

RBSC 기반 초박막 $\text{InP} \cdot \text{Ga}_2\text{O}_3$ 광·전력반도체 플랫폼

조진현 쿨스 대표 jhcho@cools.co.kr

SUMMARY

InP 와 Ga_2O_3 는 열전도도가 낮고 단결정 기판이 비싸지만 기능하는 층은 표면 수 μm 에 그친다. 기능층만 층전사로 떼어 RBSC에 붙이고 원웨이퍼는 자연마해 다시 쓴다. 1500 nm 대역 광은 두 소재를 투과해 계면 흡수막에서만 발열하고, RBSC 잔류 Si 상이 국부 용융되어 접합한다. 열저항·원가 효과의 계산 근거를 함께 신는다.

기술 사업화 기술 자료

RBSC 기반 초박막 InP · Ga₂O₃ 차세대 광 · 전력반도체 플랫폼

One RBSC Platform for Next-Generation Photonics and Power Electronics

(주)쿨스 (Cools Inc.)

하나의 공정 라인 · 하나의 접합 광원 · 하나의 특허군으로
AI 데이터센터 광연결 시장과 초고전압 전력변환 시장을 동시에 공략

사업 요약

InP 광반도체와 Ga₂O₃ 전력반도체를 하나의 공통 제조 플랫폼으로 사업화한다

문 제

고가 단결정 기판의 이중 부담

- InP · Ga₂O₃ 모두 열전도도가 낮아 소자 직하가 곧 열저항
- 기판 가격 급등과 3사 과점으로 공급이 수요를 따라가지 못함
- 실제로 기능하는 영역은 표면 수 μm 이하

해 결

기능층 전사 + RBSC 계면선택 접합

- 기능층만 분리해 Si-rich RBSC로 이전, 원웨이퍼는 회수·반복 사용
- 밴드갭보다 낮은 광자에너지의 투과광이 계면 흡수막에서만 발열
- RBSC 잔류 Si상의 국부 용융으로 접합, 웨이퍼 전체 가열 없음

파 급

열 · 원가 · 생산량의 동시 전환

- 소자 직하 열저항 최대 약 10.6배 개선 (계산값)
- 기판 소재비가 재사용 횟수로 분할되어 1/20 수준까지 하락
- 생산 면적이 단결정 구경이 아니라 대면적 RBSC 판재로 결정

수익은 소자 · 모듈 직접 제조와 복합기판 소재 공급, 장비, 파운드리, IP 라이선싱의 다층 구조로 회수한다

두 제품군은 별개 사업이 아니라 동일 플랫폼의 두 출력이며, 증전사 라인 · 1500 nm 대역 접합 광학계 · RBSC 성형 라인을 그대로 공유한다.

InP 기판 수급 병목

광연결 수요가 소재 공급을 추월했고, 증설 속도는 결정 성장 난이도에 묶여 있다

70%+

공급 격차

광통신급 InP 기판 유효 생산능력이
수요의 3분의 1 수준

90%+

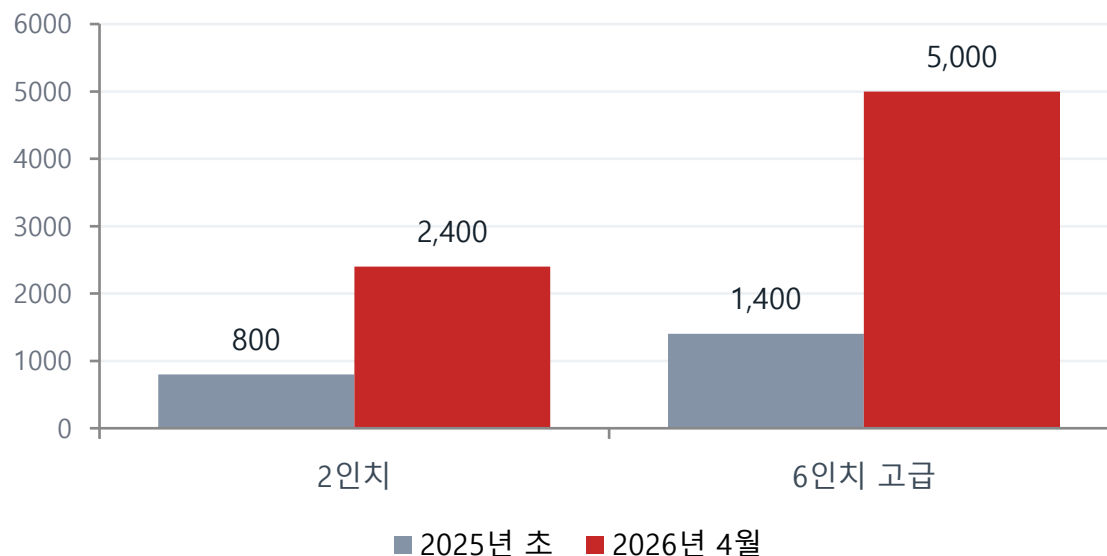
상위 3사 점유

인듐 원재료와 대구경 결정 성장이
증설 속도를 제한

수요 구조의 이동 — CPO와 외부광원(ELS)

AI 가속기 클러스터가 전기 배선의 대역폭 · 전력 한계에 도달하면서, 스위치 ASIC과 광엔진을 함께 패키징하는 CPO 구조가 확산된다. 이 구조는 광원을 패키지 밖에 두는 외부광원(ELS) 모듈을 별도 부품으로 요구하므로, 광원은 사라지는 부품이 아니라 독립 제품군으로 분리된다.

가격 급등 — 광통신급 InP 기판 (달러/웨이퍼)



같은 양의 InP로 더 많은 소자를, 더 나은 방열 조건에서 만드는 것이 시장의 요구다

Ga₂O₃ 열 병목

전기적으로 이미 이겼고, 열에서만 지고 있는 소재

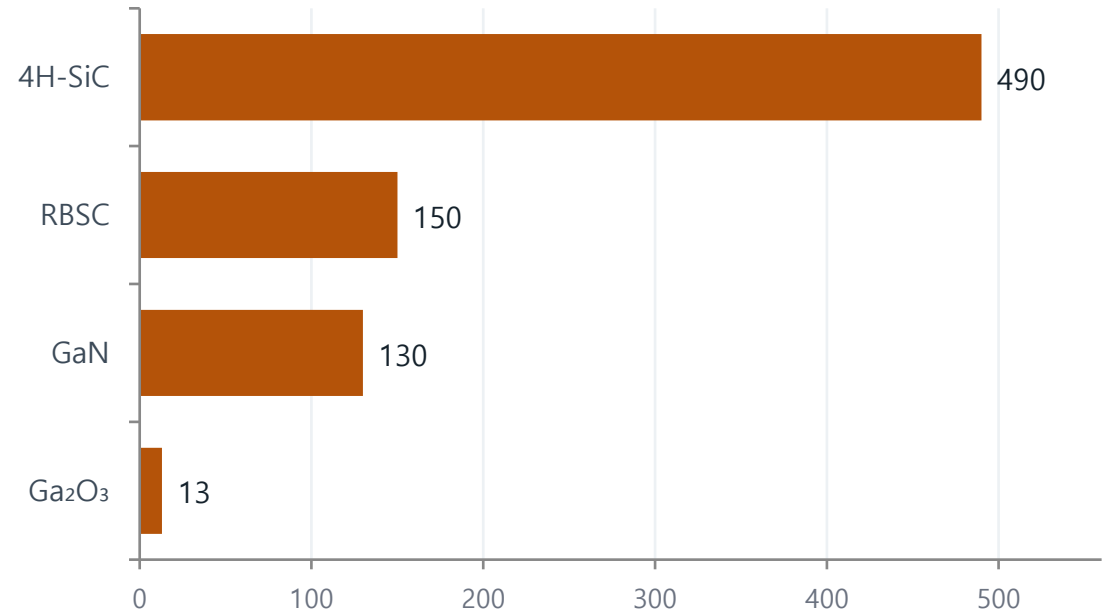
전기적 우위 — 이미 문헌에서 입증

- 밴드갭 약 4.9 eV, 이론 항복전계 약 8 MV/cm
- Baliga 성능지수 기준 SiC · GaN을 3~10배 상회
- EFG · 초크랄스키 용액성장 가능 — 승화법 SiC보다 원리적 저원가
- 4인치 기판 상용 공급, 6인치 개발 단계

열적 열세 — 상용화의 결정적 장벽

자체 발열이 채널 온도를 올리고, 이동도가 떨어지며, 온저항이 증가하고, 신뢰수명이 짧아진다. 다수의 리뷰가 열관리를 Ga₂O₃ 상용화의 결정적 장벽으로 지목한다.

열전도도 비교 (W/m·K, 공개 문헌 대표값)

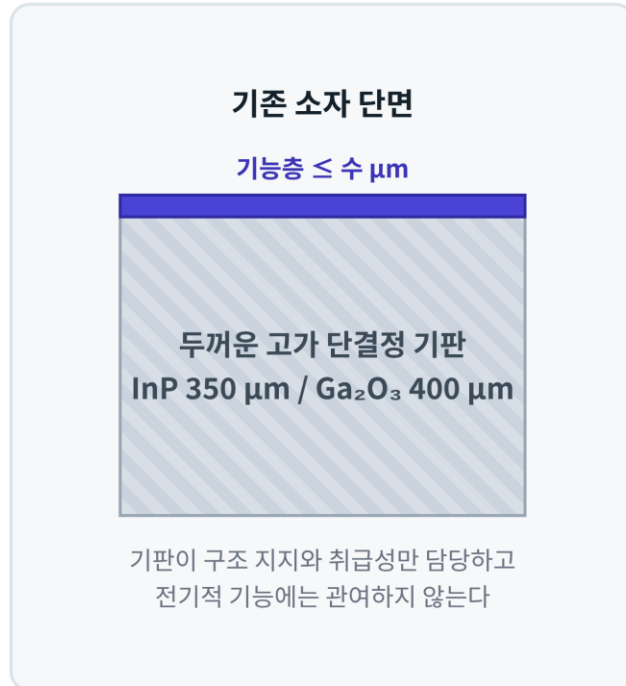


이 소재의 사업 기회는 소재 자체가 아니라, 소재의 열 문제를 저원가 대량 제조로 푸는 구조에 있다

문제 03

고가 단결정 기판의 이중 부담 구조

소자 원가와 열저항을 지배하는 층은, 소자 기능에 기여하지 않는 층이다



① 소재 두께 점유율



InP 350 μm 중 기능층 3 μm 기준 — 기판 소재비가 제조원가를 지배한다

② 소자 직하 열저항 점유율



1차원 전도 $R = t/(\kappa A)$ 계산값 — InP 99.1%, Ga₂O₃ 99.3%

③ 소자 기능 기여도



발광 · 증폭 · 드리프트 · 채널 동작은 전부 표면 수 μm 이내에서 일어난다

■ 단결정 기판 ■ 기능층

원가의 99%와 열저항의 99%를 만드는 층이, 소자 성능에는 0%를 기여한다

두께 · 열저항 점유율은 InP 350 μm · Ga₂O₃ 400 μm 기판에 기능층 3 μm 를 둔 1차원 전도 모델 계산값이며, 계면 열저항과 횡방향 확산은 포함하지 않는다.

두 소재의 공통 병목 구조

표면적으로 다른 문제가, 제조 구조로 환원하면 같은 항목으로 정리된다

항목	InP	Ga ₂ O ₃	공통 함의
열전도도	약 68 W/m·K (Si의 약 1/2)	약 11~27 W/m·K (SiC의 약 1/40)	소자 직하가 곧 열저항이다. 기판이 열의 통로가 아니라 열의 장벽이 된다.
기판 원가 · 공급	3사 과점, 공급격차 70%+ 1년 새 가격 2~3배	고가 · 취성, 4인치 중심 6인치는 개발 단계	기판이 원가와 생산량의 상한을 동시에 결정한다.
필요 기능층	활성 에피층 수 μm 이하	드리프트 · 채널층 수 μm 이하	웨이퍼 두께의 1% 미만만 소자 성능에 기여한다.
공정 온도	저온 재성장 가능 고온에서 P 이탈 위험	600 °C급 저온 에피 실증	Si 융점(1414 °C) 이하에서 제작 가능하므로 Si상을 접합매체로 쓸 수 있다.
기계적 특성	취성, 대구경화 난이	취성, 벽개 발생	두꺼운 세라믹 지지체가 취급성과 수율을 개선한다.

다섯 항목 모두가 '기능층만 남기고 나머지를 고열전도 저원가 지지체로 대체한다'는 하나의 조치로 동시에 개선된다

단일 조치에 의한 병목 동시 해소

소재별로 다른 해법을 만드는 것이 아니라, 하나의 제조 구조가 두 소재에 그대로 적용된다



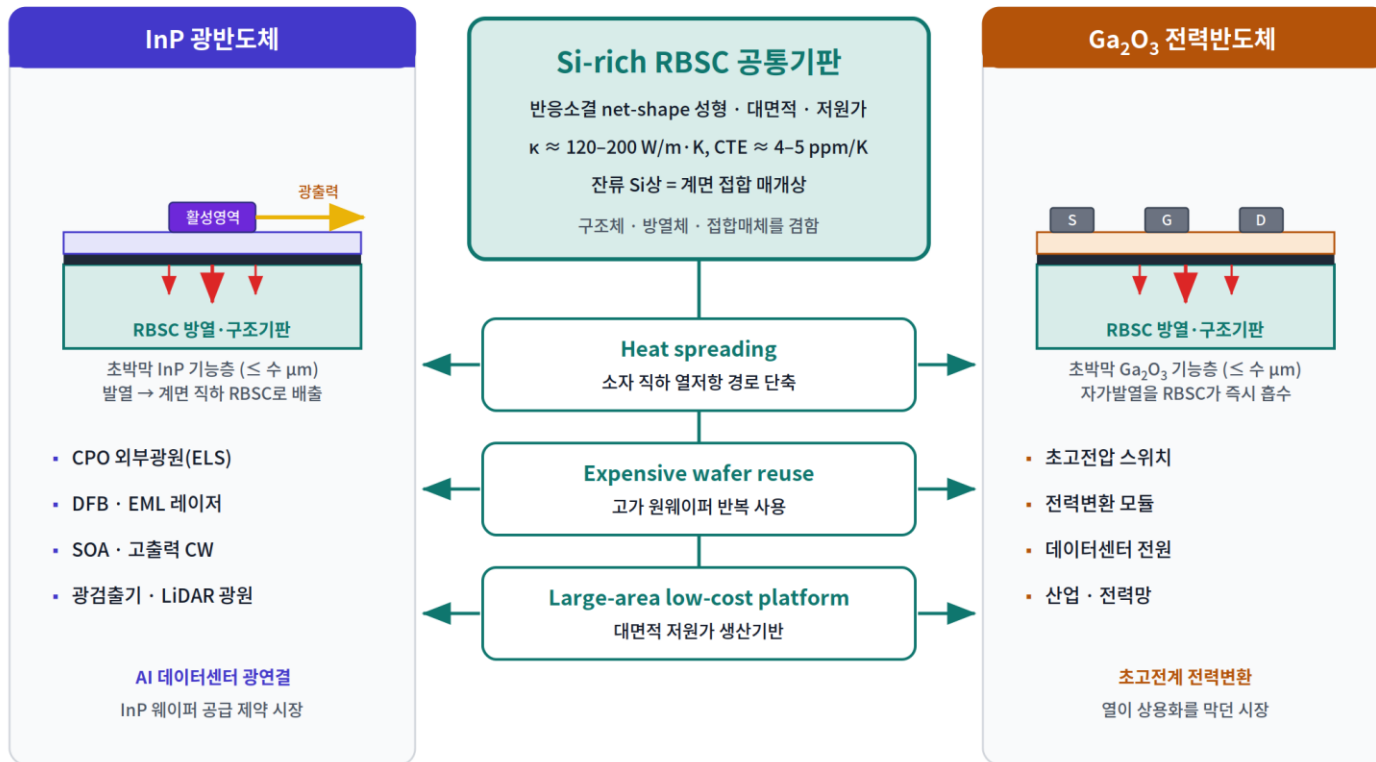
이 다섯 가지가 동시에 성립하는 순간, 웨이퍼 전체를 소자에 남기는 방식은 더 이상 최적이지 아니다.

Cools 공통 제조플랫폼

두 제품군이 동일 장비 · 동일 공정 · 동일 특허군을 공유한다

One RBSC Platform for Next-Generation Photonics and Power Electronics

하나의 제조 플랫폼 — 광반도체와 전력반도체 두 시장



두 제품군은 동일한 장비 · 동일한 공정 · 동일한 특허군을 공유한다.

플랫폼 3대 기술 요소

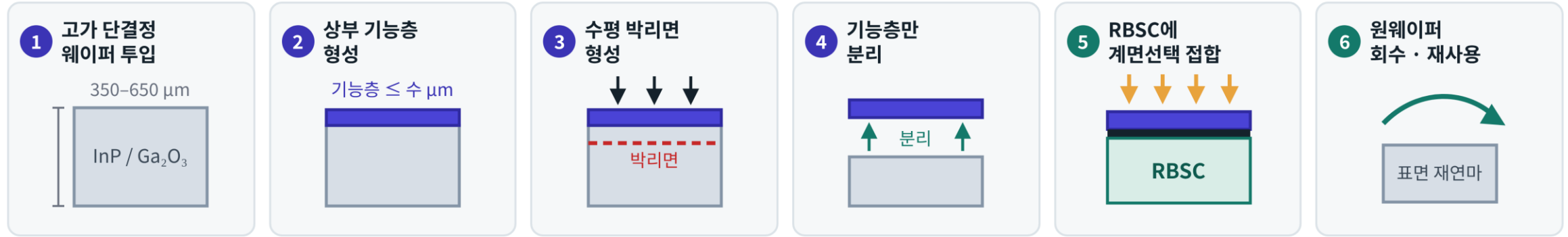
- RBSC net-shape 기판 — 소성 수축이 거의 없는 대면적 저원가 판재
- 층전사 — 소자에 필요한 두께만 분리, 나머지 웨이퍼는 원형 유지
- 계면선택 광가열 접합 — 계면 수 μm 이내에 열이력을 가두는 접합

플랫폼이 성립하는 물리적 근거

InP의 흡수단은 900 nm대, β -Ga₂O₃는 자외 영역에서만 흡수한다. 따라서 1500 nm 대역의 광은 두 소재 모두에서 흡수되지 않고 통과한다. 하나의 광원, 하나의 광학계, 하나의 공정 레시피 계열이 서로 다른 두 반도체를 모두 처리한다.

원웨이퍼 반복 사용 표준 공정

고가 단결정 웨이퍼는 소모품이 아니라 반복 사용되는 공급원이 된다



분리 구간 (①~④)

이온주입 유도 박리 또는 응력 유도 박리로 웨이퍼 내부에 취약면을 만들고, 소자에 필요한 두께만 떼어낸다. 나머지 웨이퍼는 원형으로 남는다.

접합 구간 (⑤)

밴드갭보다 낮은 광자에너지의 투과광이 계면 흡수막에서만 열로 바뀌고, RBSC 계면의 잔류 Si상이 국부 용융되어 일체화된다.

회수 구간 (⑥)

박리면을 재연마한 원웨이퍼가 다시 ①로 투입된다. 소재비는 소자마다의 고정비에서 재사용 횟수로 나뉘는 변동비로 바뀐다.

원웨이퍼 1매 → 기능층 20매 내외
두께 350 μm , 회당 전사 3 μm + 재연마 손실 12 μm , 사용 가능 두께 300 μm 기준 산술값

RBSC net-shape 기판

구조체와 방열체를 동시에 담당하는 대면적 저원가 지지체

120~200

열전도도 (W/m·K)

잔류 Si 함량과 기공률로 조절

4~5

열팽창계수 (ppm/K)

조성에 따라 조절 가능

net-shape

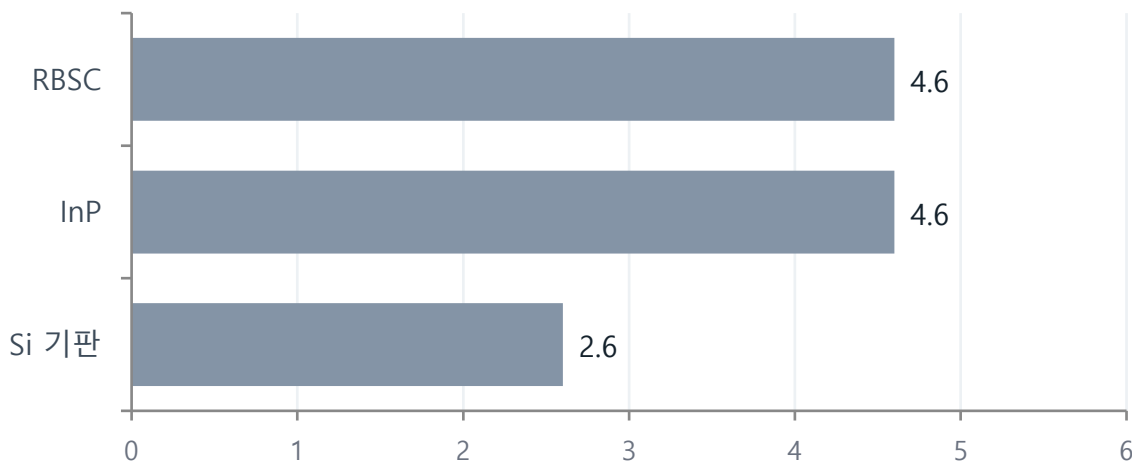
성형 특성

소성 수축이 거의 없어
최종 형상에 가까운 대면적 판재

접합 매개상
잔류 Si상

반응소결 과정에서 남는 Si가
계면 접합의 매개상으로 작동

열팽창 정합 — InP 기준 (ppm/K)



net-shape 성형이 사업에 미치는 효과

- 반응소결 탄화규소는 성형체에 용융 Si를 침투시켜 치밀화하므로 소성 수축이 거의 없다
- 단결정 웨이퍼 구경이 아니라 판재 크기가 생산 면적을 정한다 — 다수의 기능층 타일을 한 장의 캐리어에 배열
- InP의 열팽창계수 약 4.6 ppm/K에 대해 Si 기판(약 2.6)보다 훨씬 가까운 정합 조건을 만든다
- 접합 후 잔류 힘이 작게 유지되어 후공정 취급성이 개선된다

층전사에 의한 기능층 분리

소자에 필요한 두께만 가져가고, 나머지 웨이퍼는 원형으로 남긴다

이온주입 유도 박리

스마트컷형 층전사

- 수소 이온주입으로 웨이퍼 내부에 취약면 형성
- 분자접합과 결합하여 단결정 박막을 전사
- 전사 두께를 주입 에너지로 제어
- SOI 등에서 산업적으로 확립된 방식

응력 유도 박리

레이저 조건화 박리 · 기계적 층분리

- 응력장을 이용해 저손실로 얇은 층을 분리
- 이온주입 설비 없이 두꺼운 층 전사에 유리
- 레이저 조건화로 박리면 위치를 규정
- 재연마 손실을 줄이면 재사용 횟수가 증가

공통 귀결

어느 방식이든 소자에 필요한 두께만 가져가고 나머지 웨이퍼는 원형으로 남는다는 점은 동일하다. 재사용 횟수 N 의 상한은 두께 산술로 정해지며, 이 사업의 원가 경쟁력은 재생 공정의 정밀도라는 하나의 변수에 수렴한다. 그 변수는 설비와 공정으로 개선할 수 있는 대상이다.

용어 — 이온주입 유도 박리(Smart Cut 등) · 응력 유도 박리 · 레이저 조건화 박리 · 기계적 층분리

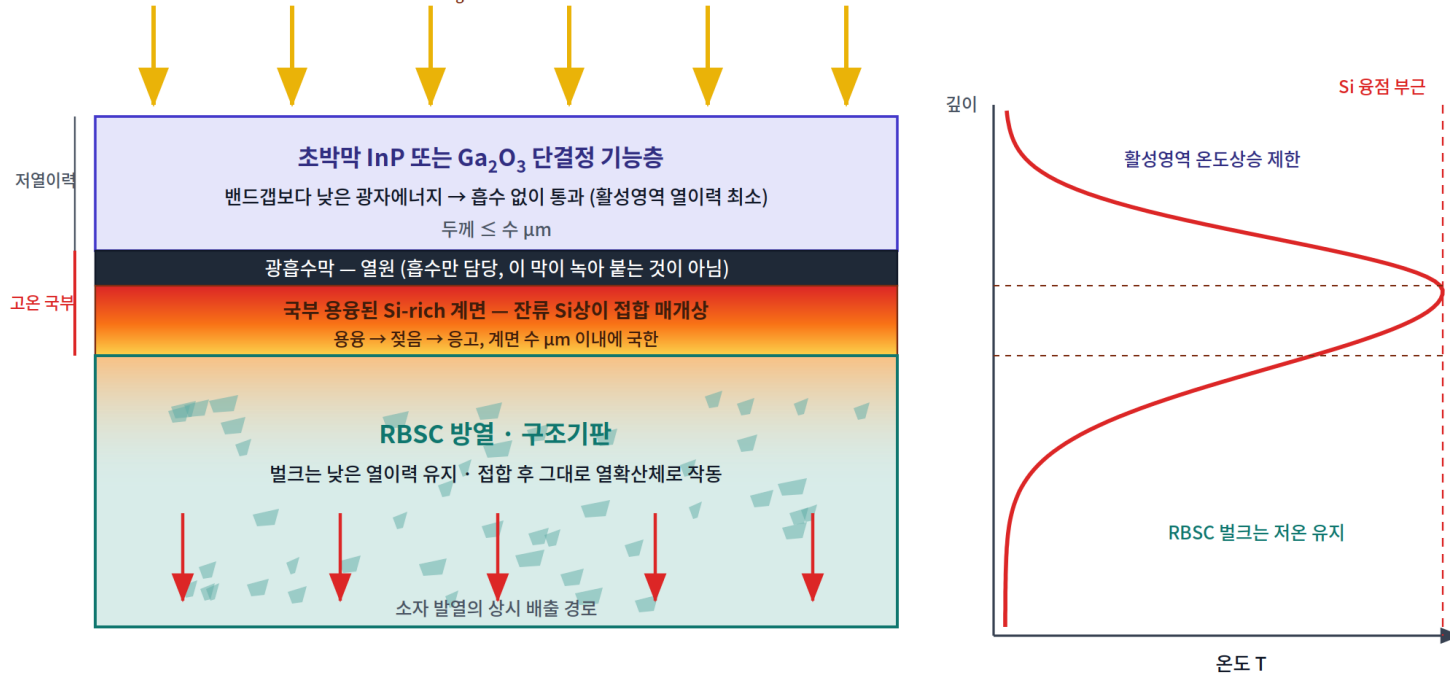
계면선택 광가열 접합 원리

광은 반도체층을 통과하고, 흡수막에서만 열로 바뀌며, 접합은 계면의 Si상이 담당한다

계면선택 광가열 접합 단면

광은 반도체층을 통과하고, 흡수막에서만 열로 바뀌며, 접합은 계면의 Si상이 담당한다

투과광 $h\nu < E_g$ (예: 1500 nm 대역)



열침투깊이 $\sqrt{(\alpha t)}$ 기준 설계창 — Si: 100 ns $\approx$ 1.4 μm , 1 $\mu s \approx$ 4.5 μm / Ga_2O_3 : 100 ns $\approx$ 0.7 μm , 1 $\mu s \approx$ 2.1 μm

펄스폭과 흡수막 배치로 용융역을 계면에 국한시키면, 웨이퍼 전체 가열 없이 접합이 성립한다.

열원과 접합상의 분리

광흡수막은 열원이며, 녹아서 붙는 접착층이 아니다. 실제 접합 매개상은 RBSC 계면의 잔류 Si상이고, 이 Si가 국부 용융 · 젖음 · 응고를 거치면서 반도체층과 세라믹을 일체화한다.

접합 성립 조건

- '얼마나 뜨겁게'가 아니라 '얼마나 좁은 영역을 얼마나 짧게'로 결정
- 웨이퍼 전체를 가열하는 노 공정이 아님
- 반도체층 상부와 RBSC 벌크는 낮은 열이력 유지
- 전면 용융이 아닌 이산 접합 영역으로 투입 에너지와 잔류 응력을 함께 저감

열이력을 계면에 가두는 설계창

열확산길이 $\sqrt{(\alpha t)}$ 계산값 — 문헌 물성 기준 산출, 상변화 잠열 미포함

조사 시간	Si (고온역) $\alpha \approx 2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	InP $\alpha \approx 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Ga ₂ O ₃ $\alpha \approx 4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
100 ns	약 1.4 μm	약 2.1 μm	약 0.7 μm
1 μs	약 4.5 μm	약 6.8 μm	약 2.1 μm
10 μs	약 14 μm	약 21 μm	약 6.7 μm
100 μs	약 45 μm	약 68 μm	약 21 μm

조사 시간을 마이크로초 이하로 두면 열이 관여하는 영역은 계면 수 μm 이내에 머문다.

접합 강도와 열저항의 동시 확보

계면 Si상의 용융 체적과 젖음 면적을 제어한다. 전면 용융이 아니라 격자 형태의 이산 접합 영역을 두면 총 투입 에너지와 잔류 응력을 함께 낮출 수 있고, 열팽창 정합이 이미 좋은 조합(InP 4.6 ppm/K 대 RBSC 4~5 ppm/K)에서는 접합 후 잔류 휨도 작게 유지된다.

Ga₂O₃ — 약점이 그대로 보호막이 된다

열전도도가 낮아 열침투가 가장 얇다. 소자 동작에서는 약점인 낮은 열전도도가, 접합 공정에서는 활성영역을 보호하는 차단막으로 작동한다.

InP — 설계 입력으로 전환되는 제약

- 조사 시간 단축
- 접합면적을 제한 — 격자 형태의 이산 접합 영역
- 활성영역과 계면 사이의 완충 두께 확보
- 본딩-퍼스트 경로 채택

두 가지 통합 경로

고객의 공정 자산과 열예산 조건에 따라 선택되며, 두 경로를 병행한다

에피-퍼스트

공정 순서

기능층 형성 → 박리 → RBSC 접합

장점

- 기존 에피 자산을 그대로 활용
- 고객 웨이퍼를 위탁 처리하는 형태로 진입 가능

유의점

활성영역의 열이력 관리가 설계 조건이 된다

InP 광소자 초기 진입에 유리

본딩-퍼스트

공정 순서

박막 전사 → RBSC 접합 → 저온 에피 · 소자공정

장점

- 활성영역이 접합 이후에 형성
- 접합 열이력의 영향에서 자유롭다

유의점

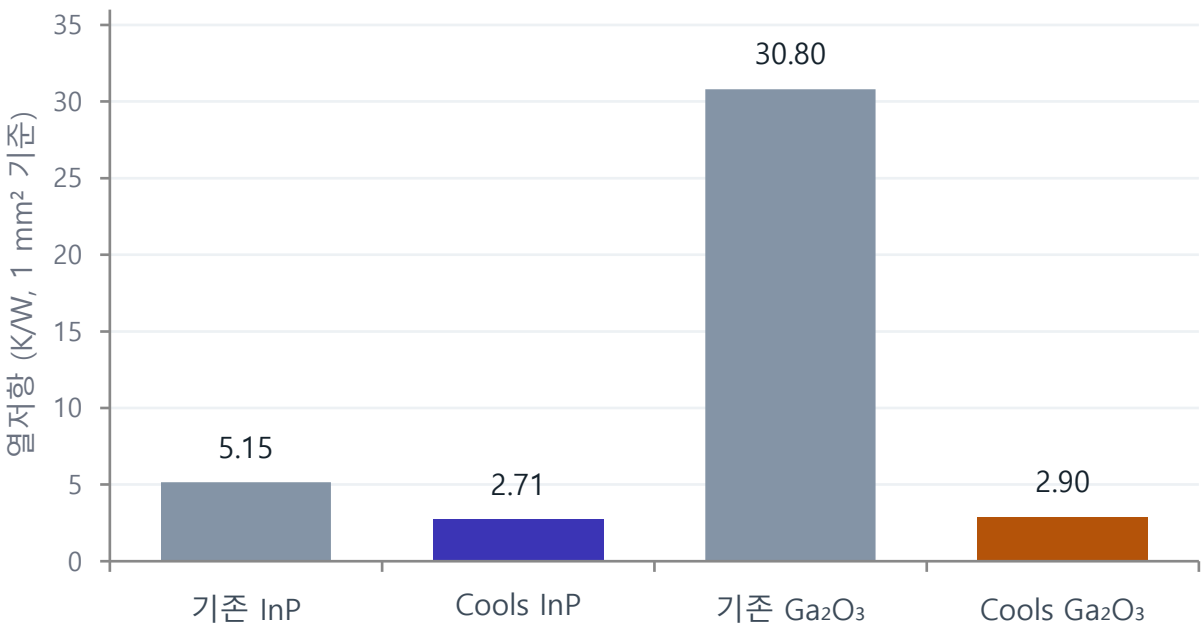
복합기판 위 저온 에피 조건을 확보해야 한다

Ga₂O₃ 전력소자에 유리 (600 °C급 저온 에피가 문헌에서 확인됨)

두 경로는 동일한 증전사 라인과 동일한 1500 nm 대역 접합 광학계를 공유하며, 제품 전환은 소재와 레시피 변경으로 이루어진다.

열저항 개선폭

면적 1 mm² 발열원 기준 1차원 전도 열저항 $R = t/(\kappa A)$ 계산값 — InP $\kappa=68$, Ga₂O₃ $\kappa=13$, RBSC $\kappa=150$, 횡방향 확산 효과 제외



문헌에는 Ga₂O₃를 단결정 4H-SiC에 접합한 복합웨이퍼에서 채널 온도가 절반 수준으로 낮아지고 접합-패키지 열저항이 4배 이상 개선된 결과가 보고되어 있다. Cools 구조는 값비싼 단결정 SiC를 저원가 대면적 RBSC로, 노 접합을 계면선택 광가열로 바꾼다.

구성	층 구조	열저항 (K/W)	개선
기존 InP 소자	InP 350 μm	5.15	기준
Cools InP 구조	InP 3 μm + RBSC 400 μm	2.71	1.9배
기존 Ga ₂ O ₃ 소자	Ga ₂ O ₃ 400 μm	30.8	기준
Cools Ga ₂ O ₃ 구조	Ga ₂ O ₃ 3 μm + RBSC 400 μm	2.90	10.6배

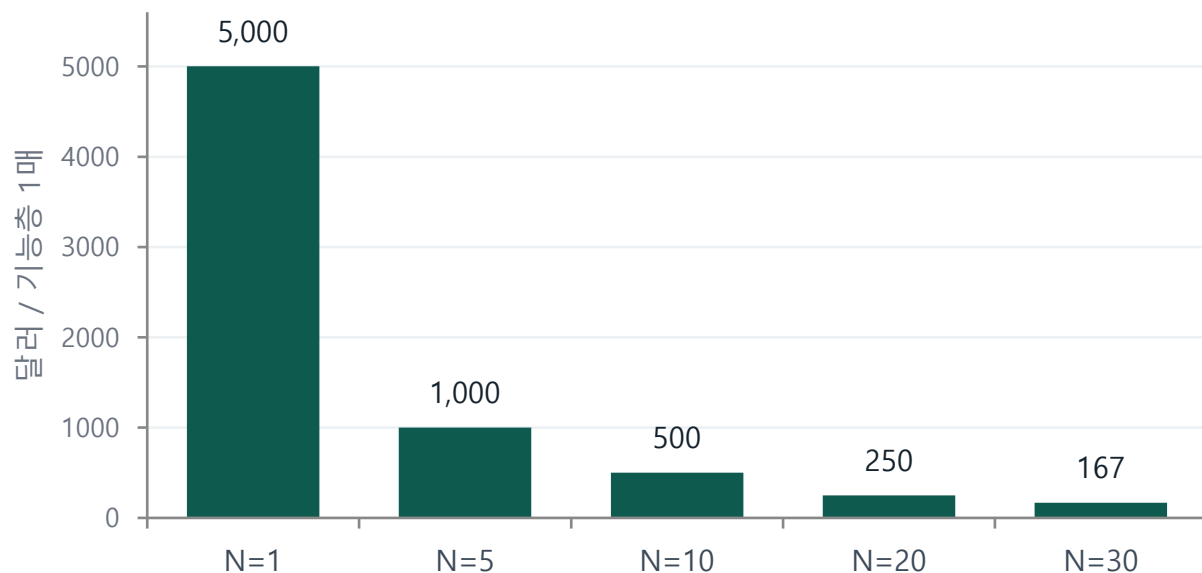
Ga₂O₃에서 개선폭이 압도적인 이유

기존 구조의 열저항이 거의 전부 기판 자신에게서 나오기 때문이다. 이 항을 제거하면 남는 것은 RBSC의 열저항뿐이고, RBSC를 200 μm로 하면 Ga₂O₃ 구조의 열저항은 약 1.6 K/W까지 내려간다.

원가 구조와 생산량의 전환

기판 소재비는 재사용 횟수 N으로 나뉘고, 처리 단위는 캐리어 면적으로 커진다

전사 1매당 원웨이퍼 상각액 (6인치 InP 5,000달러 가정)



동일한 웨이퍼 투입량으로 공급 가능한 기능층 수가 20배로 늘어난다
— 공급격차 70%의 시장에서 이는 원가 절감이 아니라 생산량 확보의 문제다

$N \approx 20$

현실적 목표

회당 전사 3 μm +
재연마 손실 12 μm 기준

$N > 30$

손실 최소화 시

재연마 손실을 절반으로
줄이는 경우

N의 상한은 두께 산술로 정해진다

두께 350 μm 웨이퍼에서 회당 15 μm 가 소모되고 사용 가능 두께를 300 μm 로 잡으면 N은 20 내외가 된다. 원가 경쟁력은 재생 공정의 정밀도라는 하나의 변수에 수렴한다.

두 번째 원가 효과 — 처리 단위의 확대

4인치 InP 웨이퍼에서 떼어낸 다수의 기능층 타일을 대면적 RBSC 판재에 배열하면, 이후 공정은 캐리어 한 장 단위로 진행된다.



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
