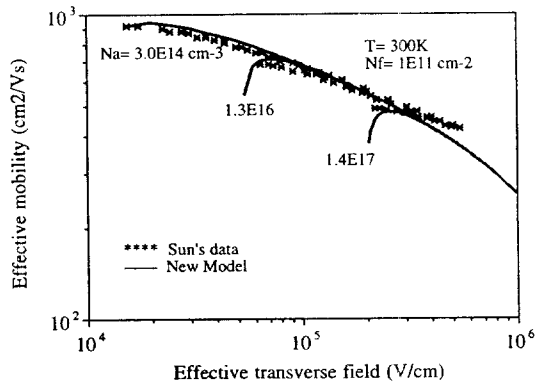


그림 5. 새 모델과 측정값<sup>13)</sup>의 비교.

Fig. 5. Comparison of calculated (new semi-empirical equation) vs. measured<sup>13)</sup>  $\mu_{i,eff}$  vs.  $E_{i,eff}$  for several channel doping levels.

### 3. 측정값과 모델의 비교

앞에서 설명한 바와 같이 새 모델은 수직전계, 불순물농도 그리고 온도에 의존성을 갖고 있으므로 이러한 의존성의 타당성을 검증하기 위하여 기존에 발표된 다양한 전하이동도 측정값과 모델을 비교하였다. Takagi의<sup>2)</sup> 측정값이 상온에서 넓은 영역의 채널 불순물농도와 수직전계에 대한 가장 다양한 측정값이므로 상온에서 수직전계에 대한 의존도를 검증하기 위하여 모델과 비교하였다. 그림 4에서 보인 바와 같이 새 모델은 넓은 영역의 실효 수직전계에서 ( $E_{\perp,eff} = 3 \times 10^4 - 2 \times 10^6$  V/cm) 측정값과 우수한 일치도를 보인다. 특히 넓은 채널 불순물농도영역에서 ( $N_a = 3.9 \times 10^{15} - 2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 새 모델이 문턱전압 부근에서의 전하이동도 감소를 잘 설명하고 있다. 이러한 결과를 토대로 문턱전압 부근의 낮은 전계에서의 전하이동도 감소가 쿨롱산란의 영향임을 다시 알 수 있다. 또한 표면요철에 의한 산란이 가장 큰 영역인 높은 수직전계( $E_{\perp,eff} \geq 5 \times 10^5$  V/cm) 영역에서 새로운 모델이 측정값과 일치한다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 새 모델이 Sun<sup>4)</sup>의 전하이동도 측정값과도 잘 일치함을 알 수 있다.

Sabnis의 측정값은 298K에서 413K까지의 온도 변화에 따른 전하이동도 변화를 포함하고 있으므로 이 측정값을 이용하여 새 모델의 온도 의존성을 검증하였다.(그림6) 앞에서 설명한 바와 같이 Fuchs상수 p의 온도의존성을 최적화하여 Schwarz의 모델에 비하여 새 모델이 측정값과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 그림 6은 온도가 증가함에 따라 표면요철에 의한 산란이 좀더 높은 수직 전계 영역으로 이동함을 보이고 있는데 이는 온도가 증가 할수록 포논산란의 영향이 증가하기 때문이다. 앞에서 설명한 바와 같이 새 모델은 산화막전하의 영향을 무시하였음에도 불구하고 다양한 산화막전하량( $N_f = 2 \times 10^{10} - 1 \times 10^{11}$ )을 갖는 MOS소자에서 측정된 전하이동도 값과 잘 일치함을 (그림4-6) 알 수 있다.

모든 실험값과 모델의 비교는 표 1에 보인 바와 같이 동일한 fitting 파라미터를 사용하였다. 새 모델과 비교한 채널 농도 영역이 deep-submicron 소자에서 사용되는 채널 농도를 포함하고 있으므로 1G DRAM급 소자에도 적용이 가능하다. 그러나 온도 의존성은 그림 6에서와 같이 상온 이상에서만 검증되었으므로 Cryogenic 온도에서 사용되는 소자에는 적용될 수 없으며 이를 위해서는 온도 의존성에 대한 최적화가 필요하다.

### 4. 결론

MOS소자 반전층에서의 실효 전하이동도에 대

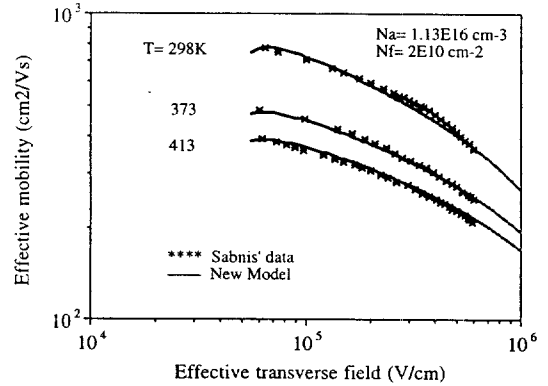


그림 6. 온도에 따른 새 모델과 측정값<sup>14)</sup>의 비교.

Fig. 6. Comparison of calculated (new semi-empirical equation) vs. measured<sup>14)</sup>  $\mu_{eff}$  vs.  $E_{\perp,eff}$  at several temperatures.

표 1. 추출된 fitting 파라미터

Table 1. The Extracted Value of Fitting Parameters.

$K_{ij}$	$K_T$	$K_{qm}$	$K_{sr}$	$K_c$	$K_f$
1150	-2.5	$1.73 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{19}$	$3 \times 10^{17}$

한 새로운 모델을 제시하였다. 새로운 모델은 넓은 영역의 실효 수직전계, 채널 불순물농도, 산화막전하 그리고 온도등의 변화영역에서 측정값과 일치하였다. 특히 새 모델에서는 채널 불순물농도에 의한 차폐 쿨롱산란과 표면요철에 의한 산란이 고려되어, 넓은 영역의 실효 수직전계 ( $E_{\perp,eff} = 3 \times 10^4 - 2 \times 10^6$  V/cm) 및 채널 불순물농도변화 ( $N_a = 3.0 \times 10^{14} - 2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )에 따른 전하이동도의 변화를 정확하게 설명한다. 이것은 높은 수직전계와 채널 불순물농도를 갖고 있는 submicron MOS소자의 정확한 시뮬레이션을 위하여 매우 중요한 결과이다.

### 참고 문헌

1. S.A.Schwarz and S.E.Russeck, "Semi-Empirical Equations for Electron Velocity in Silicon : Part II - MOS Inversion Layers," IEEE Trans. Elect. Dev., Vol.30, No.12, pp.1634-1639, 1983.
2. S.Takagi, A.Toriumi, M.Iwase, and H.Tango, "On the Universality of Inversion Layer Mobility in Si MOSFET's :Part I - Effects of substrate Impurity Concentration," IEEE Trans. Elect. Dev., Vol.41, No.12,

- pp.2357-2362, 1994.
3. D.K.Ferry, "Effects of Surface Roughness in Inversion Layer Transport," 1984 IEEE IEDM Technical Digest, pp.605-608, 1984.
  4. A.Hartstein, A.B.Fowler, and M.Albert, "Temperature Dependence of Scattering in the Inversion Layer," Surface Science, Vol.98, No.1, pp.181-190, 1980.
  5. B.T.Moore and D.K.Ferry, "Scattering of Inversion Layer Electrons by Oxide Polar Mode Generated Interface Phonons", J.Vac. Sci.Technol., Vol.17, No.5, pp.1037-1040, 1980.
  6. J.R.Brews, "Carrier-Density Fluctuations and the IGFET Mobility near Threshold," J. Appl.Phys., Vol.46, No.5, pp.2193-2203, 1975.
  7. J.A.Wikstrom and C.R.Viswanathan, "Lateral Non-uniformities and the MOSFET Mobility Step Near Threshold," IEEE Trans. Elect. Dev., Vol.35, No.12, pp.2378-2383, 1988.
  8. C.Lombardi, S.Manzini, A.Saporito, and M. Vanzi, "A Physically Based Mobility Model for Numerical Simulation of Nonplanar Devices," IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol.7, No.11, pp.1164-1171, 1988.
  9. D.S.Jeon and D.E.Burk, "MOSFET Electron Inversion Layer Mobilities - A Physically Based Semi-Empirical Model for a Wide Temperature Range," IEEE Trans. Elect. Dev., Vol.36, No.8, pp.1456-1463, 1989.
  10. R.F.Greene, "Surface Electron Transport," CRC Crit. Rev. Sol. St.Sci., Vol.25, No.5, pp.477-497, 1974.
  11. R.F.Greene, "Surface Transport," Surface Science, Vol.2, pp.101-113, 1964.
  12. F.Stern, "Self-Consistent Results for n-Type Si Inversion Layers," Phys. Rev. B, Vol.5, No.12, pp.4891-4899, 1972.
  13. S.C.Sun and J.D.Plummer, "Electron Mobility in Inversion and Accumulation Layers on Thermally Oxidized Silicon Surfaces," IEEE Trans. Elect. Dev., Vol.27, No.3, pp.1497-1508, 1980.
  14. A.G.Sabnis and J.T.Clemens, "Characterization of the Electron Mobility in the Inverted <100> Si Surfaces," 1979 IEEE IEDM Technical Digest, pp.18-21, 1979.
  15. C.Jacoboni, C.Canali, G.Ottaviani, and A. Alberigi Quaranta, "A Review of Some Charge Transport Properties of Silicon," Solid-State Electronics, Vol.20, No.1, pp.77-89, 1977.
  16. G.W.Ludwig and R.L.Watters, "Drift and Conductivity Mobility in Silicon," Phys. Rev., Vol.101, No.6, pp.1699-1701, 1956.
  17. M.Ali Omar and L.Reggiani, "Drift and Diffusion of Charge Carriers in Silicon and their Empirical Relation to the Electric Field," Solid-State Electronics, Vol.30, No.7, pp.693-697, 1987.
  18. M.Lundstrom, Fundamentals of Carrier Transport, New York: Addison-Wesley, 1990.

**저자소개**



**신형순**

1959년 10월 18일생. 1982년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1984년 미국 University of Texas at Austin 석사. 1990년 미국 University of Texas at Austin 박사. 1990년-1994년 LG 반도체 부장. 현재 이화여자대학교 전자공학과 조교수.