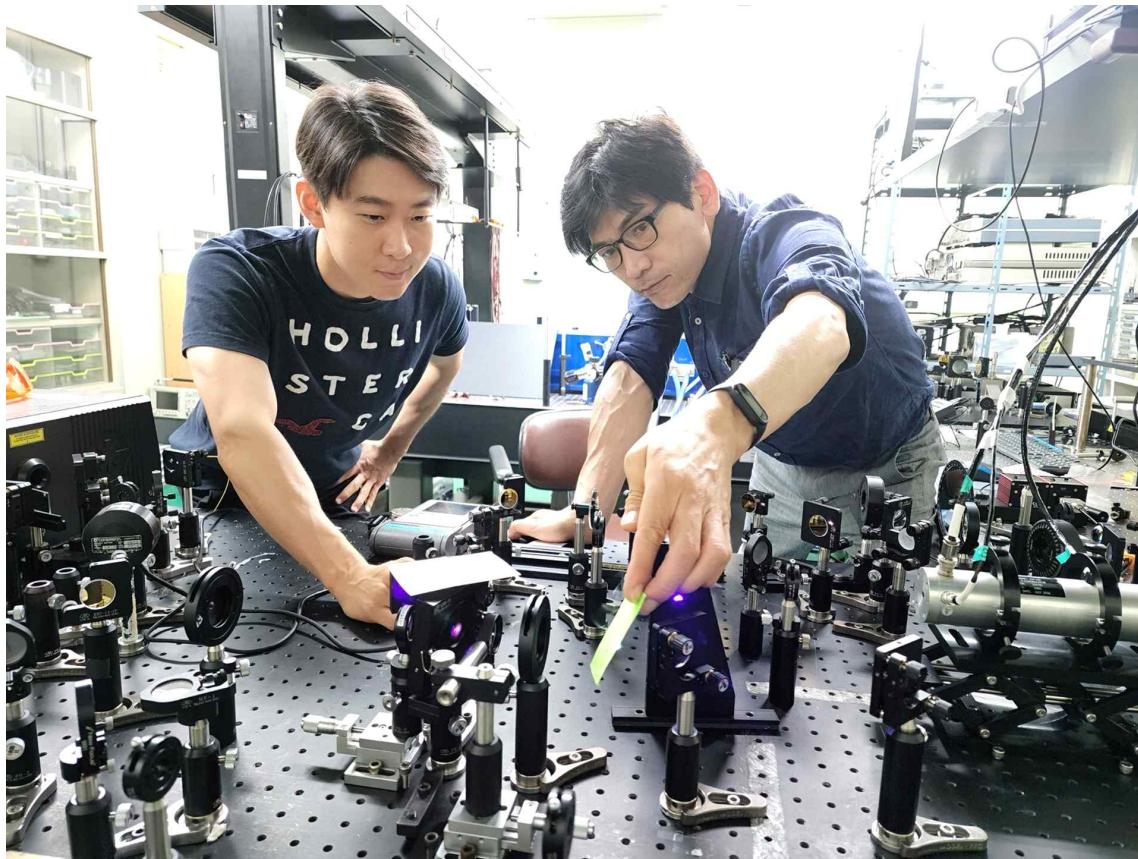


퀀텀 방열: 반도체 패키징의 새로운 지평을 열다

- 열 발생 직후에 존재하는 열전달 음향포논의 파동성을 활용한 퀀텀 방열 기법 제시



▲ (왼쪽부터) 박상혁 통합과정생, 조영달 교수

반도체 패키징이 고출력·고집적화됨에 따라 구조 설계를 통한 방열 기법이 한계에 이르면서 적정 구동온도를 넘어서는 일이 빈번해졌다. 소비전력은 줄어들고 성능은 더 좋아진 반면에 이 과정에서 연산을 담당하는 칩의 발열부하는 오작동 등의 문제를 야기한다.

그간 관련 업계에서 발열부하를 해결하기 위해 방열판을 이용하거나 냉각팬을 결합하는 공랭식 방열은 실생활에서 익숙하다. 최근에는 그래핀 등의 나노 신소재, 열전(열을 전기로 바꾸는) 현상, 복사 냉각 등을 포함한 방열 개념이 등장하며, 방열 문제를 해결하기 위한 다양한 노력이 시도되고 있다.

열의 전달은 전도, 대류, 복사 등의 방법으로 이루어지는데 반도체는 다양한 물질들로 층층이 쌓여 있어 전도를 방열 패키징에서 중요하게 다뤄왔다.

국내 연구진이 수 년 동안 열 전달체인 음향포논*의 파동성에 대한 연구에 집중하여 최근 새로운 반도체의 열 제거 기법을 발견했다.

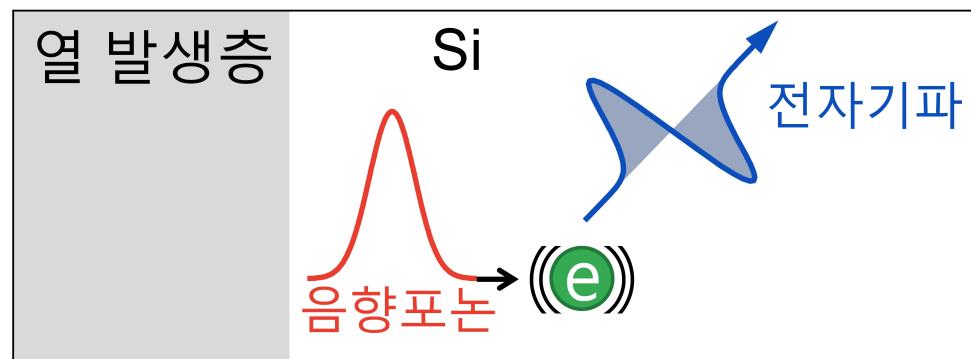
* **음향포논(acoustic phonon):** 포논의 한 종류로, 소리와 열의 전달자임. 고체에는 다양한 주파수를 가진 음향포논이 존재하며, 특히 테라헤르츠 주파수 대역은 열 전도를 결정함. 주요 열 전달자임에도 불구하고 빛의 분산곡선과 교차하지 않기 때문에 빛으로 전환이 안 되는 것으로 알려져 있음.

지스트(광주과학기술원) 전기전자컴퓨터공학부 조영달 교수 연구팀은 열 평형 이전의 음향포논 복사 메커니즘을 발견하고, 음향포논 파동을 빛으로 전환하는 새로운 방법을 반도체 핵심소재인 실리콘에서 실험적으로 규명하였다.

기존 연구에 따르면, 복사 냉각은 열 평형 이후의 시간 대역에서 전하의 이동에 따른 전자기파의 발생을 다루며 플랑크의 복사 법칙을 따른다. 이와는 다르게 열 평형 이전에는 열 전달체인 음향포논이 물결처럼 일정한 굴곡을 형성하는 파동성을 띠고 빛처럼 다양한 주파수 값을 갖게 된다.

이러한 음향포논 파동은 압전(누르면 전기가 생산되는) 상수 차이가 나는 계면(예: 질화갈륨GaN/질화알루미늄AlN)을 통과할 때 이온과 상호작용하여 전자파를 복사하게 된다.

그러나 실리콘과 같은 압전전기장이 없는 반도체에서는 음향포논이 빛으로 전환되는 복사 개념은 아직 밝혀지지 않았다. 이는 물리학적으로 음향 포논의 분산 곡선과 빛의 분산 곡선이 서로 만나지 않아 에너지 보존법칙을 위배하기 때문이다.



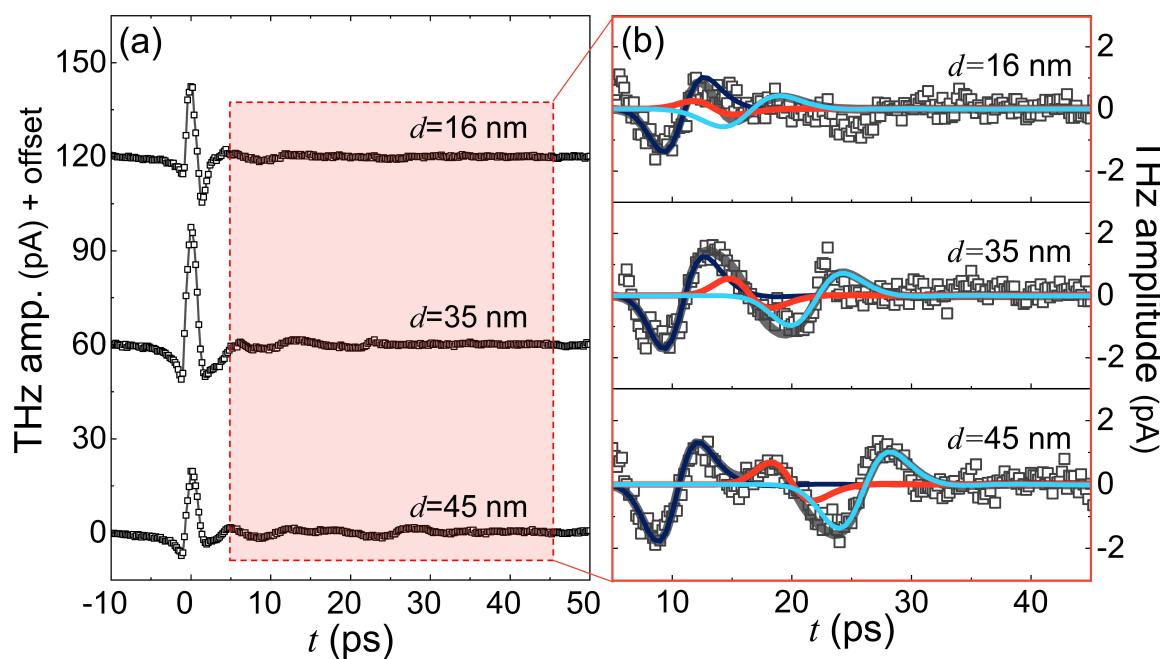
▲ 변형전위에 기반한 전자-음향포논 상호작용에 의한 음향포논 복사의 모식도.

음향포논이 이동하면서 전자를 가속시킴에 따라 테라헤르츠 전자기파가 발진이 가능하다.

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 열 전달자인 음향포논이 국부적으로 고체의 에너지 값인 밴드갭을 변조하고, 이에 따라 전기장이 발생하는 이른바 변형 전위*를 활용하였다.

특히, 반도체에서 잘 알려진 도핑 기법을 이용하여 전자를 실리콘 기판에 미리 축적 시켜둠에 따라 전자-음향포논 상호작용을 유도하여 전자파가 복사되도록 했다. 이는 열 발생 직후의 음향포논 파동성을 활용한 쿤텀 방열 개념의 현실적인 구현이다.

* **변형 전위(deformation potential):** 고체의 물질 상수 중의 하나임. 고체의 변형(단위 셀의 크기나 형태가 바뀌는 것)에 따라 에너지갭이 변하는데, 그들의 상관 계수임.



▲ 열발생층/Si 이종접합구조에서 측정한 전자-음향포논 상호작용에 의한 테라헤르츠 전자기파 측정 결과. 열 발생층과 전자층 사이의 거리 (d)가 달라질 때 음향포논의 이동하는 시간이 달라지는 만큼, 테라헤르츠 전자기파가 발진되는 시간 또한 달라짐을 확인함으로써 전자-음향포논 상호작용에 의한 음향포논 복사를 증명하였다.

조영달 교수는 “인공지능, 모바일기기, 디스플레이, 전기차 배터리 등 모든 첨단산업 분야에서 열 제거는 관련 반도체 시스템의 효율 및 수명 연장의 핵심 요소이다”면서 “이번 연구에서의 퀀텀 방열 개념은 다양한 연구 협력을 통해 산업계 활용과 향후 실리콘 등의 광범위한 반도체 기판 처리를 통해 퀀텀 방열과 기존의 열평형 이후의 방열 기법 간의 결합이 기대된다”라고 전했다.

주저자인 박상혁 박사는 “광/전자공학 소자의 방열 한계를 극복하기 위해 노력해 왔고 그 결실이 이제 보이기 시작했다”며 소감을 밝혔다.

조영달 교수가 지도하고 박상혁 박사가 주저자로 참여한 이번 연구는 교육부 및 전력연구원의 지원을 받아 수행되었으며, 광기술 분야 주요 국제 학술지인 ‘Optics Express’ 6월호에 그 성과를 인정받아 편집위원장 선정(Editor’s pick) 논문으로 채택되어 6월 13일 온라인 게재됐다.

논문 및 저자 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Optics Express* (IF=3.894)

*광학 분야의 저명한 국제 학술지로 상위 12% 학술지

- 논문명 : Terahertz radiation from propagating acoustic phonons based on deformation potential coupling

- 저자 정보 : 박상혁 통합과정(제1저자, 광주과학기술원), 이세혁 통합과정(공동저자, 광주과학기술원), Kunie Ishioka 박사(공동저자, National Institute for Materials Science, Japan), Christopher J. Stanton 교수(공동저자, University of Florida, U.S.), 기철식 박사(공동저자, 고등광기술연구소), Andreas Beyer 박사(공동저자, Philipps Universitat Marburg), Ulrich Höfer 교수(공동저자, Philipps Universitat Marburg), Wolfgang Stolz 교수(공동저자, Philipps Universitat Marburg), Kerstin Volz 교수(공동저자, Philipps Universitat Marburg), Andreas Beyer 박사(공동저자, Philipps Universitat Marburg), 조영달 교수(교신저자, 광주과학기술원)