

# 핫 캐리어에 의한 피-모스 트랜지스터의 채널에서 이동도의 열화 특성

논문  
11-1-5

## Degradation Characteristics of Mobility in Channel of P-MOSFET's by Hot Carriers

이용재\*  
(Yong-Jae Lee)

### Abstract

We have studied how the characteristics degradation between effective mobility and field effect mobility of gate channel in p-MOSFET's affects the gate channel length being follow by increased stress time and increased drain-source voltage stress. The experimental results between effective and field-effect mobility were analyzed that the measurement data are identical at the point of minimum slope in threshold voltage, the other part is different, that is, the effective mobility is the faster than the field-effect mobility. Also, It was found that the effective and field-effect mobility of p-MOSFET's with short channel are increased by decreased channel length, increased stress time and increased drain-source voltage stress.

**Key Words(중요용어)** : characteristics degradation(특성 열화), effective mobility(유효 이동도), field-effect mobility(전계효과 이동도), short channel(단채널), p-MOSFET's( 피-모스 트랜지스터)

### 1. 서 론

고집적, 고속, 저전력 소비의 초고집적도를 갖는 소자의 요구는 개별 소자의 크기가 좁아지는 추세로써 자연히 모스 트랜지스터의 게이트 채널 길이 더욱 짧아지면서, 얇은 게이트 산화막의 소자가 요구되며, 속도에 관계되는 채널의 이동도의 신뢰성 분석이 필수적이다.<sup>1)</sup> 게이트 채널 길이가 1 마이크로 이하의 서브-마이크론 모스 트랜지스터의 동작은 게이트 전장으로 반전층의 유기와 협-채널에 의해 생기는 전장에 의한 동작과 또 드레인 전압으로 소오스에서 드레인 까지 캐리어를 이동하게 하는 전위에 의한 전장이다.<sup>2)</sup> 이 전장은 소자에서 채널의 길이가 일 마이크로 이하의 소자에서는 게이트 산화막의 두께와 산화막의 양질에 따라서 모스 트랜지스터의 전기적 특성을 크게 변화 시킨다.<sup>3)</sup> 이 원인은 게이트

소자에 다양한 스트레스를 인가할 때 산화막 속으로 핫 캐리어가 포획과 이미 포획된 캐리어가 탈출되는 특성을 나타낸다.<sup>4)</sup> 따라서 모스 트랜지스터의 게이트 산화막 내에 포획된 핫 캐리어 주입량의 정도와 산화막 생성시에 계면상태 밀도에 따라 소자의 전기적 특성이 변화되는 현상이 일어날 수 있으며, 모스 소자의 게이트 채널에서 캐리어의 이동도에 영향도 미치게 된다.<sup>5)</sup>

본 연구는 초박막 게이트 산화막의 실리콘 피-모스 트랜지스터에서 게이트 채널 폭/길이(W/L)의 변화가 각각 15/1.8 $\mu$ m, 15/1.5 $\mu$ m, 15/1.2 $\mu$ m와 15/0.9 $\mu$ m인 소자를 제작한다. 각 소자에서 소오스-드레인 사이에 높은 인가 전압과 인가 시간에 따른 스트레스의 영향이 모스 트랜지스터의 게이트 채널에서 유효 이동도와 전계효과 이동도의 특성에 미치는 전기적 현상 변화와 짧은 채널 길이 변화에 대한 스트레스 영향과 이에 따른 이동도를 측정 한다. 인가 스트레스의 방법은 소자에서 최대 누설 게이트 전류를 측정하여 이 전류에서의 전압을 소자의 게이트에 각각 인가 하면서, 소오스-드레인 전압을 일정 시간

\* : 동의대학교 전자공학과  
연락처:부산시 진구 가야동 산24  
접수일자 : 1997년 7월 14일  
심사완료 : 1997년 12월 10일

마다 점진적으로 증가시킨다. 따라서 각각의 모스 트랜지스터에 대해 스트레스 인가 전과 후의 전기적 특성과 유효 이동도( $\mu_{eff}$ )와 전계효과 이동도( $\mu_{FE}$ )의 열화 관계를 분석하고자 한다.

2. 열화 메카니즘

소자에서 속도에 관련되고 시간적인 경년 변화인 모스 트랜지스터의 이동도 특성 측정을 고려한 게이트-소오스 전압과 드레인-소오스 전압에 관련된 드레인 전류에서 어떤 측정 전압의 의존 여부에 따라 전계효과 이동도(Field-Effect Mobility,  $\mu_{FE}$ )와 유효 이동도(Effective Mobility,  $\mu_{eff}$ )를 정의할 수 있다.<sup>2,4)</sup>

스트레스에 의한 핫-캐리어가 게이트 산화막 속으로 포획될 수 있는 모델 설명은 핫-캐리어가 드레인 눈사태 핫-캐리어(DAHC)와 채널 핫-전자이다. 그러나 드레인 전압이 게이트 전압 보다 클때 ( $|V_d| > |V_g|$ )는 드레인 근처에서 격자와 충돌하여 이온화된 전자와 정공이 산화막내에 포획된다. 이 드레인 눈사태 핫-캐리어로 인한 특성 변화를 가져오며, 그림 1은 이 모델<sup>[3,4]</sup>의 설명이다. DAHC 형성은 게이트 인가 전압에 의해 게이트 채널을 형성 시키고, 소오스 전압을 0V의 접지 상태에서 드레인 전압을 변화

시킬때, 소오스에서 드레인으로 캐리어가 이동되면서 드레인 영역 근처에서는 캐리어가 더욱 가속되어, 이 힘에 의한 전자-정공쌍을 발생 시키고, 가속으로 인한 일부 캐리어가 게이트 산화막 속으로 전자와 정공이 포획되며, 일부는 산화막 속에서 이탈이 일어난다.

피-모스 트랜지스터인 경우 주된 핫-캐리어는 역바이어스에 의한 기판과 드레인 근처에서 소오스 보다 전위차에 의한 넓은 공핍층이 발생되고, 드레인 전류 형성 성분인 정공은 채널내에서 이동중 드레인 부근에서 높은 전장으로 인한 전자-정공 쌍을 형성 된다.<sup>5)</sup>

정공의 산화막 내의 주입은 높은 산화막 장벽 에너지와 정공의 짧은 평균자유행정 때문에 산화막 속으로 주입되는 양이 적겠지만, 전자는 긴 평균 자유행정으로 산화막 속으로 많은양의 포획과 또 큰 에너지를 가진 일부 전자는 게이트 산화막을 터널링하는 성분이 게이트 전류를 형성한다. 이 포획된 많은 양의 전자는 음전하로써 채널에 양전하를 유지시켜 결국 피-모스 트랜지스터에서 채널 길이를 짧게하는 효과를 나타내며, 이로인해 드레인 전류가 많아지며, 이동도의 특성 변화를 가져오며, 이것의 설명이 그림1로써 소자의 단채널 효과<sup>1,5)</sup>가 일어난다.

동일 소자에서 캐리어 포획으로 인한 이동도의 특성 변화는 크게 두가지로 전계효과 이동도와 유효 이동도로 구분할 수 있는데, 공통 인자는 소자의 게이트 채널 폭/길이, 드레인-소오스 전압과 드레인 전류이고, 차이 인자는 게이트 산화막의 단위 두께당 커패시턴스값과 최대 전달 컨덕턴스값으로 추출 이론적인 식(3,5)<sup>3,5)</sup>에 의해서 파라미터 분석기에서 직접적으로 전계효과 이동도를 측정할 수 있다. 소자에서 드레인 전류는 소오스로 부터 주입된 전자가 모두 드레인으로 추출되기 때문에 다음식(1)과 같다.

$$I_d = W \cdot Q_i \cdot \mu_{FE} \cdot E = W \cdot C_{ox} (V_{gs} - V_{th}) \cdot \mu_{FE} \cdot E \dots \dots (1)$$

이고, 수평 전장에 대하여 최종적인 드레인 전류는 식(2)이다.

$$I_d = \frac{W}{L} \cdot \mu_{FE} \cdot C_{ox} \cdot [(V_{gs} - V_{th}) V_{ds} - \frac{1}{2} \cdot V_{ds}^2] \dots \dots (2)$$

소자의 전기적 특성에서 선형영역의 전류-전압 특성

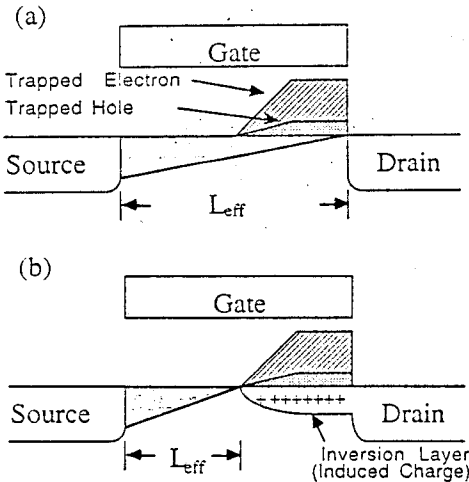


그림 1. 피-모오스 트랜지스터의 핫 캐리어 유기 열화 모델. (a)스트레스 인가전 (b)스트레스 인가후

Fig. 1. Induced degradation model of hot carrier for p-MOSFET's. (a) Before stress (b) After stress

에서 전달 컨덕턴스에 관련된 전계 효과 이동도 표현은 식(3,4)이다.

$$\mu_{FE} = \frac{L}{C_{ox} \cdot V_{ds}} \cdot G_m \quad \dots \dots \dots (3)$$

전계효과 이동도는 정의된 식(3)에서 게이트 채널 길이/폭의 비가 전달컨덕턴스와 함께 직접 비교하는 인자이며, 최대 전달컨덕턴스는 소자에서 직접 측정 가능한 파라미터이기 때문에 결국 전계효과 이동도도 직접 추출 가능하다.

유효 이동도는 드레인 전압에 의한 채널 컨덕턴스의 정의값<sup>[1,2,3]</sup>과 관련된 인자이며, 드레인 전류 측정 방법으로 유도한 다음식으로 유효 이동도를 전계 효과 이동도와 같이 직접적으로 추출할 수 있으며, 드레인 전류를 채널 컨덕턴스에 대입 정리하면 유효 이동도 식(5)로 추출 된다.

$$G_d \equiv \frac{dI_d}{dV_{ds}} = \frac{W}{L} \cdot \mu_{eff} \cdot C_{ox} \cdot V_{ds} \quad \dots \dots (4)$$

$$\mu_{eff} = \frac{1}{\frac{W}{L} \cdot V_{ds} \cdot C_{ox}} \cdot \frac{dI_d}{dV_{ds}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

여기에서,  $I_d$ 는 드레인 전류,  $W$ 과  $L$ 은 게이트 채널의 폭과 길이,  $V_{ds}$ 은 드레인-소오스 전압,  $C_{ox}$ 는 단위 면적당 게이트 산화막 커패시턴스값과  $V_{gs}$ 는 게이트-소오스 전압이며, 이러한 소자의 변수 파라미터는 소자에서 직접적인 이동도 측정으로 스트레스의 인가 전과 후 영향을 비교 할 수 있다.<sup>3,4)</sup>

3. 실험

피-모스 트랜지스터 제작은 기판(100) P-형, 비저항 1-2 Ω-cm인 실리콘 웨이퍼이며, 초고집적 회로 공정을 위한 주요 공정은 상보 모스 트랜지스터를 위해 쌍둥이 무물 기술과 n<sup>+</sup> 다결정 전극 형성 공정을 이용한 게이트 전극을 제작 하였으며, 게이트 산화막은 활성 영역 정의 후 초박막 산화막층(100Å 이하)을 형성하며, 급속 열처리 공정 장치에 의해 건식 산소 분위기 속에서 성장시켰다. 소자간의 격리 공정은 진보된 트렌치 산화막 격리 공정이다. 완성한 모스 트랜지스터의 동작 형태는 증가형 동작 모드의 소자이며, 또 소자의 게이트 채널 폭/길이가 각각 15/1.8μm, 15/1.5μm, 15/1.2μm와 15/0.9μm로 변화시킨 소자를 제작하였다.

이동도에 대한 특성 측정을 위하여 각각의 소자에 대하여 각각의 게이트 채널 길이 변화에 대해서 스트레스 인가 전의 상태에서 전기적 특성과 이동도를 측정 하였으며, 이를 다시 스트레스를 일정 시간과 전압을 변화 시킨 조건에서 인가한 후 스트레스 인가전과 동일한 측정방법으로 전기적 특성과 이동도를 측정 하였다. 동작 스트레스 인가 조건은 피-모스 트랜지스터의 게이트 전압 변화에 대한 게이트 전류 특성을 측정하여서 게이트 전류가 최대점인 최대 게이트 전압 ( $V_g = -1.9V$ )을 측정한 스트레스 전압을 게이트에 인가하였는데, 이는 각 소자가 가장 많은 스트레스를 받는 조건이기 때문이다.<sup>4,5)</sup>

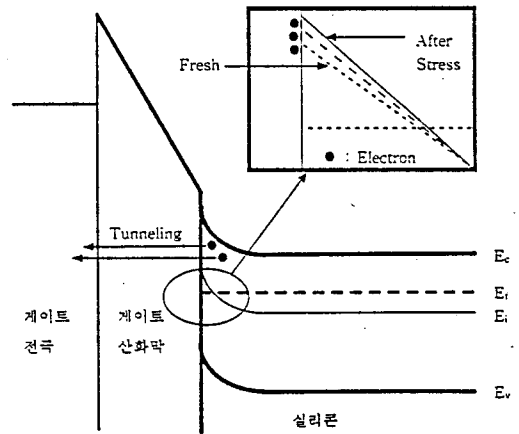


그림 2. F-N 전류 형성의 에너지 밴드  
Fig. 2. Energy band of F-N current formation

따라서 게이트 전류 형성 메카니즘은 F-N (Fowler Norheim) 터널링에 의한 전류 성분이며, 게이트와 기판 사이에 큰 전위차의 모스(MOS) 구조의 에너지 밴드 설명이 그림 2이며, 이때 포획 캐리어의 양에 따라서 유기되는 양전하에 의해 피-모스 소자의 경우는 채널길이 짧아지며, 전도 메카니즘은 기판의 표면 가까이 있는 전하가 삼각형 모양의 전위 장벽을 터널링하며, 전자에 의한 전류 밀도는 WKB 근사 방법<sup>6)</sup>으로 구할 수 있으며, 이런 F-N 터널링 전류 밀도는 산화막 내부에서는 전하 포획과 실리콘과 산화막 계면에서 트랩들의 발생을 야기 시키며, 이로 인해 소자에서 전기적 특성과 이동도의 변화를 유발 시킨다. 이때 전하의 포획이 산화막 내에 생성되면 내부 전장의 변화가 야기되어 트랩의 밀도에 관련된 F-N 터널링 전류량의 변화가 나타나 는 유도 전류의 결과가 식 (6)이다.

$$J_{FN} = J_0 \exp[-B \cdot \beta \cdot N_T^-(t)/E^2] \dots \dots \dots (6)$$

이러한 전류형성은 산화막 계면 트랩의 밀도에 크게 의존하는 조건으로 스트레스는 인가 시간과 게이트 전압을 일정하게 고정하고, 드레인-소오스 전압을 각각 -5V에서 -2V 간격으로 점진적인 증가 상태로 -19V까지 증가시키면서 각 드레인-소오스 전압 스트레스에 대하여 순차적 증가 방법으로 각 전압마다 100초 동안 누진하여 인가하였다. 각 조건의 채널 폭/길이가 변화된 소자에 각각 스트레스 인가 전·후에 소자의 유효 이동도와 전계효과 이동도를 구분하여 측정하였다.

**4. 측정 결과 및 고찰**

피-모스 트랜지스터에서 전압 스트레스에 의한 채널 반전층 위의 게이트 산화막 속으로 핫 캐리어들의 포획으로 채널의 유기 전하 영향으로 나타날 특성 변화는 게이트 전압과 드레인 전류 변화와 채널 길이의 변화 즉 짧은 채널 효과가 발생되며<sup>3,4)</sup> 이러한 효과는 이동도의 열화 특성을 초래할 수 있다.

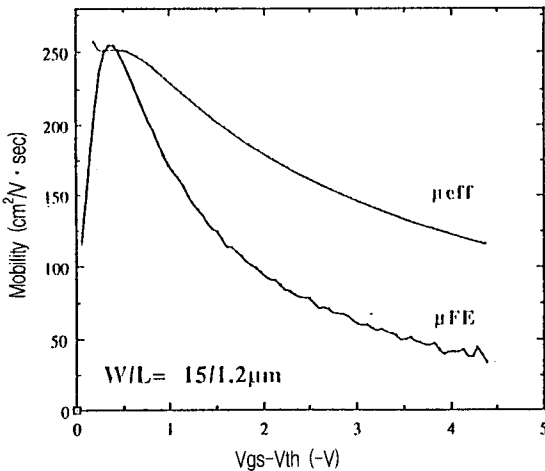


그림 3. 유효 이동도와 전계효과 이동도 사이의 이동도 대  $V_{gs}-V_{th}$  관련성.

Fig. 3. Relationship between Effective Mobility and Field-Effect Mobility vs.  $V_{gs}-V_{th}$ .

그림 3은 동일 조건에서 유효 이동도와 전계효과 이동도를 측정하여 비교한 결과이며, 두 이동도는 게이트 전압 의존성을 나타내며, 최대 이동도는 거의 일치하는 특성을 보인다. 그러나 이동도는 게이트

트 전압이 증가할수록 전계효과 이동도가 유효 이동도 보다 낮은 이동도를 차이가 나는데, 이는 선형영역의 드레인 전류와 게이트-소오스 전압 특성에서 일정한 게이트 전압이 인가 되었을때는 특정구간에서 전계효과 이동도와 유효 이동도의 기울기 차이에 의한 발생<sup>2,4)</sup> 원인이다. 게이트 전압의 변화에 따라 두 이동도의 특성은 낮은 게이트 전압에서 증가하고 높은 게이트 전압에서는 감소하고 있는데, 이를 세 영역으로 나눌어 분석할 수 있다. 첫번째는 낮은 게이트 전압 인가로 낮은 게이트 전압의 채널 형성은 계면에 인접한 부분에 약한 반전층을 형성하는데, 이층은 정공의 낮은 밀도와 작은 운동에너지로 계면 상태에 의해 산란이 작용하여 이동도가 느려진다. 두번째는 게이트 전압이 어느 정도 높아지면 반전층 내의 정공수가 증가하고, 계면상태에 대한 불순물은 줄어들면서 이동도가 빨라진다. 세번째는 게이트 전압이 더욱 강하게 증가 시키면, 게이트 전압에 의한 수직 전장의 증가로써 이 전장의 영향으로 채널의 정공 이동도를 감소<sup>6)</sup>시킨다.

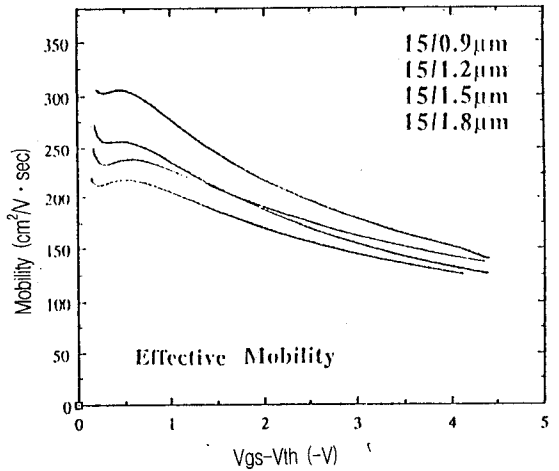


그림 4. 유효 이동도 대 게이트 소오스 전압 ( $V_{gs}-V_{th}$ )

Fig. 4. Effective Mobility vs. Gate source Voltage ( $V_{gs}-V_{th}$ )

소자의 게이트 채널 길이 변화에 따른 유효 이동도의 측정값의 결과가 그림 4이며, 스트레스 인가전에 소자의 채널 길이가 짧아질수록 최대 유효 이동도의 크기는 증가하였으며, 게이트 채널 길이가 15/0.9μm인 경우 유효 이동도가 318( $cm^2/V \cdot sec$ )이고 긴 채널 길이 15/1.8μm인 경우 223( $cm^2/V \cdot sec$ )으로

크게 차이가 난 측정 결과이다. 이런 결과 분석은 짧은 게이트 채널의 길이의 소자가 전기적 특성 파라미터 값의 변화 야기로 채널길이의 감소에 따라 임계전압은 감소하고, 최대 전달 컨덕턴스와 드레인 전류가 증가되는 결과로써, 정공의 유효 이동도는 채널의 길이의 감소에 따라 증가하는 결과는 이론식(3,4)과도 잘 일치된다.

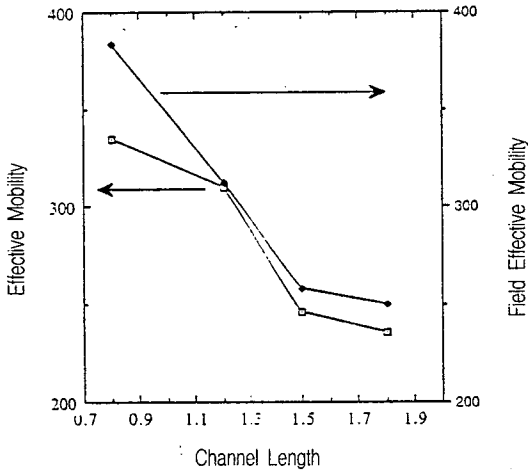


그림 5. 게이트 채널길이에 따른 유효 이동도 특성  
Fig. 5. Characteristics of Effective Mobility along Gate Channel length.

그림5는 게이트의 채널 길이 변화에 대한 스트레스 인가 전의 최대 유효 이동도와 최대 전계효과 이동도를 측정된 결과로써, 이동도는 채널 길이의 감소에 대해 역으로 증가 되었다. 이는 이동도의 측정 값이 채널 길이가 짧아짐에 따라서 정공이 드레인 부근에서 짧아진 채널 길이 만큼 정공 이동시 채널에서의 산란이 감소되는 영향과 추후 일정한 게이트 채널 길이/폭의 소자에서 스트레스로 인한 게이트 산화막 내의 캐리어의 포획으로 유효 채널 길이가 짧아지는 원인으로 이동도가 증가될 수 있을 결과가 예상되는 측정 데이터이다.

그림 6 a)는 채널 길이가 15/1.8 $\mu$ m b)는 15/1.5 $\mu$ m일 때 이동도가 게이트 소오스 전압에 임계 전압을 공제한( $V_{gs}-V_{th}$ ) 전압에 대한 스트레스 전과 후( $V_{ds} = -17V$ , 스트레스 시간 2000초 동안)의 유효 이동도와 전계효과 이동도의 변화를 측정된 결과로써, a)는 스트레스 인가 후의 전계효과 이동도가 증가되었으며, b)에서 유효 이동도는 스트레스 인가후는 최대 이동도도 증가되었다.

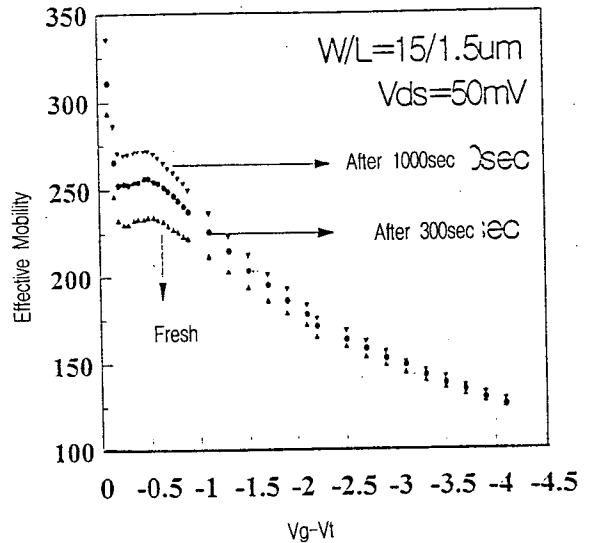
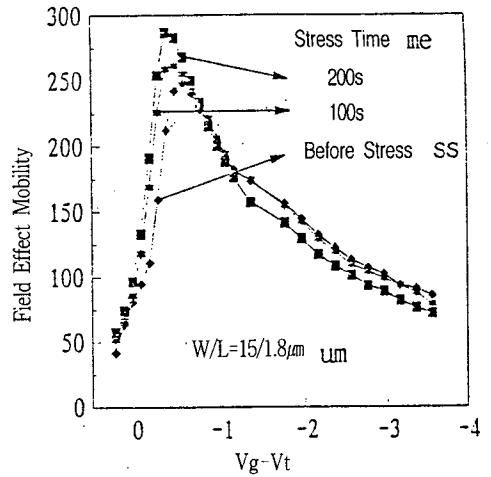


그림 6. 스트레스 시간에 따른 a) 전계 효과 이동도 대  $V_{gs}-V_t$  b) 유효 이동도 대  $V_{gs}-V_t$   
Fig. 6. a) Field-Effect Mobility vs.  $V_{gs}-V_t$   
b) Effective Mobility vs.  $V_{gs}-V_t$  with Stress Time

스트레스에 대한 이동도의 증가된 변화는 스트레스가 산화막내의 전하 포획으로 인한 유효 채널의 변화를 가져올 수 있는 설명이 가능하다. 이 원인 분석은 채널 길이 변화에 대한 이론식과 실험적인 측정 결과와 일치하며, 소자에서 채널 길이의 감소에 따라 이동도가 빨라지는 특성을 나타낸다. 또한 스트레스에 의한 이동도의 열화 특성을 예상할 수 있는데, 스트레스로 인한 게이트 산화막내 전자 포

획으로 게이트 채널에 양전하의 유기로 인한 채널 길이의 변화에 따른 게이트 전압 변화, 수직 전계 변화, 드레인 근처에서의 수평전계 변화등의 결과로서 채널 길이가 짧아지면서, 이로 인한 소자의 파라미터의 변화를 가져와 이동도를 증가시킨 결과이다.

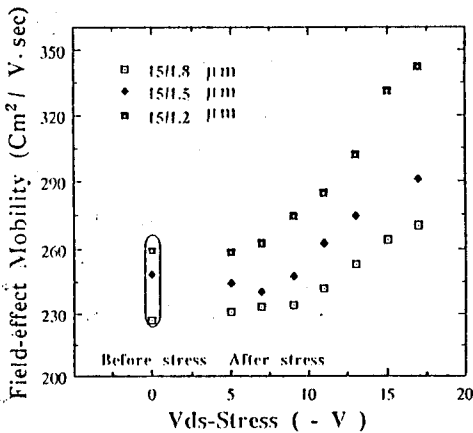
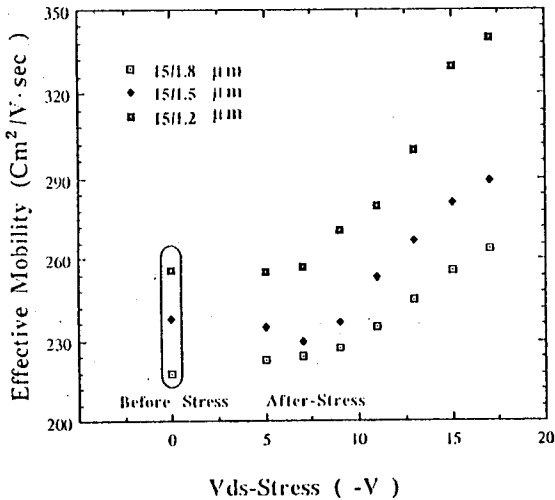


그림 7. 채널 길이에 따른 소오스-드레인 전압 스트레스에 의한 특성 a) 유효 이동도 b) 전계효과 이동도

Fig. 7. Characteristics of Source-drain Voltage Stress with Channel length, a) Effective Mobility, b) Field-Effect Mobility

그림7은 소오스-드레인 전압 스트레스 인가 전·후의 a) 유효 이동도와 b) 전계효과 이동도의 측정 결과이며, 스트레스 인가 전의 이동도는 게이트 채널

길이의 증가 소자는 반비례적인 특성으로 빨라지며, 스트레스 인가 후의 동일 조건의 각 소자는 드레인-소오스 전압 증가 스트레스에 대한 인가후의 두 이동도는 모두 증가 되었으며, 유효 이동도와 전계효과 이동도의 최대 이동도의 특성 결과는 거의 일치 하였다.

이동도 열화 원인은 스트레스 인가로서 게이트 채널 길이가 짧아지는 효과와 동일한 측정된 전기적 파라미터 변화가 열화 특성이 측정 되었으며, 이동도에 연관된 채널 길이, 임계전압, 전달 컨덕턴스, 채널 컨덕턴스와 드레인 전류 등의 파라미터 변화의 열화 특성으로써, 이는 스트레스 인가에 의한 유효 게이트 채널 길이가 짧아지는 채널 효과와 동일 하기 때문에 그 짧아지는 만큼의 이동도는 빨라지는 측정 결과와 이론적인 예측 결과와 잘 일치함을 보였다.

### 3. 결론

동일한 게이트 채널의 폭과 다양한 채널 길이의 피-모스 트랜지스터를 채널 증가형 소자로 제작하였으며, 게이트 전극은 n+ 다결정 실리콘이다. 스트레스 인가 조건은 측정된 최대 게이트 전류에서의 전압을 소자의 게이트에 인가한 상태에서, 드레인과 소오스 간의 전압을 누진적으로 증가시켰다.

각각의 스트레스 시간과 정압에 따라 정공의 유효 이동도와 전계 효과 이동도를 스트레스 전과 후에 측정 분석하였다. 소자에서 각 채널 길이에 대하여 유효 이동도와 전계효과 이동도의 측정 결과는 설계상의 짧은 채널 길이의 소자가 유효 이동도와 전계효과 이동도는 긴 게이트 채널 길이 보다 증가함은 이미 설정한 모델의 설명과도 일치한다. 스트레스 인가 영향은 동일한 채널 길이/폭의 소자에서 스트레스 시간의 증가와 게이트-소오스 간의 전압 증가에 따른 인가후의 정공의 각 이동도는 빨라진 측정이 추출 되었다.

이결과의 분석은 게이트-소오스 전압 인가 스트레스는 핫 캐리어 효과의 발생으로 게이트 산화막 속의 포획 전자로 게이트 채널에 유기 양전하 때문에 감소된 유효 채널 길이 때문이다. 이로 인해 최대 전달 컨덕턴스 증가, 드레인 전류 증가등의 전기적 특성결과를 가져오며, 피-모스 트랜지스터의 스트레스 인가후 짧아지는 유효 채널 길이 효과 때문에 정공의 전계효과와 유효 이동도는 빨라지는 결과가 분석 되었다.

감사의 글

본 연구는 동의대학교 '96 대학자체 학술연구조성비(자유공모)로 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. M. D. Jacuncki, M. Hack et al "Threshold Voltage, Field Effect Mobility, and Gate-to-Channel Capacitance in Polysilicon TFT's", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-43, No. 9, pp. 1433-1439, Sep. 1996
2. G. Reichert, T. Ouisse " Relationship Between Empirical and Theoretical Mobility Model in Silicon Inversion Layers" IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 43, No. 9, pp. 1394-1397, Sep. 1996
3. J. Welser, et. al "Electron Mobility Enhancement in Strained-SiN-Type Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors" IEEE Electron Device Lett., Vol.15, No.3, pp.100-102, March 1994
4. F. Matsuoka, et al. "Analysis of Hot-Carrier-Induced Degradation Mode on pMOSFET" IEEE Trans. on Electron Devices Vol.37, No.6, pp. 1487-141495, Junel. 1990
5. M. Lenzlinger, E. H. Snow "Fowler-Nordheim Tunneling into Thermally Grown SiO<sub>2</sub>" J. Appl. Phy., Vol.40, No.1, pp.278-283, Jan 1996