

웨이퍼 전체가 아닌 Cu 접합계면만 가열하는 하이브리드 본딩

조진현 쿨스 대표 jhcho@cools.co.kr

SUMMARY

하이브리드 본딩은 Cu 접합을 완성하기 위해 웨이퍼 전체를 0.5~4시간 가열한다. 접합에 필요한 열은 계면 근방 수 마이크로미터에만 필요한데도 그렇다. 1500 nm 광은 실리콘의 밴드갭 흡수가 억제되는 파장대여서 기판을 투과하고, 패드 배면의 얇은 흡수층에서만 나노초 동안 열이 발생한다. 가열 온도가 아니라 가열 위치와 시간을 바꾸는 접근이다. 열확산 깊이, 필요 에너지, recess 폐쇄, 냉각률의 계산 근거와 PIC-EIC 실증 조건을 Appendix 25개 항목으로 실는다.

웨이퍼 전체가 아닌 Cu 접합계면만 가열하는 하이브리드 본딩

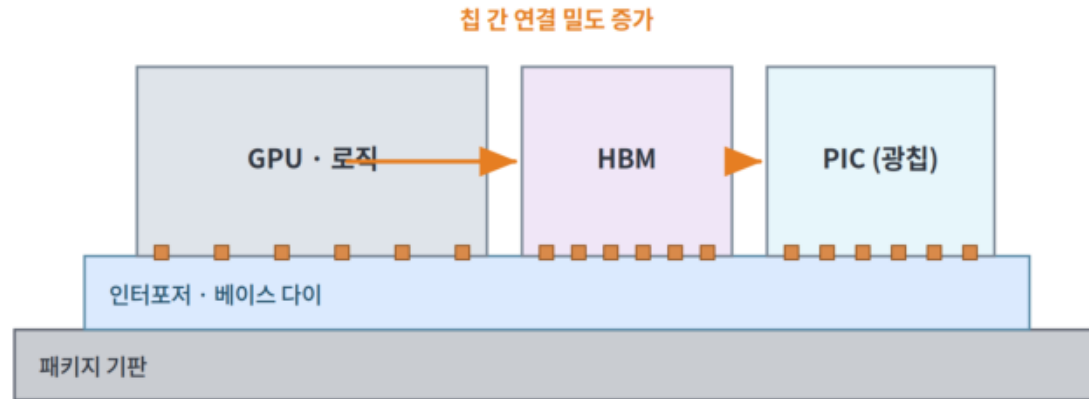
1500 nm 나노초 광열을 이용한 저열예산 Cu/유전체 접합 기술

Sub-bandgap Nanosecond Photothermal Hybrid Bonding

(주)쿨스 · 2026. 09.

AI 와 CPO 는 칩 사이의 연결 밀도를 빠르게 높이고 있다

하나의 패키지에 서로 다른 칩이 모이고, 칩 사이 연결은 계속 미세해진다



AI 연산 성능 요구가 칩렛 · 이종집적을 확대하고,
CPO 는 전자칩과 광칩을 더 짧은 거리에서 연결하도록 요구한다.

칩 간 연결 피치

양산 9 μm 급



현재 6 μm 급



2029 로드맵 4.5 μm

연구 수준

200 nm 피치 · 40 nm 미만 정렬오차 보고

칩 간 연결이 미세해질수록 기존 범프 방식만으로는 밀도와 정렬 요구를 만족하기 어렵다.

범프를 없애는 하이브리드 본딩이 초미세 연결의 핵심 공정이 되었다

돌출 범프로 잇는 방식과 면끼리 직접 맞대는 방식



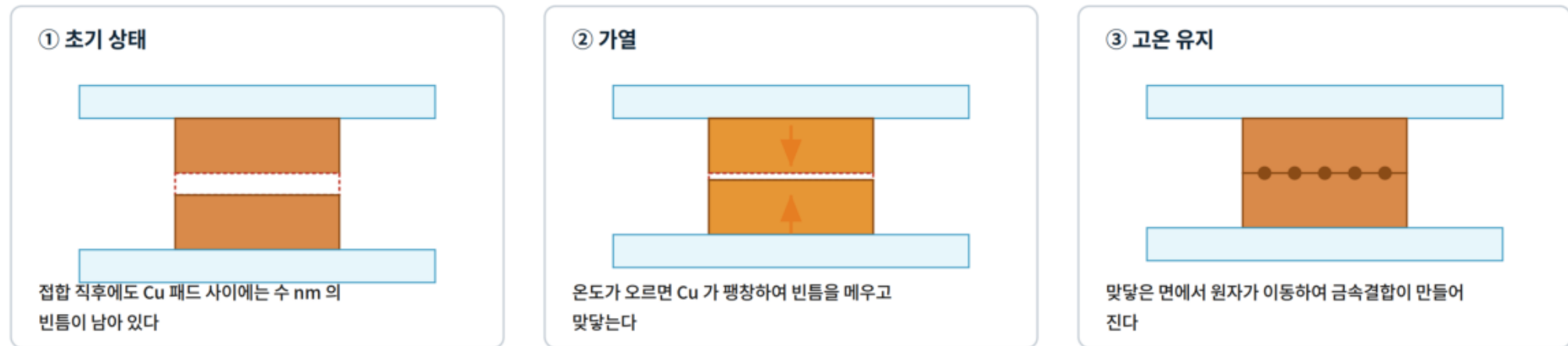
하이브리드 본딩은 AI · CPO 용 초미세 이중집적을 가능하게 하는 연결 방식이다.

현재 Cu 접합은 본딩 후 웨이퍼 전체 어닐링에 의존한다

현행 하이브리드 본딩 공정과 Cu 를 가열하는 이유



이 단계에서 Cu 에 열이 필요한 이유

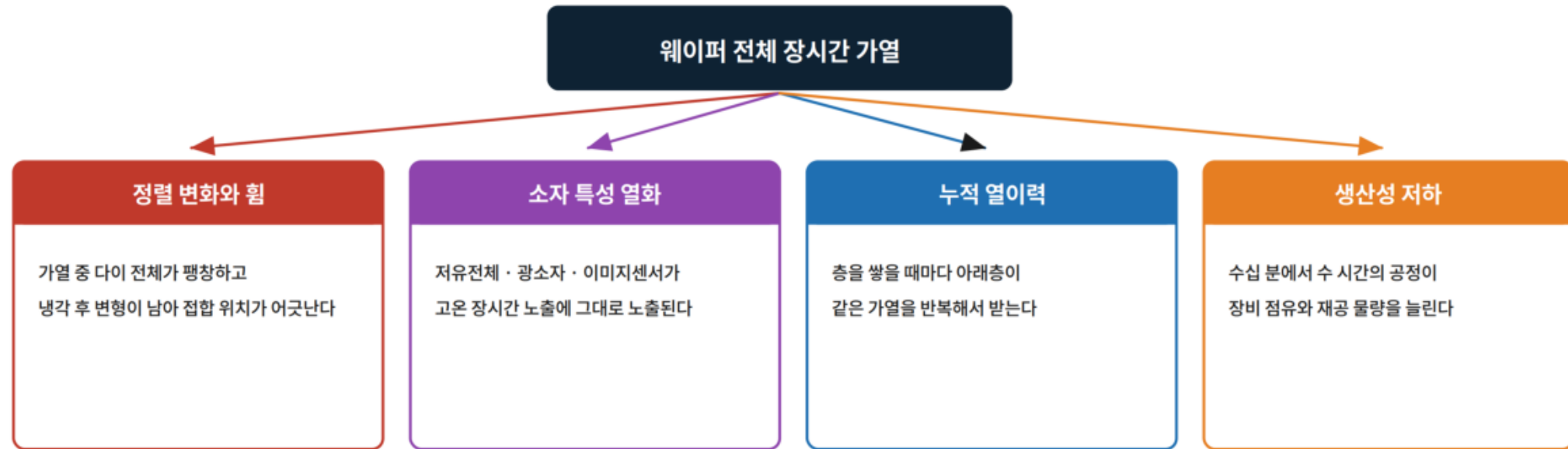


현재 방식은 이 세 과정을 위해 웨이퍼 전체를 오랫동안 가열한다.

현재 방식은 Cu 접합을 완성하기 위해 웨이퍼 전체를 오랫동안 가열한다.

장시간 전면 가열이 차세대 이종집적의 병목이 된다

웨이퍼 전체를 오래 가열하면 네 가지 손실이 함께 발생한다



접합에 필요한 열과 보호해야 할 소자가 같은 온도 이력을 받는 것이 근본 문제이다.

접합에 필요한 열은 계면 근방 수 μm 에만 필요하다

접합에 필요한 열은 접합계면 근방 수 μm 에만 필요하다

기존 공정이 가열하는 범위

상부 다이
유전체 · 소자층
접합계면
하부 다이
웨이퍼 기판

웨이퍼 · 다이 · 적층 구조 전체

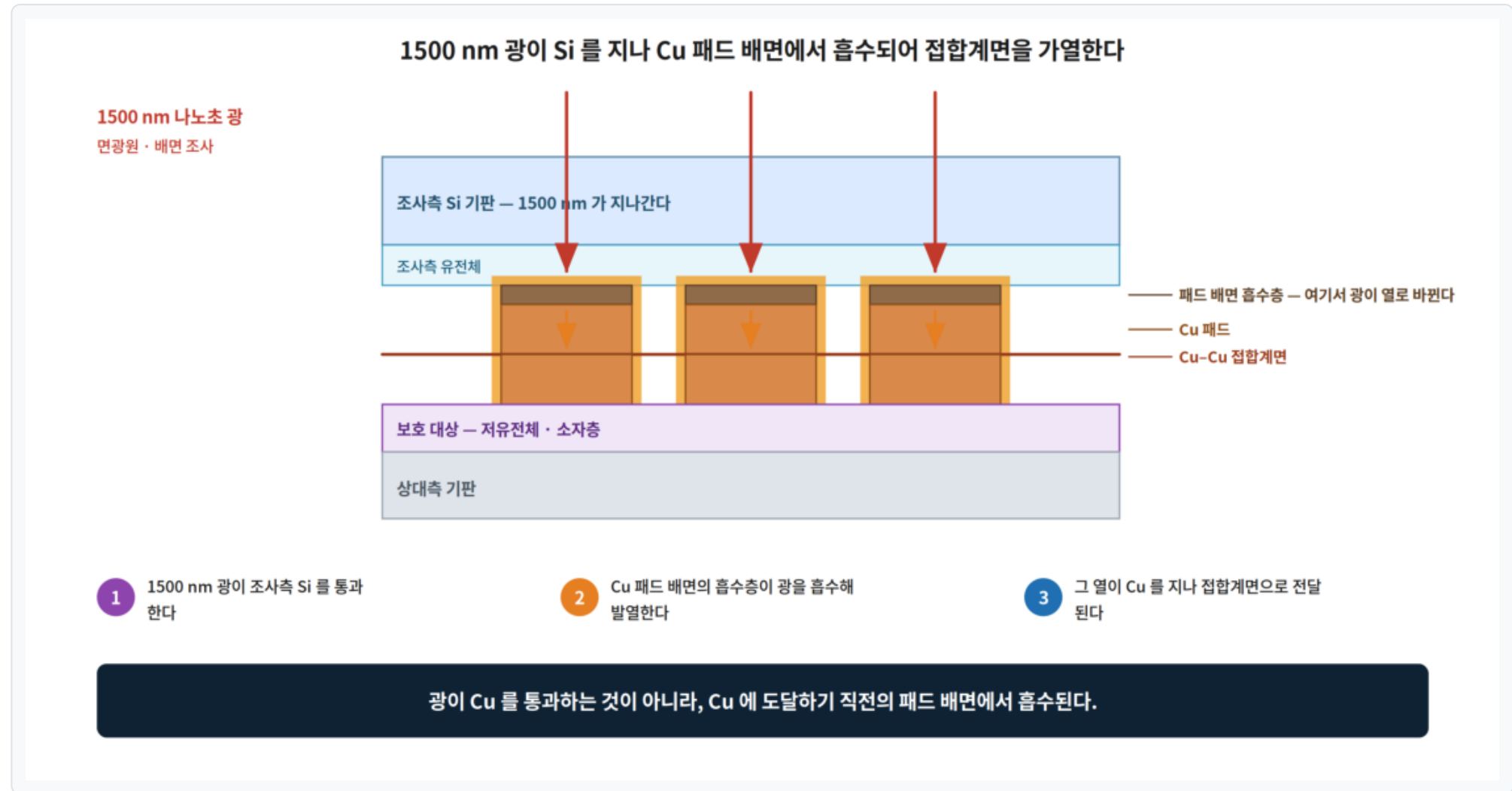
실제로 접합이 일어나는 범위

상부 다이
유전체 · 소자층
계면 근방 수 μm
접합계면
하부 다이
웨이퍼 기판

Cu 패드와 접합계면 근방

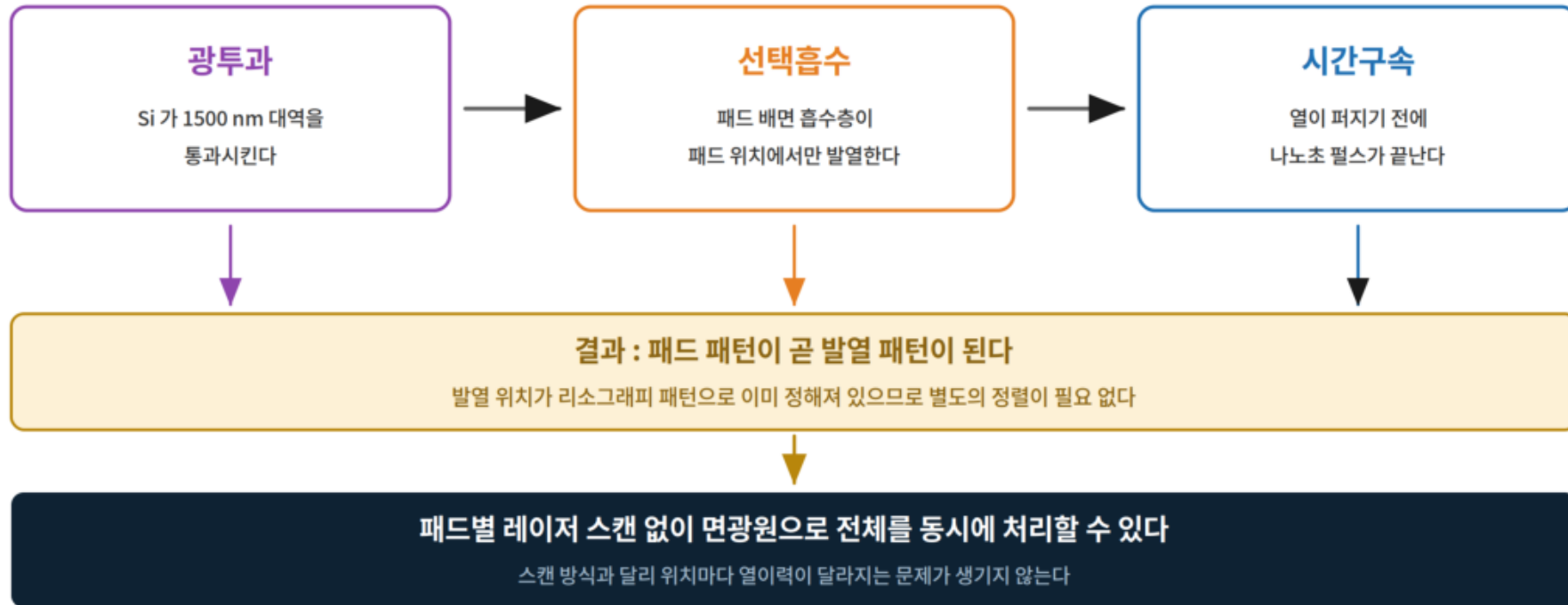
접합부만 선택적으로 가열할 수 있다면 Cu 접합과 소자 보호를 분리할 수 있다.

쿨스는 1500 nm 광으로 Cu 패드 배면에서만 열을 발생시킨다



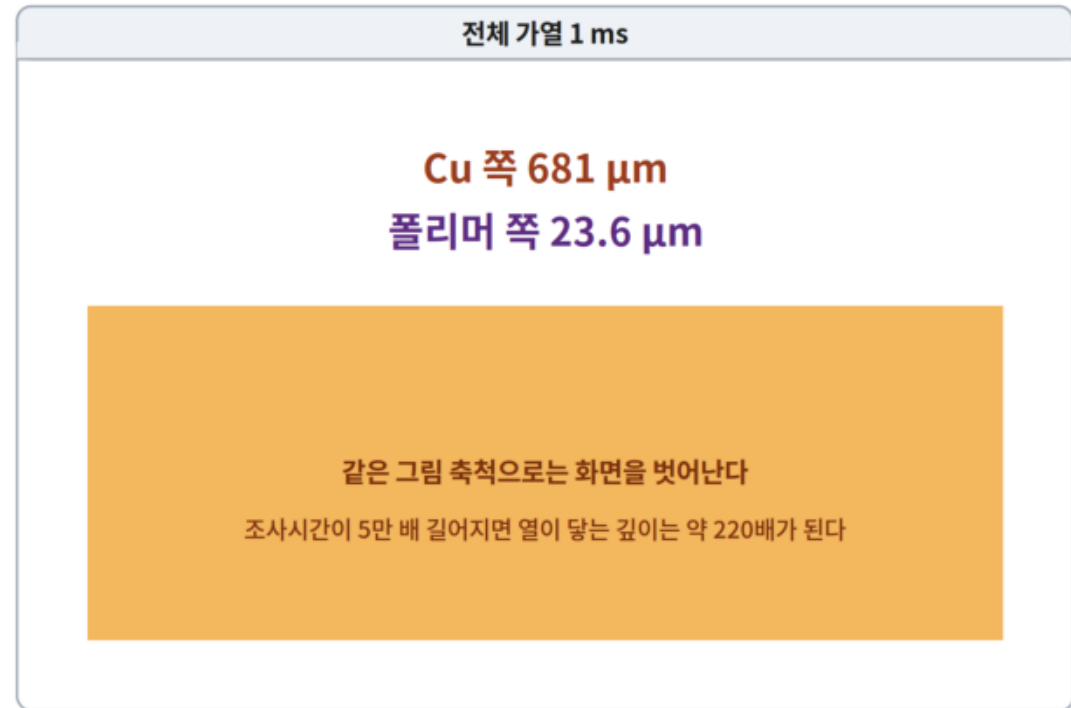
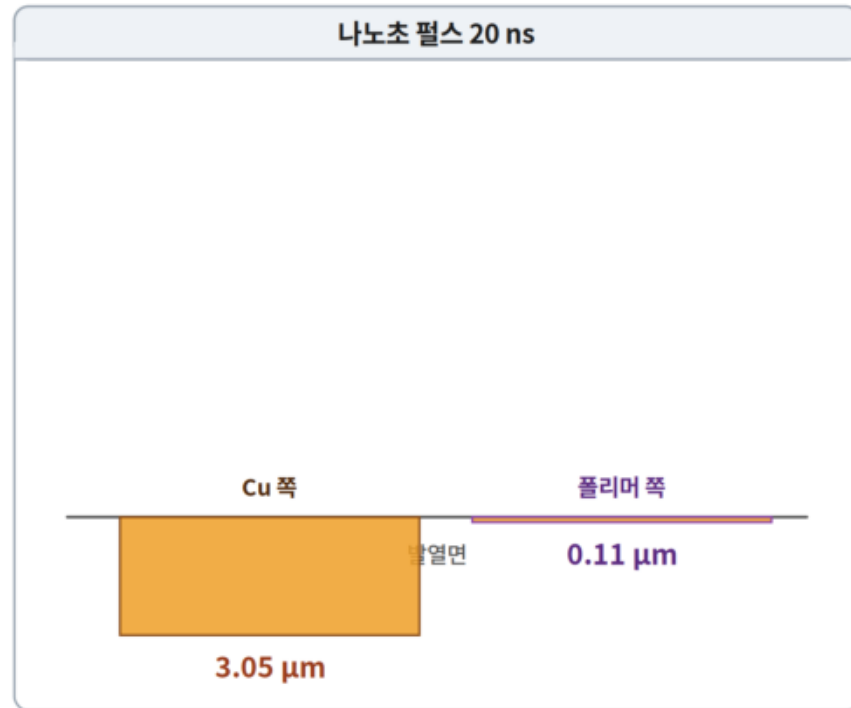
광투과 · 선택흡수 · 나노초 열구속이 하나의 구조로 작동한다

세 요소가 연결되어야 계면만 선택적으로 가열된다



20 ns 동안 열은 Cu 약 3 μm , 폴리머 약 0.1 μm 범위로만 확산된다

조사시간이 짧을수록 열이 닿는 깊이가 줄어든다



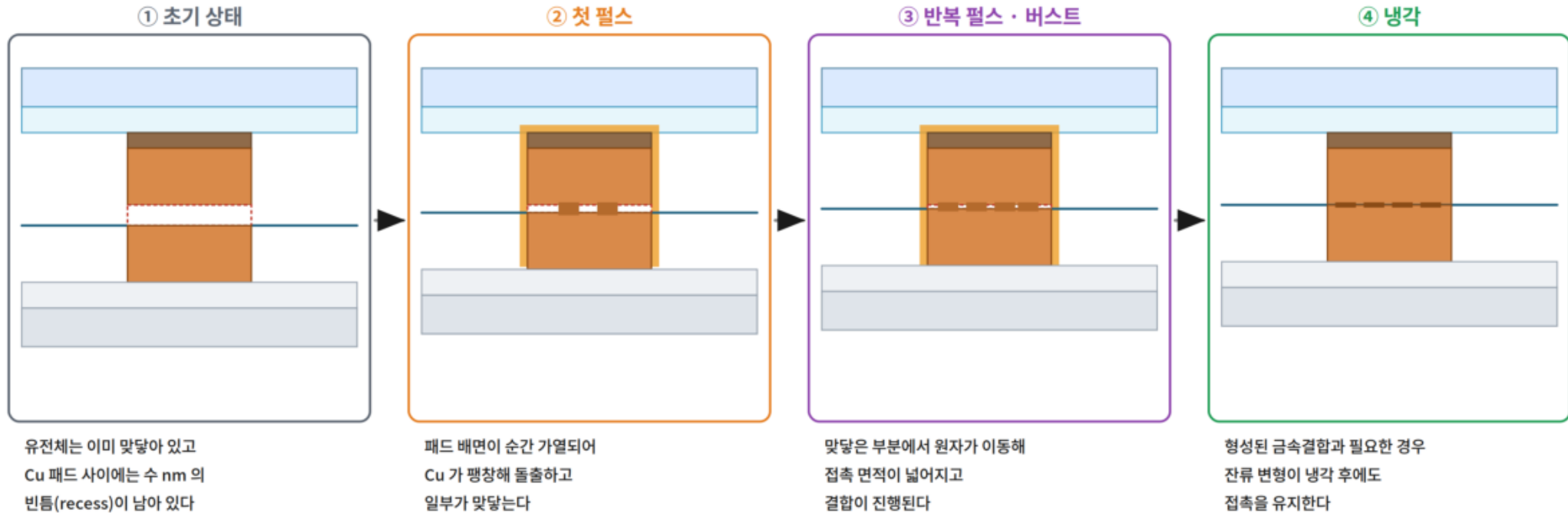
나노초는 단순히 빠른 것이 아니라, 열이 닿는 깊이를 정하는 설계수단이다.

계산 조건과 관계식은 Appendix A-2 에 정리하였다.

순간 열팽창으로 recess 를 닫고, 반복 펄스로 금속결합을 형성한다

Cu 의 순간 열팽창 돌출(Cu pumping)이 먼저 접촉을 만든다

빈틈을 닫고 접촉을 넓혀 냉각 후에도 유지되는 금속결합을 만든다



②의 순간 팽창 돌출을 Cu pumping 이라 부른다.

한 번의 펄스로 접합이 끝나지 않으며, 펄스 수 · 간격 · 버스트 구성이 접합을 완성하는 핵심 공정변수이다.

본 기술의 차이는 가열 온도가 아니라 가열 위치와 시간이다

비교 항목	오븐 어닐링	열압착 TCB	레이저 가열 (일반)	쿨스 기술
가열 대상	웨이퍼 전체	다이 전체	조사 영역과 주변	패드 배면 흡수층
고온 노출시간	0.5 ~ 4 시간	수 초 ~ 수십 초	방식별로 다름	20 ~ 200 나노초
정렬 · 힘 영향	큼	큼	위치별 이력 편차	다이 평균온도 상승 제한
대면적 동시 처리	배치 단위	다이 단위 축차	스캔 시간 비례	면광원 일괄

접합계면만 선택 가열함으로써 전체 가열과 국부 스캔 방식의 한계를 동시에 피한다.

기존 anneal 의 열예산을 먼저 줄이고, 최종적으로 완전 치환한다

기존 라인의 어닐링 조건을 먼저 줄이고, 이후 완전히 대체한다

1단계 — 열예산 저감형

- 나노초 광열로 Cu 접합을 먼저 형성한다
- 유전체 안정화에 필요한 저온 · 단시간 후처리만 남긴다
- 기존 어닐링 조건을 줄이는 형태로 라인에 도입한다

기존 공정과 병행 가능한 진입 단계



2단계 — 완전 치환형

- 상온에서 유전체 접합강도가 충분한 구조
- 나노초 광열로 Cu 접합까지 완성한다
- 기존 고온 어닐링 단계를 제거한다

열예산과 택트타임을 함께 없애는 목표 단계

기존 라인의 공정 순서와 패드 구조를 그대로 두고, 어닐링 조건부터 줄여가는 진입 방식이다.

PIC-EIC 는 광경로와 고객효과를 동시에 검증할 수 있는 첫 시장이다

1 1550 nm 광경로 확보가 유리

광칩이 이미 이 대역에서 동작하도록 설계되어 있다

2 저유전체 열예산 문제가 직접 존재

전자칩 배선층의 저유전체가 공정 온도를 제한한다

3 광결합 정렬 요구가 엄격

광 도파로끼리의 결합은 정렬 오차 허용폭이 매우 좁다

4 한 시편에서 동시 평가 가능

접합저항 · 강도 · 광손실 · 정렬을 함께 확인할 수 있다

공동 PoC 순서

광투과 · 흡수 확인



recess 폐쇄 확인



접합저항 · 강도 확인



광손실 · 정렬 유지 확인

후속 확장시장

CIS

HBM

인터포저-GPU

낸드 X-stack

PIC-EIC 공동 PoC 로 계면 선택가열의 접합성과 소자 보호효과를 검증한다

1 시장 문제

연결 피치는 계속 미세해지는데, 기존 하이브리드 본딩은 Cu 접합을 위해 웨이퍼 전체를 장시간 가열한다.

2 쿨스 기술

1500 nm 투과경로와 Cu 패드 배면 흡수층을 이용해 접합계면 근방만 나노초 동안 가열한다.

3 고객 가치

정렬 변화와 힘, 소자 열화, 적층 누적 열이력,택트타임 부담을 함께 줄인다.

4 실행 제안

PIC-EIC 시편을 이용한 공동 PoC 로 접합 성립과 소자 보호를 동시에 확인한다.

쿨스는 PIC-EIC 시편 공동 PoC 를 통해 접합저항 · 강도 · 광손실 · 정렬 유지성을 검증하고자 합니다.

Appendix

기술 근거와 설계 계산

본편에서 다루지 않은 계산 · 조건 · 문헌 근거를 25개 항목으로 정리하였다.

이후 수치의 근거 구분

A-1 수치의 근거 구분

확정된 성능과 설계 추정을 시각적으로 구분한다

계산값

본 문서의 해석 모형에서 산출

문헌값

공개된 물성 · 광학상수

설계 가정

실측 전 설계 목표로 설정한 값

현재 단계

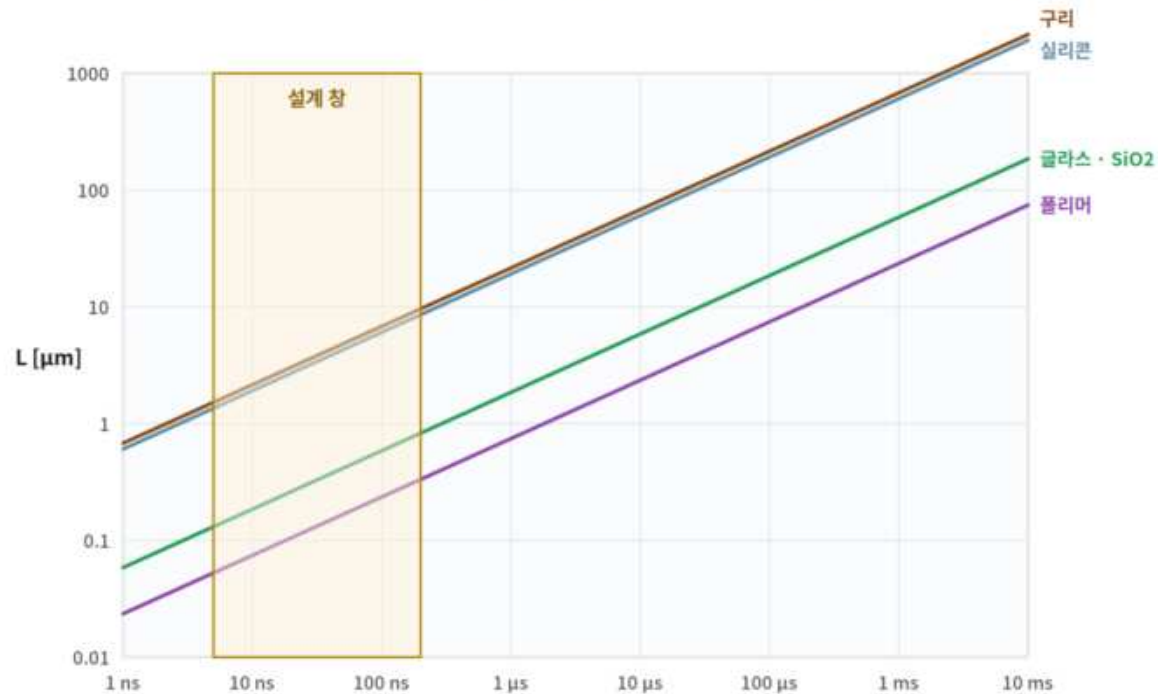
해석 기반 설계창 확보, PoC 검증 예정

- 이후 계산 슬라이드의 수치는 별도 표기가 없는 한 해석 모형에 의한 계산값이다.
- 물성값은 공개 문헌값을 사용하였으며, Ti 광학상수는 다층막 구성에 따라 실측 보정이 필요하다.
- 접합 성립 온도 · 어블레이션 임계는 설계 가정이며 PoC 판정항목이다.
- 현재 단계는 해석 기반 설계창 확보이며, PIC-EIC 시편으로 순차 검증한다.

펄스폭이 열영향 깊이를 결정한다

A-2 열확산 깊이와 펄스폭

도 7. 재료별 열침투 깊이 $L = 2\sqrt{(\alpha t)}$ 와 조사시간의 관계



로그-로그 좌표에서 모든 곡선은 기울기 1/2의 직선이다. 조사시간을 100배 줄이면 열침투 깊이는 10배 줄어든다.

설계 창인 5~200 ns 구간에서 구리는 1.5~7 μm, 폴리머는 0.05~0.3 μm 만 승온된다. 폴리머 두께가 수 μm 이상이면 사실상 무영향이다.

설계 질문

20 ns 동안 열은 어디까지 이동하는가

지배식 · 물성

$$L = 2\sqrt{(\alpha t)}, \alpha = k/(\rho c) \cdot \text{문헌 물성값}$$

계산 결과

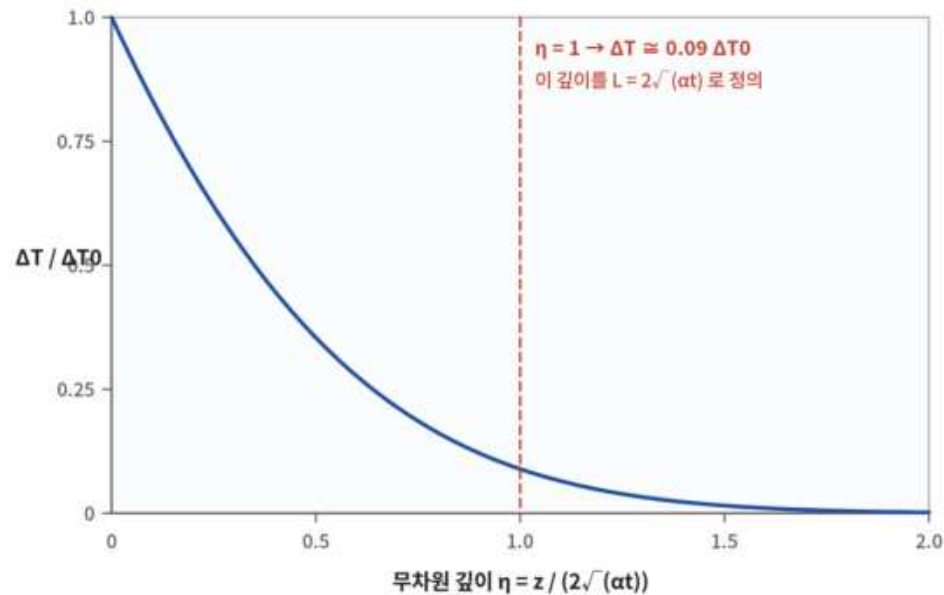
Cu 3.05 μm, 폴리머 0.11 μm (20 ns 기준 계산값)

공정 설계상 의미

접합계면과 보호 대상 사이의 거리로 펄스폭을 설계할 수 있다

온도 분포의 형상은 하나뿐이고 깊이축만 늘어난다

도 6. 무차원 깊이에 대한 정규화 온도 프로파일 — 모든 재료 · 모든 시간에 공통



프로파일 형상은 재료와 시간에 무관하게 동일하고, 깊이축만 $L = 2\sqrt{\alpha t}$ 배로 늘어난다.

본 구조에서는 펄스폭이 열영향 깊이를 결정하는 핵심 설계변수이다.

η 에 따른 온도 잔존율

0.0	100 %
0.25	62 %
0.5	35 %
0.75	19 %
1.0	8.9 %
1.5	1.5 %
2.0	0.2 %

설계 질문

재료와 시간이 달라지면 분포 모양도 달라지는가

지배식 · 물성

$$\Delta T(z,t) / \Delta T(0,t) = \sqrt{\pi} \cdot \text{ierfc}(z / 2\sqrt{\alpha t})$$

계산 결과

형상은 무차원 깊이 η 하나로 결정되며 재료 · 시간에 무관 (계산값)

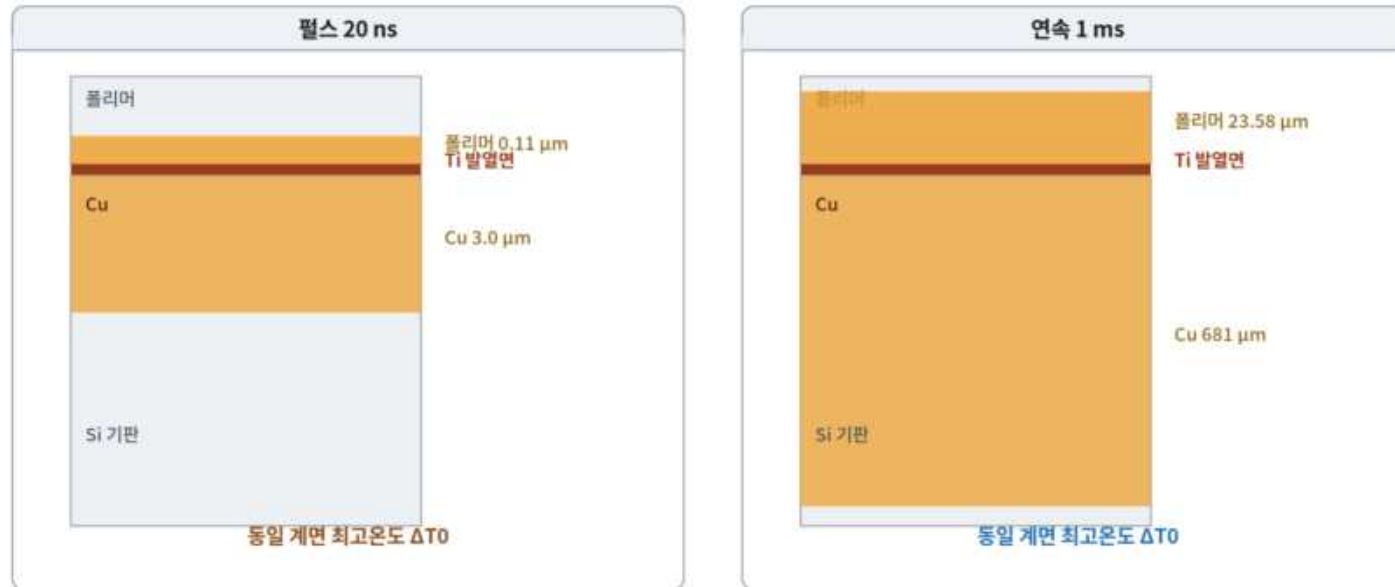
공정 설계상 의미

본 구조에서는 펄스폭이 열영향 깊이를 결정하는 핵심 설계변수이다

같은 계면 온도에서 1차원 열확산 깊이가 약 220배 다르다

A-4 펄스와 연속가열의 열영향 비교

도 8. 계면 최고온도가 동일할 때 펄스 조사와 연속 조사의 깊이방향 온도분포



계면에서 온도는 연속이므로 폴리머 접촉면의 최고온도는 두 경우가 같다. 다른 것은 그 온도가 미치는 두께이다.

펄스에서는 폴리머가 0.1 μm 만 승온되고, 연속에서는 24 μm 가 승온된다. 부피비로 약 220배이며, 이는 $\sqrt{(1 \text{ ms} / 20 \text{ ns})}$ 와 정확히 같다.

구리 쪽도 마찬가지로 펄스는 3 μm, 연속은 680 μm 를 데운다. 연속 조사에서는 기판 전체가 열용량으로 참여한다.

가열 부피가 $\sqrt{t}$ 로 커지므로, 같은 계면온도를 얻는데 필요한 에너지도 $\sqrt{t}$ 로 커진다.

설계 질문

계면 최고온도를 같게 두면 무엇이 달라지는가

지배식 · 물성

$L = 2\sqrt{(\alpha t)}$ 를 두 조사시간에 각각 적용

계산 결과

펄스 20 ns 대 연속 1 ms 에서 1차원 열확산 깊이가 비 약 220배 (계산값)

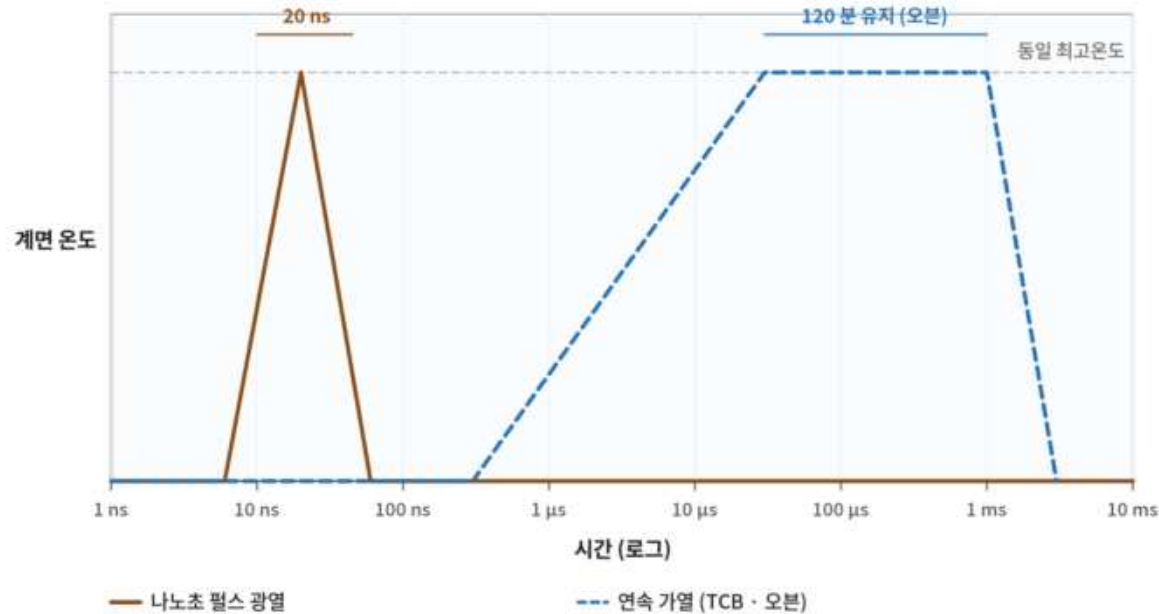
공정 설계상 의미

계면 온도를 낮추지 않고도 주변의 열노출 범위를 줄일 수 있다

손상은 온도와 노출시간의 결합 함수이다

A-5 손상의 온도-시간 의존성

도 9. 계면 온도의 시간 이력 : 나노초 펄스와 연속 조사의 노출시간 비교



두 경우의 최고온도는 같지만 그 온도에 머무는 시간이 다르다. 폴리머 분해, 산화, 확산, 크리프는 모두 시간에 의존하는 과정이므로, 동일 온도라도 노출시간이 몇 자릿수 짧으면 손상 반응이 진행할 시간 자체가 없다. 이것이 무열접합이라 부르는 근거이다.

설계 질문

같은 최고온도에서 노출시간이 다르면 손상은 어떻게 달라지는가

지배식 · 물성

분해 · 산화 · 크리프는 온도 의존 반응속도를 노출시간에 걸쳐 누적한 결과로 결정된다

계산 결과

노출시간 2×10^{-8} s 대 7.2×10^3 s (조건 비교값)

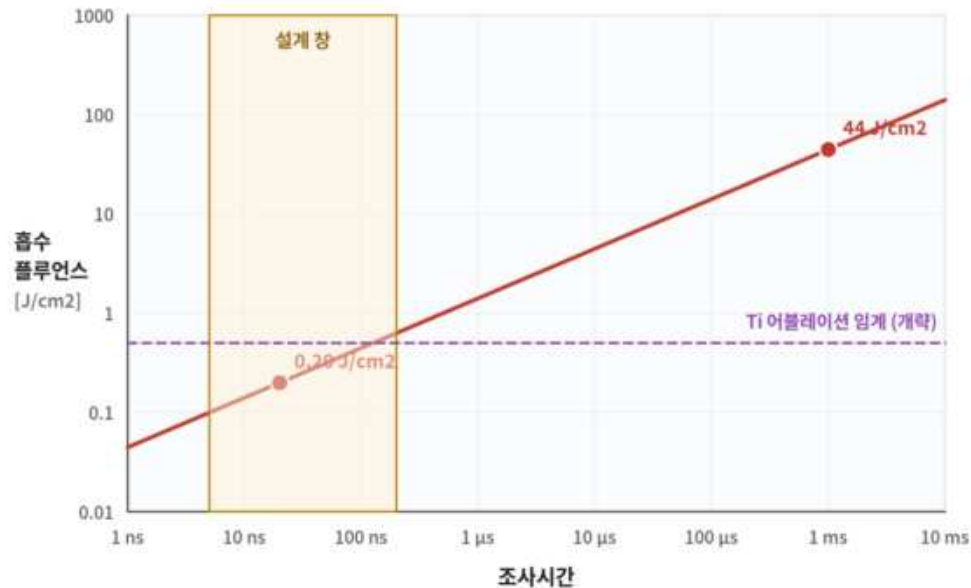
공정 설계상 의미

폴리머와 저유전체의 고온 노출시간을 크게 제한할 수 있다

조사시간이 길어질수록 필요한 에너지와 열확산 깊이가 함께 증가한다

A-C 조사시간별 필요 에너지

도 10. 계면 온도상승 300 K 를 만드는 데 필요한 흡수 플루언스와 조사시간의 관계



흡수 플루언스는 $F = q_0 t \propto \sqrt{t}$ 로 증가한다. 조사시간을 5만배 늘리면 필요한 에너지가 220배가 되고, 그 에너지는 전부 주변 부피를 데우는 데 쓰인다.
역으로 나노초 영역에서는 0.2 J/cm² 수준의 흡수 플루언스로 300 K 상승이 성립한다. 다만 이 값은 어블레이션 임계에 근접하므로 단발이 아니라 다발 누적으로 나눈다.
계산은 Ti 발열면을 사이에 둔 Cu 와 Si 의 열침투율 합 $e = 52.8 \text{ kW} \cdot \text{s}^{1/2} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 을 사용하였다.

설계 질문

같은 온도를 만드는 데 에너지가 얼마나 드는가

지배식 · 물성

$$F = 0.886 \cdot \Delta T \cdot e \cdot \sqrt{t}, e = \sqrt{(k\rho c)}$$

계산 결과

20 ns 0.20 J/cm², 1 ms 44 J/cm² (ΔT 300 K 설계 가정 기준 계산값)

공정 설계상 의미

짧은 조사가 에너지와 열영향을 동시에 줄이는 방향이다

반무한 1차원 모형에서 접합측 분배는 약 70%로 예측된다

A-7 계면 열분배

도 11. 열침투율 $e = \sqrt{kpc}$ 에 의한 발열면의 상하 열분배



표면 열원이 두 반무한 매질 사이에 있을 때, 각 방향으로 들어가는 열의 비는 열전도율이 아니라 열침투율 $e = \sqrt{kpc}$ 의 비로 결정된다. 이 비율은 시간에 무관하게 일정하므로, 펄스폭을 바꾸어도 분배는 변하지 않는다. 분배를 바꾸려면 기판 재료를 바꾸어야 한다. Si 기판에서는 30%가 아래로 새지만, 이것은 손실일 뿐 국부성을 훼손하지 않는다. Si 로 들어간 열도 같은 나노초 동안 서브마이크론만 침투한다. 글라스 기판에서는 96%가 위로 향하므로 동일 계면온도를 더 적은 에너지로 얻는다. 다만 냉각 후 열 배출이 느려 반복 조사 시 축열에 유의한다.

설계 질문

흡수층에서 난 열은 어느 쪽으로 가는가

지배식 · 물성

$$q_1/q_0 = e_1/(e_1+e_2), \text{ 열침투율 } e = \sqrt{kpc}$$

계산 결과

Cu 약 70% : Si 약 30%, 시간에 무관 (문헌 물성 기반 1차원 예측값)

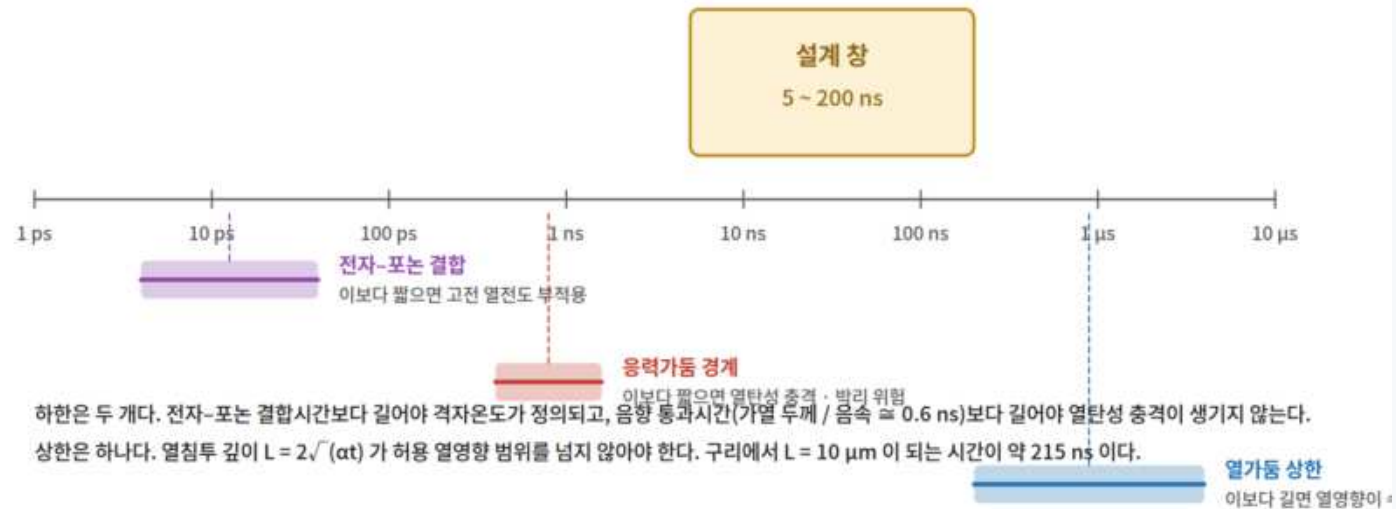
공정 설계상 의미

기판 재료 선택이 소요 에너지를 좌우하며 펄스폭과는 독립이다

펄스폭에는 물리적 하한과 상한이 함께 존재한다

A-8 펄스폭 설계창

도 13. 펄스폭 설계창 : 하한과 상한을 정하는 세 가지 시간 척도



설계 질문

펄스폭을 얼마까지 줄일 수 있는가

지배식 · 물성

전자-포논 결합시간 · 음향 통과시간 · 열가동 한계

계산 결과

설계창 5 ~ 200 ns (설계 가정)

공정 설계상 의미

너무 짧으면 열탄성 충격, 너무 길면 열영향 확대로 양쪽 모두 실패한다

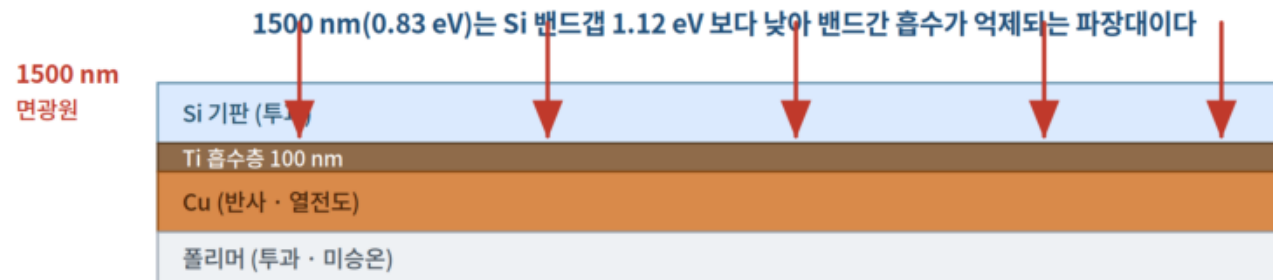
1500 nm 대역은 Si 의 밴드간 흡수가 억제되는 파장대이다

A-9 1500 nm Si 투과 특성

실제 투과율은 Si 두께 · 도핑 농도 · 표면 구조에 따라 측정으로 확정한다

도 2. 파장 1500 nm 에서 각 재료의 광학 거동과 선택 흡수의 성립

재료	1500 nm 에서의 근거	거동	흡수율(개략)
Si (고저항)	밴드간 흡수 억제 (흡수단 1107 nm)	저흡수	5%
SiO2 · 글라스	밴드갭 매우 큼	저흡수	3%
폴리머 (PBO · 에폭시)	전자전이 없음	저흡수	8%
Cu	자유전자 반사율 98% 이상	반사	2%
Ti	밴드간 전이 · 침투깊이 30 nm	흡수	45%



흡수가 Ti 100 nm 안에서 끝나므로 발열면이 리소그래피로 이미 정의되어 있다

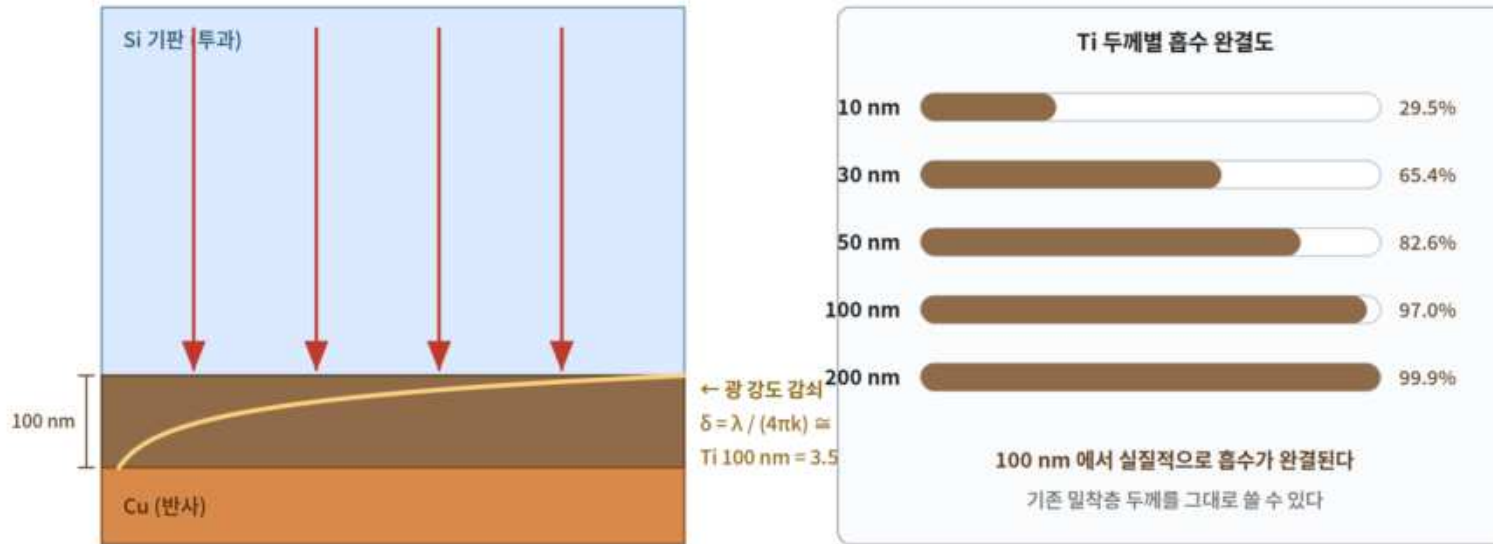
구리가 없는 영역에는 Ti 도 없으므로 그 자리의 발열이 억제된다

Ti계 배리어층 중심의 선택적 흡수 구조로 설계한다

A-10 Ti계 흡수층 광학특성

실제 다층막의 흡수율과 반사율은 측정 · 해석으로 확정한다

도 12. Ti 흡수층의 광 침투깊이와 두께에 따른 흡수 완결성



Ti 표면 반사율이 약 55% 이므로 입사광의 약 45% 가 층 내부로 들어가고, 그 가운데 97% 가 100 nm 안에서 흡수된다. 실효 흡수율은 약 44% 이다.

흡수가 30 nm 규모에서 끝나므로 발열은 사실상 표면 열원이며, Ti 100 nm 를 통과하는 열전도 시간은 약 0.3 ns 로 펄스폭보다 훨씬 짧다.

따라서 Ti 층은 광을 열로 바꾸는 변환면일 뿐 열저항으로 작용하지 않는다.

설계 기준

- 광 침투깊이 $\delta \approx 28$ nm (문헌 광학상수 기반)
- 100 nm 두께에서 층 내 흡수 97 %
- 실효 흡수율 약 44 % (반사 55 % 가정)
- Ti 100 nm 열통과 약 0.3 ns

설계 가정

다층막 구성 · 산화 상태 · 하부 반사에 따라 값이 달라지므로 실측 보정이 전제된다.

배리어 · 라이너는 구조마다 다르므로 두 실시형태로 구분한다

A-11 배리어 · 라이너 실시형태

'기존 Ti 배리어가 이미 있으므로 변경이 없다' 는 전제는 성립하지 않는다

무구조변경형

- 기존 배리어 · 라이너가 요구 흡수율을 만족하는 경우
- 적층 변경 없이 조사 조건만 설계
- 적용 전 실측 흡수율 · 반사율 확인이 전제
- 패드 저항 · CMP 조건 변화 없음

최소구조변경형

- 흡수율이 부족한 경우 초박막 흡수층을 추가하거나 조성 · 두께를 조절
- 후보 : Ti, TiN, TaN 등 흡수성 금속 · 금속질화물
- 삽입 위치는 조사측 패드 배면으로 고정
- 두께는 흡수 완결과 저항 증가의 절충으로 결정

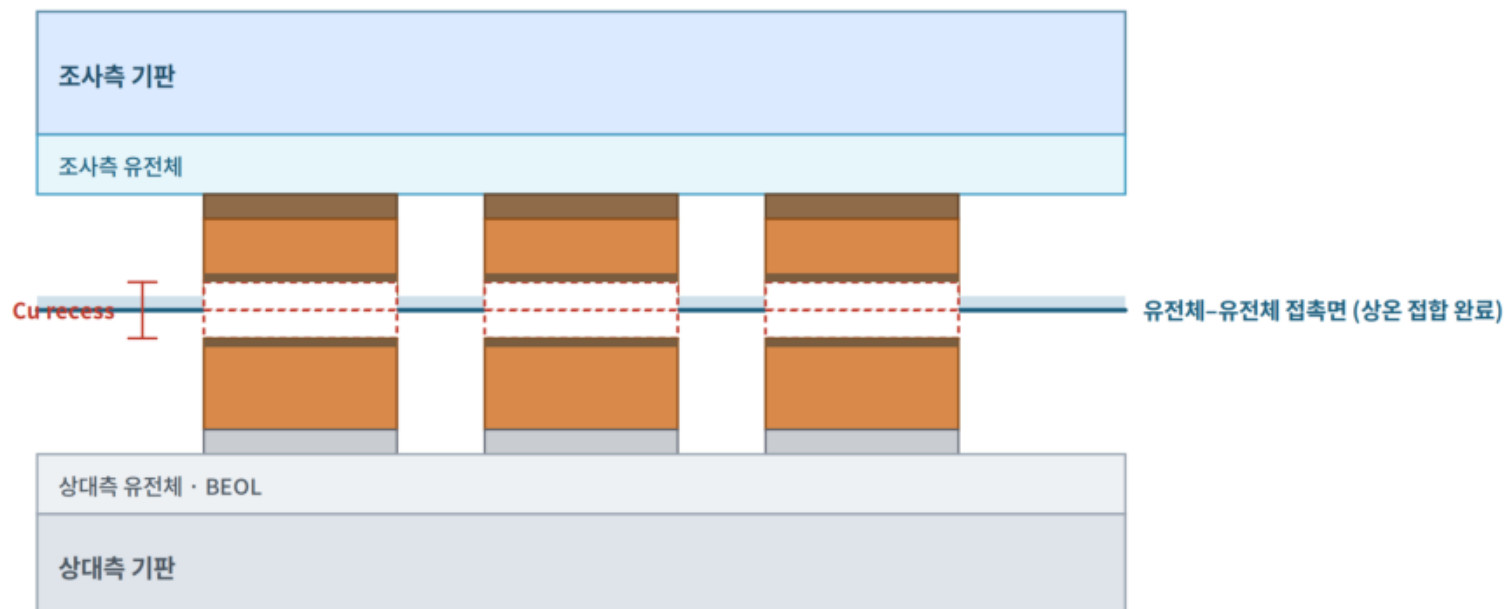
흡수층 도입 시 검증 항목

항목	확인 내용	판정 기준
전기저항	패드 직렬저항 증가분	접합저항 규격 내 기여분
Cu 확산 방지	배리어 기능 유지 여부	열이력 후 확산 프로파일
접착성	하부 유전체 · Cu 와의 밀착	박리 · 크랙 유무
CMP 호환성	연마 선택비와 디싱 거동	recess 제어 범위 유지

가열이 시작되는 시점의 계면은 아직 Cu-Cu 가 아니다

유전체는 이미 접착했고, Cu 는 수 nm recess 와 산화막을 사이에 두고 떨어져 있다

접합 전 초기 상태 — 유전체는 이미 접착했고 Cu 는 아직 떨어져 있다



- **Cu recess** CMP 로 형성한 수 nm 수준의 함몰 — 유전체 접합을 먼저 성립시키기 위한 의도적 단차
- **Cu 표면 상태** 자연 산화막 또는 활성화 처리면 — 금속 접착을 저해하는 요인
- **실제 Cu-Cu 접착** 이 시점에는 접착하지 않았거나 부분 접착 — 어닐링이 필요한 이유
- **흡수층 위치** 조사측 패드 배면 — 광이 Cu 를 지나기 전에 도달하는 위치

나노초 가열이 Cu-Cu 결합으로 이어지는 경로는 하나가 아니다

A-12 고상확산 및 국부용융 경로

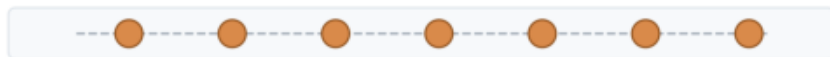
고상 확산 방식과 국부 용융 방식을 서로 다른 공정으로 구분한다

나노초 가열이 Cu-Cu 결합으로 이어지는 경로 — 네 가지 후보 메커니즘

A. 계면확산 · 결정립 성장

고상 확산 방식

이미 Cu-Cu 가 접촉한 영역에서 표면 · 입계 확산이 일어나고 결정립이 계면을 가로질러 성장



B. 국부 열팽창에 의한 recess 패쇄

고상 확산 방식

패드가 국부 승온으로 축방향 팽창하고 연화하여 잔여 간극을 메우고 접촉면적을 확대



C. 다중 펄스 누적 활성화

고상 확산 방식

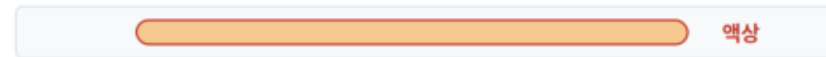
반복 펄스로 계면 활성화와 확산을 누적시켜 단발로는 부족한 결합을 단계적으로 형성



D. 국부 용융 접합

용융 방식 (별도 공정)

용점 근방 또는 국부 용융을 이용해 요철을 액상으로 메우는 별도 공정 모드



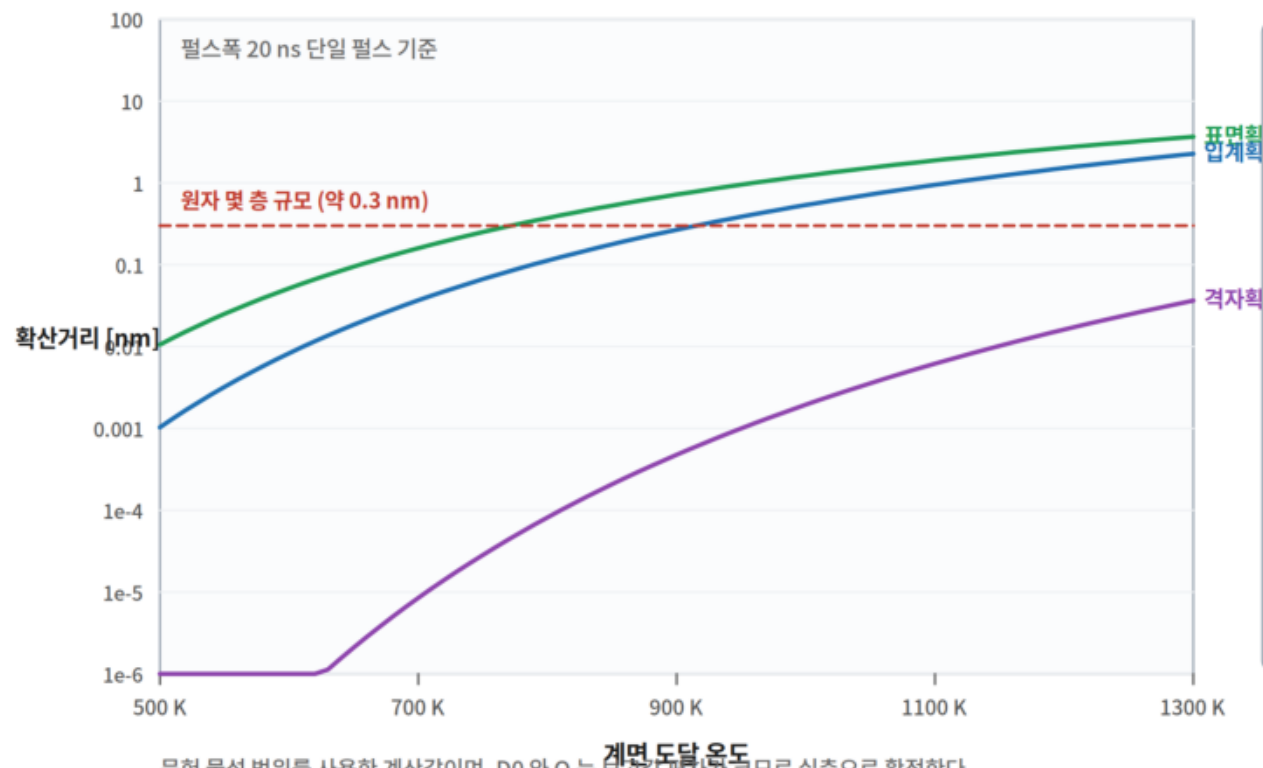
어느 메커니즘이 지배적인지는 아직 확정되지 않았다.
고상 확산 방식(A·B·C)과 국부 용융 방식(D)은 서로 다른 공정으로 구분하여 검증한다.

접합동역학 (1) — 나노초 펄스의 확산거리는 원자 수 층 규모이다

A-13 Cu 확산거리 계산

열이 발생한다는 사실과 금속학적 접합이 완성된다는 사실은 다르다

나노초 단일 펄스에서 기대 가능한 Cu 확산거리



읽는 법

- 20 ns 단발에서 격자확산은 사실상 기여하지 않는다
- 표면 · 입계확산은 1000 K 이상에서 원자 수 층 규모에 도달한다
- 따라서 접촉이 이미 성립한 영역의 계면 소멸에는 기여할 수 있으나
- 수 nm 의 recess 를 확산만으로 메우는 것은 성립하지 않는다
- recess 폐쇄는 열팽창(B)이, 계면 결합은 확산(A·C)이 담당하는 분업 구조로 보아야 한다

문헌 물성 범위를 사용한 계산값이며, D0 와 Q 는 보고된 편차가 크므로 실측으로 확정한다.

비교 : 300 °C 2시간 조건에서는 표면확산 기준 수 μm , 입계확산 기준 수 μm 규모로 계산된다.

즉 종래 어닐링은 확산거리를 과잉 확보하는 방식이고, 본 기술은 필요한 만큼만 국부적으로 공급하는 방식이다.

recess 폐쇄의 1차 구동력은 구속된 Cu 의 순간 열팽창이다

단순식 $\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$ 는 자유 팽창 기준의 1차 근사이다

$$\Delta g = C_m \cdot \int \alpha_{Cu} \cdot \Delta T(z, t) dz$$

C_m : 패드 매립구속 · 유전체 강성 · 적층구조를 반영하는 보정계수
실제 계면 방향 변위는 매립구속, 깊이별 온도분포, 한쪽 또는 양쪽 가열, Cu 소성변형에 따라 달라진다.

자유팽창 기준으로 필요한 유효 가열길이 (1차 근사 · 계산값)

Cu recess	$\Delta T = 300\text{ K}$	$\Delta T = 500\text{ K}$	$\Delta T = 800\text{ K}$	판정 (자유팽창 기준)
2 nm	0.40 μm	0.24 μm	0.15 μm	자유팽창 기준으로 기하학적 폐쇄 가능 범위
5 nm	1.01 μm	0.61 μm	0.38 μm	$C_m=1$ 자유팽창 가정에서 1 μm 급 유효 가열길이 필요
10 nm	2.02 μm	1.21 μm	0.76 μm	패드 두께와 ΔT 를 함께 상향해야 하는 범위

표의 값은 recess 를 메우는 데 필요한 '가열된 Cu 기둥의 자유팽창 길이' 이며 $\alpha(\text{Cu}) = 16.5\text{ ppm/K}$ 를 사용하였다. 구속 조건에 따라 C_m 이 1보다 작아질 수 있다.

- 실제 접촉면적

표면 조도와 recess 분포에 따라 초기 접촉은 부분적이다. 열팽창으로 접촉면적이 확대되어야 확산 경로가 열린다.
- 산화막 존재 시

Cu 표면 산화막은 금속 접촉과 확산을 저해한다. 사전 활성화 또는 환원성 표면처리와의 조합을 PoC 판정항목으로 둔다.
- 펄스 누적 효과

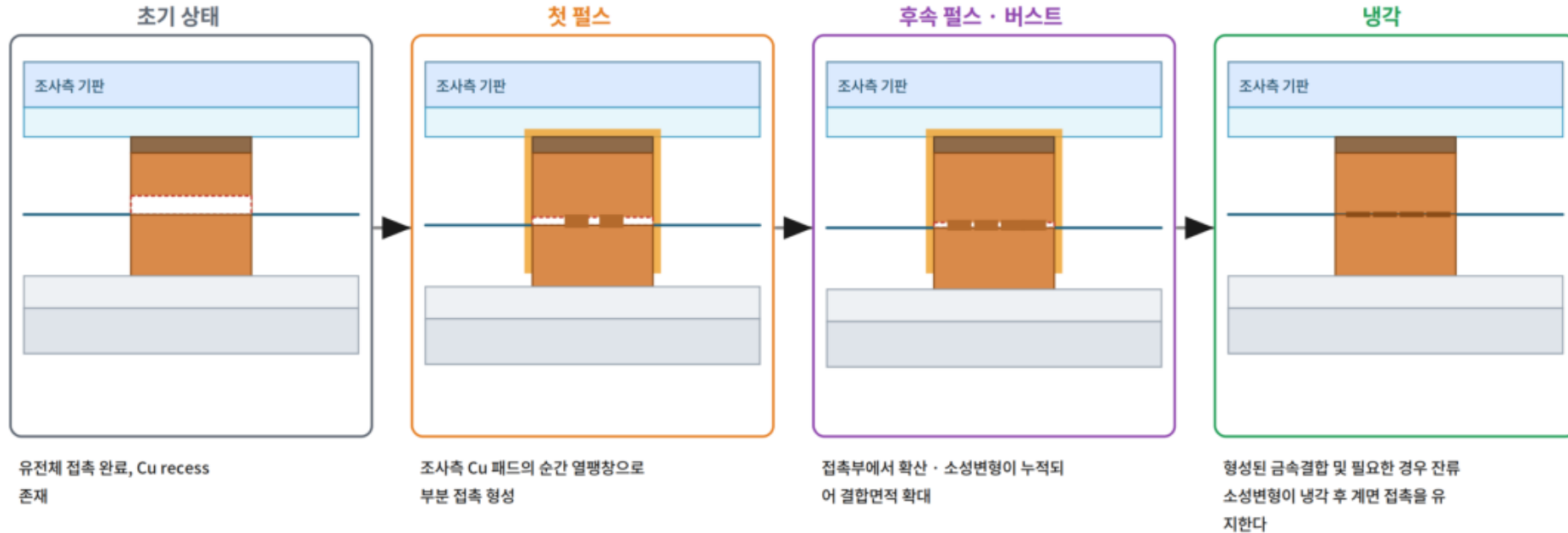
펄스 간격이 열확산 시간보다 짧으면 온도가 누적된다. 확산거리는 총 고온 유지시간의 제곱근으로 증가한다.

냉각 후 접착을 유지시키는 것은 형성된 금속결합과, 필요한 경우 잔류 소성변형이다

A-16 냉각 후 접착 유지 메커니즘

순간 열팽창으로 접착을 만들고, 누적 펄스로 결합면적을 넓힌다

냉각 후 접착을 유지시키는 결합 형성 — 시간 순서



핵심 공정변수

- 단일 20 ns 펄스가 접합을 완결한다고 전제하지 않는다. 단발 · 다중 펄스 · 버스트를 모두 실시형태로 둔다.
- 펄스 수, 펄스 간격, 잔열 누적이 접착면적과 결합 진행을 결정하는 1차 공정변수이다.

post-bond anneal 의 두 역할을 분리한다

본 기술이 직접 겨냥하는 것은 A 이며, B 는 적용 시나리오에 따라 남긴다

A. Cu recess 폐쇄 및 Cu-Cu 금속결합

- 금속 확산과 열팽창이 지배하는 과정
- 본 기술이 직접 대체를 겨냥하는 대상

B. 유전체-유전체 접합계면 안정화

- 공유결합 밀도 증가와 접합강도 상승
- 상온 접합강도와 요구 신뢰성에 따라 필요량이 달라짐

공정 적용 시나리오

열예산 저감형

초기 PoC 및 고객 도입의 현실적 진입경로

- 나노초 광열로 Cu 접합(A)을 먼저 형성
- 유전체 안정화(B)에 필요한 저온 · 단시간 후처리만 수행
- 기존 라인의 어닐링 조건을 단축하는 형태로 도입

완전 치환형

확장 목표

- 상온 유전체 접합강도가 충분한 경우
- 나노초 광열로 Cu 접합까지 완성
- 기존 고온 어닐링 단계를 제거

첨두 파워와 펄스폭은 두 임계 사이에서 최적화한다

A-16 첨두 파워와 펄스폭

접합 임계 이상, 흡수층 손상 · 어블레이션 · 열응력 임계 이하

첨두 열유속 [W/m^2]	도달 시간	Cu 열영향	20 ns 기준 발수	제약
1.0×10^{11}	20 ns	$3.0 \mu\text{m}$	1	손상 임계 근접
5.0×10^{10}	79 ns	$6.1 \mu\text{m}$	4	여유 확보
3.3×10^{10}	178 ns	$9.1 \mu\text{m}$	9	초기 실험 탐색 범위
2.0×10^{10}	493 ns	$15.2 \mu\text{m}$	25	열영향 상한 근처
1.0×10^{10}	$1.97 \mu\text{s}$	$30.4 \mu\text{m}$	100	국부성 약화

파워를 올릴 때 얻는 것

- 도달 시간 단축 ($\propto 1/\text{파워}^2$)
- 총 에너지 감소 ($\propto 1/\text{파워}$)
- 열영향 깊이 축소 ($\propto 1/\text{파워}$)

파워 상한을 정하는 것

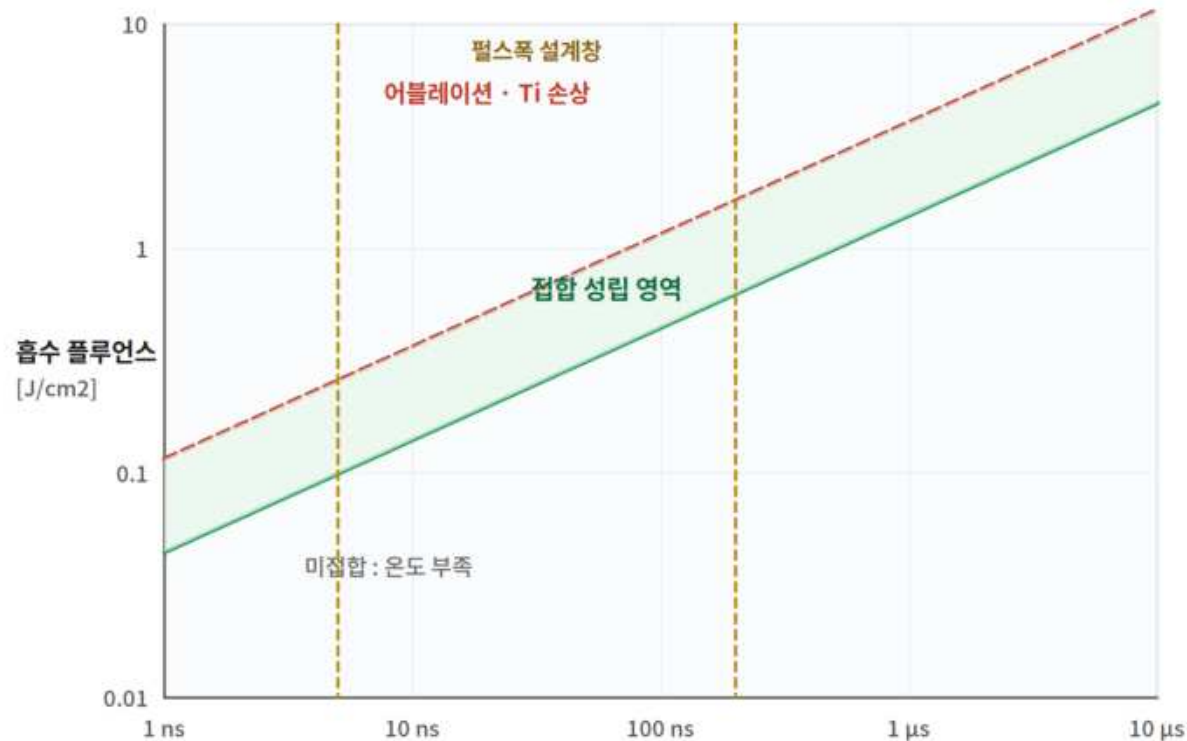
- 흡수층 어블레이션 · 용융 임계
- 급속 승온에 의한 열응력 · 박리
- 광원이 낼 수 있는 첨두 출력

공정창은 접합 임계와 손상 임계 사이로 정의된다

A-17 접합 임계와 손상 임계

두 경계가 모두 $\sqrt{t}$ 에 비례하므로 로그좌표에서 평행하다 (계산값 · 임계는 설계 가정)

도 17. 펄스폭과 흡수 플루언스로 정의되는 공정창



경계선의 의미

하한선 (녹색)
계면 온도상승 300 K 도달선
 $F \propto \sqrt{t}$ 로 증가

상한선 (적색 점선)
Ti 어블레이션 · 용융 임계
역시 $\sqrt{t}$ 에 비례하므로
두 선은 평행하다

따라서 공정창의 폭은
펄스폭에 관계없이 일정하며,
짧은 펄스일수록 절대 에너지가
작아 장비 부담이 준다

접합 임계와 손상 임계가 모두 $\sqrt{t}$ 에 비례하므로 로그좌표에서 평행한 두 직선이 되고, 그 사이가 공정창이다.

실제 운용에서는 단발이 아니라 버스트를 쓰므로 세로축을 펄스당 플루언스로 읽고, 버스트 발수 N 만큼 하한선이 $1/\sqrt{N}$ 로 내려간다.

급냉이 미세조직을 보존하지만 응력 완화 기회도 함께 없앤다

A-18 급냉과 미세조직

조사 종료 직후 냉각률은 $10^9 \sim 10^{10}$ K/s 수준 (계산값)

방식	냉각률	조직에 대한 의미
오븐 어닐링	0.01 ~ 1 K/s	평형 조직, 입성장 충분
열압착 TCB	1 ~ 10 K/s	준평형 조직
나노초 광 열	$10^9 \sim 10^{10}$ K/s	급냉 조직, 입성장 억제

이점

- 미세립 · 나노트윈 조직이 보존된다
- 주변 배선의 조직 변화가 국한된다
- 금속간화합물 성장이 억제된다
- 이미 접합된 층을 다시 데우지 않는다

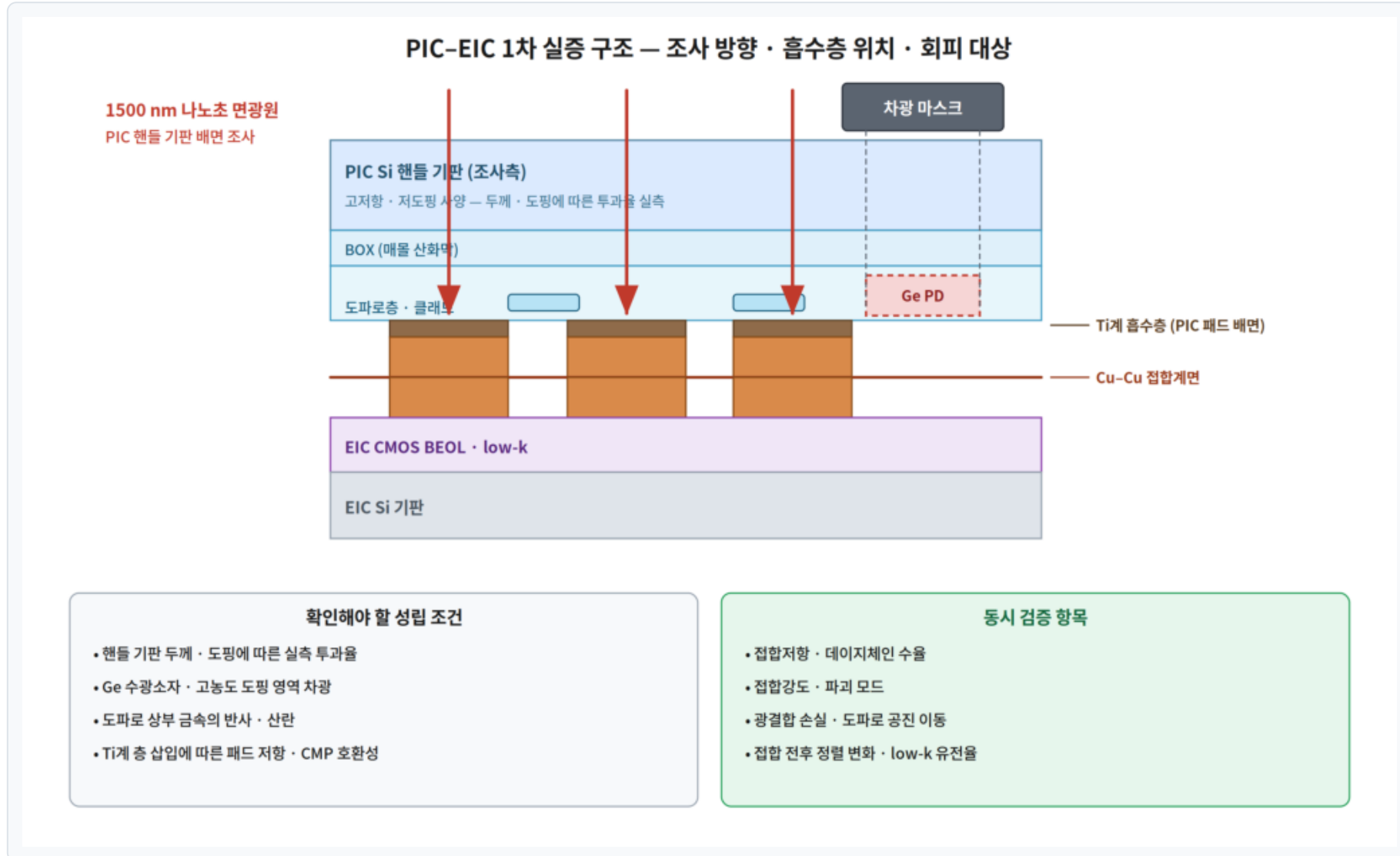
설계에서 다루어야 할 점

- 냉각 중 응력 완화가 일어나지 않는다
- 접합은 고온 구간에서 완결되어야 한다
- 버스트 말미 간격 조절로 냉각률을 완화할 수 있다
- 급냉 잔류응력은 실측 평가 항목이다

1차 실증 : PIC-EIC 조사 구조

A-19 PIC-EIC 상세 실증 조건

조사 방향 · 흡수층 위치 · 회피 대상 · 동시 검증 항목



1차 실증 : PIC-EIC 항목 정리

A-19 PIC-EIC 상세 실증 조건

병목

광결합 정렬 허용오차와 BEOL 저유전체 열예산이 동시에 접합 조건을 제한한다

적용 위치

PIC-EIC 사이 Cu/유전체 하이브리드 본딩 계면. 흡수층은 PIC 패드 배면

조사 방향

PIC Si 핸들 기판 배면에서 면광원 조사. Ge 수광소자 영역은 차광

해결 메커니즘

패드 배면 흡수층에서만 발열시켜 접합계면의 열이력을 선택적으로 형성

실증 KPI

접합저항 · 전단강도 · 광결합 손실 · 정렬 변화 · low-k 유전율

성립 조건

핸들 기판 두께 · 도핑에 따른 실측 투과율, 흡수층 삽입에 따른 저항 · CMP 호환성

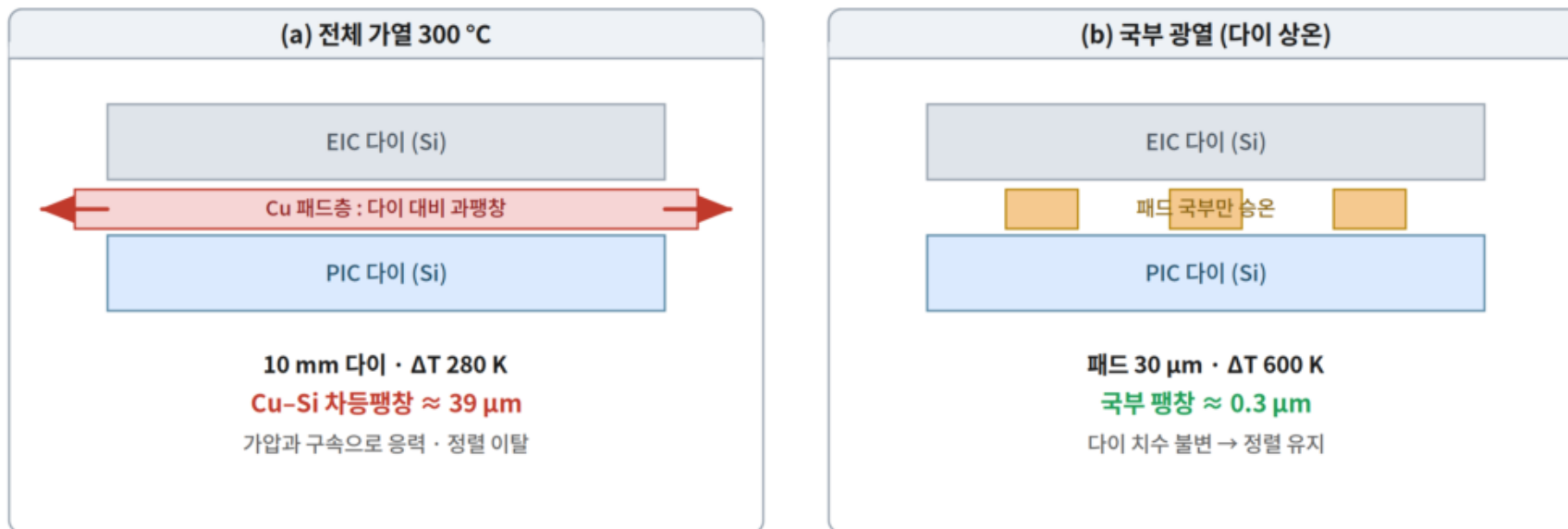
1차 실증에서 확인해야 할 것은 접합 성립 여부만이 아니라, 접합이 성립하면서 광학 특성과 정렬이 유지되는지이다.

다이 전체 평균온도 상승을 제한하면 정렬 부담이 크게 줄어든다

A-20 정렬 변화 계산

전체 가열의 차등팽창은 도파로 결합 요구를 두 자릿수 초과한다 (계산값)

도 20. 다이 규모 열팽창 : 전체 가열과 국부 광열의 정렬 영향 비교



정렬 요구와의 비교

• Cu 패드 정렬 요구 : 통상 1 μm 이하 • 도파로 대 도파로 결합 요구 : 0.2 μm 이하 • 전체 가열의 차등팽창은 이 요구를 두 자릿수 초과한다

전체 가열에서 Cu와 Si의 열팽창계수 차이는 약 13.9 ppm/K 이고, 10 mm 다이에서 280 K를 올리면 누적 차등팽창이 수십 μm에 이른다.

실제로는 가압과 구속으로 이 팽창이 억제되며, 그만큼 계면에 응력으로 남아 접합 후 잔류응력과 광학 특성 변화의 원인이 된다.

국부 광열에서는 팽창하는 부피가 패드 규모에 갇히고 주변이 상온이므로, 다이 전체 치수가 변하지 않아 정렬이 유지된다.

PIC-EIC 를 1차 실증 및 진입 시장으로 삼는다

나머지 네 시장은 성립 조건이 확인된 뒤 순차 확장한다

1차 실증 · 진입 시장

PIC-EIC 하이브리드 본딩

- 조사축 기판이 1550 nm 대역 동작을 전제로 설계되어 광 경로 확보가 가장 유리
- BEOL 저유전체가 열예산 한도를 정하는 구조여서 효과가 직접 드러남
- 도파로 결합 정렬 요구가 서브마이크론으로 가장 엄격
- 다이 규모가 작아 초기 실증 시편 제작이 용이
- 접합저항 · 강도 · 광손실 · 정렬을 한 시편에서 동시 측정 가능

확장 시장

CIS

화소 웨이퍼-로직 웨이퍼 본딩. 광경로가 화소 영역을 지나는 문제를 먼저 풀어야 함

HBM

층별 순차 접합. 조사 깊이와 상부 금속 차폐가 성립 조건

인터포저-GPU

대면적 빔 균일도와 분할 조사 이력 관리가 성립 조건

낸드 X-stack

웨이퍼 배면 투과와 대구경 균일도가 성립 조건

각 시장의 광경로 · 흡수층 위치 · 접합 깊이 · 허용 열예산이 성립하는 조건을 개별적으로 확인한 뒤 진입한다.

확장 시장의 병목 · 적용 위치 · 성립 조건

A-21 확장시장

동일 논리를 적용하되 시장마다 병목과 전제가 다르다

시장	고유 병목	적용 접합 위치	해결 메커니즘	성립 조건 · 주요 KPI
CIS	고온 유지시간에 비례하는 계면 결함으로 암전류 · 백색점 증가, 유기 필터 내열 한도	화소 웨이퍼-로직 웨이퍼 본딩 계면	패드 배면 흡수층 발열로 포토다이오드와 유기층의 고온 노출시간 제한	화소 영역 광경로 관리 / 암전류 · 백색점 · 접합저항
HBM	적층 단마다 하부층이 열이력을 중복 수신하여 층수 확장을 제약	다이 간 Cu 하이브리드 본딩 계면 (층별 순차)	새로 접합하는 계면의 흡수층만 발열시켜 하부층 재가열 회피	층별 광경로 · 상부 금속 차폐 / 층별 저항 편차 · 워피지
인터포저-GPU	다이 면적 증가에 비례하는 차등 열팽창과 워피지	다이-인터포저 접합 계면	다이 평균온도 상승 제한으로 면적 증가에 따른 열팽창 부담 완화 가능성	대면적 빔 균일도 · 분할 조사 이력 / 워피지 · 코너 저항 편차
낸드 X-stack	페리 CMOS 열예산이 본딩 후 열처리와 회로 설계를 함께 제한	어레이-페리 웨이퍼 본딩 계면	웨이퍼 단위 면광원 일괄 조사로 접합 계면만 가열	배면 투과 · 전면 금속 차폐 / 계면 저항 · 웨이퍼 내 균일도

시장이 요구하는 해결 조건

일곱 조건을 동시에 만족해야 대체가 성립한다

01

계면 온도 도달

Cu 접합계면은 확산 또는 접합이 가능한 온도까지 도달할 것

02

주변 열노출 제한

주변 소자와 유전체의 최고온도 및 고온 노출시간을 최소화할 것

03

정렬 유지

서브마이크론 정렬 상태를 접합 전후로 유지할 것

04

일괄 처리

웨이퍼 또는 대면적 다이를 한 번에 처리할 것

05

구조 유지

기존 패드 · 배리어 구조와 공정 흐름을 최대한 유지할 것

06

가압 · 유지 최소화

추가 압력과 장시간 유지공정을 최소화할 것

07

공정창 확보

흡수층 손상 · 박리 · 어블레이션이 없는 조사 조건 범위를 확보할 것

동시 만족이 관건

개별 조건은 기존 방식으로도 만족할 수 있으나, 미세 피치 · 대면적 · 이종집적 · 다층 조건에서 동시에 만족하기 어렵다.

기존 방식이 일곱 조건을 동시에 만족하지 못하는 지점

각 방식은 목표가 다르며 그 목표 안에서는 성숙해 있다. 조건이 겹칠 때의 제약을 본다

비교 항목	오븐 post-bond anneal	열압착 TCB	레이저 가열 (일반)	본 기술
가열 대상	웨이퍼 · 스택 전체	다이 및 접합부 전체	조사 영역과 그 주변	패드 배면 흡수층
대표 조건	150 ~ 300 °C, 0.5 ~ 4 h	조건에 따라 수 초 ~ 수십 초	ns ~ ms 까지 방식별 상이	20 ~ 200 ns (설계값)
압력	공정에 따라 상이 (무가압 배치 포함)	가압 병행, 하중은 구성별 상이	방식 · 장비별 상이	초기 접촉하중 최적화 대상
정렬 · 워피지	전면 승온에 따른 영향	가압과 승온의 복합 영향	국부적이나 축차 이력 편차	해석상 다이 평균온도 상승 제한
주변 소자 열노출	전면적	전면적	방식 · 파장 · 시간에 따라 상이	해석상 계면 근방으로 제한
면적 확장성	배치 처리	다이 단위 축차	스캔형은 시간 비례	면광원 일괄 (설계)
기존 구조 변경	불요	불요	흡수 구조 설계 필요	배리어 흡수율에 따라 무변경 또는 최소 변경

PoC 에서 확정할 핵심 설계변수

- 광경로 확보 — 조사축 적층의 실측 투과율
- 흡수층 위치 · 재료 — 배리어 검용 가능 여부
- 빔 균일도 — 면내 플루언스 편차가 온도 편차로 직결
- 접합동역학 — 확산 · recess 폐쇄 메커니즘 PoC 판정
- 산화막 관리 — 계면 산화막이 접합을 저해

세 방식의 정량 비교

차이는 접합 원리가 아니라 열을 어디에 얼마나 오래 두는가에 있다

도 22. 오븐 어닐링 · 열압착(TCB) · 나노초 광열의 정량 비교

항목	오븐 어닐링	열압착 TCB	나노초 광열
가열 대상	구조 전체 + 챔버	다이 전체	패드 계면 수 μm
유지시간	수십 분 ~ 수 시간	수 초 ~ 수십 초	수십 ~ 수백 ns
폴리머 승온 두께	전체	전체	0.1 μm 이하
다이 열팽창	수십 μm	수십 μm	무시 가능
가압 요구	필요	높음 (수십 MPa)	접촉 확보 수준
처리 단위	배치	다이 단위 축차	패널 일괄
주 제약	소자 내열한도	정렬 · 텍트타임	빔 균일도 · 흡수층 설계

세 방식의 차이는 접합 원리가 아니라 열을 어디에 얼마나 오래 두느냐에 있다. 세 방식 모두 계면에서 필요한 온도는 비슷한 수준이다. 따라서 비교의 축은 최고온도가 아니라 열예산이며, 열예산은 가열 부피와 유지시간의 곱으로 읽어야 한다.

검증 계획 — 광학에서 시작해 접합 메커니즘으로 내려간다

A-23 상세 검증계획

흡수 위치가 확인되기 전에 접합 조건 탐색으로 넘어가지 않는다

1

광학 적층 검증

조사측 적층의 실측 투과율 · 반사 · 산란, 도핑 영향

2

흡수 위치 · 흡수율

다층막 흡수 프로파일 해석과 실측, 흡수층 사양 확정

3

계면 온도 · 열영향

시간분해 반사율 · 융점 마커로 도달 온도 구간과 열영향 확인

4

recess 폐쇄 · 접촉

단면 관찰로 gap 폐쇄와 실제 접촉 면적 확인

5

접합저항 · 강도

데이지체인 저항, 전단 · 인장 강도와 파괴 모드

6

결합 메커니즘 규명

단면 TEM · EBSD 로 계면 소멸 · 결정립 성장 경로 확인

7

소자 특성 · 정렬

저유전체 · 광학 특성과 접합 전후 정렬 변화

8

면적 확대

대면적 균일도와 수율, 택트타임 검증

1~3단계에서 광경로와 흡수 위치를 확정하고, 4~6단계에서 접합동역학을 규명하여 열예산 저감형에서 완전 치환형으로 확장한다.

Phase 1

원리 실증

단일 패드 접합 · 공정창 매핑 · 해석 모형 검증

Phase 2

소자 실증

PIC-EIC 및 CIS 시편에서 특성 유지 검증

Phase 3

장비화

면광원 광학계 · 균일도 · 인터록 · 인라인 통합

Phase 4

양산 적용

웨이퍼 단위 일괄 조사 · 수율 · 택트타임 검증

각 단계의 판정 기준은 접합 성립 여부가 아니라, 접합이 성립하면서 보호 대상이 변하지 않는지에 둔다.

공정 리스크와 대응

시간 · 에너지 축은 전원 설정으로, 광학 · 기계 축은 설계로 확정한다

도 24. 나노초 광열 접합의 실패모드와 지배 변수

실패모드	직접 원인	관측되는 현상	대응 변수
펄스폭 과소	응력가동 영역 진입	열탄성 충격 · Ti 박리	펄스폭 상향
플루언스 과다	어블레이션 임계 초과	Ti 손상 · 기공 발생	버스트 분할
플루언스 부족	확산거리 미달	미접합 · 계면 잔류	발수 증가
버스트 과다	총 조사시간 초과	연속 가열로 수렴	총 길이 제한
빔 균일도 불량	면내 플루언스 편차	접합 편차 · 국부 손상	빔 정형 · 분할 조사
Ti 두께 편차	흡수율 면내 편차	온도 편차	성막 균일도 관리
기판 흡수	고농도 도핑 · 결함	기판 승온 · 손실	고저항 기판 선정
접촉 불량	패드 높이 편차	국부 미접합	최소 가압 · 평탄화

여덟 가지 실패모드는 네 갈래의 변수로 정리된다. 시간 축(펄스폭 · 버스트 길이), 에너지 축(플루언스 · 발수), 광학 축(균일도 · 흡수층), 기계 축(접촉 · 평탄도)이다. 이 가운데 시간 축과 에너지 축은 전원 설정으로 즉시 조정되므로 공정창 탐색이 빠르고, 광학 축과 기계 축은 설비 사양으로 고정되므로 설계 단계에서 확정해야 한다.

산업 현황 숫자

피치 · 오버레이 · 어닐링 조건 · Cu recess 의 현재 값과 방향

항목	현재 값	방향 · 비고
양산 하이브리드 본딩 피치	양산 9 μm 급 $\rightarrow$ 6 μm 급	2029년 4.5 μm 로드맵 / Intel Foveros Direct 9 μm $\rightarrow$ 3 μm 로드맵
W2W 연구 최전선 피치	200 nm (2026년 imec-EVG 발표)	직전 세대 300 nm, 로드맵 250 nm 를 지나 200 nm 도달
Post-bond overlay	40 nm 미만 (2026년 imec-EVG 발표)	200 nm 피치 · 300 mm 웨이퍼 전 다이 기준
Post-bond anneal 조건	배치로 150 ~ 300 $^{\circ}\text{C}$, 0.5 ~ 4 h	단일웨이퍼 열처리로 300 $^{\circ}\text{C}$ · 5 min 보고 (기존 로 대비 두 자릿수 단축)
완전 gap 폐쇄 (특정 실험보고)	dishing 5 nm 미만 조건에서 400 $^{\circ}\text{C}$	동일 보고에서 250 ~ 350 $^{\circ}\text{C}$ 는 고저항 또는 개방. 보편 조건이 아니라 해당 실험의 결과
Cu recess 관리 범위	CMP 로 수 nm 수준 제어	특정 실험에서 다이 간 Cu gap 9 ~ 47 nm 비교. 과대 · 과소 모두 수율 저하
대면적 열변형	Cu-Si CTE 차 약 13.9 ppm/K	10 mm 다이 · ΔT 280 K 에서 차등팽창 약 39 μm (계산값)

출처 : 200 nm 피치와 40 nm 미만 overlay 는 2026년 imec · EV Group 공동 발표(ECTC 2026 및 imec 보도자료). 양산 피치 로드맵은 TSMC 2026 North America Technology Symposium 보도. 어닐링 시간은 배치 furnace 대표 범위 및 ECTC 2024 단일웨이퍼 열처리 발표. 400 $^{\circ}\text{C}$ 및 250~350 $^{\circ}\text{C}$, Cu gap 9~47 nm 는 특정 실험보고 결과이며 보편 조건이 아니다. 마지막 행은 본 문서 계산값.

시장이 이 충돌을 더 이상 피할 수 없는 이유

A-25 전체 참고문헌 및 수치 출처

다섯 가지 시장 변화가 모두 같은 지점으로 수렴한다

시장 변화가 만들어내는 열예산 병목



다섯 변화가 하나의 지점으로 모인다 — Cu 접합에 필요한 온도와 소자가 견디는 열예산의 충돌

참고문헌 및 수치 출처

A-25 전체 참고문헌 및 수치 출처

외부 인용 수치와 해당 슬라이드

항목 · 적용 슬라이드	출처	학회 · 저널 · 연도	DOI / URL
하이브리드 본딩 피치 로드맵 (본편 3, A-25)	TSMC 2026 North America Technology Symposium 로드맵 보도 (SoIC 9 μm 급 $\rightarrow$ 6 μm 급 $\rightarrow$ 2029년 4.5 μm), Intel Foveros Direct 로드맵 포함	Tom's Hardware 보도, 2026	tomshardware.com/tech-industry/semiconductors/hybrid-bonding-roadmap-examined
W2W 200 nm 피치, overlay 40 nm 미만 (본편 3, A-25)	imec · EV Group, Wafer-to-wafer hybrid bonding with 200 nm interconnect pitch and record high overlay accuracy	IEEE ECTC 2026 발표 / imec 보도자료, 2026	imec-int.com/en/press/imec-and-ev-group-demonstrate-wafer-wafer-hybrid-bonding-200nm-interconnect-pitch-and-record
post-bond anneal 150–300 $^{\circ}\text{C}$ 배치 (본편 3 · 5, A-22, A-25)	Low Temperature Cu Interconnect with Chip to Wafer Hybrid Bonding (DBI 저온 배치 어닐링 150–300 $^{\circ}\text{C}$)	IEEE ECTC, 2019	ieeexplore.ieee.org/document/8811157
어닐링 시간 0.5–4 h (본편 3 · 5, A-22, A-25)	Hybrid bonding and apparatus for performing the same (어닐링 0.5–4 h 기재)	US Patent 9,331,032	patents.google.com/patent/US9331032
단일웨이퍼 300 $^{\circ}\text{C}$ · 5 min (A-25)	Novel Low Thermal Budget Bonding Using Single Wafer Thermal Processing System, Resulting in Excellent W2W Hybrid Bonding at sub-0.5 μm Pitch	IEEE ECTC, 2024	ieeexplore.ieee.org/document/10564930
Cu gap 9–47 nm, 400 $^{\circ}\text{C}$ 완전폐쇄, 250–350 $^{\circ}\text{C}$ 고저항 (A-25)	Sub-11 μm Pitch Hybrid Direct Bond Interconnect Development (Cu gap 높이와 post-bond anneal 온도 상관)	IEEE ECTC / OSTI 공개본, 2020	osti.gov/servlets/purl/1639286
Cu recess 수 nm CMP 제어 · SiCN 유전체 (A-14, A-25)	imec, Wafer-to-wafer hybrid bonding: pushing the boundaries to 400 nm interconnect pitch	imec 기술기사, 2023	imec-int.com/en/articles/wafer-wafer-hybrid-bonding-pushing-boundaries-400nm-interconnect-pitch

표기 규칙 : 괄호 안은 해당 수치가 사용된 위치(본편 장 번호 또는 Appendix 항목 번호)이다. 외부 인용값은 해당 보고의 실험 · 발표 조건에서의 결과이며 보편 조건이 아니다. 별도 표기가 없는 수치는 본 문서의 해석 기반 계산값이다.

참고문헌 및 수치 출처 (계속)

물성 · 메커니즘 관련 인용

항목 · 적용 슬라이드	출처	학회 · 저널 · 연도	DOI / URL
Si · Ti 의 1500 nm 광학상수 (A-9, A-10)	E. D. Palik (ed.), Handbook of Optical Constants of Solids — Si 및 Ti 의 n, k 수록값. Si 흡수단 1107 nm 는 밴드갭 1.12 eV 로부터 산출	Academic Press, 1985 / 1991	ISBN 978-0-12-544420-0 (DOI 없음). 본 자료의 $\delta \cong 28$ nm 는 이 값을 이용한 계산값
Cu 확산계수 D_0 · 활성화에너지 Q (A-13)	격자 · 입계 · 표면 자기확산의 대표 문헌값. Cu 격자 자기확산 $Q \approx 211$ kJ/mol 계열 값을 사용	Landolt-Börnstein, Diffusion in Solid Metals and Alloys, Vol. III/26 / Smithells Metals Reference Book	보고값 편차가 크므로 PoC 실측으로 확정 (A-23 검증계획 1~3단계)
Cu pumping · 열팽창 구속 거동 (A-14, A-15) [구속된 Cu 거동의 유사 근거 — TSV]	H. Yang, T. K. Lee, L. Meinshausen, I. Dutta, Heating Rate Dependence of the Mechanisms of Copper Pumping in Through-Silicon Vias — 소성 · 입계 슬라이딩 · 계면슬라이딩의 세 기구	Journal of Electronic Materials 48(1), 2019	doi.org/10.1007/s11664-018-6805-5
Cu 돌출과 어닐링 · 결정립 성장 상관 (A-14, A-15) [구속된 Cu 거동의 유사 근거 — TSV]	A. Heryanto et al., Effect of copper TSV annealing on via protrusion for TSV wafer fabrication — EBSD 기반 결정립 성장과 돌출 모델	Journal of Electronic Materials 41(9), 2012	doi.org/10.1007/s11664-012-2117-3
Cu pumping 과 사전 열예산 (A-14) [구속된 Cu 거동의 유사 근거 — TSV]	I. De Wolf et al. (imec), Cu pumping in TSVs: Effect of pre-CMP thermal budget	Microelectronics Reliability 51(9–11), 2011	imec-publications.be/handle/20.500.12860/18813
Cu/SiO ₂ 하이브리드 본딩의 in-situ Cu pumping (A-14, A-15) [직접 근거 — 하이브리드 본딩]	Cu Pumping Analysis during Cu/SiO ₂ Hybrid Bonding using In-situ SPM Imaging — 하이브리드 본딩 구조에서 승온 중 Cu 패드 돌출 거동을 in-situ 로 측정	IMAPS 학술발표 공개본	imapsource.org/article/94821-cu-pumping-analysis-during-cu-sio2-hybrid-bonding-using-in-situ-spm-imaging.pdf
재료 열물성 k, ρ , c (A-2 ~ A-8)	Cu · Ti · Si · SiO ₂ · 폴리머의 열전도율 · 밀도 · 비열 표준값. $\alpha = k/(\rho c)$, $e = \sqrt{k\rho c}$ 는 이로부터 산출	CRC Handbook of Chemistry and Physics / 표준 열물성 편람	본 자료의 α , e, L, F 값은 전부 이로부터의 계산값
냉각률 $10^9 \sim 10^{10}$ K/s (A-18)	본 문서 계산값. 조사 종료 직후 표면 온도 감쇠식 $\Delta T \propto [\sqrt{t} - \sqrt{(t-t_p)}]$ 로부터 산출	본 자료 해석, 2026	외부 인용 아님 — 계산값

Cu 확산 파라미터와 광학상수는 보고값 편차가 크므로 설계 기준값으로만 사용하며, PoC 1~3단계에서 실측으로 확정한다.



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
