

論文98-35D-7-10

과잉 Ti 성분의 티탄산 바륨과 실리콘 산화막으로 구성된 안티퓨즈 (Antifuse with Ti-rich Barium Titanate Film and Silicon Oxide Film)

李在成*, 李龍鉉**

(Jae Sung Lee and Yong Hyun Lee)

요 약

본 논문에서는 낮은 구동 전압에서 동작하고 안정된 ON 및 OFF 상태를 갖는 안티퓨즈를 제조하였다. 제조된 안티퓨즈는 Al/BaTi₂O₃/SiO₂/TiW-실리사이드의 구조를 갖는다. 안티퓨즈를 구성하는 하층 금속과 금속층간 절연물에 대한 분석을 통해 그 물성 및 전기적 특성을 각각 조사하였다. 하층 전극으로 사용된 TiW-실리사이드의 표면은 평균 높낮이가 10×10^{μm}²의 면적에서 11Å으로 매우 평탄하며, 표면위에 제조되는 SiO₂의 물성을 안정되게 유지시켰다. 이중 절연물을 구성하는 BaTi₂O₃는 평균 절연 파괴 전압이 평균 2.5MV/cm로 매우 낮았다. 제조된 안티퓨즈의 절연 파괴 전압은 BaTi₂O₃에 의해 낮출 수 있었으며, 누설 전류는 SiO₂에 의해 낮은 수치를 유지할 수 있었다. 이중 절연물의 두께가 220Å이고 면적이 19.6X10⁻⁶cm² 인 안티퓨즈에서 1nA이하의 낮은 누설 전류, 약 9.1V의 프로그램 전압과 약 46Ω/μm²의 ON-저항을 얻을 수 있었다.

Abstract

This paper is focused on the fabrication of reliable novel antifuse, which could operate at low voltage along with the improvement in OFF and ON-state properties. The fabricated antifuse consists of Al/BaTi₂O₃/SiO₂/TiW-silicide structure. Through the systematic analyses for bottom metal and the intermetallic insulator, material and electric properties were investigated. TiW-silicide as the bottom electrode had smooth surface with average roughness of 11Å at 10X10^{μm}² and was being kept as-deposited SiO₂ film stable. Amorphous BaTi₂O₃ film as the another insulator was chosen because of its low breakdown strength(2.5MV/cm). Breakdown voltage of antifuse is remarkably reduced by using BaTi₂O₃ film, and leakage current of that maintained low level due to the SiO₂ film. Low ON-resistance (46Ω/μm²) and low programming voltage(9.1V) can be obtained in theses antifuses with 220Å double insulator layer and 19.6X10⁻⁶cm² area, while keeping sufficient OFF-state reliability(less than 1nA).

I. 서 론

안티퓨즈(antifuse)는 전극/절연물/전극의 구조에서 절연물의 절연 파괴를 이용하여 두 전극을 연결시키는 스위치 역할을 하는 소자이다. 즉, 두 전극은 절연물의 절연 파괴 전에는 개방된 상태(off-state)이며, 절연 파괴 후에는 단락된 상태(on-state)가 된다. 안티퓨즈는 Field Programmable Gate Array(FPGA)에서 논리 블록들을 선택적으로 연결하는 프로그램 스위치

* 正會員, 威德大學校 情報通信工學科

(Dept. of Computer & Communication Eng., Uiduk Univ.)

** 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

※ 본 연구는 한국과학재단 핵심 전문 연구비(95-0100-001-2)지원에 의한 것임.)

接受日字: 1997年6月12日, 수정완료일: 1998年6月25日

로 가장 많이 이용되고 있으며^[1-3], 빠른 속도와 높은 집적도의 FPGA를 구현하고자 새로운 물질 및 구조 개발에 많은 연구가 현재 진행 중에 있다.

절연물의 절연 파괴 전압을 안티퓨즈의 프로그래밍 전압이라 하는데, 집적화를 위해서는 절연물의 두께를 감소시켜 그 수치를 가급적 낮추는 것이 바람직하다. 박막의 절연물을 사용하게 되면 프로그래밍 전압 뿐 아니라 두 전극 사이가 짧아지기 때문에 프로그램 후 저항(ON-저항)을 매우 낮게 줄일 수 있다. 그러나 안티퓨즈에서는 박막의 절연물이 다결정 실리콘이나 금속과 같은 전극 위에 형성되므로 전극의 표면 거칠기에 따라 절연물의 물성이 바뀌게 되어 안티퓨즈의 신뢰성을 저하시킨다. 또한, 박막의 절연물은 안티퓨즈의 프로그램 전 상태(OFF-상태) 정전 용량을 증가시켜 응용 회로의 동작속도를 느리게 하는 원인이 된다^[2,3]. 그러므로 우수한 안티퓨즈를 제조하기 위해서는 이들 각 특성에 대한 상호 타협(trade-off)이 필요하다. 기존에 연구된 안티퓨즈는 그 구성물질에 따라 9~11V의 프로그램 전압과 50Ω이하의 프로그램 후 저항(ON-저항)을 갖는다. 발표된 안티퓨즈 구조에 대한 프로그램 전압 및 ON-저항을 표 1에 정리하였다^[3,4,5].

표 1. 발표된 안티퓨즈에 대한 사양
Table 1. Specifications for the reported antifuses.

Company	Kawasaki Steel Co.[3]	Actel Co.[4]	QuickLogic Co.[5]
Structure	W ₆₁ x/SiN _x (100Å)/TiN	W/SiO ₂ (120Å)/W/Ti	Al/TiW/a-Si (1500Å)/Al
Programming Voltage(V)	9.3	10	10.6
ON-Resistance (Ω/μm ²)	< 50	40	<50

본 연구에서는 낮은 프로그래밍 전압과 안정된 OFF-상태를 동시에 유지할 수 있는 안티퓨즈를 제조하였다. 전기적 특성이 다른 두 절연물로 새로운 안티퓨즈 구성 물질을 개발하였으며, 그 물성 및 전기적 특성을 각각 조사하였다. 박막의 절연물로는 파인 Ti 성분을 갖는 비정질 티탄산 바륨(BaTi₂O₃)과 실리콘 산화막(SiO₂)의 이중막을 사용하였으며, 두 전극으로는 알루미늄과 TiW-실리사이드를 각각 사용하였다. 안티퓨즈의 전극으로 TiW-실리사이드를 사용함으로

써 TiW 및 TiN 등의 장벽 금속(barrier metal)을 사용할 때 생성될 수 있는 원하지 않는 Ti-O 산화층의 형성을 막아주어 안티퓨즈의 전기적 특성을 개선할 수 있다^[6].

II. 실험 방법

그림 1은 안티퓨즈의 제조 공정이다. 비저항이 6-9 Ω.cm인 p 형의 실리콘 웨이퍼 위에 실리콘 산화막을 PECVD법으로 약 5000Å을 형성하였다. PECVD 실리콘 산화막층은 실리콘 웨이퍼와 안티퓨즈와의 절연을 위해 사용되었다. 안티퓨즈의 하층 전극으로 사용될 TiW(80 at.% W, 20 at.% Ti) 를 DC 스퍼터링법으로 1000Å을 형성 시켰다. 저온 CVD법으로 약 5000Å의 실리콘 산화막을 증착한 후, 사진 식각법을 사용하여 실리콘 산화막을 부분적으로 제거하여 안티퓨즈 영역을 형성하였다. TiW-실리사이드의 형성을 위해 약 200Å의 비정질 실리콘을 RF 스퍼터링법으로 TiW위에 형성한 후, 10⁻⁶ Torr의 진공속에서 2 단계 furnace 열처리하였다. 시료를 습식 세척한 후, 이중 절연막의 형성을 위해 RF스퍼터링이 진행되었다. SiO₂를 TiW-실리사이드위에 형성한 후, 열처리를 산소 분위기의 500°C에서 행하였으며, 연속적으로 BaTi₂O₃의 형성이 이루어졌다. 이러한 공정들은 절연물간 안정된 계면특성을 얻기 위해 같은 노(furnace) 안에서 대기 중 노출이 없이 진행되었다. BaTi₂O₃는 다결정 BaTiO₃ 원재료를 스퍼터링하여 제조하였다. BaTiO₃의 구성하는 원소들 중 Ti가 Ba보다 가볍기 때문에 압력 및 기판과 타겟의 거리를 조절함으로써 BaTi₂O₃의 조성을 얻을 수 있다. 그림 2는 절연물 제조에 사용된 RF 스퍼터의 개략도이다. 하층 전극의 접촉(contact) 부분을 형성 한 후 전극으로 사용될 Al(1.0 wt. % Si, 0.5 wt. % Cu)을 증착하여 안티퓨즈를 완성하였다. 안티퓨즈의 단면적은 19.6X 10⁻⁶cm²이었다. 제조된 물질의 물성은 X-ray diffraction(XRD), Auger electron spectroscopy (AES) 및 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)로 각각 분석되었다. AES와 XPS를 위해 사용된 표준 시편은 각각 carbon과 gold였다. TiW-실리사이드의 표면 형태(morphology)는 atomic force spectroscopy(AFM)으로 분석되었다. 제조된 안티퓨즈의 기본적 전기적 특성은 HP 4145B로 이루어졌다.

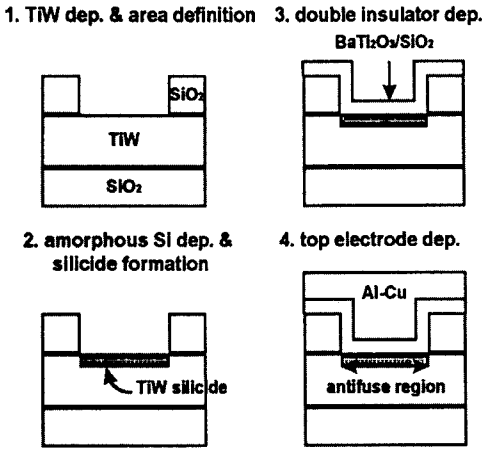


그림 1. 안티퓨즈의 제조 공정
Fig. 1. Schematic cross sections of antifuse process flow.

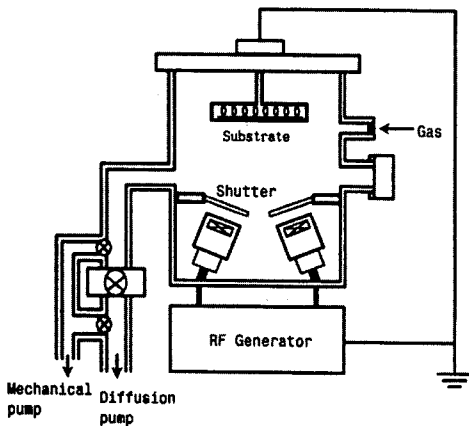


그림 2. RF 스퍼터의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of RF sputter system.

III. 실험 결과 및 고찰

1. TiW-실리사이드의 물성

그림 3은 열처리 온도 변화에 따른 TiW-실리사이드의 형성 과정을 보여주는 XRD 결과이다. 그림 3a)는 열처리 이전, 그림 3b)와 3c)는 450°C/750°C와 550°C/750°C에서 각각 2 단계 열처리된 결과이다. 제조된 실리사이드 성분은 대부분이 TiSi와 (Ti_{0.6}W_{0.4})Si₂이었으며, TiSi₂ 및 WSi₂ 결합은 발견되지않았다. 실리사이드 반응을 하지 않은 실리콘을 건식 식각 및 습식 세척을 통해 제거한 후, 실리사이드 표면의 면 저항을

측정하였다. 실리사이드의 면 저항은 2~3Ω/□ 이었다.

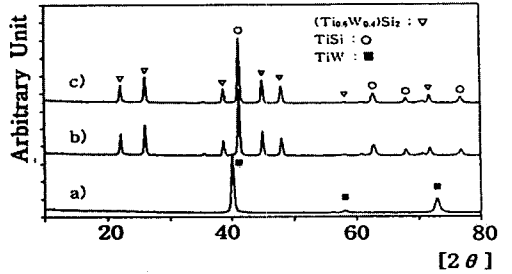


그림 3. 2 단계 열처리 온도에 따른 TiW-실리사이드의 XRD 분석
(a) 열처리 이전 (b) 450°C/750°C (c) 550°C/750°C
Fig. 3. XRD analysis for TiW-silicide depending on 2-step annealing temperature.
(a) before annealing (b) 450°C/750°C (c) 550°C/750°C

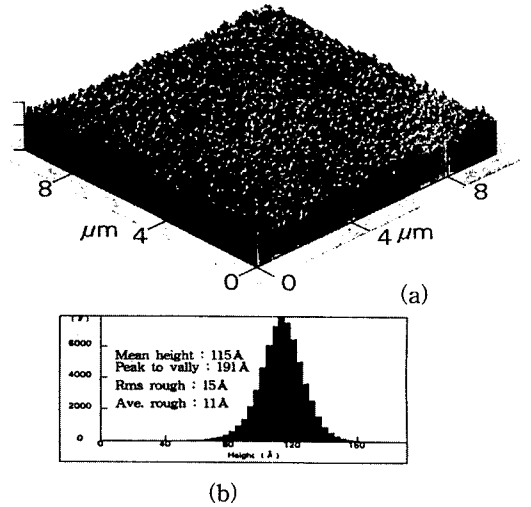
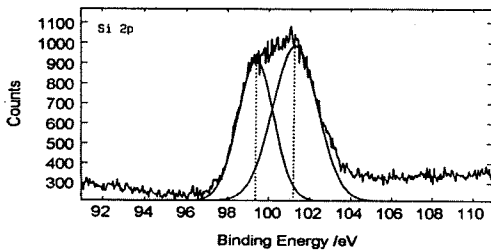


그림 4. 450°C/750°C에서 제조된 TiW-실리사이드의 표면 분석
(a) 표면 상태, (b) 표면 높낮이 분포
Fig. 4. Surface analysis of TiW-silicide formed at 450°C/750°C annealing.
(a) surface morphology, (b) roughness distribution

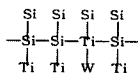
그림 4는 450°C/750°C에서 제조된 TiW-실리사이드의 표면 상태를 나타내는 AFM 분석 결과이다. 그림 4a)와 4b)는 TiW-실리사이드의 표면 상태와 표면 높낮이(roughness)의 분포를 각각 나타낸다. AFM을

사용하여 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 의 시료 면적에서 256X256개의 측정 점을 통해 조사된 평균 표면 높낮이는 11Å로 양호하였다. 열처리 온도가 비교적 낮았기 때문에 균질한 표면을 얻을 수 있었다. 이러한 균질한 표면 상태는 금속층간 절연물의 물성을 개선시킬 수 있다.

TiW-실리사이드의 표면을 세척한 후 표면 원소들의 결합 상태를 조사하였다. 그림 5a)는 Si의 2p껍데 전자의 결합 상태를 보여주는 XPS 분석이며, 그림 5b)는 유추되는 표면 결합 상태이다. 그림 5a)에 나타난 스펙트럼은 두 성분으로 분리할 수 있다. 즉, 99.0~99.5eV와 101.3eV에서 특정 결합이 나타나는데, 이는 실리콘-실리콘 결합과 실리콘-금속 결합을 각각 나타낸다. 실리콘-산소의 결합(103.3eV)은 나타나지 않는다^[7]. TiW-실리사이드의 표면에는 실리사이드가 진행되지 않은 실리콘층이 존재하는 것으로 생각되며, 이러한 실리콘들은 실리콘 산화막이 형성되는 동안 산화되어 계면 특성을 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 5. TiW-실리사이드 표면의 (a) Si 2p XPS 분석과 (b) 유추된 Si 원자의 결합 상태

Fig. 5. (a) XPS analysis of Si 2p and (b) model of Si bonds on TiW-silicide surface.

2. 금속층간 절연물의 형성

금속/절연물/금속 구조의 안티퓨즈에서 금속층간 절연물은 누설 전류가 적어야 하며 낮은 절연 파괴 전압을 가져야 한다. 그리고 응용 회로의 빠른 신호 전달을 위해서는 프로그램 전 정전 용량이 적어야 한다^[3,5]. 본 연구에서 사용된 이중 절연물 중에서 SiO₂는 양질을 유지하여 누설 전류 억제 효과를 가지며, BaTi₂O₃은 상층 금속으로부터 박막의 SiO₂를 보호하

면서 안티퓨즈의 낮은 절연 파괴 전압을 유도할 목적으로 각각 사용되었다. 그리고 이러한 이중 절연물을 사용함으로써 정전 용량을 줄일 수 있다. 절연물에 강한 전계가 인가될 때 내부 결함부근에서 많은 전류가 흘러 주울(joule)열에 의한 절연물의 국부적 용융이 발생하게 된다^[8]. 이러한 현상에 의해 절연 파괴된 절연물 내에는 두 전극을 잇는 전도성 다결정 통로가 생기는데 이를 필라멘트(filament)라 한다. 필라멘트의 저항이 안티퓨즈의 ON-저항을 결정하게 된다. 필라멘트 형성 시 낮은 전력 소모를 갖기 위해서는 절연물의 용점이 낮은 것이 유리할 것으로 생각된다. 다결정 형태의 과잉 Ti 성분을 갖는 BaTi₂O₃의 용점은 1317~1600°C로 알려져 있다^[9]. 표 2는 제조된 비정질 BaTi₂O₃와 BaTi₂O₃에 대한 유전 상수, 굴절률, 및 절연 파괴 강도를 각각 나타내고 있다. Ti 성분이 많을수록 막의 절연 특성이 저하되고 있다. BaTi₂O₃의 유전 상수가 약 10.8이므로 SiO₂ 값에 비하면 높지만 그 두께를 고려하여 안티퓨즈에 응용하면 정전 용량의 감소 효과를 얻을 수 있다.

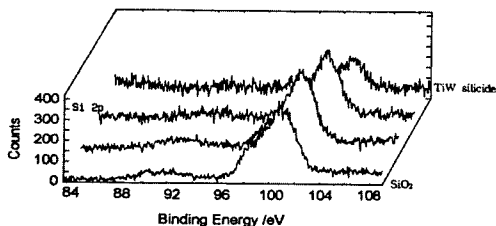
표 2. BaTiO₃와 BaTi₂O₃에 대한 유전 특성
Table 2. Dielectric properties for BaTiO₃ and BaTi₂O₃.

	composition (Ba:Ti:O)	dielectric constant (at 100kHz)	refractive index (λ = 6328 Å)	dielectric strength (MV/cm)
BaTiO ₃	1:1:3	14.51	1.98	3.00
BaTi ₂ O ₃	1:2:3	10.80	1.93	2.50

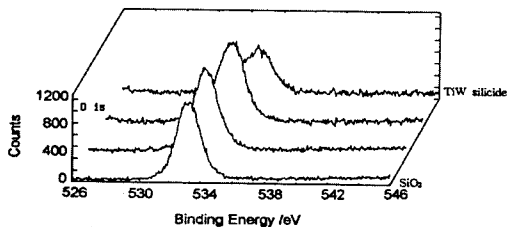
3. TiW-실리사이드와 SiO₂의 계면 특성

그림 6은 SiO₂와 TiW-실리사이드의 계면에서 Si 및 O의 결합 상태를 나타낸다. 그림 6a)와 6b)는 각각 Si2p와 O1s에 대한 XPS분석이다. 그림 6a)로부터 계면 부근에서 Si는 Si-O(103.3eV), Si-Si (99.0~99.5eV) 및 Si-Ti-W(101.3eV) 형태로 동시에 존재하다가 깊이 방향에 따라 Si-Ti-W 결합성분이 많이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 그림 6b)에서 나타난 O는 계면 전체에 걸쳐 Si-O결합(533.0eV)만을 갖는다. Ti-O 및 W-O와 같은 금속 산화물(530.6eV)의 형성을 TiW-실리사이드와 SiO₂의 계면에서 발견할 수 없었다. 이러한 현상은 SiO₂와 TiW-실리사이드 계면에서 실리사이드가 금속 산화물의 형성을 효과적으로 억제해주기 때문으로 생각된다. 실리사이드가 진행되지 않은 Si원소들은 SiO₂가 증착되는

동안 산화되어 Si-O의 결합을 갖게 된다.



(a)



(a)

그림 6. SiO₂/TiW-실리사이드 계면에서 (a) Si 2p 및 (b) O 1s XPS 분석

Fig. 6. XPS analysis for (a) Si 2p and (b) O 1s at SiO₂/TiW-silicide interface.

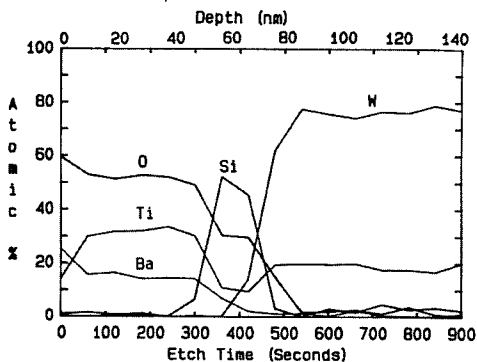


그림 7. BaTi₂O₃/SiO₂/TiW-실리사이드 구조의 깊이 방향 AES 성분 분석

Fig. 7. AES depth profile for BaTi₂O₃/SiO₂/TiW-silicide system.

그림 7은 BaTi₂O₃/SiO₂/TiW-실리사이드 구조의 깊이 방향에 따른 조성 변화를 나타내는 AES 분석 결과이다. BaTi₂O₃의 조성은 정확하게 나타났으나 SiO₂의 조성에서는 Si의 양이 많이 나타났다. 이는 실리사이드 표면에 존재하는 실리사이드되지 않은 Si 원소와 BaTi₂O₃에 의한 O의 소비로 발생한 것이라 생각되나, 정확한 원인은 분석 중에 있다. TiW-실리사

이드는 TiW 표면 근처에서 얇게 형성되었기 때문에 AES 분석에 사용된 Ar 에칭률로서는 그 두께를 정확하게 분석하기 어려웠다. 그러나 앞의 XPS 표면 분석 결과에서는 확인 할 수가 있었다.

4. 프로그램 특성

그림 8은 (a)BaTi₂O₃와 (b)BaTiO₃를 각각 포함하는 안티퓨즈의 전압-전류 특성이다. 이중 절연물을 구성하는 두 절연물의 두께는 각각 110Å로 일정하였다. 과잉 Ti 조성을 갖는 BaTi₂O₃을 포함한 이중 절연물이 보다 낮은 절연파괴 전압을 갖는다. BaTiO₃/SiO₂의 절연 파괴 강도는 약 4.32MV/cm인 반면, BaTi₂O₃/SiO₂는 약 3.86MV/cm로 낮게 나타났다. 그리고 두 경우 누설 전류는 모두 1nA이하로 적게 흘렀다.

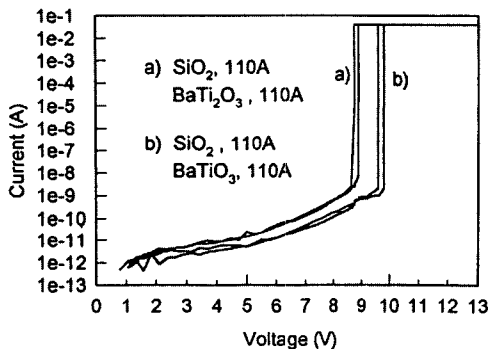


그림 8. (a) BaTi₂O₃/SiO₂와 (b) BaTiO₃/SiO₂로 구성된 안티퓨즈의 전류-전압 특성

Fig. 8. IV characteristics of antifuses with (a) BaTi₂O₃/SiO₂ and (b) BaTiO₃/SiO₂.

그림 9는 BaTi₂O₃/SiO₂ 및 BaTiO₃/SiO₂의 조성을 각각 갖는 안티퓨즈의 절연 파괴 전압 분포이다. Ti 성분이 많은 경우가 낮은 절연파괴 전압을 나타낸다. 40개의 안티퓨즈에대한 특성 분석 결과 가장 낮은 값은 7.0V 이었으며, 평균값은 9.1V 였다. 그림 10은 BaTi₂O₃/SiO₂ 로 구성된 안티퓨즈의 단위 면적당 ON-저항 분포이다. 측정을 위해 사용된 정전압원은 12V의 크기와 10msec.의 폭을 갖는 펄스 신호였다. ON-저항은 측정된 저항 값에서 하층 TiW-실리사이드 전극에 대한 저항을 제거한 값이다. 평균 ON-저항 값은 46Ω/μm²으로 매우 낮았다. 이처럼 절연물의 절연 파괴 후의 저항 값이 낮은 것은 절연물의 두께가 얇아 두 전극의 거리가 짧을 뿐 아니라, BaTi₂O₃에

포함된 Ti 및 Ba이 필라멘트에 포함되어 있어 필라멘트의 저항을 더욱 감소 시켰기 때문으로 생각된다.

그림 11은 BaTi₂O₃(110Å)/SiO₂(110Å)으로 구성된 안티퓨즈의 주파수 특성과 그 주파수 모델을 각각 나타낸다. BaTi₂O₃의 정전용량(C_{BT0})와 그 저항 성분 R의 병렬 연결은 SiO₂에 의한 정전용량(C_{OX})과 직렬 연결되어 있다. SiO₂의 저항 성분은 BaTi₂O₃에 비해 매우 크다고 가정하였다. 제조된 안티퓨즈의 정전용량은 20KHz이하의 주파수에서 변화 없다. 그러나 약 20KHz의 입력 주파수에서 정전용량은 낮은 값으로 떨어져 그 값을 그 이상의 높은 주파수에서도 계속 유지하고 있다. 이 결과로부터 제조된 안티퓨즈의 그림 11과 같은 모델은 20KHz의 입력 주파수에서부터 적용이 가능함을 알 수 있다.

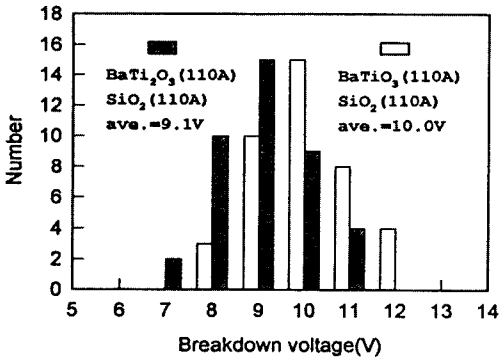


그림 9. 안티퓨즈의 절연파괴 전압 분포
Fig. 9. Distribution of breakdown voltages.

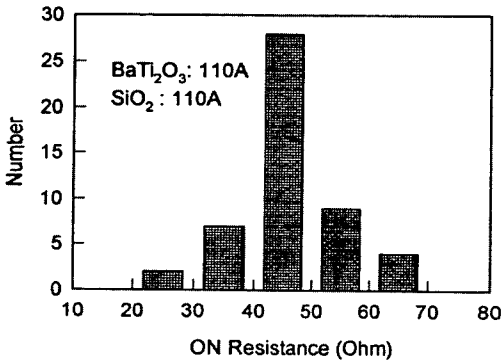


그림 10. 안티퓨즈의 ON-저항 분포
Fig. 10. Distribution of ON-resistances for antifuses.

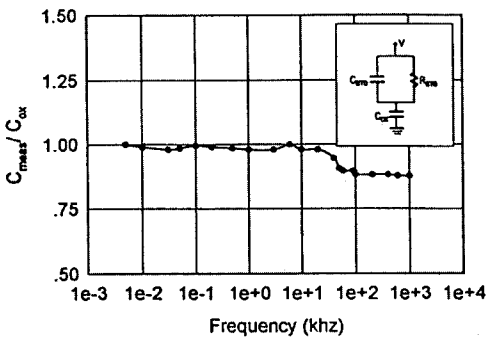


그림 11. BaTi₂O₃(110Å)/SiO₂(110Å)으로 구성된 안티퓨즈의 주파수 특성과 그 주파수 모델
Fig. 11. The measured capacitance of BaTi₂O₃(110Å)/SiO₂(110Å) antifuse as a function of frequency and the equivalent circuit of the antifuse structure.

IV. 결론

낮은 프로그램 전압과 신뢰성 있는 ON, OFF-상태를 동시에 가질 수 있는 새로운 형태의 금속/절연물/금속 구조의 안티퓨즈를 제조하였다. 하층 전극 금속으로 사용된 TiW-실리사이드는 표면이 평탄하여 안정된 물성을 갖는 절연물의 형성이 용이하였다. 또한 산화물과의 접촉에서 생길 수 있는 원하지 않는 금속 산화물의 형성이 억제되기 때문에 산화물과의 안정된 계면 특성을 갖을 수 있었다. 절연물로는 비정질 형태의 BaTi₂O₃/SiO₂를 사용하였으며, 상층 전극 금속으로는 Al을 사용하였다. 절연 파괴 강도가 낮은 BaTi₂O₃을 사용함으로써 안티퓨즈의 프로그램 전압을 낮출 수 있었으며, 양질의 SiO₂ 로써 안티퓨즈의 신뢰성 있는 OFF-상태를 유지시킬 수 있다. BaTi₂O₃(110Å)/SiO₂(110Å)인 이중 절연물로 제조된 안티퓨즈에서 OF-상태 누설 전류는 1nA이하이었으며, 프로그램 전압 및 ON-저항은 각각 9.1V 및 46Ω/μm²으로 매우 낮았다. 제조된 Al/BaTi₂O₃/SiO₂/TiW-실리사이드 구조의 안티퓨즈는 신뢰성 있는 ON 및 OFF-상태를 동시에 갖으면서 프로그램 전압을 10V이하로 낮출 수 있었다. 본 연구의 결과들은 표 1에서 언급된 결과들과 비교하여 경쟁력을 가질 수 있다고 생각된다.

참고 문헌

[1] E. Hamdy, J. McCollum, S. Chen, S. Chiang, S. Eltoukhy, J. Chang, T. Speers, and A. Moshen, "Dielectric based antifuses

- for logic and memory ICs”, *IEEE, IEDM Tech, Dig.*, p. 780, 1988.
- [2] C. Hu, “Interconnection devices for field programmable gate arrays”, *IEEE, IEDM, Tech, Dig.*, p. 591, 1992.
- [3] Y. Tamura and H. Shinriki, “Most promising metal-to-metal antifuse based from 10nm thick p-SiN film for high density and high speed FPGA application”, *IEEE, IEDM, Tech, Dig.*, p. 285, 1994.
- [4] G. Zhang, C. Hu, P. Yu, S. Chiang, and E. Hamdy, “Metal-to-Metal Antifuses with Very Thin Dilicon Dioxide Films”, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 15, no. 8, p. 310, 1994.
- [5] V. Jain, S. R. Nariani, C. Boardman, D. Chan, K. Y. Chang, K. Gordon, and R. Wong, “Amorphous Silicon Anti-Fuse for High Speed FPGA Application”, *IEEE, IEDM, Tech, Dig.*, p. 111, 1992.
- [6] H. H. Park, J. S. Lee, S. Nahm, and Y. H. Lee, “Investigation on the interfacial reaction of $\text{SiO}_2/\text{Ti}_{0.1}\text{W}_{0.9}$ system”, *Journal of non-crystalline solids*, vol.187, p.149, 1995.
- [7] Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy, Perkin-Elmer Co. 1992.
- [8] G. Zhang, C. Hu, P. Yu, S. Chiang, S. Eltoukhy, and E. Handy, “Reliable metal-to-metal oxide antifuses”, *IEDM*. P. 281, 1994.
- [9] D. E. Rose and R. Rey, “Phase equilibria in the system BaO-TiO_2 ”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 38, no. 3, p. 102, 1955.

 저 자 소 개

李在成(正會員) 第32卷 A編 11號 參照

현재 위덕대학교 정보통신공학과 전
임강사

李龍鉉(正會員) 第31卷 A編 8號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 교
수