COOLS

TECHNICAL NOTE
2026. 11. 02.

고분자 계면의 금속 연결 두께로 늘리는 글라스 비아 스퍼터 시드 연결 깊이

조진현 쿨스 대표 jhcho@cools.co.kr

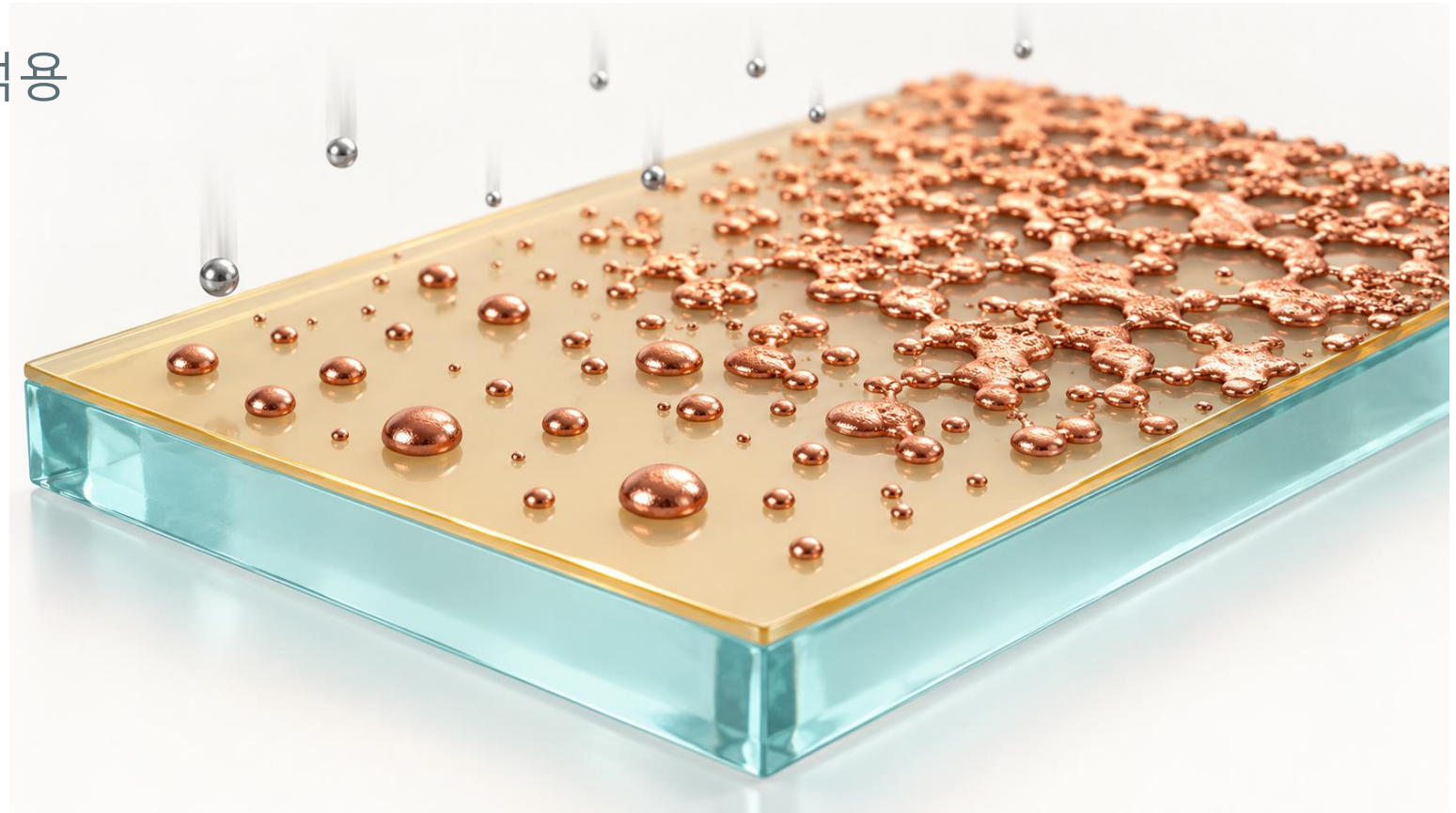
SUMMARY

스퍼터 금속은 섬으로 자라다 서로 닿는 순간 전기적으로 연결되며, 연결 임계 두께는 계면과의 반응성이 클수록 얇아진다. 같은 고분자 계면에서 Cu는 2.5 nm, Au는 6.2 nm에서 연결됐다. PDA로 비아 벽 전체를 덮어 임계 두께를 낮추면 직진성 스퍼터가 얇게 닿는 깊은 벽면에서도 시드가 이어지는 원리와 공정을 다룬다.

COOLS · 기술 검토 자료

고분자 계면에서의 스퍼터 금속 성장

Phenolic resin 연구와 PDA 비아 적용



Schuster et al.

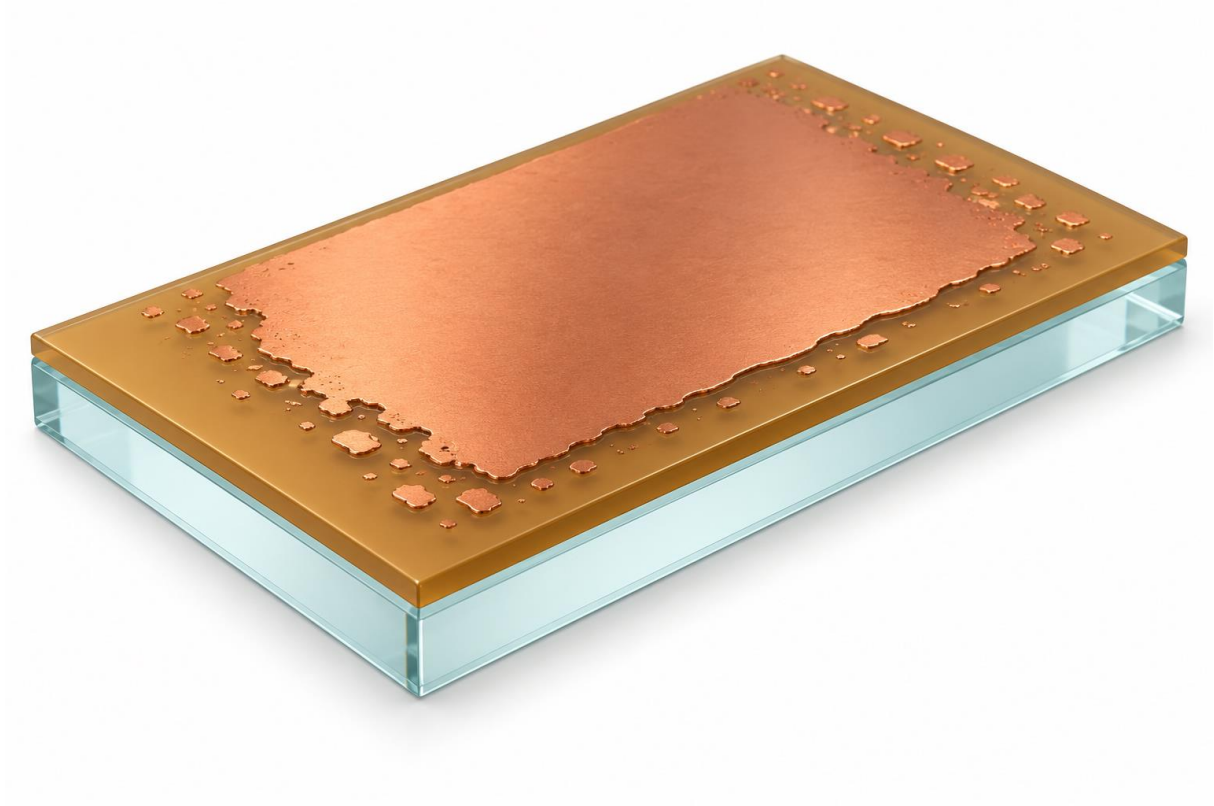
Nanomaterials 2021, 11, 589

doi:10.3390/nano11030589

그림: 성장 메커니즘 개념도

유리 위 PCGF–PEI 가교막

동일한 고분자 표면에서 금속 종류에 따른 성장 차이를 비교



적층 개념도: 유리 / 가교 고분자막 / 스퍼터 금속

고분자 용액

PCGF 20 mg/mL × 100 µL

PEI 10 mg/mL × 200 µL

클로로포름 용매 · 각각 2 mg

막 형성과 가교

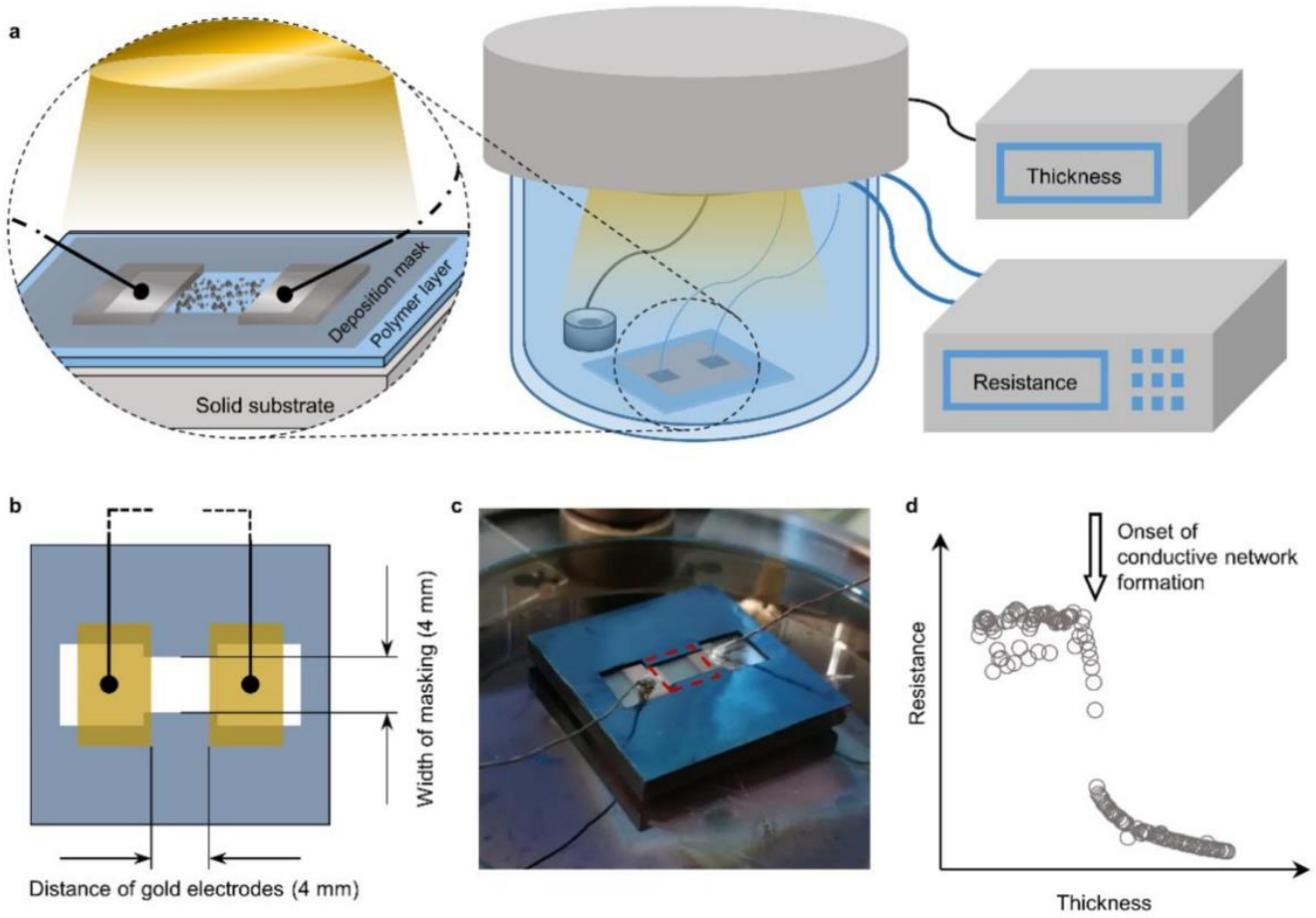
유리 커버슬립에 스핀 코팅

120 °C에서 5분 열처리

비교 금속 Au · Ag · Cu · Ni

Schuster et al., Nanomaterials 2021, 11, 589

성장 중 두께와 저항의 동시 측정



DC 마그네트론 스퍼터

Ar 압력 0.9–1.2 Pa
증착 속도 0.06–0.08 nm/s

두 신호의 연결

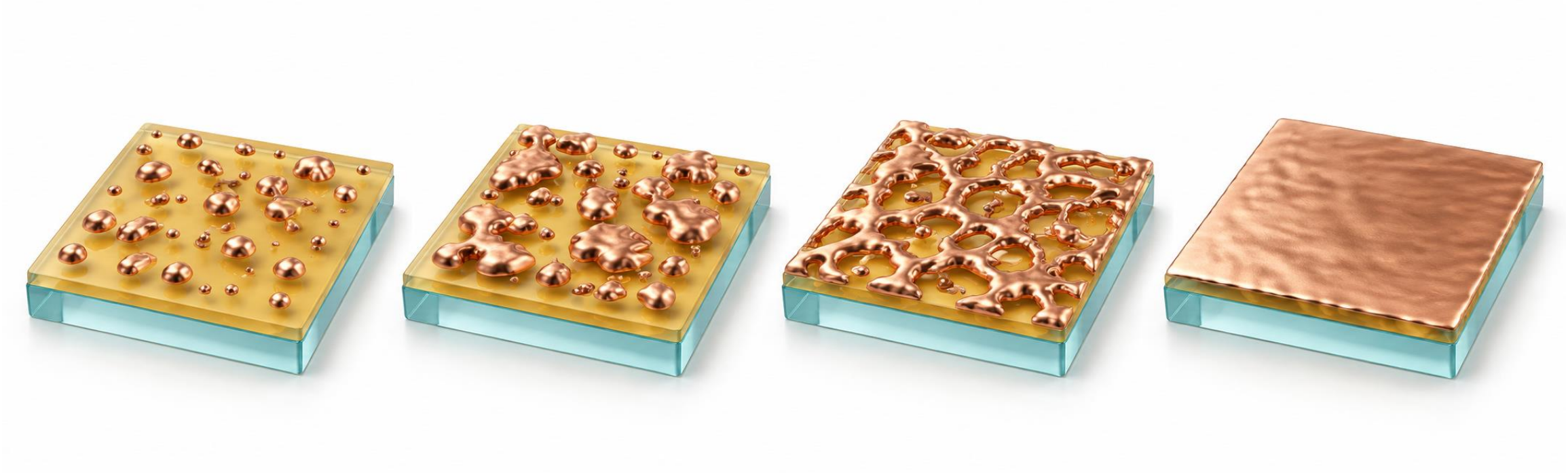
QCM: 명목 막 두께
LCR: 성장 중 면저항

Au 전극 간격 4 mm
측정 영역 4 × 4 mm²

Schuster et al., 2021, Fig. 1 · CC BY 4.0

금속 섬에서 전도성 연결망으로

독립된 금속 섬이 성장·접촉하면서 전도 경로를 만든다



01 핵생성
표면에 금속 원자 고정

02 섬 성장
섬의 크기·형상 변화

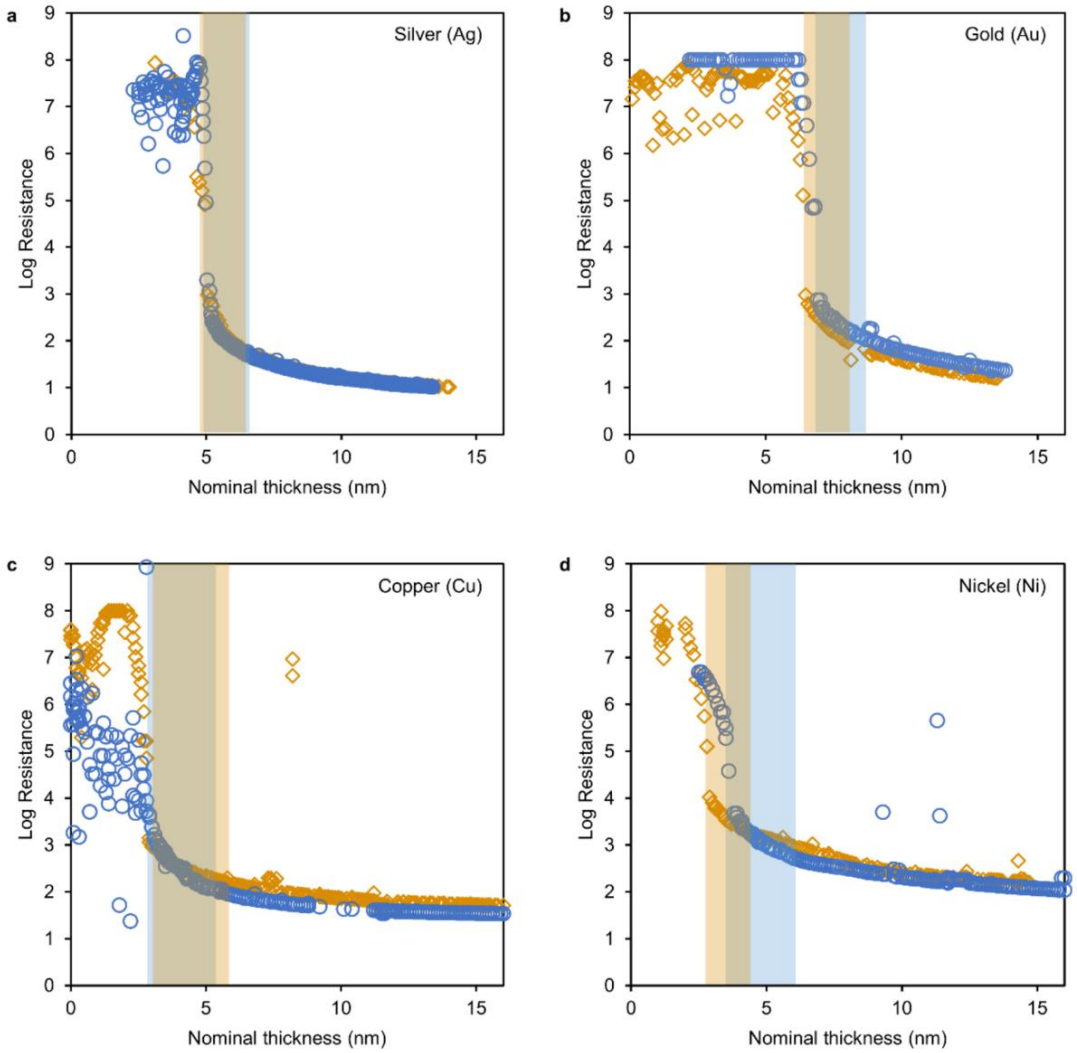
03 전기적 연결
퍼콜레이션 시작

04 연속막
남은 빈 영역 충전

임계 두께 dc는 전도 경로가 생기는 시점이며, 완전한 치밀막 형성 시점과 구분된다.

Schuster et al., 2021, §3.1 · 성장 단계는 설명용 개념도

저항 급감으로 확인한 연결 시점



저항이 급격히 낮아지는 구간

분리된 금속 섬 사이에
연속적인 전도 경로가 형성된다.

$$R \propto (d - dc)^{-t}$$

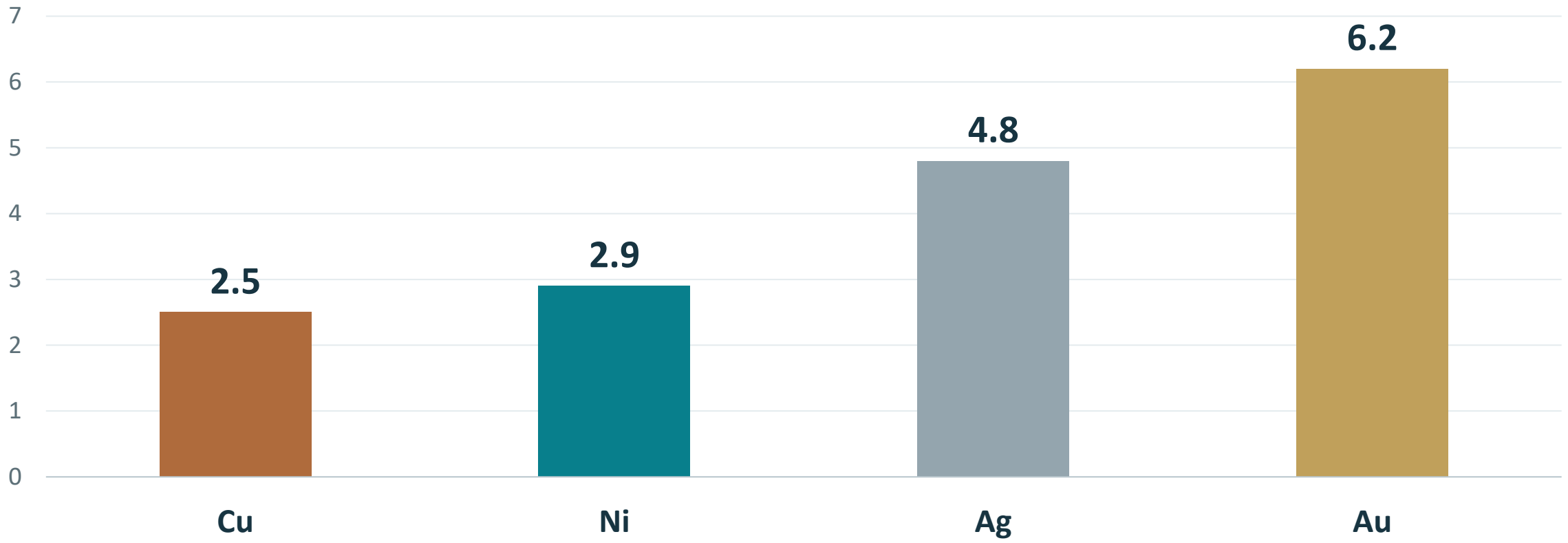
d: 명목 두께 · dc: 연결 임계 두께
t: 퍼콜레이션 임계 지수

임계 지수 약 1.3
섬 성장과 네트워크 연결을 지지

Schuster et al., 2021, Fig. 2 · CC BY 4.0

Cu와 Ni는 더 얇은 막에서 연결

전기적 연결의 임계 명목 두께 dc (nm)



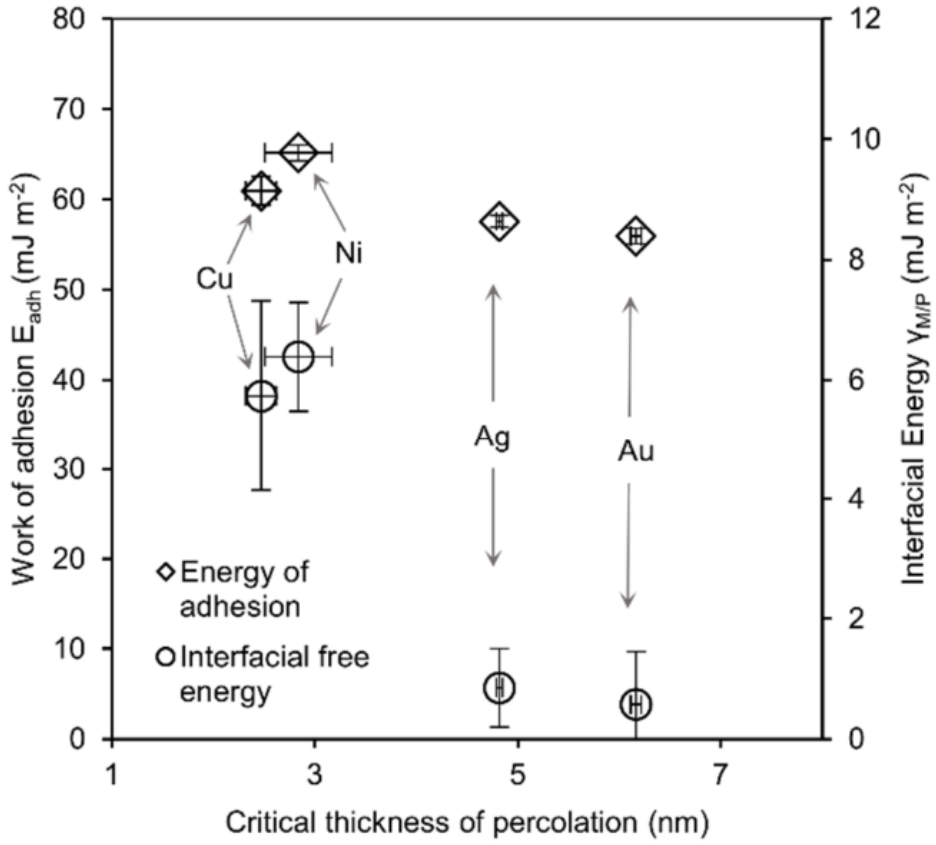
원문 보고값: Cu 2.5 ± 0.2 · Ni 2.9 ± 0.3 · Ag 4.8 ± 0.1 · Au 6.2 ± 0.1 nm

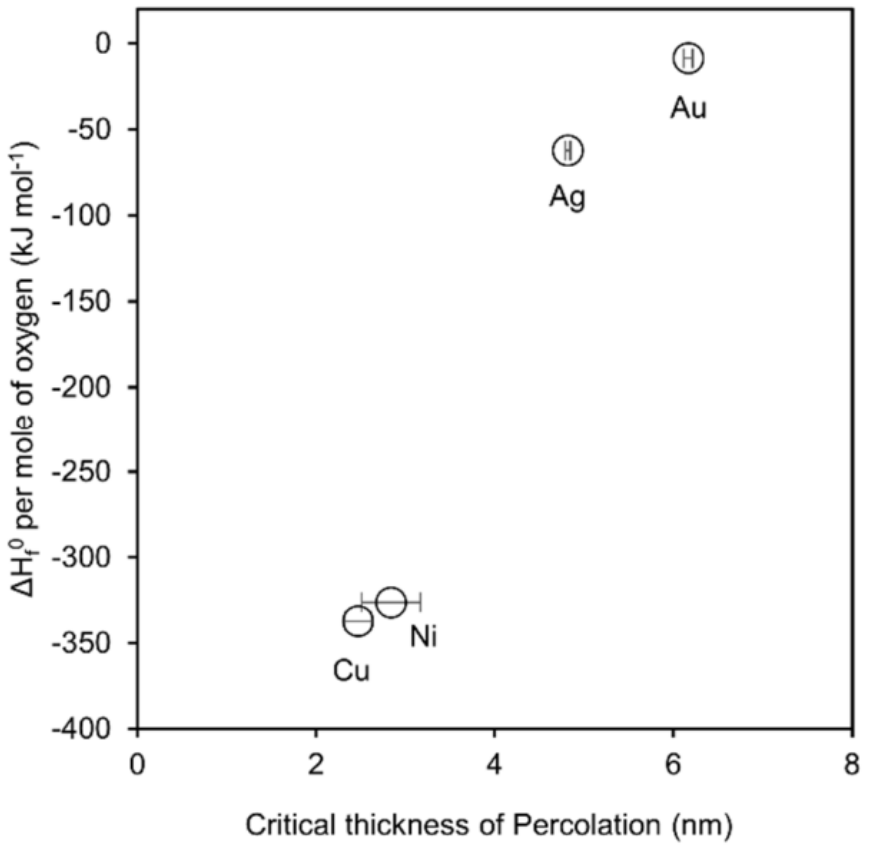
각 금속 2회 실험의 평균 ± 원문 range 값. 막 두께는 QCM 기준 명목 두께.

Schuster et al., 2021, Table 1 · 원문 수치를 편집 가능한 그래프로 재구성

표면에너지보다 반응성과 뚜렷한 상관

산화물 생성 엔탈피를 금속 반응성의 지표로 사용

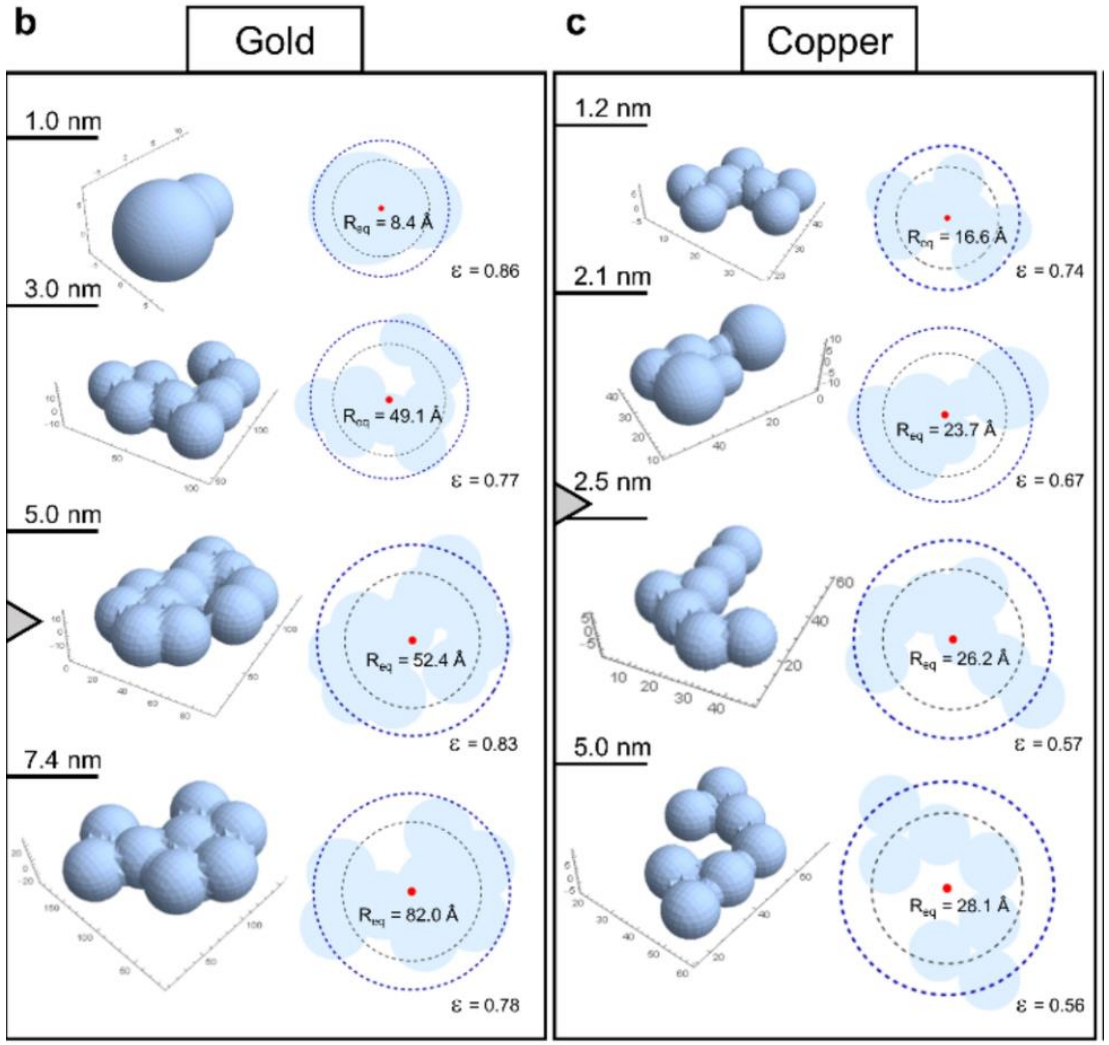




계면 결합에 의한 원자 이동성 감소가 금속 섬의 형성과 연결 시점을 바꾼다는 해석

Schuster et al., 2021, Fig. 3 · CC BY 4.0

연결을 좌우하는 금속 클러스터 형상



Au · 상대적으로 조밀한 형상

금속이 큰 클러스터로 응집하며
전도성 연결까지 더 많은
명목 증착 두께가 필요하다.

Cu · 더 작고 가지친 형상

분산된 구조가 연결되면서
더 낮은 명목 두께에서
전도 경로가 형성된다.

GISAXS 데이터 기반 추정 형상
그림의 삼각형: 전기적 연결 임계 두께

Schuster et al., 2021, Fig. 5b–c 발췌 · CC BY 4.0

PDA 계면 기반 비아 시드 연결 깊이 확장

COOLS · PDA / Ti·Cu / 유리 비아

연결 임계 두께 저감에 의한 깊은 벽면의 시드 연결 성립

논문 메커니즘

계면 반응성 ↑ → 원자 이동성 ↓ → 가지형 클러스터 → 조기 연결
동일 고분자 계면 실측 d_c **범위 6.2 → 2.5 nm (2.5배)**

쿨스 이전

용액 공정 PDA: 비아 전 깊이 컨포멀 피복 + 카테콜·아민 금속 결합 자리
직진성 스퍼터의 벽면 증착 결손을 계면 측 임계 두께 저감으로 보상

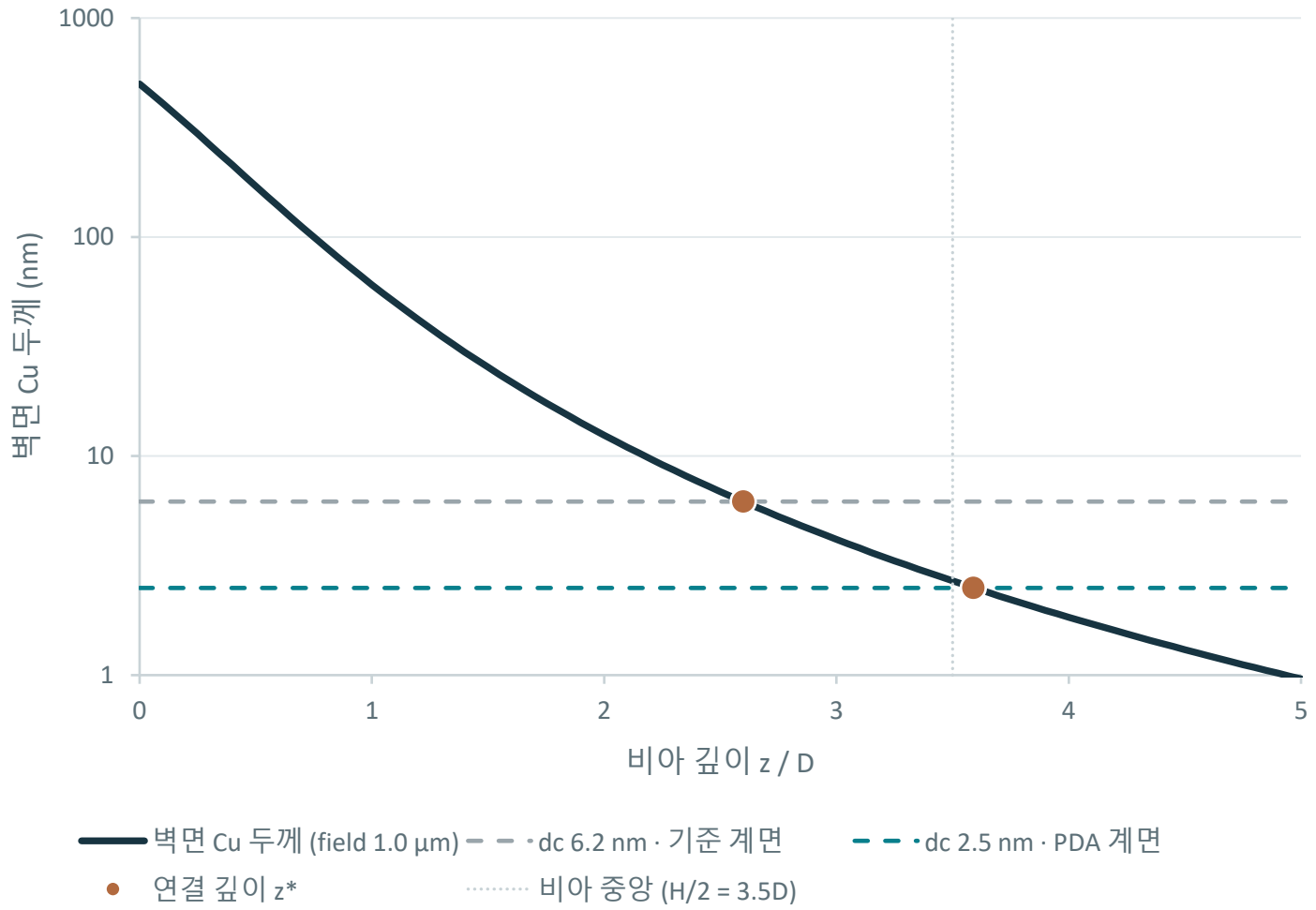
시드 연결 성립 조건 $t_f \cdot F(z/D) \geq d_c$
고정 깊이: 필요 증착량 $t_f \propto d_c$ · 고정 증착량: 연결 깊이 $z^* \propto d_c^{-1/3}$



쿨스 적용 설계 · dc 범위: Schuster et al., 2021, Table 1 · 그림: PDA 비아 계면과 금속 성장

비아 깊이별 벽면 증착량과 시드 연결 깊이

D 50 µm · H 350 µm (AR 7) 유리 비아 · 양면 스퍼터 field Cu 1.0 µm/면 · 해석 모델 계산값



단면 시드 연결 깊이

130 → 180 µm

2.6D → 3.6D (d_c 6.2 → 2.5 nm)

양면 합산 연결 길이 · H 350 µm

260 → 360 µm

중앙 미연결 90 µm → 전 깊이 연결

전 깊이 연결 필요 field Cu

2.30 → 0.93 µm

면당 증착량 60% 저감, 개구부 오버행 동반 저감

해석 모델: 코사인 입사 · 부착계수 1 · 직진 비행 · 벽면 형태계수 $F(X) = (X^2+½)/√(X^2+1) - X$, $X = z/D$

플라즈마·PDA·스퍼터·도금 통합 공정 설계

계면 준비 → 컨포멀 PDA → 양면 시드 연결 → 간극 연결 도금, 단계별 정량 설계 입력

공정 단계	설계 포인트	정량 설계 입력	제조 관점의 목표
플라즈마	세정과 유리 표면 Si–OH 활성화	O_2/Ar 플라즈마 · 물 접촉각 10° 이하	PDA 부착·전 깊이 피복 균일도
PDA 코팅	벽면 친수화 · 카테콜·아민 결합 자리	도파민 2 mg/mL · pH 8.5 · 10–20 nm	임계 연결 두께 d_c 저감 · 젖음성 확보
스퍼터	양면 순차 Ti/Cu 시드 · 깊은 벽면 연결	Ti 50 nm / Cu 1.0 µm (field) · $z^* = 3.6D$/면	AR 7 비아 전 깊이 시드 연결
후속 도금	연결 시드 강화 · 잔여 간극 성장 연결	2 A/dm² · 0.44 µm/min · $t = g / 2v$	간극 10 µm 연결 11분

바텀업 구성 벽면 젖음성 · 금속–벽면 밀착 확보, 미충전 억제

스퍼터 구성 양면 시드 전 깊이 연결 → 컨포멀 도금 → 충전

쿨스 공정 설계 · 연결 깊이: 해석 모델 계산값 · 도금 성장 속도: 패러데이 법칙 계산값

주식회사 쿨스

대표이사 조진현

본사 | 경상남도 창원시 의창구 중동북로 23

지사 | 경기도 화성시 동탄구 삼성1로 160

M. 010-2280-9414

E. jhcho@cools.co.kr

H. www.cools.co.kr