

실리콘窒化膜的 氣相成長과 그 電氣的 特性

論 文
28~9~1

Vapor Deposition of Silicon Nitride Film on Silicon and Its Electrical Properties

成 英 權* · 閔 南 基** · 金 承 培***

(Yung Kwon Sung, Nam Ki Min, Seung Bae Kim)

Abstract

Silicon nitride films were chemically deposited on silicon substrates by reacting SiCl₄ and NH₃ in a nitrogen atmosphere at 700~1100°C.

The deposition rate increased rapidly with deposition temperature upto about 1000°C, and became less temperature dependent above this temperature.

The etch rate of films in buffered HF solution decreased with an increase of deposition temperature, and a heat treatment at a temperature higher than that of the deposition considerably reduced the etch rate. It indicates that the heat treatment resulted in a densification of the films.

Surface charge density of $3\sim 4 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ was determined from the C-V characteristics of MNS diode, and it was also found that surface charge density depended on deposition temperature, but not film thickness.

The current-voltage characteristics displayed a $\log I-V^{1/2}$ dependence in the temperature range of 300~500°K. Measurement of the slope of this characteristics and its dependence on temperature and bias polarity suggest that conduction in silicon nitride films arises from the Poole-Frenkel mechanism.

I. 序 論

오늘날 실리콘 酸化膜은 각종 半導體素子나 IC 製造上 가장 중요한 Planar technology의 핵심이 되어 MOS 등에서는 이 酸化膜이 직접 能動作用으로 기여하기에 이르러 酸化膜의 電氣的 特性은 素子の 安定한 動作에 결정적인 영향을 미치는 중요한 要素로 등장되고 있다. 그러나 酸化膜은 構造의 多孔性을 가지며 親水性이 높고 Na⁺ 이온등의 알칼리 이온에 대한 Masking 効果의 全無 등 木質의인 결점때문에 半導體素子の 安定성과 信賴性에 문제점이 많다.

이에 대해 실리콘 窒化膜은 실리콘 酸化膜에 비해

Na⁺ 이온등의 알칼리 이온에 대해 우수한 Masking 效果를 지니며, 각종 半導體素子の 表面保護膜으로서 종래 사용되어 왔던 실리콘 酸化膜보다 우수하여 근래에 와서 Hu⁽¹⁾, Tombs⁽²⁾ 등을 비롯한 많은 사람들에 의해 Surface passivation, Diffusion mask, Insulating layer 및 memory device에의 應用등 실리콘 窒化膜에 대한 광범위한 연구가 계속되어 왔다.

그러나 실리콘 窒化膜은 加工性이란 點에서 문제가 있어 실제 半導體 製品에의 應用으로서는 한정되고 있다. 이와같은 실리콘 窒化膜의 生成方法에는 大別하여 ① Glow 放電法 ② Sputter 法 ③ 化學反應을 이용한 氣相成長法 및 ④ 熱窒化法등이 있으나 각각 溫度, 均一性, 安定性 등에 대해 長短點이 있다.

따라서 우리는 NH₃와 SiCl₄의 化學的 反應에 의한 氣相成長法에 있어서 氣相成長時 反應管內를 減壓시키

* 正會員: 高麗大 工大 教授(工博)

** 正會員: 高麗大 大學院 電氣工學科 博士課程

*** 正會員: 高麗大 大學院 電氣工學科

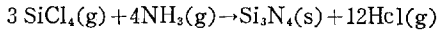
* 接受日字: 1979年 7月 6日

므로서 비교적 낮은 온도범위(700~1100°C)에서 실리콘 산화막을 성장시키고 量産에 적합하도록 그最適成長條件을 제시함과 아울러 MNS 다이오드를 試作하여 容量—電壓特性, 電流—電壓特性 등의 電氣의 特性을 고찰하였기에 보고하는 바이다.

II. 實驗裝置 및 方法

1. 실리콘 산화막의 成長

SiCl₄와 NH₃의 反應에 의한 실리콘 산화막의 氣相 成長實驗에 사용한 成長裝置는 그림 1과 같고, 그 反應式은 SiCl₄의 Ammonolysis에 의한 복잡한 反應過程을 隨伴하지만 대체로 다음과 같다⁽²⁾.



실리콘 wafer 로서는 B를 doping 시킨 P型으로 比抵抗 2~10[Ωcm], 두께 0.24[mm]인 실리콘 單結晶의 結晶面<111>을 사용하여 실리콘 산화막 成長前에 이 wafer를 아래 순서에 따라 前處理했다. 즉

Aceton → Trichloroethylene(boiling 5分) → Aceton → d.i. water → HNO₃(boiling 5分) → d.i. water → HF: water = 1 : 10 → d.i. water 順으로 세척하여 silicagel을 통한 공기로 건조시켰으며, 모든 과정은 clean bench 위에서 行했다.

다음에 無水鹽酸과 水素와의 혼합가스에 의해 1200°C에서 가스 etching 시켰다.

한편 본 실험에 사용한 SiCl₄는 epitaxial grade인 반면에 NH₃가스와 N₂가스는 國産으로서 각각 純度 99%의 공업용을 사용하였다. 일반적으로 NH₃에 포함된 과잉산소와 수분은 Silicon-oxy-nitride⁽³⁾를 형성케 하므로 NH₃가스를 sodalime filter 內를 통과시켜 제거하였다.

실리콘 산화막 成長實驗은 우선 反應管內를 질소분 위기로 만든 다음 전술한 前處理 wafer를 反應管內로 넣고 소정의 成長溫度(700~1100°C)에서 wafer를 處

분히 가열시킨후 NH₃가스를 0.2 l/min의 流量으로 먼저 보내고 1분 후에 SiCl₄를 캐리어가스인 N₂가스로 bubbling시켜 0.1 l/min, N₂가스를 4 l/min의 流量으로 보내주었다. 또한 SiCl₄와 NH₃와의 相互反應의 효율화를 높이기 위해 NH₃가스를 직접 hot zone으로 흘려 보냈다.

일정시간(20~60분)동안 산화막을 成長시킨 후 SiCl₄의 流入을 막고 反應管內에 남아 있는 SiCl₄와의 완전한 反應을 위해 NH₃가스를 약 3분간 더 보내 주었다.

끝으로 NH₃가스의 流入을 차단한 후 N₂가스의 분위기에서 온도를 1200°C로 높인 후 약 1시간 동안 熱處理를 行한 다음 溫度를 室溫까지 서냉시켰다.

成長시킨 산화막의 두께는 우선 색체에 의해서 표준 Color Chart⁽⁴⁾와 비교한 후 간접 현미경으로 측정했다.

2. 電極의 附着

成長된 산화막의 電氣의 特性(容量—電壓特性, 電流—電壓特性)을 측정하기 위하여 Al電極을 그림 2에 나타낸 眞空蒸着裝置를 사용하여 그림 3과 같이 필요한 부분에만 선택적으로 附着시켰다.

蒸着은 Bell Jar 內를 oil diffusion pump로 1.6 × 10⁻⁶mmHg의 高眞空으로 만든 다음 나사형 텅스텐 필라멘트에 蒸着源인 Al(99.9%)을 놓고 基板溫度를 100°C 정도로 가열시켜 용융증착하였다.

蒸着된 시료는 500°C에서 5분간 가열한 후 급냉 합금화시켜 접촉저항을 감소 시켰다.

3. MNS 다이오드의 試作

전술한 실리콘 산화막의 成長方法과 같이 그림 4의 工程에 따라 그림 5와 같은 구조의 MNS 다이오드를 제작하였다.

4. 容量—電壓特性 測定

容量—電壓特性은 산화막—半導體 境界面의 特性을 고찰하는 한 방법으로 사용되는데 본 實驗에서는 그림

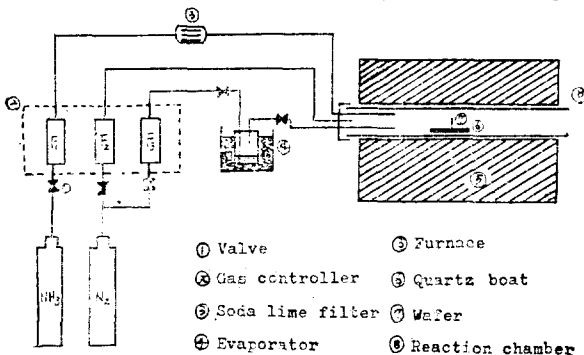
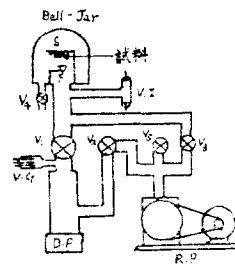


그림 1. 산화막 成長 實驗裝置

Fig 1. Apparatus for the deposition of silicon nitride films.



- S : Substrate
- F : Filament & source
- V1 : High vacuum valve
- V2 : Fore vacuum valve
- V3 : By pass valve
- V4 : Bell-jar leak valve
- V5 : Rotary pump leak valve
- R.P : Rotary pump
- D.P : Oil diffusion pump
- V.G : Geissler tube
- V.I : Forgel tube

그림 2. 眞空蒸着裝置

Fig 2. Vacuum evaporator.

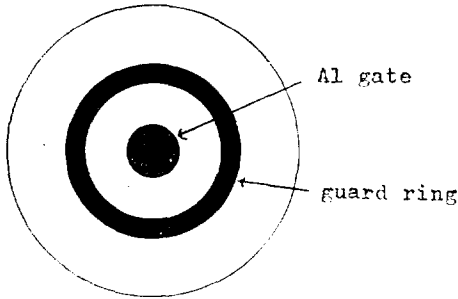


그림 3. 電極의 形狀
Fig 3. Top view of Al electrode.

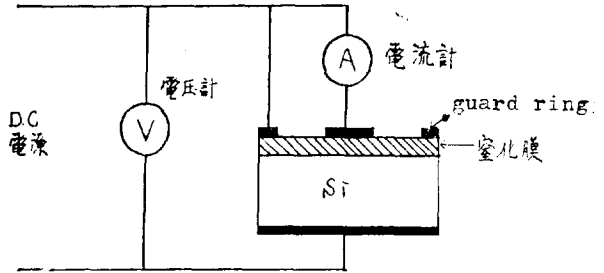


그림 6. 電流—電壓 特性 測定回路
Fig 6. Measuring circuit for I-V characteristics.

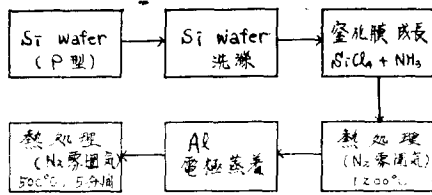


그림 4. MNS 다이오드의 製作過程
Fig 4. Process in the fabrication of MNS diode.

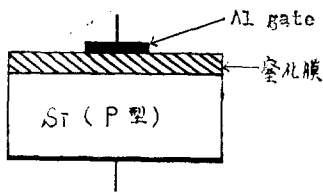


그림 5. MNS 다이오드의 構造
Fig 5. Structure of the MNS diode.

5와 같은 MNS 다이오드를 제작하여 容量—電壓特性을 측정하였다.

容量은 LCR 브릿지를 사용하여 게이트전압을 시료에 따라 $\pm 5[V]$ 범위 내에서 변화시키면서 측정하였다.

5. 電流—電壓特性 測定

그림 6은 電流—電壓特性 測定回路이다. 電流値는 電壓을 昇壓速度 $5V/min$ 로 인가하고 1분후에 picoammeter를 읽었으며 전압변화에 따른 전류의 변화를 그래프에 $\log I-V^{1/2}$ 로 구성했다.

III. 實驗結果 및 考察

1. 실리콘 窒化膜의 成長條件

$SiCl_4$ 와 NH_3 로부터 실리콘 窒化膜을 成長시키는 경우 우선 反應生成物인 HCl 의 排出速度에 따라 크게 좌우됨을 알았다.

즉 HCl 가스를 自然排出시킨 경우는 反應管벽에는 다량의 $NH_4Cl^{(6)}$ 로 보이는 白色膜이 附着되었고 wafer에도 역시 NH_4Cl 의 白色膜이 生成되나 HCl 가스를 排氣 팬으로 強制排出시킨 경우는 약간의 NH_4Cl 만이 反應管벽에 부착될뿐 비교적 均일한 窒化膜이 成長되었다.

이 實驗事實은 Mackenna⁽³⁾⁽⁶⁾의 提示와는 모순된다. 즉 生成 HCl 이 窒化膜 生成時에 각종 不純物이 온에 대해 getter 역할을 하기 때문에 HCl 의 존재가 窒化膜 生成時的 필요조건이 된다는 것과 反對現象이다. 따라서 우리들은 窒化膜 生成時的 HCl 은 膜生成에 유익하지 않고 오히려 과잉의 HCl 은 Mackenna의 주장과는 달리 流入되는 NH_3 가스와 다시 反應하여 反應管벽과 실리콘 wafer에 NH_4Cl 을 生成시킴으로써 生成 HCl 은 窒化膜의 成長에 방해되고 成長速度가 낮아지게 된다고 생각한다. 이와같은 生成 HCl 의 障害要素를 줄이기 위해서 本 實驗에서는 生成 HCl 을 強制排出시킴과 동시에 NH_3 의 量을 충분히 보내 주도록 하였다.

그러나 이와같은 조건아래 이루어진 窒化膜의 成長速度는 대체로 成長溫度와 $NH_3/SiCl_4$ 의 體積比에 의존하여 변화한다.

그림 7은 成長條件을 $SiCl_4$ 流量 $0.1 l/min$, NH_3 流量 $0.2 l/min$ 로 한 경우의 長成速度와 成長溫度와의 관계이다.

成長速度의 溫度依存性은 $1,000^\circ C$ 前後에서 크게 변화하여 $1,000^\circ C$ 이하에서는 成長速度는 급격히 증가하여 그 活性化에 너지는 $24kcal/mole$ 前後이며, $1,000^\circ C$ 以上에서는 $2.9kcal/mole$ 정도이다. 이와같이 $1,000^\circ C$ 이하에서는 실리콘基板 表面에서의 化學反應이 지배적이지만 $1,000^\circ C$ 이상에서는 氣體內에 生成된 Si_3N_4 입

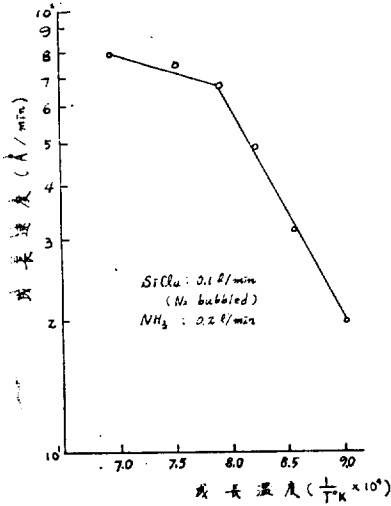


그림 7. 성장속도의 온도依存性
Fig 7. Temperature dependence of deposition rate of nitride films.

자가 실리콘基板 表面에 도달하는 확산과정의 기여가 있어 활성화에너지는 적어진다고 생각된다. 따라서 이들의 활성화에너지 만은 NH₃/SiCl₄의 體積比에는 관계없음을 알았다.

그림 8은 성장온도 1,000°C에서 SiCl₄ 流量的 변화에 대한 성장속도의 변화를 나타낸 것으로 NH₃ 가스의 流量을 일정케하고 SiCl₄의 流量을 증가시키면 성장속도는 점점 증가하나. 0.16 l/min 정도의 流量에서는 성장속도가 포화치를 나타내었다. 즉 NH₃/SiCl₄의 體積比를 적게하면 성장속도가 처음에는 급증해 나가나 나중에는 포화상태로 이르게 된다.

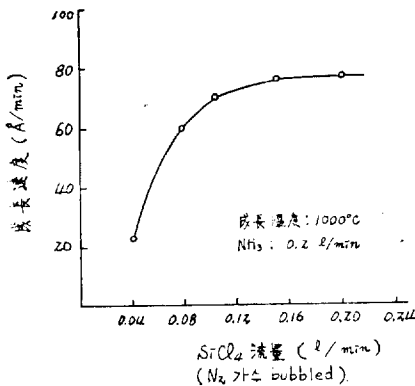


그림 8. 성장속도와 SiCl₄ 流量과의 關係
Fig 8. Deposition rate of nitride films as a function of the SiCl₄ flow rate.

한편 成長시킨 窒化膜의 緻密性 與否를 평가하기 위하여 窒化膜의 etching 速度를 측정하였다.

그림 9는 buffered HF 용액 (40gr NH₄F + 60ml H₂O + 15ml 48% HF)내에서 窒化膜의 etching 速度의 成長온도 依存性을 나타낸 것으로 시료의 成長條件은 그림 7과 같은 경우이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 etching 速度는 900°C에서 50Å/min 정도이나 1,000°C에서는 30Å/min 정도로 감소하여 成長온도가 높아짐에 따라 etching 速度가 현저하게 감소하였다. 이는 成長온도가 낮은 경우의 窒化膜은 소위 looser structure로 됨을 시사하며 따라서 窒化膜의 成長온도가 증가할수록 高密度의 窒化膜이 얻어짐을 알 수 있다.

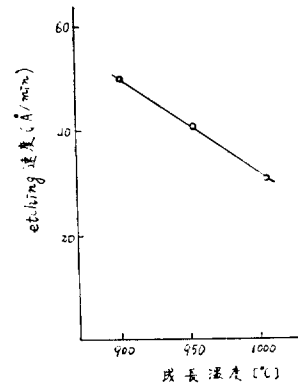


그림 9. etching 速度의 成長온도 依存性
etching 溶液: Buffered HF
Fig 9. Deposition temperature dependence of etch rate.

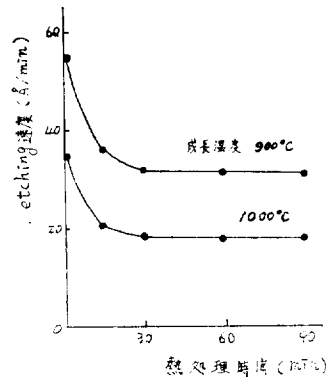


그림 10. etching 速度와 熱處理時間과의 關係
熱處理溫度: 1,200°C
Fig 10. Etch rate vs. heat-treatment time at 1,200°C

다음에 成長된 窒化膜에 대한 etching 速度의 熱處理依性存을 살펴본 결과 그림 10에 나타난 바와 같이 etching 速度는 熱處理를 행한 것이 현저하게 적어져 窒化膜의 緻密化가 熱處理 여하에 따라 좌우됨을 시사하고 있다. 즉 膜의 高密度化를 기하기 위해서는 窒化膜의 成長溫度보다 높은 溫度에서 熱處理해야 함을 알 수 있다.

한편 본 실험조건하에서 成長시킨 窒化膜 자체의 誘電率 측정은 MNS 다이오드의 게이트에 -2.5V의 전압을 인가하여 실리콘 表面에 강력한 正孔의 축적층을 형성시킨 후 1KHz의 주파수에서 容量을 측정하여 결정하였다.

이로부터 계산된 窒化膜의 誘電率は 약 4~5로 100 KHz에서 측정된 B.E Deal⁽⁷⁾이나 M.J. Grieco⁽⁸⁾의 결과와 거의 일치하였다.

2. 電氣의 特性

(1) 容量—電壓特性

실리콘 單結晶素體와 窒化膜境界面の 電荷 특성을 고찰하기 위하여 MNS 다이오드의 容量—電壓特性을 측정하였다.

그림 11은 窒化膜 두께 1,000Å으로 구성된 MNS 다이오드의 측정된 C-V 곡선을 理想的인 MNS 다이오드와 대비시켜 도시한 것으로 理想的인 MNS 다이오드의 C-V 특성에 대해 본 실험에서 얻은 試料는 (-)측으로 移動되어 있다.

이와같은 현상은 물론 窒化膜內에 또는 窒化膜과 실리콘기판과의 境界面に 존재하는 電荷등에 기인하는 것이며 그 表面電荷密度 Q_s 는 다음 식으로 주어진다.

$$Q_s = (-V_{FB} + \phi_{MS}) C_N \dots\dots\dots(2)$$

단 V_{FB} : flat band 電壓

$\phi_{MS} = \phi_M - \phi_S$: 金屬—半導體의 일함수差

C_N : 窒化膜 容量 [F/cm²]

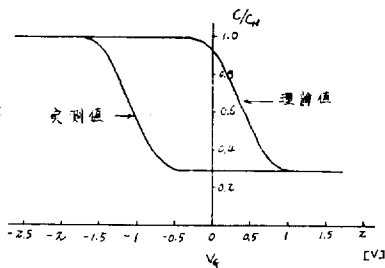


그림 11. 容量—電壓特性
窒化膜두께 : 1,000Å
成長溫度 : 1,000°C
Fig 11. Capacitance-Voltage characteristics.

윗 식중에서 V_{FB} 는 그림으로 부터 $V_{FB} \approx 1.5[V]$ 이므로 식 (2)에서 ϕ_{MS} 를 무시하면 表面電荷密度는 약 $\frac{Q_s}{q} \approx 3.73 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 정도이다.

이들 表面電荷密度에 대한 窒化膜 成長條件의 영향을 검토하기 위하여 우선 成長溫度(900°C 및 1,000°C)를 달리한 窒化膜에 對한 容量—電壓特性을 實測한 바 그림 12에 나타난 바와같이 成長溫度 900°C인 경우의 C-V 曲線이 1,000°C인 경우의 것보다 理論曲線으로부터 (-)側에의 移行度가 커져 膜이 더 (+)로 荷電하고 있음을 시사하고 있다. 이와 같은 實測結果로부터 窒化膜의 成長溫度를 높게하고 그 成長溫度보다 높은 온도에서 熱處理한 것이 V_{FB} 가 적어지고 表面電荷密度가 약간 감소함을 알 수 있다.

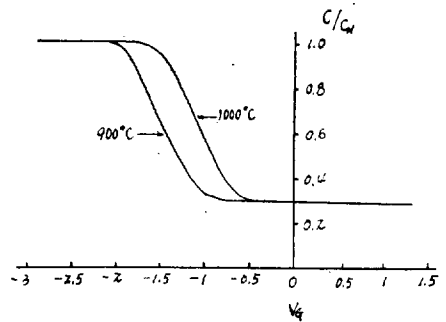


그림 12. C-V 特性과 成長溫度와의 關係
窒化膜 두께 : 1,000Å
Fig 12. Deposition temperature dependence of C-V curve.

따라서 앞에서 검토한 膜의 緻密性和 관련시켜 볼 때 본 실험범위에서는 역시 높은 온도(1,000°C)에서 窒化膜을 成長시키는 것이 安定한 窒化膜을 얻는데 유익하다고 결론 지을 수 있다.

또 인가전압의 履歷에 대한 C-V 特性은 그림 13에 나타난 바와같이 약간의 히스테리시스 특성을 나타내나 이것은 실리콘기판과 窒化膜과의 界面에서의 電荷注入에 기인한 것이라고 생각된다⁽⁵⁾⁽⁸⁾.

이와 같은 히스테리시스 현상은 非熱處理 試料인 경우 더욱 현저하게 나타나 窒化膜의 Passivation 機能의 不安定性을 시사하는듯 하나 熱處理에 의해 膜이 緻密化되고 Pin hole의 減少나 膜內의 化學結合이 安定된 듯한 試料에서는 약간의 히스테리시스 현상이 나타나는 것을 미루어 보아 本質的인 窒化膜의 특성이라고는 단정하기 어렵다⁽⁵⁾.

한편 膜두께의 C-V 특성과의 관계는 그림 14에 나타난 바와 같이 膜두께가 두꺼운 경우(2,000Å)가 얇

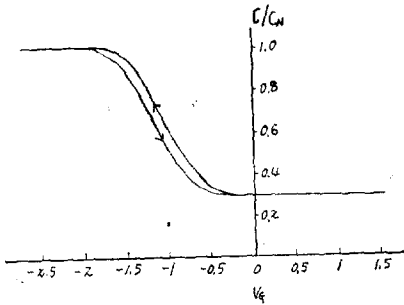


그림 13. C-V 特性의 히스테리시스現象
 窒化膜 두께: 1,000Å
 成長溫度: 1,000°C
 Fig 13. Hysteresis of C-V curve.

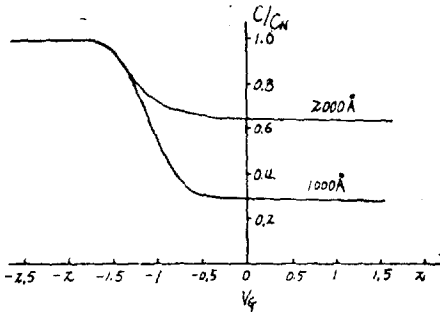


그림 14. C-V 特性의 膜 두께 依存性
 成長溫度: 1,000°C
 Fig 14. Film thickness dependence of C-V curve.

은 경우(1,000Å) 보다 C_N 이 거의 $\frac{1}{2}$ 로 줄어지나 表面電荷密度는 窒化膜의 두께에는 거의 의존하지 않는 것 같다.

(2) 電流-電壓特性

그림 15는 室溫에서 측정한 MNS 다이오드의 電流-電壓特性이다. 그림에서 보는 바와 같이 電流($\log I$)는 電壓($V^{1/2}$)에 따라 線型的으로 변화함을 알 수 있다.

또 이들 MNS 다이오드의 $\log I - V^{1/2}$ 특성의 溫度依存성을 실측한 바 그림 16에 나타낸 바와같이 절보기에 Poole Frenkel 효과⁽⁹⁾에 기인한 듯한 電流가 주위 온도에 따라 변화한다.

이들 電流-電壓特性的의 메카니즘에 대해서는 우선 $\log I - V^{1/2}$ 관계가 直線的인 경우이므로 Schottky emission이나 Poole-Frenkel emission에 의해 설명할 수 있으나, 본 실험 조건하에서 제작한 窒化膜의 電流傳導는 우선 Poole-Frenkel 효과에 기인된다고 생각하면 후술하는 바와같이 Poole-Frenkel 電流를 가정하여 그 電流-電壓特性的의 기술기에서 구한 電子分極에

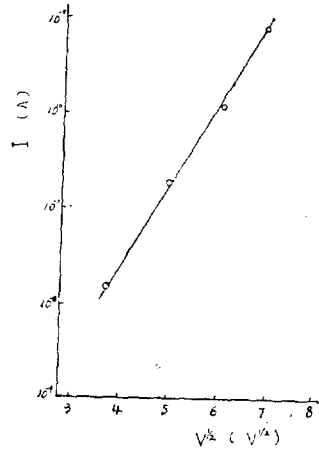


그림 15. MNS 다이오드의 電流-電壓特性
 窒化膜 두께: 2,000Å
 測定溫度: 室溫
 Fig 15. Current-Voltage characteristics of MNS diode.

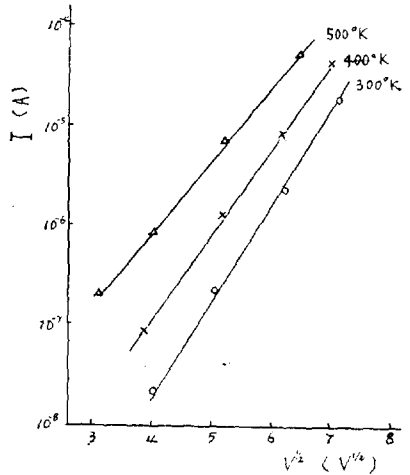


그림 16. 電流-電壓特性的의 溫度依存性
 窒化膜 두께: 2,000Å
 成長溫度: 1,000°C
 Fig 16. Ambient temperature dependence of I-V characteristics.

의한 誘電率 ϵ_o (optical dielectric constant)는 약 4, 또 屈折率은 成長條件에 관계치 않으므로 $n \approx 2^{(10)}$ 라 하면 $n^2 \approx \epsilon_o$ 를 만족하므로 確證지을 수 있다.

그러나 이의 타당성을 確證하기 위하여 Poole-Frenkel 메카니즘을 理論적으로 일단 檢討한 다음 본 實驗結果에 대해 고찰해 보기로 한다.

起하여 Poole-Frenkel 電流源으로 하고 MNS 電極에 의 印加電壓極성에 관계없이 실리콘-窒化膜界面에서 窒化膜에서 실리콘側에 電子, 또는 역으로 실리콘에서 正孔을 窒化膜에 注入하므로써 나타난 結果이며 이 機構가 전술한 印加電壓 履歴에 따르는 히스테리시스 현상의 원인으로 된다.

또한 Mead⁽¹¹⁾는 Poole-Frenkel 効果와 같이 bulk-Control 메카니즘인 경우에는 試料에 順方向 및 逆方向으로 각각 동일전류를 흘려 주었을 때 試料에서 drop 되는 順方向 電壓降下(V_F) 對 逆方向 電壓降下(V_R) 特性의 기울기가 1인 특성을 가져야 한다고 강조하였으나 우리들의 실험범위에서는 그림 19과 같이 거의 원점을 통과하는 직선임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 전술한 實驗 data가 본 論文에서 제시한 Poole-Frenkel 메카니즘과 일치함을 더욱 확고히 뒷받침 해 주고 있는 것이다.

IV. 結 論

이상의 實驗結果 및 考察로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 實驗의 경우 실리콘 窒化膜의 最適成長條件은 다음과 같다.

- SiCl₄ 가스流量 : 0.1 l/min (0°C에서 N₂ 가스로 bubbling)
- NH₃ 가스流量 : 0.2 l/min
- N₂ 가스流量 : 4 l/min
- 成長 溫度 : 1,000°C

(2) 窒化膜의 成長速度는 成長溫度가 높아짐에 따라 1,000°C까지는 증가하였으나 그 이상에서는 완만히 증가하였다.

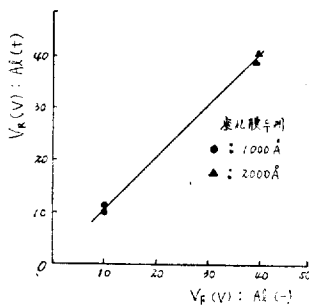


그림 19. 順方向(AI-) 및 逆方向(AI+)으로 10⁻⁶[A]의 電流를 흘려줄 때 電壓降下の 比較

Fig 19. Comparison of the negative vs. positive voltage across samples of various film thickness at a fixed current 10⁻⁶ (A).

또한 SiCl₄의 流量을 증가시키면 成長速度도 급격히 증가하나 0.15 l/min 정도의 流量에서 成長速度는 포화치에 이르렀다.

(3) 窒化膜의 etching 速度는 成長溫度가 높을수록 감소하였다.

또한 1,200°C에서 熱處理를 행한 결과 etching 速度는 현저하게 감소하였으며 이것은 熱處理에 의해 窒化膜의 組成의 변화에 기인하고 이로 인해 膜의 緻密化가 진행되는 것을 시사한다.

(4) 容量-電壓特性으로 부터 측정된 窒化膜-실리콘 界面의 表面電荷密度는 3~4×10¹¹/cm² 정도이며, 窒化膜의 두께에는 의존하지 않으나, 成長溫度가 높을수록 表面電荷密度는 낮아져 緻密化가 좋아진다.

(5) 電流-電壓特性은 NH₃/SiCl₄의 體積比를 적게 하고, 주위온도를 높이면 실리콘 窒化膜은 化學量論值에서 이탈한 過剩실리콘의 증가에 기인하는 듯한 Poole-Frenkel 電流에 의한 電氣傳導度가 커지며 아울러 電流-電壓特性의 直線의 기울기, 溫度의존성, 極性的존성 등을 검토한 결과 窒化膜에 있어서의 電流傳導메카니즘은 Poole-Frenkel emission이라는 確證을 얻었다.

參 考 文 獻

- 1) S.M.Hu: J. Electrochem. Soc., **113**, 7, p.693: (1966)
- 2) N.C. Tombs, et al: Proc. of IEEE (letters), **54**, p.87 (1966)
- 3) V.D. Wohlheiter, et al: J. Electrochem. Soc., **119**, 7, p.945 (1972)
- 4) Philip. F. Kane, et al: Characterization of Semiconductor Materials, McGraw-Hill p.309 (1970)
- 5) M.J. Grieco, et al: J. Electrochem. Soc., **115**, 5, p.525 (1968)
- 6) E. Mackenna, et al: Paper 146 Presented at Electrochem. Soc. Meeting, Atlantic City, Oct. 4-9, (1970)
- 7) B.E. Deal, et al: J. Electrochem. Soc., **115**, 3, p.300 (1968)
- 8) S.M. Hu, et al: Appl. Phys. Lett., **10**, 3, p.97 (1967)
- 9) J. Frankel: Phys. Rev., **54**, p.647 (1938)
- 10) K.E. Bean, et al: J. Electrochem. Soc., **114**, 7, p.733 (1967)
- 11) C.A. Mead: Phys. Rev., **128**, 5, p.2088 (1962)
- 12) S.M. Sze: J. Appl. Phys., **38**, 7, p.2951 (1967)