

자기 정렬된 $\text{Mo}_2\text{N}/\text{Mo}$ 게이트 MOSFET의 제조 및 특성

(Fabrication of Self-Aligned $\text{Mo}_2\text{N}/\text{Mo}$ -Gate MOSFET and Its Characteristics)

金 鎮 燮*, 李 鍾 玄*, 李 德 東*, 李 宇 一*

(Jin Sup Kim, Jong Hyun Lee, Duk Dong Lee and Wu Il Lee)

要 約

RMOS (refractory metal oxide semiconductor)의 게이트 금속으로 사용되는 $\text{Mo}_2\text{N}/\text{Mo}$ 이중층을 N_2 와 Ar을 혼합하여 저온의 반응성 스퍼터링법으로 제조하였다. Ar : N_2 = 95 : 5로 혼합된 가스 분위기에서 반응성 스퍼터링을 할 때 Mo_2N 이 잘 형성되었다. 이렇게 제조한 Mo_2N 박막은 면저항이 약 1.20~1.28 Ω/\square 로서 다결정 실리콘의 1/10정도가 되어 반도체 소자의 동작속도를 크게 향상시킬 것으로 기대된다. 1100°C의 N_2 분위기에서 PSG (phosphorus silicate glass)를 불순물 확산원으로 하여 소오스와 드레인의 불순물 확산을 할 때 Mo_2N 박막이 Mo으로 환원되어 확산전의 면저항보다 훨씬 작은 약 0.38 Ω/\square 정도의 면저항을 나타내었다. 본 실험에서 제작한 자기정렬된 RMOSFET의 문턱전압은 약 -1.5V 이고 결핍과 증가의 두 가지 동작특성을 나타내었다.

Abstract

$\text{Mo}_2\text{N}/\text{Mo}$ double layer which is to be used for the RMOS (refractory metal oxide semiconductor) gate material has been fabricated by means of low temperature reactive sputtering in N_2 and Ar mixture. Good Mo_2N film was obtained in the volumetric mixture of Ar: N_2 =95:5. The sheet resistance of the fabricated Mo_2N film was about 1.20 - 1.28 ohms/square, which is about an order of magnitude lower than that of polysilicon film, and this would enable to improve the operational speed of devices fabricated with this material. When PSG (phosphorus silicate glass) was used as impurity diffusion source for the source and drain of the RMOSFET in the N_2 atmosphere at about 1100 °C, the Mo_2N was reduced to Mo resulting in much smaller sheet resistance of about 0.38 ohm/square. The threshold voltage of the RMOSFET fabricated in our experiment was - 1.5 V, and both depletion and enhancement mode RMOSFETs could be obtained.

I. 序 論

근래에 와서 다결정 실리콘 게이트 MOSFET가 공정의 여러 가지 잇점때문에 집적회로에 널리 사용되고 있다. 그러나 집적 규모가 증가됨에 따라 소자의 크기가 작아져 필연적으로 MOSFET의 게이트 폭과

*正會員, 慶北大學校 工科大學 電子工學科
(Dept. of Electronics Eng., Kyungpook National Univ.)

接受日字: 1984年 7月 6日

소자간의 연결선 폭이 감소하게 된다. MOSFET의 게이트로 사용되는 다결정 실리콘은 20~30Ω/□ 정도의 높은 면저항때문에 소자간의 연결선 폭이나 게이트 폭을 줄이면 선간 저항이 커져서 회로의 RC 시정수가 증가하고 따라서 신호의 전송시간 지연이 증가한다.¹⁾ 이러한 문제를 해결하기 위하여 면저항이 다결정 실리콘의 경우보다 상당히 작은 refractory 금속 또는 refractory 금속 化合物을 게이트로 사용하는 RMOS (refractory metal oxide semiconductor)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{2,3)}

Refractory 금속은 녹는점이 높을 뿐만 아니라 불순물의 이온주입 또는 열화산에 대한 마스크의 역할을하므로 MOSFET의 경우 소오스와 드레인이 게이트 금속에 의해서 자기정렬(self-alignment)이 되는 잇점이 있다.⁴⁾ 이와 같은 자기정렬은 게이트가 소오스와 드레인에 중첩되어 발생하는 기생용량(C_{gs})을 극소화시킬 수 있다.⁵⁾

최근에는 Mo게이트 MOSFET의 경우, Mo의 화학적 안정성을 증가시킬 뿐만 아니라 이온 주입이나 열화산에 대한 마스크 효과도 높이기 위해 게이트를 Mo₂N/Mo의 이중층으로 한다.⁶⁾ M. J. Kim등^{6,7)}은 이窒化 몰리브데늄을 제조하는 방법으로서 증착된 Mo을 고온의 암모니아 분위기에서窒化시키는 열질화(thermal nitridation) 방법을 보고하였다. 본 연구에서는 이러한 열질화 방법을 쓰는 대신 Mo을 증착한 뒤 Mo을 Ar-N₂의 혼합가스로 바로 반응성 스퍼터링을 하는 저온공정에 의한 질화 몰리브데늄을 제조하였다. 이와같은 공정으로 만들어진 Mo₂N/Mo을 게이트로 하는 RMOS를 제작하고 이들 소자의 전기적 특성을 조사하였다.

II. 실험

1. 窒化 몰리브데늄의 형성

질화 몰리브데늄을 제조하기 위해 사용한 기판은 비저항이 1~30Ω·cm이고 결정면이 (100)인 p형 실리콘 단결정 웨이퍼였다. 우선 이 기판을 건식산화시켜 1,000Å의 SiO₂를 성장시키고 이 위에 표 1의 조건으로 Mo을 Ar으로 약 2,000Å정도로 스퍼터링하였다. 다음으로 Ar과 N₂의 혼합 가스를 주입하여 약 1,000Å의 질화몰리브데늄을 형성시켜 질화몰리브데늄/Mo/SiO₂/p-Si의 구조로 만들었다. 이때 Mo₂N의 질화물을 형성시키기 위한 질소의 농도를 1~15% 범위로 변화시켰다. 전력에 따른 Mo의 스퍼터링 속도를 표 2에 나타내었다. 질화 몰리브데늄의 성장 속도는 Å-scope(Varian 980-4000)로 측정된 결과 Mo의 성장 속도와 큰 차이를 볼 수 없었다. 그리고 본 실험에서

표 1. R. F. 스퍼터링 조건
Table 1. R. F. sputtering condition.

	Molybdenum	Molybdenum Nitride
Power	150 Watt	150 Watt
Plate Voltage	3.4 KV	3.4 KV
Plate Current	200-230 mA	200-230 mA
Target Size	4"	4"
Cathode-Anode Spacing	3.8 cm	3.8 cm
Initial Vacuum	6×10 ⁻⁶ torr	6×10 ⁻⁶ torr
Sputtering Atmosphere	Ar:5 SCCM	Ar:10 SCCM N ₂ :0-1.8 SCCM
Sputtering Vacuum	3×10 ⁻² torr	3×10 ⁻² torr
Substrate Temperature	Room Temperature	Room Temperature
Film Thickness	2000 Å	1000 Å

사용한 스퍼터링 표적은 순도가 99.99%, 두께가 0.2 mm이고 직경이 4"인 Mo판이었다. ASTM 카야드상의 Mo 주피이크는 회절각 40.3°의 (110)면으로 b. c. c. 구조를 하고 있으나 본 실험에서 사용한 Mo 표적은 회절각 58.5°의 (200)면이 가장 큰 피이크를 나타내는 것이었다. 그러나 스퍼터링할 때 기판의 온도를 실온으로 하면 표적의 주피이크가 (200)면임에도 불구하고 (110)면이 주피이크가 되는 b. c. c. 구조의 Mo 박막을 얻을 수 있었다. 그리고 본 실험에서는 스퍼터링 전력을 150Watt로 하였다.

Ar으로 Mo을 2,000Å의 두께로 스퍼터링한 뒤 반응가스(N₂)의 혼합비를 변화시켜 질화 몰리브데늄을 약 1,000Å의 두께로 형성시켰다. 이의 X선 회절결과를 그림 1에 나타내었다. 이때 사용한 X선은 CuKα₁선(λ=1.54050Å)이었다. N₂의 농도가 5% 이하에서는 회절각 37.85°의 (111)면이 주피이크가 되는 f.c.c. 구조의 γ-Mo₂N이 형성되었고 N₂의 농도가 5~10%에서는 회절각 36.54°의 (200)면이 주피이크가 되는 육방정계 구조의 δ-MoN과 γ-Mo₂N이 혼합되어 형성되었다. 그리고 N₂의 농도가 10% 이상일 때는 δ-MoN의 주피이크만 나타났다. 증착된 Mo을 암모니아 분위기에서 열질화시킬 경우 질화온도에 따라 상전이

표 2. 스퍼터링 전력에 대한 Mo 증착속도의 변화

Table 2. Mo deposition rate dependence on sputtering power.

Sputtering Power	Deposition Rate
100 Watt	18 Å/min
150 Watt	175 Å/min
200 Watt	300 Å/min

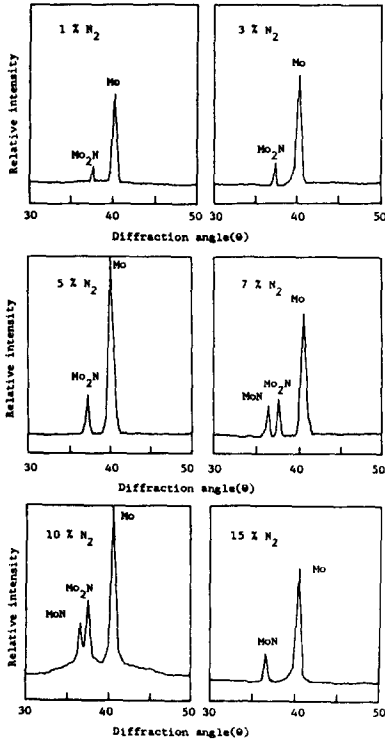


그림 1. N₂ 농도에 따른 질화 몰리브데늄 박막의 X선 회절 스펙트럼

Fig. 1. X-ray diffraction spectra of deposited molybdenum nitride films in various N₂ concentrations.

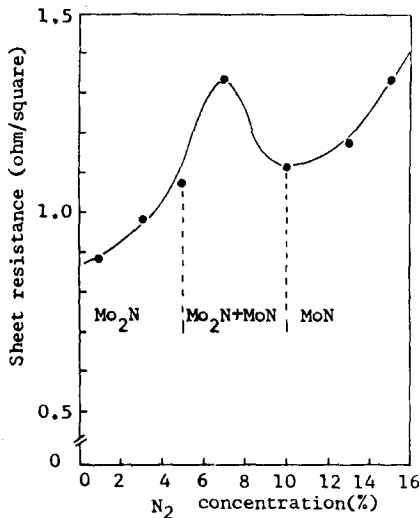


그림 2. N₂ 농도에 따른 질화 몰리브데늄 박막의 면저항 변화

Fig. 2. Sheet resistance dependence of molybdenum nitride film on N₂ concentration.

(phase transition)가 일어나는 현상⁶⁾과 유사하게 본 실험에서도 반응가스(N₂)의 농도에 따라 역시 상전이 가 일어났다. 그림 2는 N₂ 농도에 따른 질화 몰리브데늄 박막의 면저항 변화를 나타낸 것이다. N₂의 농도가 증가하여 7%까지는 박막의 면저항이 계속 증가하다가 7~10%에서 면저항이 감소하는 것은 상전이 때문인 것으로 생각되며 그림 1의 X선 회절결과와 잘 일치한다. 그림 3은 SiO₂ 층을 성장시킨 p-Si 기판위에 다시 질화 몰리브데늄 박막을 직접 형성시킨 표면을 금속 현미경으로 촬영한 것이다. SiO₂ 위에 질화 몰리브데늄을 형성시켰을 때 그림 3에서와 같이 증착된 박막의 표면에 규칙적인 균열이 나타났다. Fumiya

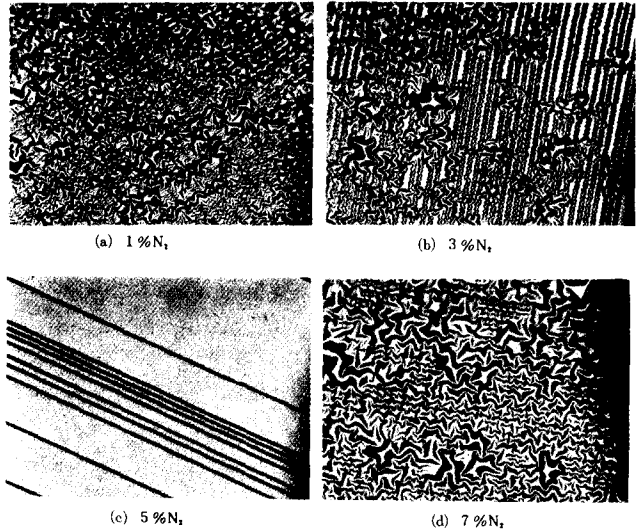


그림 3. SiO₂/p-Si 기판에 증착된 질화 몰리브데늄 박막의 금속 현미경 사진(X70)

Fig. 3. Metallurgical microphotographs of molybdenum nitride films deposited on SiO₂/p-Si substrate (X70).



그림 4. Mo₂N/Mo 이중층의 SEM 사진(x10,000)

Fig. 4. Scanning electron micrograph of Mo₂N/Mo double layer (x10,000).

등¹⁸⁾은 질화 물리브데늄이 형성될때 b. c. c. 의 Mo 격자사이에 질소 원자가 격자간 원자(interstitial atom)로 들어가서 질소의 농도가 증가함에 따라 질화 물리브데늄의 격자상수가 커짐을 밝혔다. 위에서 언급한 균열의 원인도 격자상수의 증가로 질화 물리브데늄 박막이 받는 스트레스때문인 것으로 생각된다. 그러나 Mo를 스퍼터링하고 그 위에 질화 물리브데늄층을 다시 스퍼터링할 경우에는 그림 4와 같이 균열현상이 나타나지 않고 표면이 아주 평탄한 Mo₂N/Mo의 이중층을 얻을 수 있었다.

2. Mo₂N/Mo 게이트 MOSFET의 제작

소자의 제작을 위해서 사용한 기판은 비저항이 6~9 Ω ·cm이고 결정면이 (100)인 p형 실리콘 단결정 웨이퍼였다. 소자의 제조공정은 그림 5와 같다. 세척한 기판을 습식산화시켜 약 5,800Å의 산화막을 성장시키고 게이트, 소오스, 드레인이 들어갈 활성영역(active area)을 결정하고 건식산화와 TCE 게터링을 병행하여 약 500Å의 게이트 산화층을 성장시켰다. 그 다음 표 1의 조건으로 Mo를 4,000Å 정도로 스퍼터링하고 N₂의 농도가 약 5%가 되도록 Ar과 N₂를 혼합하여 1,000Å 정도의 Mo₂N 층을 증착했다. 게이트금속의 패턴을 결정하기 위하여 40°C에서 H₃PO₄ : HNO₃ = 96 : 4의 용액으로 Mo₂N/Mo의 이중층을 부식하였다. 이

때 Mo₂N과 Mo의 부식속도는 각각 분당 500Å 및 1500Å였다.

소오스와 드레인의 불순물 확산원으로 PSG(phosphorus silicate glass)를 사용하였다.¹⁹⁾ 이때 PSG내의 P₂O₅의 몰농도는 약 6%였고 두께는 8,000Å으로 하였다. 그리고 이 위에 인(P)을 도핑하지 않은 LTO(low temperature oxide)를 약 2,000Å 증착하였다. 불순물 확산은 1,100°C의 질소 분위기속에서 50분간 하였다.

소자제작의 각 공정에 대한 설명을 표3에 간략히 나타내었다. 본 실험에서 소자의 제작을 위해 사용한 사진식각 마스크는 모두 5장으로 음화부식과 양화부식을 표3에서와 같이 혼용하였다. 그림 6은 표3의 공정에 의해서 제조된 시험칩(test chip)의 사진이다.

표 3. Mo₂N/Mo 게이트 MOSFET의 제작을 위한 각 공정설명

Table 3. Illustration of the processes for the fabrication of Mo₂N/Mo-gate MOSFET.

	Process	Remark
1	Initial Cleaning	○ Organic ○ Inorganic
2	Initial Oxidation	○ Wet Oxidation:5800Å ○ O ₂ :2 l/min
3	Active Area Definition	○ Mask #1 ○ Positive P/R
4	Gate Oxide Regrowing	○ Dry Oxidation & TCE Gettering:500Å ○ 1100°C, 15min(5/10) ○ O ₂ :2 l/min ○ TCE:90 CC/min
5	Gate Metal Sputtering	○ Mo ₂ N/Mo:1000Å/4000Å ○ Power:150 Watt(4" target) ○ Ar(10 SCCM)+N ₂ (0.5 SCCM) /Ar(5 SCCM)
6	Gate Metal Definition	○ Mask #2 ○ Positive P/R ○ Etch Rate:Mo ₂ N;500Å/min Mo;1200Å/min
7	Source & Drain Contact Window Open	○ Mask #3 ○ Negative P/R ○ Source, Drain
8	PSG & Undoped Oxide Deposition	○ Temp.:380°C ○ P ₂ O ₅ :6 Mol.-% ○ 2000Å/8000Å
9	PSG Densification & Drive-in	○ N ₂ :2 l/min ○ Densification:800°C, 10min ○ Drive-in:1100°C, 50min
10	Metal Contact Window Open	○ Mask #4 ○ Negative P/R ○ Gate, Source, Drain
11	Aluminum Deposition & Delineation	○ Mask #5 ○ Negative P/R ○ Thermal Evaporation 8×10 ⁻⁶ Torr
12	Alloy	○ N ₂ :2l/min ○ 450°C, 20min

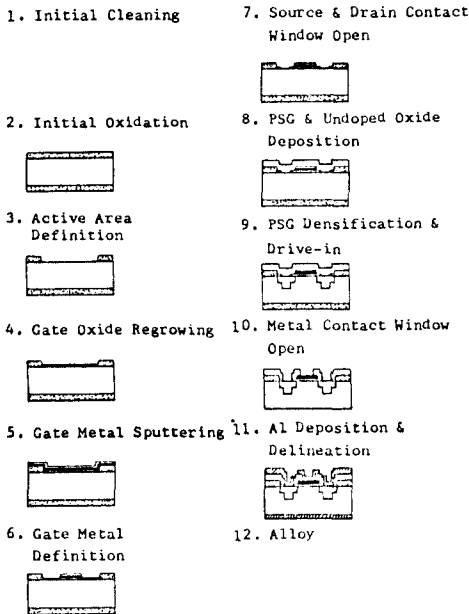


그림 5. Mo₂N/Mo 게이트 MOSFET의 제조공정
Fig. 5. Process sequence for the fabrication of Mo₂N/Mo-gate MOSFET.

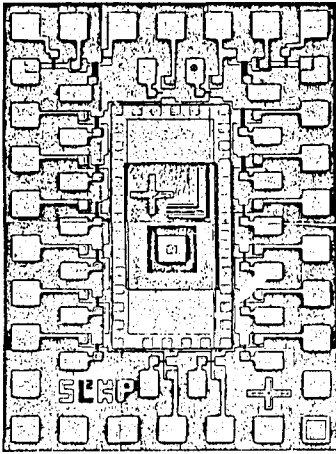


그림 6. 시험 칩 사진
Fig. 6. Microphotograph of the test chip.

III. 결과 및 고찰

소오스와 드레인의 불순물 확산원으로 PSG를 사용할 때 PSG를 산화층이 없는 실리콘에 직접 확산시키는 경우와 산화층을 통해 실리콘으로 확산시키는 경우에 대해 확산시간에 따른 접합깊이의 변화를 그림 7에 나타내었다. 그림 7로부터 실리콘 웨이퍼위에 300 Å의 산화층이 있는 경우 이 산화층을 통과하는데 약 10분이 걸리고, 500 Å의 산화층을 통과하는데는 약 20분이 걸린다는 것을 알 수 있었다. 그리고 그림 8은 확산시간에 대한 확산층의 면저항 변화를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 불순물의 확산시간을 50분으로 하였을

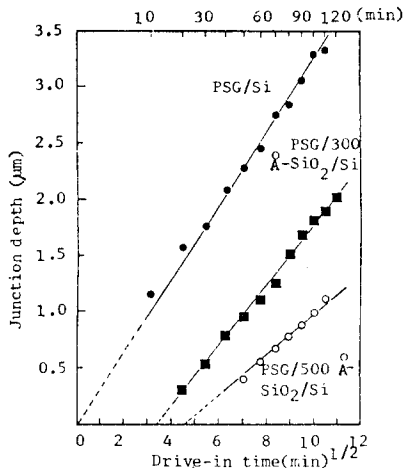


그림 7. PSG를 불순물 확산원으로 사용하였을 때 확산시간에 대한 접합깊이의 변화
Fig. 7. Junction depth versus drive-in time for phosphorus-doped glass diffusion source.

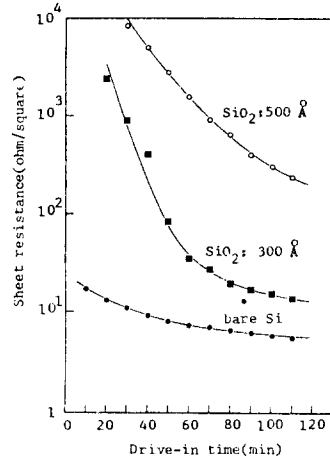


그림 8. PSG를 불순물 확산원으로 사용하였을 때 확산시간에 대한 면저항 변화
Fig. 8. Sheet resistance versus drive-in time for phosphorus-doped glass diffusion source.

때 이때 소오스와 드레인의 금속접촉 부분 및 게이트를 제외한 활성영역의 면저항과 접합의 깊이는 각각 $8.22 (\pm 1.0) \Omega/\square$ 및 $2.36 (\pm 0.1) \mu\text{m}$ 와 $2052 (\pm 100) \Omega/\square$ 및 $0.56 (\pm 0.1) \mu\text{m}$ 였다.

Mo₂N/Mo 게이트 금속을 스퍼터링한 후 PSG를 증착하여 불순물을 확산시킬 때 1,100°C에서 확산시간에 따른 게이트 금속의 면저항 변화를 그림 9에 나타내었다. 불순물을 확산하기 전의 Mo₂N/Mo 이중층의 면저항은 $1.28 \Omega/\square$ 였는데, 확산시간을 10분으로 했을 경우는 $0.38 \Omega/\square$ 이었고, 90분으로 했을 경우는 오히려

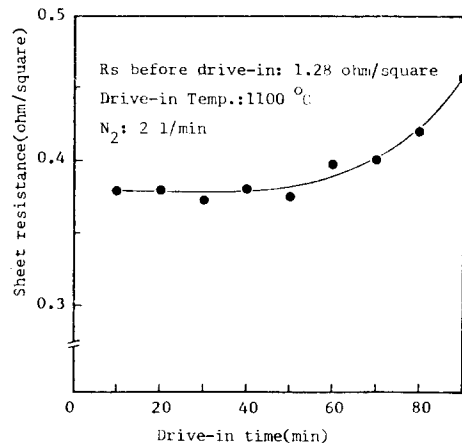


그림 9. 확산시간에 대한 Mo₂N/Mo 게이트 금속의 면저항 변화
Fig. 9. Sheet resistance versus diffusion time for Mo₂N/Mo-gate metal.

러 0.45Ω/□로 증가하였다. 이것에 대한 원인은 불순물을 확산시키는 동안 Mo₂N층이 Mo으로 변하고 확산시간이 길어짐에 따라 Mo이 산화되기 때문이라는 것을 X선회절을 통해서 알 수 있었다. 그림10은 1,100℃의 질소 분위기에서 80분간 확산시켰을 경우의 게이트 금속을 X선 회절한 것이다. D. M. Brown 등¹⁾은 이러한 현상이 열질화시킨 Mo₂N에서도 나타난다고 보

고하였다. 그러나 게이트의 산화현상은 N₂와 H₂의 혼합가스를 사용하여 불순물을 확산시키면 없앨 수 있고 더 낮은 면저항의 Mo 게이트 금속을 얻을 수 있다고 하였다. 그림11은 확산시간에 따른 게이트 금속표면의 변화를 10,000배로 확대하여 SEM 촬영한 것이다.

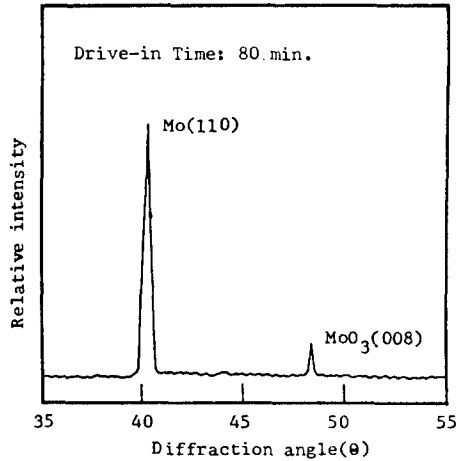


그림10. 1,100℃의 질소분위기에서 80분간 불순물을 확산시킨 게이트 금속의 X선회절 스펙트럼
Fig. 10. X-ray diffraction spectrum of the gate metal whose impurity was diffused at 1,100℃ for 80 minutes in N₂ ambient.

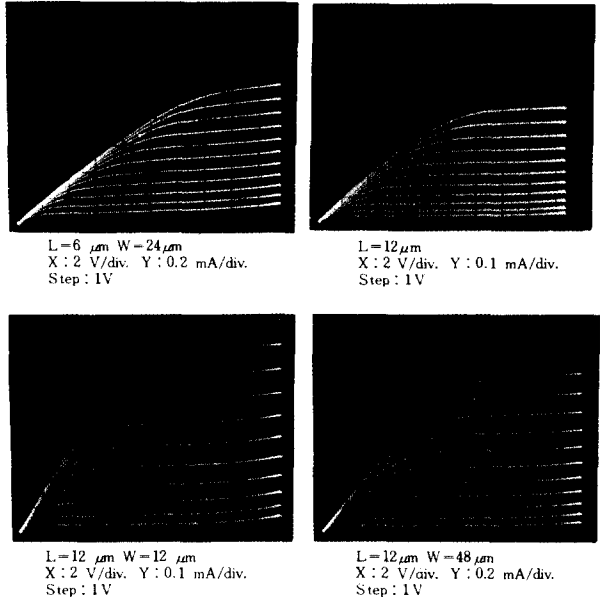


그림12. Mo₂N/Mo 게이트 MOSFET의 I_{DS}-V_{DS} 특성 곡선
Fig. 12. I_{DS}-V_{DS} characteristics of Mo₂N/Mo-gate MOSFETs.

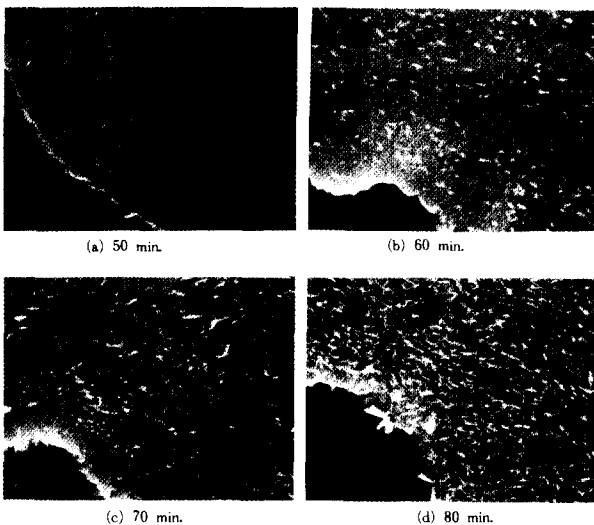


그림11. 불순물 확산을 한 후 Mo₂N/Mo 이중층의 SEM 사진(X10000)
Fig. 11. Scanning electron micrographs of the Mo₂N/Mo double layers after drive-in(X10000).

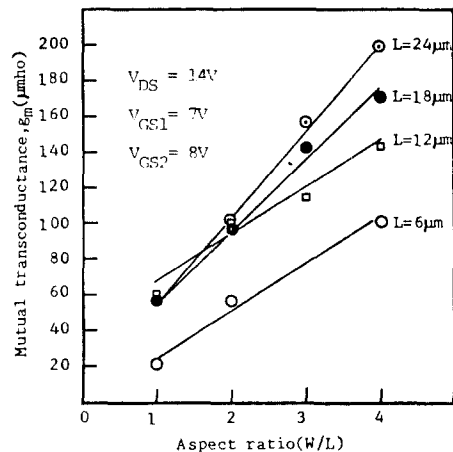


그림13. 채널의 종횡비에 대한 상호전달 콘덕턴스의 변화
Fig. 13. Mutual transconductance versus channel aspect ratio.

그림9와 그림10 및 그림11로 부터 약 60분이상 불순물을 확산시키면 Mo층이 산화되고 표면상태가 좋지 않아짐을 알 수 있다.

그림12는 본 실험에서 제조한 자기정렬된 Mo₂N/Mo 게이트 MOSFET의 I_{DS}-V_{DS} 특성곡선을 나타내고 있다. 채널의 길이(L)와 폭(W)의 변화에 대한 상호신달 문턱전압(mutual transconductance) g_m의 변화를 그림 13에 나타내었다. 그림14는 소자의 문턱전압을

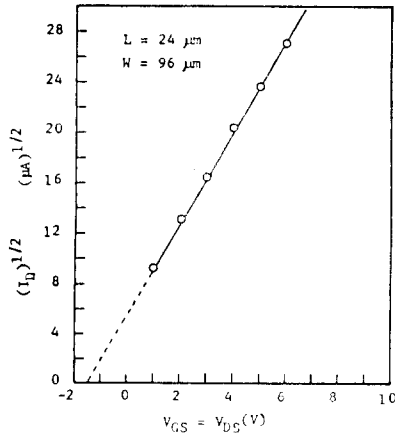


그림14. Mo₂N/Mo 게이트 MOSFET의 문턱전압
Fig. 14. Threshold voltage of the Mo₂N/Mo-gate MOSFET.

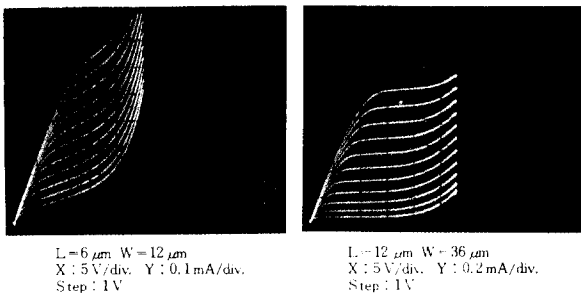


그림15. Mo₂N/Mo 게이트 MOSFET의 채널항복 전압특성
Fig. 15. Channel breakdown characteristics of the Mo₂N/Mo-gate MOSFETs.

나타내고 있다. 여기서 소자의 문턱전압은 -1.5V임을 알 수 있다. 그리고 그림15는 소자의 채널항복전압을 보여 주고 있다. 항복전압은 채널길이가 6 μm인 소자에서 약 20V였고, 12 μm 이상의 소자에서는 약 25V였다.

IV. 결 론

본 실험에서 얻은 여러가지 결과로부터 Mo₂N/Mo 이중층 형성은 열산화법에 의한 반응성 스퍼터링법으로도 가능하다는 것을 알 수 있다. 반응성 스퍼터링법으로 제조한 Mo₂N/Mo 게이트의 면저항값은 다결정 실리콘의 20~30Ω/□보다 훨씬 작아서 높은 면저항의 게이트 물질에서 생기는 신호 전달 지연 등의 문제들을 해결할 수 있다. Ar과 N₂를 혼합하여 반응성 스퍼터링을 할때 질소의 농도가 약 5%인 경우 Mo₂N층이 잘 형성되었다. 불순물을 확산시킬때 Mo₂N/Mo층이 Mo으로 환원되고 1,100°C의 질소분위기에서 약 60분이상 불순물 확산을 시키면 Mo이 산화되기 시작했으나 불순물 확산전의 면저항 1.28Ω/□보다는 훨씬 작은 값을 나타내었다. 그리고 제조한 소자의 문턱전압은 약 -1.5V로서 depletion과 enhancement의 두가지 동작 모우드를 나타냈으며 채널의 항복전압은 채널의 길이가 6 μm인 경우 약 20V였으며, 채널의 길이가 12 μm 이상인 소자에서는 약 25V였다.

参 考 文 献

- [1] Hung Chang Lin, et al, "Effect of silicon-gate resistance on the frequency response of MOS transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-22, no.5, pp. 255-264, May, 1975.
- [2] Mohamed I. Elmasry, *Digital MOS Integrated Circuits*. IEEE Press, pp. 124-135, 1981.
- [3] Dale M. Brown and Richard J. Connery, "Mo gate tetrode," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, no. 11, pp. 1302-1307, November, 1978.
- [4] Ahmed El-Hoshy, Dale M. Brown, and William E. Engeler, "Molybdenum films as partial diffusion masks in MOS processing," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 6, pp. 261-263, 15, September, 1970.
- [5] Paul Richmann, *MOS Field-Effect Transistors and Integrate Curcuits*. A Wiley-Interscience Publication, pp. 193-226, 1973.
- [6] M.J. Kim, D.M. Brown, and W.Katz, "Molybdenum nitride film film formation," *J. Electrochem. Soc., Solid-State and Technology*, vol. 130, no. 5, pp. 1196-1200, May, 1983.
- [7] Manjin J. Kim and Dale M. Brown,

- “Mo₂N/Mo gate MOSFET's,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-30, no. 6, pp. 598-602, June, 1983.
- [8] Fumiya Shoji and Saburo Nagata, “Structure and deposition mechanism of molybdenum nitride films prepared by reactive sputtering,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 13, no. 7, pp. 1072-1078, July, 1974.
- [9] M.L. Barry, “Doped oxides as diffusion sources,” *J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science*, vol. 117, no. 11, pp. 1405-1407, November, 1970.
- [10] M.J. Kim and D.M. Brown, “Hydrogen Gettering Effect of Mo₂N/Mo MOS Process,” *J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology*, vol. 130, no. 10, pp. 2104-2109, October, 1983.
-