



<연구논문>

ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol. 51, No. 2, 2018.

<https://doi.org/10.5695/JKISE.2018.51.2.110>

SIMS를 이용한 SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si 및 SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막내의 Na 게터링 분석

김진영^{a,*}

^a광운대학교 전자재료공학과

Analysis of the Na Gettering in SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si and SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si Multilevel Thin Films using SIMS

Jin Young Kim^{a,*}

^aDepartment of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

(Received March 9, 2018 ; revised March 30, 2018 ; accepted April 2, 2018)

Abstract

The Na low temperature gettering in SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si and SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si multilevel thin films was investigated using dynamic SIMS(secondary ion mass spectrometry) analysis. DC magnetron sputter, APCVD and PECVD techniques were utilized for the deposition of Al-1%Si thin films, SiO₂/PSG/SiO₂ and SiO₂/TEOS/SiO₂ passivations, respectively. Heat treatment was carried out at 300°C for 5 h in air. SIMS depth profiling was used to determine the distribution of Na, Al, Si and other elements throughout the SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si and SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si multilevel thin films. XPS was used to analyze chemical states of Si and O elements in SiO₂ passivation layers. Na peaks were observed throughout the PSG/SiO₂ and TEOS/SiO₂ passivation layers on the Al-1%Si thin films and especially at the interfaces. Na low temperature gettering in SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si and SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si multilevel thin films is considered to be caused by a segregation type of gettering.

Keywords : Na, gettering, passivation, dynamic SIMS

1. 서 론

초고집적 회로 기술에서 불순물 게터링 즉 소자 활성영역에서의 불활성화에 관한 많은 연구에도 게터링 메카니즘(gettering mechanism)은 아직까지도 명확히 밝혀지지 않고 있다. 게터링 메카니즘의 명확한 규명을 위해서는 미량으로 존재하는 불순물들의 농도 측정 및 불순물 성분 원소의 화학적 결합 상태 등을 분석하는 것이 요구 되지만 현재의 분석

장비 분해능(resolution)이 이에 미치지 못하는 실정이다 [1]. 게터링은 일반적으로 완화형 게터링(relaxation type gettering)과 편석형 게터링(segregation type gettering)으로 구분할 수 있다 [1]. 완화형 게터링은 1000°C 이상의 높은 온도에서 이루어지는 것으로 알려져 있으며, 편석형 게터링은 최근 계면 등 결함을 게터링 센터로 500°C 이하의 저온에서도 게터링이 이루어지는 것이 확인되면서 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다 [1-6]. 게터링에 관한 연구는 internal gettering과 관련된 완화형 게터링에 관한 것들이 주로 보고되었다. 저온 게터링에 관한 연구는 G. Kissinger et al.의 Si/SiO₂ 계면에서 나타나는 Cu 불순물 게터링 [1], M. Al-Amin et al.의 multicrystalline silicon(mc-Si)에서의 Fe 불순

*Corresponding Author: Jin Young Kim
Department of Electronic Materials Engineering Kwangwoon University
Tel: +82-2-940-5166 ; Fax: +82-2-940-8174
E-mail: jykim@kw.ac.kr

물 등에 대한 저온 게터링 [2-4], H. Zhu et al.은 p형 Czochralski 실리콘에서 나타나는 Fe 불순물 게터링 [5] 등이 보고되었으며, 주로 계면과 생성결함 (grown-in defects) 등이 게터링 센터로 작용하고 있는 것으로 보고하였다. 불순물들의 소자활성영역에서의 불화성화 즉 게터링은 초고집적화된 미세 전자소자에서 매우 중요하다고 할 수 있으며, 이를 위해 게터링 메커니즘의 명확한 규명이 요구된다.

본 연구에서는 $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 및 $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 적층 박막에서 Na 불순물의 저온 게터링(low temperature gettering)에 관하여 연구하였다. 적층 전자소자에서 Na 등 알칼리 불순물은 층간 확산이동 등으로 인해 적은 양으로도 미세 전자소자 성능 저하에 치명적인 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있다 [6]. SiO_2 , PSG(phosphosilicate glass) 및 TEOS(tetraethyl ortho-silicate) 보호막은 금속 박막배선에서 외부 환경으로부터의 산화막 형성 방지, 우수한 단차 피복성에 의한 표면의 평탄화 그리고 알칼리 불순물 게터링 등 목적으로 많이 사용되어지고 있다 [7,8]. Al-1%Si 박막은 실리콘 반도체 집적회로에서 박막배선 재료로서 오랫동안 사용되고 있다 [8]. Al-1%Si 박막은 스퍼터링 법으로, SiO_2 PSG 보호막 층은 상압 CVD 그리고 TEOS 보호막층은 플라즈마 CVD 법으로 각각 증착하여 제조하였으며, 열처리는 300°C 에서 5시간 동안 하였다. 보호막 층 및 박막배선 내부의 Na, Al, Si 등 성분 원소들의 분포는 동적 이차이온 질량분석기(dynamic SIMS)를 이용한 깊이분포측정(depth profiling) 분석을 통하여 확인하였으며, X선 분광분석기(XPS, X-ray Photoelectron Spectroscopy)를 사용하여 Si, O 등 성분 원소들의 결합에너지를 분석하여 화학적 결합 상태를 확인함으로써 $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 및 $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 적층 박막에서 Na 불순물의 저온 게터링에 관하여 연구하였다.

2. 실 험

열 산화 처리된 $\text{SiO}_2/\text{p-Si}(100)$ 기판 위에 700 nm Al-1%Si 박막을 스퍼터링(MRC 920M D.C. Magnetron Sputter)을 이용하여 증착하였으며, SiO_2 PSG 보호막 층은 APCVD(atmospheric pressure chemical vapor deposition) 그리고 TEOS 보호막 층은 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 법으로 각각 300 nm 두께로 증착하여 제조하였다. 저온 게터링을 위한 열처리는 Na 게터링이 일어나기에 충분하다고 판단되는 300°C 에서 5시간 동안 대기 중에서 하였다.

Table 1. Measured secondary ions and analytical conditions of dynamic SIMS. (for O_2^+ primary ion beam)

Primary ion beam	O_2^+
Measured secondary ions	Positive ions (Na, Al, Si)
Impact energy	7.5 keV
Beam current	40 nA
Raster size	$50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$
Measured area	$33 \mu\text{m} (\Phi)$

동적 이차이온 질량 분석기(dynamic SIMS, IMS 6F from CAMECA)를 사용하여 $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2$ 및 $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2$ 보호막 층에서부터 Al-1%Si 박막 내부까지의 Na, Al, Si 등 성분 원소들의 분포를 깊이분포측정(depth profiling) 분석으로 확인하였다. dynamic SIMS를 이용한 깊이분포측정 분석은 극미량의 불순물 등 분석에 널리 사용되고 있는 분석 방법으로 이온 빔에 의한 스퍼터 에칭 현상에 의해 시편의 표면으로부터 방출되는 시편 성분 원소의 이차이온을 검출하여 분석한다 [1]. 표면에서 방출되는 이차이온 생성율(secondary ion yield)은 사용되는 이온빔의 종류에 따라 다를 수 있으며 본 연구에서는 이차이온 생성율을 극대화하기 위하여 산소이온(O_2^+)빔을 사용하였다 [9]. 산소 이온빔은 일반적으로 Na, Al 등과 같은 양전성 성분 원소의 이차이온 생성율을 높이는 데 효과적인 것으로 알려져 있다 [9]. 산소 이온빔의 분석영역은 $33 \mu\text{m}(\Phi)$, raster size는 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 이었으며 표 1에 dynamic SIMS 분석 조건을 나타내었다. XPS(SIGMA PROBE, Thermo VG Scientific)를 이용하여 표면 SiO_2 보호막 층에서의 Si, O 등 성분 원소들의 결합에너지를 분석하여 화학적 결합 상태를 확인하였다. XPS 분석에서는 Al-K α 단파장 X-ray Source (15 KV, 100 W, $400 \mu\text{m}$)를 사용하였으며, pass energy 20 eV, step size 0.1 eV로 각 성분 원소들의 결합에너지를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 O_2^+ 이온빔에 의한 dynamic SIMS 깊이 분포측정 분석결과로써 $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 적층 박막에서 $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2$ 보호막 층 및 Al-1%Si 박막 층 내부의 질량 27 알루미늄(Al)과 질량 30 실리콘(Si) 성분 원소의 깊이에 따른 성분분포를 보여준다. Si는 질량 28(92.27%), 질량 29(4.68%) 그리고 질량 30(3.05%)로 질량 28 Si의 질량비(relative

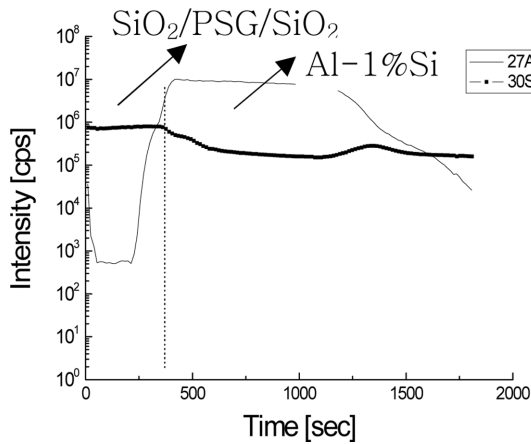


Fig. 1. Al and Si SIMS depth profile of SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si multilevel thin films.

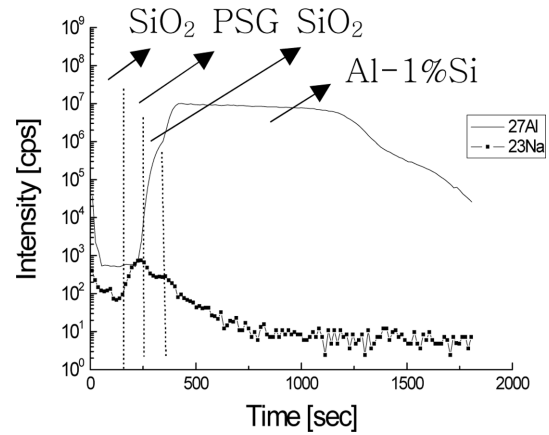


Fig. 2. Al and Na SIMS depth profile of SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si multilevel thin films.

abundance)가 가장 크지만 질량 27 Al(100.0%) 등 분석 성분 원소들을 고려하여 질량 30 Si를 선택하여 검출 분석하였다 [10]. O₂⁺ 이온빔에 의한 평균 스퍼터율(sputter rate)은 SiO₂(300 nm)/PSG(300 nm)/SiO₂ (300 nm) 보호막 층에서 약 3 nm/sec 그리고 Al-1%Si(700 nm) 박막 층에서 약 0.7 nm/sec 정도로 나타났다. SiO₂/PSG/SiO₂ 보호막 층 및 Al-1%Si 박막 층의 형성을 확인할 수 있으며, SiO₂/PSG/SiO₂ 보호막은 모두 실리콘과 산소가 주성분으로 각 보호막 층간의 계면은 그림 1의 Si 원소의 성분 분포에서는 명확히 구별되어 나타나지 않음을 보여준다. Al-1%Si 박막 층 하부 SiO₂ 열 산화막 층에서 Al 성분 피크의 완만한 감소는 Al 성분의 SiO₂ 열 산화막 층으로의 상호확산(interdiffusion)에 의한 것이 아니고, dynamic SIMS 깊이분포측정 분석에서 이온빔에 의한 스퍼터 에칭 및 분석영역 등 원인에 의한 것으로 판단된다.

그림 2는 O₂⁺ 이온빔에 의한 dynamic SIMS 깊이분포측정 분석결과로써 SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서 질량 23 sodium(Na)과 질량 27 알루미늄(Al) 성분 원소의 깊이에 따른 성분분포를 보여준다. Na는 Al-1%Si 박막배선의 상부 두 보호막 PSG/SiO₂에서 계면을 중심으로 나타났으며, PSG 보호막 상부 SiO₂ 보호막에서는 Na 피크가 검출되지 않은 것으로 판단된다. 그림 3은 PSG 보호막 상부 표면 SiO₂ 보호막에서 측정된 Na1s core level XPS 스펙트럼 분석 결과로써 약한 피크들은 XPS 분석상의 noise로 판단되며 PSG 보호막 상부 SiO₂ 보호막에서 Na 불순물은 검출되지 않은 것으로 사료된다. 따라서 300°C 저온에서 5시간 동안 대기 중에서 열처리한 SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서 Na 불순물 게터링은 dynamic SIMS 분석 결과

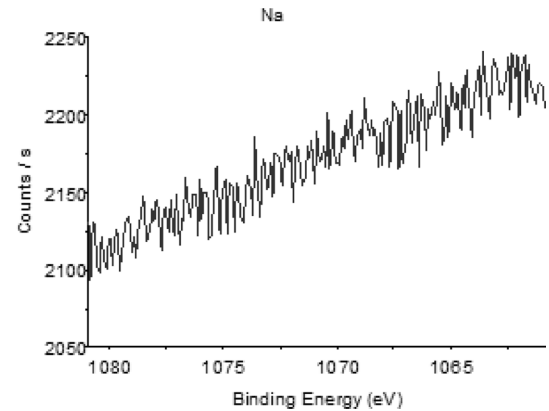


Fig. 3. Na1s core level XPS spectra of the surface SiO₂ passivation layer.

주로 Al-1%Si 박막배선의 상부 PSG/SiO₂ 두 보호막 사이의 계면을 중심으로 이루어지는 것으로 보인다. 이러한 SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서 Na 불순물 저온 게터링은 편석형 게터링에 의한 것으로 사료된다. 편석형 게터링은 500°C 이하 저온에서도 충분히 일어날 수 있으며, 주로 계면과 생성결함(grown-in defects) 등이 게터링 센터로 많이 일어나는 것으로 보고되고 있다 [1-5].

그림 4(a)와 그림4(b)는 PSG 보호막 상부 표면 SiO₂ 보호막에서 측정된 Si2p 및 O1s core level XPS 스펙트럼 분석 결과로써 결합에너지 102.72 eV의 Si2p core level 피크와 결합에너지 532.24eV의 O1s core level 피크를 각각 나타낸다. 또한 XPS 정량분석 결과 Si와 O 성분 원소의 원자 농도(atomic concentration) 비율은 28.42%와 50.7%로 각각 나타났다. 이는 SiO₂ 보호막 내의 Si와 O 성분 원소의 SiO₂ 화학적 결합상태임을 나타낸다 [11]. SiO₂/PSG/

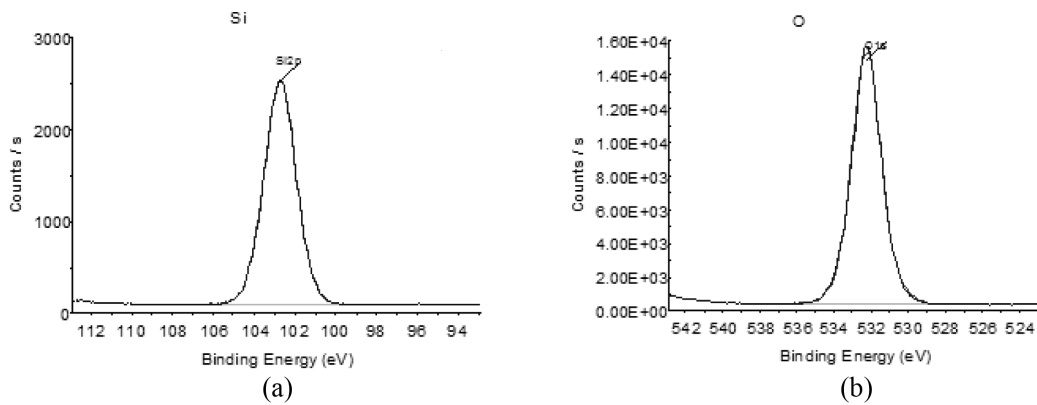


Fig. 4. (a) Si2p and (b) O1s core level XPS spectra of the surface SiO₂ passivation layer.

SiO₂ 보호막은 모두 기본적으로 Si와 O 성분 원소의 SiO₂ 화학적 결합상태를 유지함으로써 보호막 간 조성 및 결합구조의 급격한 변화가 없어 응력 완화를 기대할 수 있으며 Na 등 알칼리 불순물 게터링 효과를 높이는 데 적합할 것으로 사료된다. Al-1%Si 박막배선 내에서 Na 피크는 검출되지 않은 것으로 판단되며 이는 PSG/SiO₂ 보호막에 의한 게터링 효과 때문인 것으로 사료된다. Al-1%Si 박막 배선에서 Na 성분 원소의 약한 피크들은 SIMS 분석상의 noise로 사료되며, Na 성분 피크가 Al-1%Si 박막 층에서 완전한 감소를 나타내는 것은 dynamic SIMS 분석에서 이온빔에 의한 스퍼터 에칭, 분석영역 그리고 표면구조 등 원인에 기인한 것으로 사료된다. 미세 적층 전자소자 제조과정에서 Na 등 알칼리 불순물은 외부환경 노출 시 오염될 수 있으며, 층간 확산이동 등 요인으로 소자의 성능 저하에 치명적인 원인으로 작용할 수 있다 [6]. SiO₂/PSG/SiO₂ 보호막은 보호막 간 응력 완화 및 알칼리 불순물에 대한 게터링 효과를 통하여 미세 전자소자의 특성 향상을 위해 적합할 것으로 사료된다.

그림 5는 O₂⁺ 이온빔에 의한 dynamic SIMS 깊이 분포측정 분석결과로써 SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서 SiO₂/TEOS/SiO₂ 보호막 층 및 Al-1%Si 박막 층 내부의 질량 27 알루미늄(Al)과 질량 30 실리콘(Si) 성분 원소의 깊이에 따른 성분분포를 보여준다. SiO₂/TEOS/SiO₂ 보호막 층 및 Al-1%Si 박막 층의 형성을 확인할 수 있으며, SiO₂/PSG/SiO₂ 보호막 층에서와 마찬가지로 SiO₂/TEOS/SiO₂ 보호막은 모두 실리콘과 산소가 주성분으로 각 보호막 층간의 계면은 Si 원소의 성분 분포에서는 명확히 구별되어 나타나지 않음을 보여준다. O₂⁺ 이온빔에 의한 평균 스퍼터율은 SiO₂(300 nm)/TEOS(300 nm)/SiO₂(300 nm) 보호막 층에서 약 2.4 nm/sec 그리고

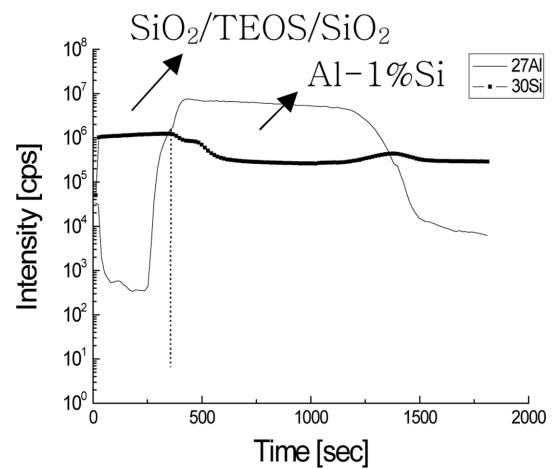


Fig. 5. Al and Si SIMS depth profile of SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si multilevel thin films.

Al-1%Si(700 nm) 박막 층에서 약 0.7 nm/sec 정도로 나타났다.

그림 6은 O₂⁺ 이온빔에 의한 dynamic SIMS 깊이 분포측정 분석결과로써 SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서 질량 23 sodium(Na)와 질량 27 알루미늄(Al) 성분 원소의 깊이에 따른 성분분포를 나타낸다. Na는 Al-1%Si 박막배선의 상부 두 보호막 TEOS/SiO₂에서 계면을 중심으로 두 보호막 전체에서 나타났으며, SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서와 마찬가지로 TEOS 보호막 상부 SiO₂ 보호막에서는 Na 피크가 검출되지 않은 것으로 판단된다. 그림 2의 SiO₂/PSG/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서 보다 Na peak intensity는 크게 나타났으나 이는 SIMS 분석상의 background peak intensity 차이에 의한 것으로 사료된다. 따라서 300°C 저온에서 5시간 동안 대기 중에서 열처리한 SiO₂/TEOS/SiO₂/Al-1%Si 적층 박막에서 Na 불순물 게터링은 dynamic SIMS 분석 결과 주로 Al-1%Si 박막배선의 상부 TEOS/

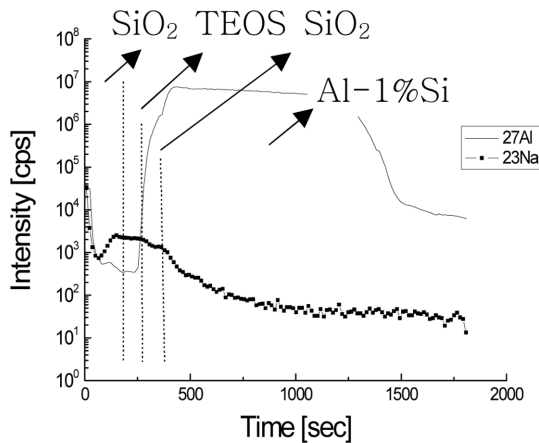


Fig. 6. Al and Na SIMS depth profile of $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ multilevel thin films.

SiO_2 보호막 계면을 중심으로 두 보호막에서 이루어지는 것으로 사료된다. Al-1%Si 박막패션 내에서 Na 피크는 검출되지 않은 것으로 판단되며 이는 TEOS/ SiO_2 보호막에서의 Na 불순물 게터링에 의한 것으로 사료된다. 미량의 존재에도 Na 등 알칼리 불순물들은 소자 성능에 악영향을 미치며 이들 불순물들을 소자활성영역에서 제거하기 위한 제조과정 개선 및 게터링 효과 향상이 필요하다고 생각한다.

$\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 및 $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 적층 박막내의 Na 불순물 저온 게터링은 dynamic SIMS 분석 결과 두 적층 박막 모두 Al-1%Si 박막패션의 상부 PSG/ SiO_2 및 TEOS/ SiO_2 보호막에서 주로 계면 등 결함을 게터링 센터로 500°C 이하 저온에서 이루어지는 편석형 게터링(segregation type gettering)에 의한 것으로 판단된다. internal gettering과 같은 완화형 게터링(relaxation type gettering)은 일반적으로 1000°C 이상의 높은 온도에서 이루어지는 것으로 알려져 있다 [6]. 게터링 메커니즘의 명확한 규명을 위해서는 미량으로 존재하는 불순물들의 존재를 확인하고, 농도 측정 및 불순물 성분 원소의 화학적 결합상태 등을 분석하는 것이 요구 되지만 현재의 분석 장비 분해능(resolution)이 이에 미치지 못하는 실정이다 [1]. 게터링에 관한 연구는 주로 internal gettering과 관련된 완화형 게터링에 관한 것들이 많이 보고되었으며, 편석형 게터링은 최근 500°C 이하 저온에서 계면과 생성결함 등 결함을 게터링 센터로 게터링이 일어나는 것이 확인되면서 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-5]. 적층 미세 전자소자에서 미량의 존재에도 층간 확산이동 등 요인으로 소자 성능에 치명적인 악영향을 미치는 것으로 알려진 Na 등 알칼리 불순물에 관한 연구는 발표된 것이 많지 않다고 사

료된다[6]. $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 및 $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 적층 박막내의 Na 불순물 저온 게터링에 관한 본 연구가 적층 미세 전자소자 초고집적 회로 기술에서 게터링 특성 이해 및 게터링 메커니즘 규명에 도움이 될 것으로 기대한다.

4. 결 론

반도체 초고집적 회로 기술에서 불순물 게터링 즉 소자활성영역에서의 불활성화에 관한 많은 연구에도 미량으로 존재하는 불순물들의 농도 측정 그리고 미세 구조적 결합 분석에 미치지 못하는 분석 장비의 분해능 한계 등 이유로 게터링 메커니즘은 아직까지 명확히 밝혀지지 않고 있는 실정이다. 일반적으로 완화형 게터링(relaxation type gettering)은 1000°C 이상의 높은 온도에서 이루어지며, 편석형 게터링(segregation type gettering)은 계면 등 결함을 게터링 센터로 500°C 이하의 저온에서 이루어지는 것이 최근 확인되면서 많은 연구가 진행되고 있다. $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 및 $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2/\text{Al-1\%Si}$ 적층 박막내의 Na 불순물 게터링은 dynamic SIMS 분석 결과 PSG/ SiO_2 및 TEOS/ SiO_2 두 보호막에서 주로 계면 등 결함을 게터링 센터로 저온에서 이루어지는 편석형 게터링(segregation type gettering)에 의한 것으로 판단된다. $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2$ 및 $\text{SiO}_2/\text{TEOS}/\text{SiO}_2$ 두 적층 보호막은 모두 유사한 화학적 조성과 결합구조를 갖고 있으며 보호막 간 응력 완화 및 알칼리 불순물에 대한 게터링 효과를 통하여 미세 전자소자의 특성 향상을 위해 적합할 것으로 사료된다. 제조 과정 또는 외부환경 노출 시 오염될 수 있는 불순물들을 소자활성영역에서 제거하는 게터링 특성에 관한 이해는 전자소자의 성능 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2017년도 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었음.

References

- [1] G. Kissinger, D. Kot, M. Klingsporn, M. Schubert, A. Sattler, and T. Muller, Investigation of the copper gettering mechanism of oxide precipitates in silicon, ESC J. Solid State Sci. and Technol., 4 (2015) N124-N129.
- [2] M. Al-Amin and J. D. Murphy, Increasing minority carrier lifetime in as-grown multicrystalline silicon by low temperature internal gettering, J. Appl.

- Phys. 119 (2016) 235704.
- [3] M. Al-Amin and J. D. Murphy, Passivation effects on low-temperature gettering in multicrystalline silicon, *IEEE J. Photovoltaics*, 7 (2017) 68-77.
- [4] M. Al-Amin and J. D. Murphy, Combining low-temperature gettering with phosphorous diffusion gettering for improved multicrystalline silicon, *IEEE J. Photovoltaics*, 7 (2017) 1519-1527.
- [5] H. Zhu, X. Yu, X. Zhu, Y. Wu, J. He, J. Vanhellemont, D. Yang, Low temperature iron gettering by grown-in defects in p-type Czochralski silicon, *Superlattices and Microstructures* 99 (2016) 192-196.
- [6] K. S. Choe, Silicon intrinsic gettering technology: understanding and practice, *J. Kor. Mater. Res.*, 14 (2004) 9-12.
- [7] M. H. Lee, *Thin Film Technology*, Dooyangsa, Seoul (2009) 188.
- [8] C. Hang, Y. Tian, C. Wang, N. Wang, Ultrasonic bondability and antioxidation property of Ti/Cu/TaN/Ag multi-layers on Si substrate, *Thin Solid Films*, 524
- [9] J. Walls, VG Ionex, *Methods of Surface Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge (1987) 36-40.
- [10] J. F. O'Hanlon, *A User's Guide to Vacuum Technology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1989) 454.
- [11] C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis, and J. F. Moulder, *Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy*, G. E. Muilenberg, Perkin-Elmer Corp., Minnesota (1978) 52.