

論文97-34D-2-5

## 3차원 산화 시뮬레이터 개발

## (Development of Three-dimensional Thermal Oxidation Simulator)

李濟熙\*, 尹相鎬\*, 元太映\*

(Jaehye Lee, Sangho Yoon, and Taeyoung Won)

## 요 약

본 논문에서는 반도체 소자 제조 공정 중, 열산화 공정 시에 발생하는 스트레스에 따른 산화막의 3차원적 거동을 시뮬레이션하였다. 이를 위해, 이동하는 3차원 경계면에서의 노드 생성 및 제거 기능을 지닌 3차원 적응 메쉬 생성기를 개발하였고, 지배 방정식을 유한요소법(finite element method)으로 이산화시켜 수치 해석적으로 해를 구하는, 스트레스 효과를 고려한 3차원 산화 시뮬레이터를 개발하였다. 본 연구에서는 열산화 공정에 의한 산화막의 3차원적 거동을 관찰하기 위하여, 섬구조(island structure) 및 공구조(hole structure)의 산화막 성장을 <100> 실리콘 기판에 대하여 1000°C, 60분간 습식 산화 조건에서 시뮬레이션하였다. 초기 산화막의 두께는 300 Å, 질화막의 두께는 2,000 Å으로 가정하였다. 마스크의 형태에 따라 코너에서의 새부리(bird's beak) 형태가 변하는데, 코너에서의 효과는 마스크 형태에 따라 산화제의 확산이 다른 영역에 비해 감소하거나 증가하는 영향이 주된 이유이지만, 스트레스에 의해 그 영향이 더 커짐을 확인하였다. 섬구조에서는 compressive 스트레스에 의해 코너 부근에서 산화가 감소하는 결과를 가져오고, 공구조에서는 tensile 스트레스로 인해 산화가 더 증가하는 결과를 보임을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, the three-dimensional stress effect of thermal oxide is simulated. We developed a three-dimensional finite element numerical simulator including three-dimensional adaptive mesh generator that is able to refine and eliminate nearby moving boundary of oxide, and oxidation solver with stress model. To investigate the behavior of thermal oxidation the simulations of thermal oxidation for island and hole structures are carried out assuming silicon wafer of <100> direction, temperature of 1,000°C, oxidation time of 60min, wet ambient, initial oxide thickness of 300 Å, and nitride thickness of 2,000 Å. The main effect of deformation at the corner area of oxide is due to distribution of oxidant, but the deformation of oxide is affected by the stress in the oxide. In the island structure which is the structure mostly covered with nitride and a coner is opened to oxidation, oxidation is reduced at the coner by compressive stress. In the hole structure which is the structure mostly opened to oxide and a coner is covered with nitride, however, oxidation is increased at the coner by tensile stress.

\* 正會員, 仁河大學校 電子電氣컴퓨터工學部 半導體 및 박막技術研究所

(Inha Research Institute of Semiconductor and Thin Film Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Inha University)

※ 본 연구는 차세대 반도체 기반 기술 개발 사업, 시

스템 공학 연구소의 CRAY R&D 사업, 정보 통신 연구 관리단의 대학 기초 연구 지원 사업, 과학 기술처의 미래 원천 기술 개발 사업의 지원으로 수행되었다.

接受日字:1996年10月15日, 수정완료일:1997年2月3日

## I. 서론

DRAM의 발전 속도는 급속하여 집적도는 3년마다 4배씩 증가하고 있으며, feature size는 3년마다 2/3씩 감소하고 있다. 차세대 256M/1G/4G Bit 반도체 메모리 제조를 위하여는 0.25/0.16/0.13  $\mu\text{m}$ 의 디자인 룰이 적용될 것으로 예상되고 있다. 이와 같이, 반도체 소자와 소자 격리 간격이 서브 하프 마이크론(sub-half-micron) 수준으로 좁아짐에 따라, 포토그래피를 비롯한 물리적 제현상에 있어서 3차원 특성을 보이는 것으로 인식되고 있다. 특히, 마스크 윈도우 크기가 감소함에 따라 마스크 코너 부근의 기하학적 모습(topology)은 반도체 공정 설계에 있어서 매우 중요한 요인으로 작용하게 되었다. 따라서, 마스크 코너 부근의 3차원 형상에 대한 모델링과 시뮬레이션은 매우 시급한 과제로 인식되고 있다. 즉, 소자의 크기가 0.1  $\mu\text{m}$ 급 이하로 축소됨에 따라, 종래에 관측하였던 2차원 단면 뿐 아니라, 단면과 수직 방향의 모양을 포함한 3차원 기하학적 형상의 예측의 필요성이 점차 증가하고 있는 것이다<sup>1)</sup>.

이러한 반도체 제조 공정의 급속한 발전에 있어, 1 GB 이상의 고밀도 DRAM 셀을 제조하기 위하여, 트랜지스터의 스케일링과 더불어 개발되어야 할 부분은 소자간의 절연을 위한 격리 공정 기술(isolation)이다. 소자의 집적도가 매우 높아지고 미세화가 진행되면 새부리의 3차원적인 거동에도 주의를 요하게 된다. 질화막 마스크 주위의 LOCOS가 형성될 경우, 즉, 공구조에서는 질화막 마스크의 코너에서 새부리 길이가 길어진다. 한편, 섬구조 형태로 LOCOS 주위에 질화막 마스크가 존재할 경우에는 마스크의 코너에서 새부리가 짧아진다. 이와 같은 새부리의 3차원적인 거동은 다음 두 가지 이유에 기인한다는 것으로 알려져 있다. 하나는 질화막 마스크의 코너 부에는 주위의 질화막 마스크 끝에 비해 산소 농도가 낮아지거나 더 높아지기 때문에 새부리 길이가 다른 영역의 길이와 달라지고, 또 하나는 질화막 마스크의 코너 부에서 스트레스 효과에 의해 새부리 길이가 달라진다.

이와 같은 새부리 길이를 감소시키기 위해, 여러 가지 변형된 형태의 트랜치 또는 LOCOS 방식의 격리 방식이 개발되었다. 고집적도의 반도체 소자 제작에 사용되는 소자 격리용 산화막 성장 기술은 Full-Rox (Fully Recessed Oxide), SILO(Sealed-Interface Local Oxidation), SWAMI(Sidewall-Masked Iso-

lation), STI(Shallow Trench Isolation) 등 평탄화를 위하여 다양한 형태의 방법을 사용하므로, 3차원 산화 시뮬레이터의 제작에 있어서 해석적인 방법을 적용할 수는 없는 실정이다. 따라서, LOCOS 또는 트랜치 공정을 위한 3차원 시뮬레이터는 수치 해석적 모델을 사용하여 산화제의 산화막 내에서의 확산과 산화막 유동을 3차원적으로 모델링하여 풀어야 한다<sup>2)</sup>.

현재 미국의 Stanford 대학, 프랑스·독일 등의 우주 연합 콘소시엄 등 세계 유수의 연구기관에서 3차원 산화 시뮬레이터 개발에 전력을 다하고 있지만, 방대한 메모리 처리 및 이동하는 메쉬의 정련화 등의 문제점이 아직 해결되지 않고 있다. 따라서, 본 논문에서는 차세대 반도체 메모리 제조 기술 중 핵심 기술에 해당하는 열산화(thermal oxidation) 기술로 제작하는 LOCOS의 미세 3차원 형상을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 예측할 수 있도록 유한요소법을 적용한 수치 해석기 개발 결과를 보고하고자 한다. 본 논문에서는 수치 해석적으로 풀어야 할 확산 방정식과 유동 방정식의 경계면이 각 계산 단계마다 이동하며, 또한 LOCOS 계면은 굴곡을 갖는 3차원 곡면을 이루고 있으므로, 수치 해석을 위하여서는 노드의 생성 및 소멸에 대한 효과적인 노드 관리용 알고리즘의 개발이 필요하다. 또한, 산화막이 성장하면서 스트레스가 발생하고, 이에 따라 산화막의 형태가 변화한다. 그러므로 산화 공정의 시뮬레이션을 위해서는 스트레스 효과가 반드시 고려되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 이동하는 3차원 경계면에서의 노드 생성 및 제거 기능을 지닌 최적의 3차원 메쉬 생성기를 개발하였고, 스트레스 모델을 첨가한 지배 방정식을 유한요소법으로 이산화시켜 수치 해석적으로 해를 구하는 3차원 산화 시뮬레이터를 개발하였다.

## II. 수치 해석 방법

본 논문에서는 3차원 산화 공정 시뮬레이션을 위하여 유한요소법을 사용하여 산화막 성장에 대한 확산 방정식과 유동방정식을 해석하였다. 산화막의 성장에 따라서 실리콘/산화막 경계면과 산화막/가스 및 산화막/질화막 경계면 등이 이동하게 되고, 유한요소법에 있어서는 계산의 오차를 줄이고, 해의 수렴 속도를 증가시키기 위해서 산화막 내부에 새로운 노드들을 생성해야 하므로, 효과적인 3차원 적응 메쉬 생성기의 개발이

필수적이라 할 수 있다<sup>[3]</sup>. 3차원 형상 함수로 사용되는 구조는 대부분 육면체(cubic), 혹은 사면체(tetrahedron)이다. 따라서, 선형 형상 함수인 경우, 각 꼭짓점 노드 수가 요소의 노드 개수가 되므로 육면체는 8노드, 사면체는 4노드를 가진다. 일반적으로 해의 정확한 수렴을 위해서 선형 형상 함수 이외에도 다차원 형상 함수를 사용하여 요소 형태는 동일하지만 노드 수가 달라진다. 주어진 문제에 대하여 적합한 형상 함수와 요소 형태를 선택함으로써, 효율과 정확성을 높일 수 있다. 본 산화 공정 시뮬레이션의 경우 경계가 이동하고 그 형태의 변화가 크므로, 육면체 형상 함수에 비해 사면체 형상 함수가 매우 유리할 뿐 아니라 선형 형상 함수를 사용하더라도 정확히 해에 수렴할 수 있으므로, 사면체 형상 함수를 선택하였다. 본 연구에서 제작한 3차원 적응 메쉬 생성기는 생성된 초기 메쉬 구조로부터 시뮬레이션을 수행하는 동안 이동하는 실리콘/산화막 계면에 인접한 영역에 대하여 프리즘 형태의 구조를 정의하고, 정의된 프리즘을 기초로 하여 메쉬의 정련화 과정을 수행한다.

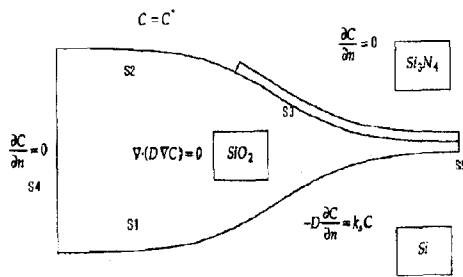


그림 1. 산화 공정 시뮬레이션을 위한 지배 방정식과 경계 조건

Fig. 1. Governing equations and boundary conditions for thermal oxidation.

산화막의 형성은 산화막을 통하여 실리콘 영역으로 확산해 가는 산화제의 확산 과정과 실리콘 영역으로 확산된 산화제와 실리콘의 반응에 의한 산화막 형성의 두 가지 과정으로 구성되어 있다. 산화제의 확산은 그림 1에 도시된 바와 같이, 노출된 S2영역에서 산화제가 산화막을 통해 S1영역으로 확산된다. S3영역은 질화막으로 덮여 있는 영역이며, 따라서 산화제의 확산이 일어나지 않는 영역이 된다. S2영역에서는 질량 전달 계수에 의존하여 산화제의 농도가 결정되며, S2영역에서는 반응 계수에 의존하여 산화막의 성장률이 얻어진

다. S4영역과 S5영역은 반사 경계 조건(reflection boundary condition)이 적용되어 S1~S5의 경계 조건이 포함된 확산 방정식을 계산한다. 실리콘 계면에서의 반응물이 계산되면, 산화막의 성장 형태를 계산한다.

확산 방정식과 유동 방정식은 먼저 유한요소법을 위한 약정식(weak form)으로 구성하여야 하며, 3차원 형상 함수를 결정하고, 구성된 약정식 형태의 지배 방정식은 각 요소 구간에서 계산하기 위하여 형상 함수와 결합되어, 이산화된다. 각 요소에 대한 계산을 반복적으로 수행한 후, 최종적으로 각 요소에서 계산된 결과를 전체 행렬(global matrix)로 결합하여 계산 결과를 구한다<sup>[4]</sup>.

먼저 산화막을 통해 실리콘 계면으로 확산되는 산화제의 확산을 계산하기 위하여 확산 방정식의 약정식 형태를 구한다. 일반적인 확산 방정식을 약정식 형태로 바꾸고, 그린 법칙(Green theorem)을 이용하여 변화시키면, 식 (4)와 같이 요소 적분과 경계 적분의 형태로 변화시킬 수 있다.

$$\int_{\Omega} \nabla \phi D \nabla C \, d\Omega + \int_{\Gamma_1} \phi k_s C \, d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \phi h C \, d\Gamma = \int_{\Gamma_2} \phi h C^* \, d\Gamma \quad (1)$$

식 (1)는 유한요소법으로 풀고자 하는 완전한 약정식으로 변환시킨 형태이며, 이제 식 (1)을 이용하여 강성행렬(stiffness matrix)과 로드 벡터를 계산할 수 있다. 산화막의 유동과 형성에 대한 메커니즘은 여러 가지 형태로 표현할 수 있다. 그 중에서 유한요소법에 적합한 적분 형태의 유동/형성 방정식은 식 (2)와 같이 표현된다<sup>[5]</sup>.

$$\int_{\Omega} \delta \epsilon \cdot \sigma \, d\Omega = \int_{\Gamma} \delta u \cdot f \, d\Gamma + \int_{\Omega} \delta u \cdot b \, d\Omega \quad (2)$$

여기서  $\epsilon$ 은 전단 응력(strain tensor)을 의미하며,  $\sigma$ 는 스트레스를,  $u$ 는 시스템의 변위,  $f$ 는 시스템의 경계면( $\Gamma$ )에 주어진 스트레스,  $b$ 는 시스템 내부( $\Omega$ )에 인가된 내력(body force)을 의미한다. 여기에 임의 함수(arbitrary function), 혹은 가상 함수(virtual function)인  $\delta$ 를 곱하게 되면  $\delta u$ 는 가상 변위(virtual displacement)를 나타내며,  $\delta \epsilon$ 는 가상 변위에 의한 가상 전단 응력을 나타낸다. 즉, 식 (5)는 시스템 내부에 존재하는 내력을 포함하는 내부의 가상 에너지는 외부에서 인가된 가상 에너지와 그 크기가 같다는 의

미로써, 가상 함수를 도입하여 나타낸 식이다.

산화막의 성장시 산화막은 비압축 점성 유체 특성을 지니며, 스트레스에 의하여 그 형태가 변화되어 진다. 따라서, 각 시간 간격마다 확산 방정식과 유동 방정식을 계산할 때 스트레스에 의존하는 계수의 값을 보정하여야 한다. 식(3), (4), (5)에 표현된 바와 같이, 산화제가 산화막을 통과하여 실리콘 계면으로 확산될 때 확산 계수  $D_{eff}$ 는 산화막의 압력에 지수적으로 비례하며, 실리콘 경계에서 산화 메카니즘 계수인 산화 반응 계수,  $K_s$ 는 스트레스에 지수적으로 비례하는 특성을 보인다. 산화막의 점성 계수,  $\eta$ 는 전단응력에 의존하는 특성을 보인다<sup>[6][7]</sup>.

$$k_s = k_0 \exp\left(-\frac{\sigma_{nn} V_k}{kT}\right) \quad (3)$$

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{PV_D}{kT}\right) \quad (4)$$

$$\eta = \eta_0 \frac{\sigma_s V_0 / 2kT}{\sinh(\sigma_s V_0 / 2kT)} \quad (5)$$

위 식에서 각각의  $K_0$ ,  $D_0$ ,  $\eta_0$ 는 온도의 함수이며,  $\sigma_{nn}$ 은 계면의 법선 방향의 스트레스를 의미하고,  $P$ 는 산화막 내부의 압력,  $\sigma_s$ 는 전단 응력,  $V_k$ ,  $V_D$ ,  $V_0$ 는 각각 보간 계수이다.

### III. 3차원 산화 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 먼저 산화제의 확산을 위해 유한요소법으로 확산 방정식을 3차원적으로 계산하였고, 계산된 산화제의 분포를 이용하여 유동 방정식을 유한요소법으로 계산하였다. 주어진 시간 동안 확산 방정식과 유동 방정식을 반복적으로 계산하였고, 확산 방정식에서 계산된 결과는 유동 방정식의 초기치로 입력되고, 유동 방정식에서 계산된 결과는 확산 방정식에서 초기치로 사용된다. 본 연구에서는 질화막의 두께에 따른 산화막의 형태 변화를 고려하였으며, 산화막의 성장에 의한 산화막 내부에서의 스트레스 효과를 고려하였다.

본 연구에서 수행한 산화 조건으로 실리콘의 기판 방향은 <100>방향으로 설정하였으며, 산화 온도는 1,000°C, 산화 시간은 60분, 산화 환경은 습식 산화 조건으로 설정하였다. 초기 산화막의 두께는 300Å, 질화막의 두께는 2,000Å으로 가정하였다. 먼저 산화제의 확산 분포를 그림 2에 도시하였다. 습식 산화에서 기체

상태의 산화제들이 산화막으로 침투하는 크기는 분위기의 압력과 온도에 영향을 받는다. 산화제는 산화막 표면의  $C^*$ 로부터 산화막/실리콘 계면으로 확산하면서 산화제의 농도는 그림과 같이 감소하게 된다. 그 결과 산화막/실리콘 계면에 도달한 산화제는 반응 계수  $K_s$  값에 비례( $F=K_s \cdot C$ )하여 실리콘과 반응함으로써 산화막을 형성하게 된다.

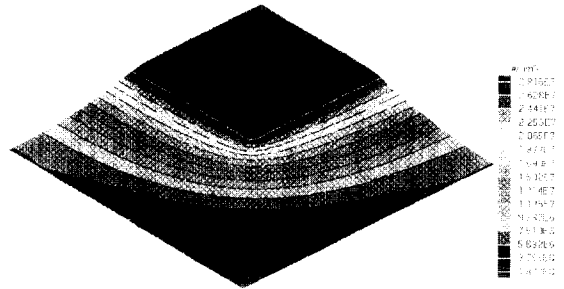


그림 2. 섬구조 형태의 마스크 형태에서 1,000°C, 60분, 습식 산화로 산화막을 성장시켰을 때 질화막을 제거한 후 산화막의 위쪽 표면에서의 산화제의 분포

Fig. 2. Oxidant distributions on the surface of oxide for island-type structure which was simulated with WET condition for 60 minutes at 1000°C.

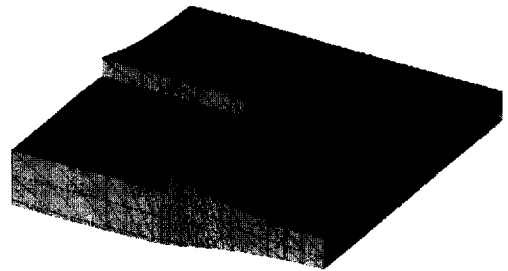


그림 3. 섬구조의 산화막 성장 3차원 시뮬레이션 결과: 질화막 마스크의 영향을 고려하지 않은 섬구조의 산화막 성장 시뮬레이션

Fig. 3. Results of three-dimensional oxidation for island-type structure without considering an effect of nitride mask.

확산 방정식과 유동 방정식을 계산한 결과가 그림 3에 도시되었다. 산화가 진행될수록 에너지를 감소시키기 위해, 산화막 내부의 메쉬가 새로 생성되어진다. 도시된 그림의 산화 조건은 온도가 1000°C일 때 30분간 WET 조건으로, <100>방향의 실리콘인 경우이다. 상

기 산화 계산에 사용된 노드는 2,115개이고, 사면체는 8,796개였다. 사용된 메모리는 데이터 포맷을 위해 7Mbyte가 소모되었고, 계산을 위해 약 36Mbyte의 메모리가 사용되었다<sup>18)</sup>.

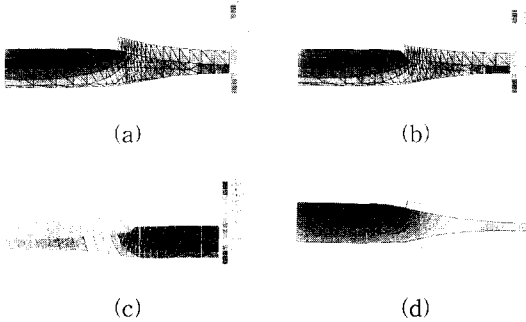


그림 4. 3차원 산화 시뮬레이션 결과에 대한 2차원 단면 구조에서 확산에 의한 산화막 내부의 산화제의 분포: (a) 질화막 마스크의 영향을 고려하지 않은 시뮬레이션 결과 (b) 질화막 마스크의 압력을 고려한 시뮬레이션 결과 (c) 공구조에 대한 단면도 (d) 2차원 시뮬레이터인 SUPREM4의 산화 결과 (a) 그림과 동일한 조건)

Fig. 4. Cross-section of three-dimensional oxidation simulation for oxidant distributions in the oxide: (a) Oxidation of island-type structure without considering an effect of nitride mask (b) Island structure considering a pressure of nitride mask (c) Hole-type structure considering a pressure of nitride mask (d) the result of two-dimensional simulator SUPREM4.

질화막의 두께가 두꺼워져서 질화막의 압력이 커진 경우, 산화제의 확산이 질화막의 아래 부분에서 감소되므로 그림 4에 나타난 바와 같이, 질화막 마스크의 두께가 2,000Å인 경우의 시뮬레이션에서는 LOCOS 형태의 변형이 심하게 발생하고, 또한 산화막 내부에서 산화제의 확산에 대한 분포를 살펴보면 산화제의 확산이 질화막 마스크의 영향을 고려하지 않은 결과보다 더 작게 이루어짐을 볼 수 있었다. 그림 4의(a)와 (b)에는 섬구조의 산화막 성장에 대하여 같은 시간 동안 산화를 진행한 후, 질화막의 압력에 의한 영향을 비교한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 질화막의 영향을 무시하고 즉 질화막의 두께가 얇아서 질화막의 압력이 산화에 영향을 미치지 않는 상황일 때, LOCOS의 형태가 상하 대칭적인 형태로 성장하여 산화막

상단에 변형이 없음을 볼 수 있었다. 이 때 성장한 산화막의 두께는 2,250Å으로 측정되었고, 새부리 길이는 2,010Å이었다. 그러나, 질화막 마스크의 압력을 산화막의 유동 방정식의 해석에 있어서 경계 조건으로 부여함으로써, 즉 마스크의 두께가 두꺼울 때는 그 무게에 의한 압력이 산화막의 형태에 영향을 주어, 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 LOCOS 상단의 질화막 마스크 끝부분에서 LOCOS의 형태가 심하게 변형되어, 산화막의 두께는 2,250Å으로 두 조건 모두 동일하였으나 새부리의 길이는 1,640Å으로 질화막이 두꺼울 때 새부리의 길이가 감소함을 확인할 수 있었다. 그림 4(c)는 공구조의 산화막 성장 시뮬레이션 결과로서, 마스크를 2,000Å으로 시뮬레이션하였을 때, 마스크 압력의 영향이 나타나 있음을 볼 수 있다. 섬구조의 코너 부근에서는 산화제가 다른 영역에 비해 더 적게 확산되므로 새부리의 길이도 그만큼 감소하게 된다. 질화막의 영향이 없을 때에는 기본 새부리 길이에 비해 65%의 새부리 길이를 가져서, 2,010Å의 65%인 1300Å의 새부리 길이를 가지며, 질화막이 두꺼운 경우 45%, 즉 738Å의 새부리 길이를 가짐을 확인하였다.

섬구조에서 스트레스를 관찰하기 위해 1000°C에서 WET 상태로 60분 동안 산화막을 성장시켰다. 그림 5는 섬구조에서의 스트레스 분포로서 산화막을 생략하고 실리콘 만을 도시한 그림과, 위에서 내려다 본 그림을 함께 도시하였다. 그림 5(a)는 앞쪽 영역이 산화막이 성장하여 실리콘이 소비되어 계면이 아래로 이동하였으며, 마스크 아래 영역에서 tensile 스트레스가 생겨 field 영역에서는 compressive 스트레스가 발생한 그림이다. 여기서는 compressive 스트레스를 양의 부호로 표시하였다. 산화 반응 계수,  $K_s$ 는  $K_0 \exp(-\sigma_m V_a / kT)$  으로 표현되며, 따라서 compressive 스트레스는 반응 계수를 감소시키게 된다. 특히 코너 부근에서는 compressive 스트레스가 매우 커짐을 확인할 수 있었다. 따라서 새부리의 길이를 더욱 감소시키고 산화막의 형태를 더욱 둥글게 만드는 효과를 가져온다. 앞서 설명한 스트레스 효과의 결과로서, 섬구조의 LOCOS 에서 산화막의 두께를 도시하였다. 코너에서 산화막이 둥글게 되는 효과는, 물론 앞서 설명한 산화제의 확산이 다른 영역에 비해 감소하는 영향이 주된 이유이지만 스트레스에 의해 그 영향이 더 커질 수 있다. 1000°C에서 WET 상태로 60분 동안 산화막을 성장시켰을 때, 3,800Å 두께로 산화막이 성장되었고, 이

때 사용한 노드 수는 5,445개, 사면체 수는 24,576개이며, 전체 사용된 데이터 메모리는 12Mbyte이다. 본 연구에서 시뮬레이션 한 결과, 질화막의 두께가 얇을 때에는 코너링 효과가 산화제의 확산이 주된 영향으로 나타났으며, 질화막의 두께가 1000 Å 이상인 경우 질화막에 의한 스트레스가 계면 스트레스에 영향을 주어 코너링 효과에 큰 영향을 미침을 확인하였다.

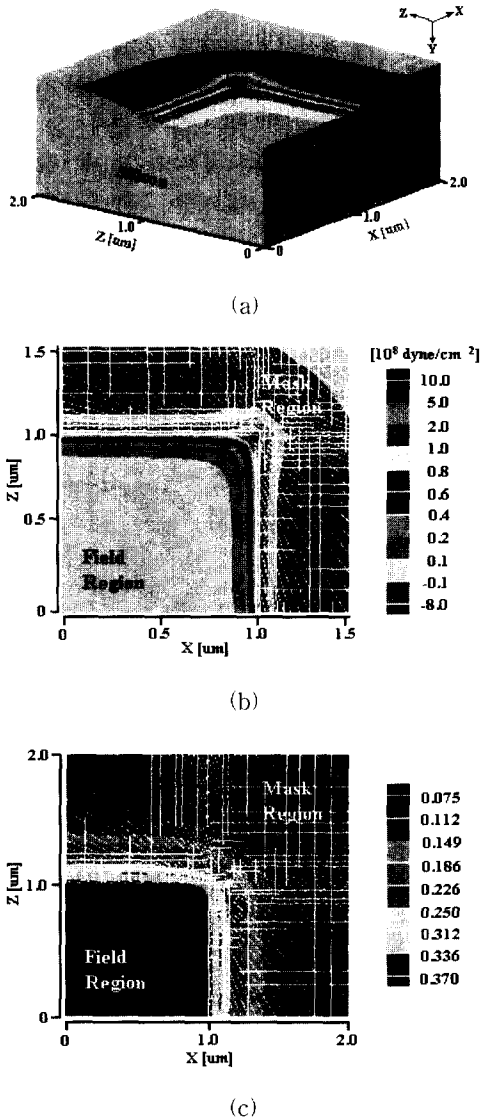


그림 5. 섬구조에서의 스트레스 분포: (a) 실리콘 계면에서의 스트레스 분포 (b) 위에서 내려다 본 스트레스 분포 (c) 산화막의 두께 컨투어  
 Fig. 5. Stress distribution for the island-type structure : (a) at the interface (b) from the top (c) contour of the thickness of the oxide.

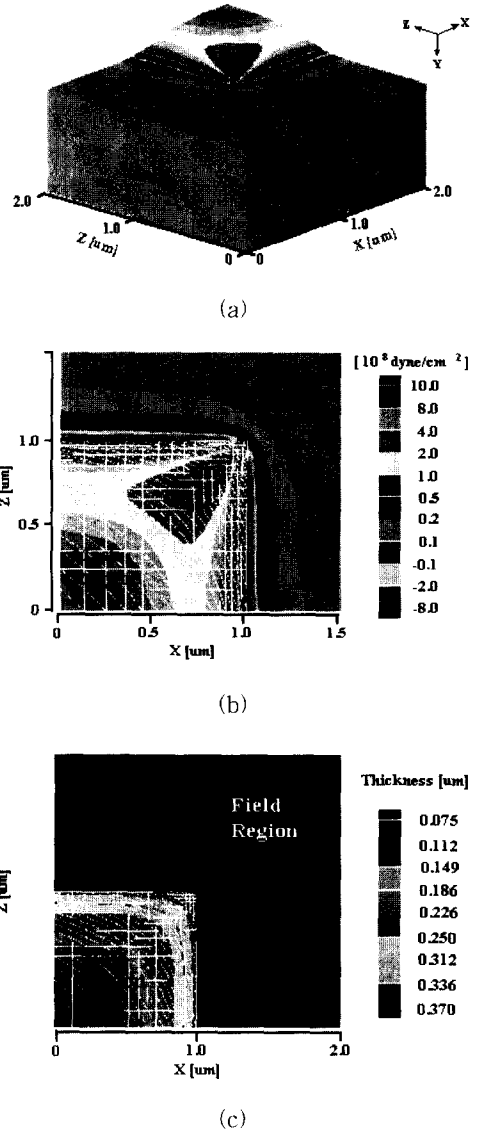


그림 6. 공구조에서의 스트레스 분포: (a) 실리콘 계면에서의 스트레스 분포 (b) 위에서 내려다 본 스트레스 분포 (c) 산화막의 두께 컨투어  
 Fig. 6. Stress distribution for the hole-type structure : (a) at the interface (b) from the top (c) contour of the thickness of the oxide

이제 그림 6에 도시된 바와 같이 공구조를 살펴보면, 실리콘의 뒤쪽 영역을 제외한 나머지 영역에서 산화막이 형성되며, 따라서 코너 부근에서 다른 영역에 비해 더 많은 산화제의 확산이 이루어진다. 그러므로 새부리의 길이도 다른 곳에 비해 더 길어지며, 코너 부근에서 질화막 아래에서 발생하는 매우 큰 tensile 스트레스로

인해 산화 반응 계수는 더욱 커져서 코너에서 산화가 더욱 가속화되고, 이로 인해 다른 영역에서 compressive 스트레스가 커지게 된다. 스트레스 효과의 결과로서, 공구조의 LOCOS 에서 산화막의 두께를 그림 6(c)에 도시하였다. 양쪽 모서리에서는 compressive 스트레스의 영향으로 새부리의 길이가 감소하게 되며, 코너 부근에서는 tensile 스트레스가 커져서 새부리의 길이가 더욱 커진다. 그 결과, 그림 7에 도시한 바와 같이 측면에서의 단면 산화 형태와 코너에서의 산화 형태는 많은 차이를 보여, 섬구조의 경우 코너에서의 새부리의 길이가 측면에서의 새부리 길이보다 크게 감소된다.

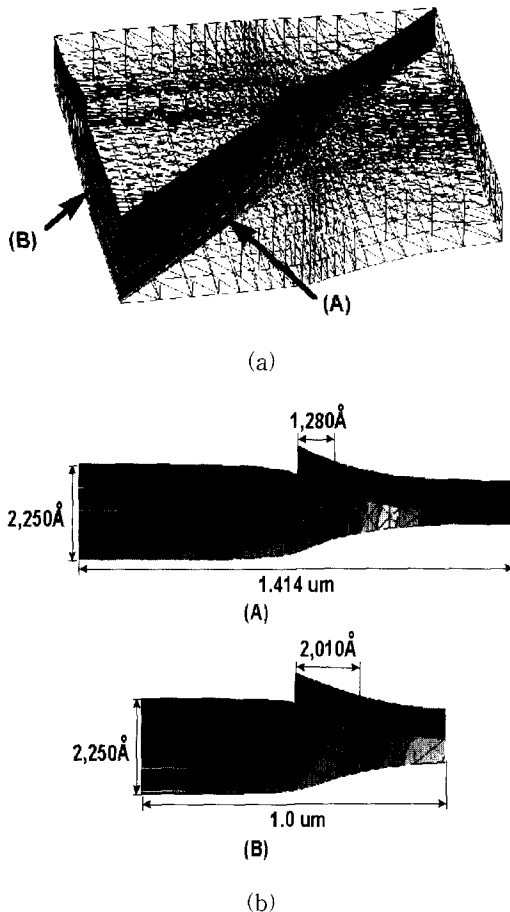


그림 7. 섬구조에서 측면과 코너에서의 산화 형태 비교: (a) 섬구조의 메쉬 형태와 측면(A)에서 본 단면의 산화 형태와 코너에서의 산화 형태 (B) (b) 측면(A)에서 본 산화 형태 및 코너에서의 산화 형태(B)

Fig. 7. Comparison between at the corner and at the side for the island-type structures (a) bird's eye view (b) cross-sectional view of the side (A) and of the corner (B).

#### IV. 결론

본 논문에서는 차세대 반도체 메모리 제조 기술 중 핵심 기술에 해당하는 열산화 기술로 제작하는 LOCOS의 미세 3차원 형상을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 예측할 수 있도록, 유한요소법을 적용한 수치 해석기를 개발하였다. 본 연구에서는 이동하는 3차원 경계면에서의 노드 생성 및 제거 기능을 지닌 3차원 적응 메쉬 생성기를 개발하였고, 지배 방정식을 유한요소법으로 이산화시켜 수치 해석적으로 해를 구하는 스트레스 효과를 고려한 3차원 산화 시뮬레이터를 개발하였다.

시뮬레이션 결과 섬구조의 코너 부근에서는 질화막의 영향이 없을 때에는 기본 새부리 길이에 비해 65%의 새부리 길이를 가지고, 질화막이 두꺼운 경우 45% 새부리 길이를 가짐을 확인하였다. 코너에서 산화막이 등글게 되는 효과는, 마스크 형태에 따라 산화제의 확산이 다른 영역에 비해 감소하거나 증가하는 영향이 주된 이유이지만 스트레스에 의해 그 영향이 더 커짐을 확인하였다. 섬구조에서는 compressive 스트레스에 의해 코너 부근에서 산화가 감소하는 결과를 가져오고, 공구조에서는 tensile 스트레스로 인해 산화가 더 증가하는 결과를 보임을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Umimoto et. al., "Three-dimensional Numerical Simulation of Local Oxidation," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-38, no. 3, pp. 505-511, March 1991.
- [2] A. Poncet, "Finite-element Simulation of Local Oxidation of Silicon," IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 4, no. 1, pp. 41-53, Jan. 1985.
- [3] S. Bozek, B. Baccus, V. Senez and Z.Z. Wang, "Mesh Generation for 3D Process Simulation and the Moving Boundary Problem," H. Ryssel, P. Pichler, *Simulation of Semiconductor Devices and Processes*, vol. 6, Springer-Verlag Wien New York, pp. 460-463, 1995.
- [4] K.H. Huebner, *The Finite Element Method for Engineers*, 3rd ed., Wiley, 1995.
- [5] O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, *The*

*Finite Element Method*, 4th ed., vol. 1, McGraw-Hill, 1989.

- [6] H. Umimoto, S. Odanaka, and I. Nakao, "Numerical Simulation of Stress-Dependent Oxide Growth at Convex and Concave Corners of Trench Structures," *IEEE Electron Devices Letters*, vol. 10, no. 7, pp. 330-332, July 1989.
- [7] P. Sutardja, and W. G. Oldham, "Modeling

of Stress Effects in Silicon Oxidation," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-36, no. 11, pp. 2415-2421, November 1989.

- [8] S.H. Yoon, J.H. Lee, T.Y. Won, B.J. Cho, J.C. Kim, and D.H. Lee, "3-D Adaptive Simulation of Thermal Oxidation Process," *Proceedings of the 26th European Solid State Device Research Conference(ESS-DERC'96)*, pp. 351-354, September 1996.

---

— 저 자 소 개 —

---



李濟熙(正會員)

1968년 10월 5일생. 1992년 인하대학교 응용물리학과(공학사). 1994년 인하대학교 전자재료공학과(공학석사). 1994년~현재 인하대학교 전자재료공학과 박사과정. 주관심분야는 반도체 소자 및 공정, 시뮬레이션 등

입.



尹相鎬(正會員)

1969년 11월 20일생. 1995년 인하대학교 전자재료공학과(공학사). 1995년~현재 인하대학교 전자재료공학과 석사과정. 주관심분야는 반도체 공정 물리, 시뮬레이션 등임.



元太映(正會員)

1959년 2월 21일생. 1981년 서울대학교 전자공학과(공학사). 1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1989년 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign 전자공학과(공학박사). 1989년~1990

년 미국 State University of New York 조교수. 1990~1991년 삼성전자(주) 수석 연구원. 1991년~현재 인하대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 부교수. 주관심분야는 반도체 소자 및 공정 등임.