

The Effect of Deposition Temperature of TiN Thin Film Deposition Using Thermal Atomic Layer Deposition

Coatings · 2023 · DOI: 10.3390/coatings13010104

초록 기반 score 9.0

1. 한 줄 요약 — $\text{TiCl}_4/\text{NH}_3$ 열 ALD로 400~600°C에서 TiN 박막을 증착해 온도에 따른 저항·표면조도·단차피복성 트레이드오프를 규명하고, N_2/He 플라즈마 후처리로 400°C 저온 증착 박막의 저항을 약 25% 낮췄다.

2. 연구 배경

TiN 박막은 반도체 소자의 확산방지층(diffusion barrier) 및 게이트 전극 재료로 널리 쓰이는데, 고온 CVD/ALD 공정은 저저항·고결정성 막을 얻기 유리하지만 미세화된 3D 구조(FinFET, 3D NAND 등)에서 열예산(thermal budget) 제약과 단차피복성 저하 문제를 야기한다. 기존 접근으로는 (1) 고온 열 ALD(400~600°C 이상)로 저저항 TiN을 얻는 방식이 있으나 표면 거칠기 증가와 단차피복성 열화가 보고되어 왔고, (2) PEALD(plasma-enhanced ALD)를 이용해 저온에서도 플라즈마 활성화로 막질을 개선하는 방식이 있으나 플라즈마 노출로 인한 하부 구조 손상이나 균일도 문제가 지적되어 왔다. 본 연구는 순수 열 ALD 공정에서의 온도 의존성을 정량적으로 분석하고, 별도의 플라즈마 후처리(post-treatment)를 결합해 저온 공정의 한계를 보완하려는 시도로, 두 접근법(고온 열 ALD, PEALD)의 절충점을 모색한다는 점에서 배경이 명확하다.

3. 핵심 기여

1) $\text{TiCl}_4/\text{NH}_3$ 열 ALD 공정에서 400~600°C 범위의 증착 온도가 증착률, 비저항, 표면 형상에 미치는 영향을 체계적으로 정량화함. 2) 고온(600°C) 증착 시 비저항 177 $\mu\Omega\text{cm}$ 까지 감소하지만 표면조도(R_q) 0.69 nm로 증가하고 단차피복성이 열화됨을 실험적으로 확인함. 3) $\text{N}_2/\text{He}=3:2$ 비율의 플라즈마 후처리를 도입해 400°C 저온 증착 TiN 박막의 결정성을 XRD로 확인하고 비저항을 약 25% 저감시킴으로써 저온 공정에서도 고품질 박막을 얻을 수 있는 대안을 제시함.

4. 재료·소자 구조

TiCl_4 를 Ti 전구체로, NH_3 를 반응 가스로 사용한 열 ALD(thermal ALD) 공정으로 TiN 박막을 증착함. 증착 온도는 400°C, (중간 온도 미기재), 600°C 등 400~600°C 범위에서 비교됨. 후처리로는 N_2/He 가스를 3:2 비율로 혼합한 플라즈마 처리를 적용함. 특성 분석은 증착률, 4점 탐침 등을 이용한 비저항 측정(구체적 측정 장비는 초록 미기재), AFM으로 추정되는 표면조도(R_q) 측정, 단차피복성 평가(구체적 구조/AR비 미기재), XRD를 통한 결정상 분석으로 구성됨.

5. 주요 성능 수치

- 600°C 증착 비저항: 177 $\mu\Omega\text{cm}$
- 600°C 증착 표면조도(R_q): 0.69 nm
- 400°C 플라즈마 후처리 후 비저항 감소율: 약 25%

- 증착률: 초록 미기재 — 원문 확인 필요

- 단차피복성(step coverage) 수치: 초록 미기재 — 원문 확인 필요

- 플라즈마 처리 전 400°C 비저항 절대값: 초록 미기재 — 원문 확인 필요

6. 기존 기술과의 비교

초록에서는 자체 실험 내 온도 조건(400°C vs 600°C) 간 비교와 플라즈마 후처리 전후 비교만 제시되어 있어, 외부 선행 연구(예: PEALD 기반 저온 TiN 또는 타 전구체 기반 TiN ALD)와의 정량적 비교는 이루어지지 않음. 일반적으로 알려진 PEALD TiN 공정은 저온(200~300°C)에서도 200 $\mu\Omega\text{cm}$ 대 비저항을 보고한 사례가 있으나, 본 논문에서 이러한 문헌과의 직접 비교 수치는 제시되지 않아 정량 비교 가능한 문헌이 명시되지 않음. 본 연구의 핵심 차별점은 열 ALD만으로 고온 공정의 한계(거칠기, 단차피복성)를 확인한 뒤, 플라즈마 후처리라는 별도 단계를 결합해 저온 열 ALD의 비저항을 개선했다는 공정 조합의 novelty에 있다.

7. 산업 적용 가능성

TiN 박막은 DRAM/3D NAND의 확산방지층, 게이트 전극, 커패시터 전극 등에 광범위하게 사용되므로, 저온에서 저저항·양호한 단차피복성을 동시에 만족시키는 공정은 열예산이 제한된 후공정(BEOL) 및 미세 구조 소자에 직접적인 산업적 가치를 지닌다. 다만 본 연구는 실험실 규모의 재료적 특성 평가 단계로, 실제 3D 구조(고종횡비 컨택/비아)에서의 단차피복성 검증, 양산 장비 적용성, 플라즈마 후처리 단계 추가에 따른 공정 시간·비용 증가 등에 대한 검토가 추가로 필요하다.

8. 한계와 남은 과제

초록만으로는 단차피복성의 정량적 수치(예: 특정 종횡비 구조에서의 %)가 제시되지 않아 실제 열화 정도를 가능하기 어렵다. 또한 플라즈마 후처리가 하부 구조나 인접 소재에 미치는 영향(손상, 열화 등)에 대한 언급이 없고, 400°C 외 중간 온도(예: 450, 500°C)에서의 상세 데이터도 초록에는 드러나지 않는다. 플라즈마 후처리 후에도 600°C 열 ALD 대비 절대적 비저항 수준이 어느 정도인지 직접 비교가 없어, 제안 공정이 고온 공정을 완전히 대체할 수 있는지는 원문 확인이 필요하다.

9. 연관 논문

- TiCl₄/NH₃ 기반 열 ALD TiN의 초기 공정 개발 연구 — 확산방지층 응용을 위한 기본 물성(비저항, 결정성) 확립에 관한 선행 연구로 추정되나 구체적 문헌은 원문 확인 필요.

- PEALD를 이용한 저온 TiN 박막 연구 — 플라즈마를 증착 단계에 직접 활용해 저온에서도 낮은 비저항을 달성하는 접근법으로, 본 논문의 후처리 방식과 대비되는 선행 연구로 추정됨.

- TiN 박막의 단차피복성과 3D 소자 적용에 관한 연구 — 고종횡비 구조에서의 ALD TiN 컨포멀리티 문제를 다룬 일반적 선행 연구로 추정됨. 실제 인용 목록은 원문 확인 필요.

10. 선정 이유

본 논문은 반도체 확산방지층으로 핵심적인 TiN ALD 공정에서 온도-물성 트레이드오프(비저항 vs 거칠기/단차피복성)를 정량 데이터로 제시하고, 플라즈마 후처리라는 실용적 해법으로 저온 공정의 한계를 25% 저항 개선으로 보완했다는 점에서 공정 최적화 연구로서 명확한 실용적 기여가 있다. 재료 자체는 신소재가 아니지만, 열예산 제약이 커지는 최신 소자 공정 트렌드에 부합하는 실험적 절충안을 제시했다는 점에서 산업적 관련성이 높아 상위권 후보로 평가된다.

11. 키워드 태그

• TiN
• thermal ALD
• TiCl ₄
• NH ₃
• plasma post-treatment
• step coverage
• resistivity
• diffusion barrier