

전자-포논 상호작용 모델을 이용한 실리콘 박막 소자의 포논 평균자유행로 스펙트럼 열전도 기여도 수치적 연구

강형선* · 고영하* · 진재식*†

* 조선이공대학교 기계설계과

A Numerical Study on Phonon Spectral Contributions to Thermal Conduction in Silicon-on-Insulator Transistor Using Electron-Phonon Interaction Model

Hyung-sun Kang*, Young Ha Koh* and Jae Sik Jin*†

* Dept. of Mechanical Design, Chosun College of Science & Technology

(Received January 6, 2016 ; Revised February 3, 2017 ; Accepted March 21, 2017)

Key Words: Electron-Phonon Interaction Model(전자-포논 상호작용 모델), Boltzmann Transport Equation(볼츠만 수송방정식), Phonon Mean Free Path(포논 평균자유행로), Thermal Conductivity(열전도율)

초록: 본 연구의 목적은 실제 실리콘 박막 트랜지스터 내 포논 전달 특성을 이해하는 것이다. 이를 위해 박막 소자 내 열해석 예측 정확성이 검증된 전자-포논 상호작용 모델을 이용하여 반도체 산업에서 중요한 Silicon-on-Insulator(SOI) 시스템에 대한 다양한 조건에서 전자-포논 산란에 의한 Joule 가열 메커니즘의 고려하여 포논 전달 해석을 수행했다. 소자 장치 전원(device power)과 실리콘 층 두께 변화에 따른 포논의 평균자유행로(mean free path) 스펙트럼에 대한 열적 특성을 조사하여, 실제 SOI 소자 내 포논 전달을 이해했다. 이 결과는 SOI 소자의 신뢰성 설계 및 고효율 열소산(heat dissipation) 설계전략에 필요한 포논 전달 특성 이해에 활용될 수 있다.

Abstract: The aim of this study is to understand the phonon transfer characteristics of a silicon thin film transistor. For this purpose, the Joule heating mechanism was considered through the electron-phonon interaction model whose validation has been done. The phonon transport characteristics were investigated in terms of phonon mean free path for the variations in the device power and silicon layer thickness from 41 nm to 177 nm. The results may be used for developing the thermal design strategy for achieving reliability and efficiency of the silicon-on-insulator (SOI) transistor, further, they will increase the understanding of heat conduction in SOI systems, which are very important in the semiconductor industry and the nano-fabrication technology.

- 기호설명 -

C : 비열(J/m³K)
 d : 박막 두께(m)
 e : 에너지 밀도(J/m³)
 e'' : 단위 부피 및 단위 입체각 당 에너지 (J/sr·m³)
 E_F : 페르미 에너지(J)
 \vec{F} : 외부력(kg·m/s²)
 k_B : 볼츠만 상수(J/K)
 K : 규준화된 열전도율(W/m·K)

LA : 세로방향 전파 음향 포논
 N_{band} : 전체 포논 띠 수
 P : 장치 전원(mW)
 q : 열 유속(W/m²)
 \hat{s} : 단위 방향 벡터
 T : 온도(K)
 TA : 가로방향 전파 음향 포논
 \vec{v}_g : 포논 군속도(m/s)
 v_d : 전자의 표류속도(m/s)

그리스문자

γ : 산란률(s⁻¹)
 η_e : 도핑 농도(m⁻³)

† Corresponding Author, jinjs@cst.ac.kr

Λ : 포논 평균자유행로(mean free path)
 τ : 이완시간(s)
 Ω : 입체각(sr)

하첨자

a : 음향 포논
 e : 전자
 f : intervalley 산란 f -과정
 g : intervalley 산란 g -과정
 i : i 번째 포논 밴드(band)
 imp : 불순물
 ij : i 와 j 번째 포논 밴드에 의한 물성 값
 o : 광 포논
 ph : 포논
 ref : 303 K 조건의 기준 값

1. 서 론

Silicon-on-insulator(SOI) 시스템은 벌크(bulk) 실리콘 층 위에 수동(passive) 층인 이산화규소(SiO_2) 층을 깔고, 미세 마이크로미터 크기(submicrometer) 두께의 완전 단결정 실리콘으로 구성되어 있으며,^(1,2) SOI 기술은 반도체 산업과 나노제작기술(nano-fabrication technology)에 있어서 매우 중요한 기술이다.^(1~5) SOI를 활용한 SOI소자에서 SiO_2 층의 극히 낮은 열전도율(상온에서 약 1.4 W/mK)로 인해 소자 내 Joule 발열에 의한 열이 외부로 배출되지 못하는 문제가 있다.^(4,5) 이로 인해 박막 소자의 신뢰성이 악화되고, 소자 내 전자 이동속도가 작아지므로, SOI 소자의 실리콘 층에 대한 열전달 이해는 소자의 신뢰성 설계에 매우 중요하다.^(3~8)

미세 마이크로미터 크기의 반도체 및 절연체(dielectrics)와 같은 고체의 주요 열전달 메커니즘은 확산(diffusion)현상이 아닌, 포논의 발리스틱(ballistic) 전달현상이 중요하다.⁽²⁾ 따라서 포논-경계표면 산란(scattering) 분석이 중요하고,⁽⁹⁾ 결국, 결정체(crystal) 격자(lattice)의 양자화된 진동인 포논(phonon)의 전달을 해석해야 하는데, 포논의 파동적 성질을 무시할 수 있는 시스템 크기에 대해서는 볼츠만 수송방정식(Boltzmann transport equation, BTE)을 적용할 수 있다.^(2,4-8,10-12)

실리콘 내 Joule 발열은 전자(electron)-포논 산란 메커니즘에 의해 결정되는데,^(13,14) 최근 제1원리 기법(first principles)으로 전자 및 정공(hole) 농도 변화에 따른 포논 산란에 대한 엄밀한 연구결과⁽¹⁵⁾가 보고된 바 있으나, 이 기법은 계산과정의 복잡성과 높은 계산 비용 때문에 SOI 소자와 같은 실제 시스템의 열해석 적용에는 한계가 있고, 전

계(electric field)를 고려하기 어려운 문제가 있다.

미세 마이크로미터 크기의 포논 전달 특성 이해에서 중요한 포논의 전달 물성(property) 중 하나가 포논 스펙트럼(spectrum) 평균자유행로(mean free path, MFP) 분포에 따른 열전도율 기여(contribution)인데, 이에 대한 실험적 측정 및 수치적 예측 방법에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있으나,⁽¹⁶⁻²²⁾ 이러한 방법은 재료 자체의 포논 스펙트럼 MFP 분포에 대한 열적 특성 예측 방법이다. 최근 포논의 주파수 의존성이 고려된 BTE 근간의 해석 모델을 적용하여, 실리콘 박막 트랜지스터의 실리콘 박막 두께 변화에 따른 포논 MFP 스펙트럼 열전달 특성 및 비등방성을 해석했다.⁽⁸⁾ 그러나 Joule 발열 메커니즘에 대해 전자와 포논의 스펙트럼 산란을 고려하지 않고, 간단히 발열량 향으로 처리하여, 실제 반도체 시스템에 대한 열적 특성을 예측하기에는 한계가 있다.

본 논문의 저자는 전자-포논 산란 메커니즘^(13,14)과 포논의 완전 분산관계^(5,16)를 적용한 포논-전자 상호작용 모델을 제안하고, 박막 소자 내 열해석 예측의 정확성을 검증 후, 미세 마이크로미터 크기의 반도체 시스템에 대한 다양한 조건의 포논 전달 해석을 수행한 바 있다.^(6-8,10-12) 본 연구에서는 전자-포논 상호작용 모델을 적용하여, SOI 소자 내 포논 스펙트럼 MFP 특성에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이를 통해, 소자 장치 전원(device power)과 실리콘 층 두께 변화에 따라 수 nm ~ 수 μm 범위의 폭넓은 포논의 MFP 스펙트럼에 대한 열적 특성을 조사하여, 실제 SOI 소자의 신뢰성 설계 및 고효율 열소산(heat dissipation) 설계전략에 필요한 포논 전달 특성 정보를 제공하고자 한다.

2. 해석모델 및 해석방법

2.1 Joule 가열 메커니즘 해석모델: 전자-포논 상호작용 모델

본 연구의 해석모델인 전자-포논 상호작용 모델 및 검증은 참고문헌 (6)과 (7)에 설명되어 있고, 본 연구의 목적은 단순 실리콘 재료가 아닌 실제 소자 내 포논 MFP 스펙트럼에 대한 열적 특성을 다양한 조건에서 조사하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 해석모델에 담겨있는 중요한 물리적 배경만을 소개하고자 한다.

실리콘 소자 내 전자-포논 산란에 의한 Joule 가열에 의한 열에너지 전달 현상은 각 에너지 전달체(carrier) 사이의 산란에 의한 에너지 이완시간(relaxation time, τ)과 깊은 관련이 있는데, 전자-포

논은 $\tau_{e-ph} \approx 0.1$ ps, 포논-포논은 $\tau_{ph-ph} \approx 10$ ps 정도의 크기를 갖는다.⁽²⁾ 따라서, $\tau_{e-ph} \ll \tau_{ph-ph}$ 이므로, 전자-포논 상호작용에 의한 에너지 전달 과정을 전자-포논 상호작용 모델^(6,7)로 우선 해석하여, 소자 내 전계에 의해 전자의 에너지가 어떤 주파수의 포논으로 전달되는지를 계산 후, 스펙트럼 포논-포논 상호작용에 의한 에너지 전달은 포논-포논 상호작용(full phonon dispersion, FPD) 모델^(5,16)로 해석한다. 전자-포논 상호작용에 의한 전자의 에너지 변화율은 BTE를 이용하면 다음과 같다.^(6,7)

$$\frac{\partial e_e}{\partial t} + \vec{v}_d \cdot \nabla e_e + \vec{F} \cdot \frac{\partial e_e}{\partial \vec{p}} = \sum_{a=1}^5 \left(\int_{T_{ref}}^{T_{ca}} C_e dT - e_e \right) \gamma_a + \sum_{a=6}^9 \left(\int_{T_{ref}}^{T_{ca}} C_e dT - e_e \right) \gamma_{(f \text{ or } g)}, \quad (1)$$

$$+ \left(\int_{T_{ref}}^{T_{co}} C_e dT - e_e \right) \gamma_g + \sum_{f=1}^2 \left(\int_{T_{ref}}^{T_{co}} C_e dT - e_e \right) \gamma_f$$

여기서 $C_e = \pi^2 (k_B T_e / E_F) \eta_e k_B / 2$ 이다.⁽²⁾ 또한, 높은 에너지의 전자와 포논이 산란 후, 음향 갈래(acoustic branch) 및 광 갈래(optical branch) 포논 에너지 변화율은 다음 식으로 구한다.^(6,7)

$$\frac{\partial e_i''}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}_{g,i} e_i'') = \left(\frac{1}{4\pi} \int_{T_{ref}}^{T_{ca}} C_i dT - e_i'' \right) \gamma_{(f \text{ or } g)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial e_o}{\partial t} = \left(\int_{T_{ref}}^{T_{co}} C_o dT - e_o \right) \gamma_g + \sum_{f=1}^2 \left(\int_{T_{ref}}^{T_{co}} C_o dT - e_o \right) \gamma_f \quad (3)$$

2.2 포논 분산관계(dispersion relation) 및 분극(polarization) 효과 해석모델: 포논-포논 상호작용 모델

포논 전달은 서로 다른 주파수의 포논 모드(mode) 사이의 산란 및 불순물(impurity) 산란, 포논-표면경계 산란의 특성을 정확히 해석하기 위해서는 포논 분산관계 및 분극 효과를 고려한 해석이 요구되며,⁽¹⁶⁾ 본 연구에서는 온도 300 K의 실리콘에 대해 [001]방향⁽²³⁾ 등방성(isotropic) 포논 분산관계를 가정했다.^(18,24) 매우 폭넓은 주파수를 가지는 포논 모드들 사이의 산란을 계산하는 것은 매우 복잡하다. 따라서 포논 주파수 범위를 몇 개의 그룹으로 나누어, 각 그룹 주파수 범위내에서는 선형(linear) 분산관계로 가정할 수 있다. 이를 위해 포논 종방향 음향(Longitudinal acoustic, LA)과 횡방향 음향 (Transverse acoustic, TA) 갈래에 대해서는 각각 6등분 균등 분할했고, 광 갈래의 경우

는 좁은 진동수 범위를 가지므로, 단일 밴드로 해석했다.^(5,16)

이완 시간 근사(relaxation time approximation)를 적용한 포논 FPD 모델^(5,16)은 음향 갈래(하첨자 i)와 광 갈래(하첨자 o)의 단위 부피 및 단위 입체각 당 에너지(e'') 변화율을 BTE 근간으로 다음 식을 이용하여 계산했다.^(5,16)

$$\frac{\partial e_i''}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}_{g,i} e_i'') = (e_i^0 - e'')(\gamma_{ii} + \gamma_{imp,i}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{bands}} \left\{ \left(\frac{1}{4\pi} \int_{T_{ref}}^{T_{ij}} C_i dT - e'' \right) \gamma_{ij} \right\}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial e_o}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_{bands}-1} \left(\int_{T_{ref}}^{T_{oj}} C_o dT - e_o \right) \gamma_{oj}, \quad (5)$$

여기서 Joule 발열량 모사는 전자-포논 상호작용 모델을 적용한다. $N_{bands} = 13$ (= 6 (LA 밴드 수) + 6 (TA 밴드 수) + 1 (광포논 밴드 수))이다.

2.3 해석방법 및 포논 전달 물성치

본 연구에서 해석한 SOI 소자의 도식 및 경계 조건을 Fig. 1에 나타냈다. 이는 Goodson 등⁽³⁾이 실험한 조건을 도식으로 표현한 것인데, 이전 해석 조건^(7,8)과 동일하다. 359 nm 두께의 SiO₂-층 위에 $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 으로 붕소(Boron) 도핑(doping)된 41 nm, 78 nm, 177 nm 두께의 Si-층을 해석했다. 앞서 연구된 바^(5,7,8)와 같이, 소자 윗면은 확산반사(diffuse reflection)에 의한 단열 면으로 가정했고, 나머지 면들은 상온(303 K)으로 가정했다.

수치해석 방법은 유한체적법(finite volume method)을 적용했고,^(5,7,8) 상세한 해석 방법 및 해석 격자수는 참고문헌 (7)과 동일하게 수행했다. Fig. 1에서 Si-층은 전자-포논 상호작용 모델로 해석한 반면,

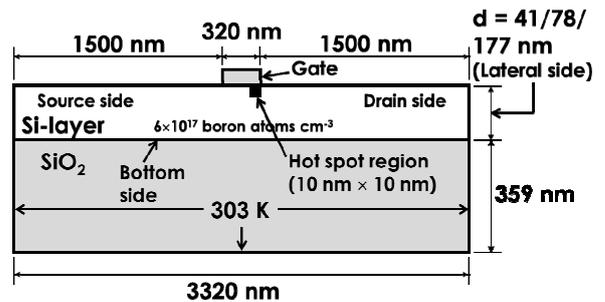


Fig. 1 Two-dimensional computational domain of Silicon-on-Insulator (SOI) transistor and simulation conditions.^(3,7,8) Here, lateral and bottom sides are noticed

SiO₂-층은 포논의 MFP가 대략 1 nm로 극히 작으므로 Fourier 법칙을 적용했다.^(5,7,8) Si-SiO₂ 경계면 처리는 참고문헌 (7)과 동일하게 처리했다.

전자-포논 상호작용 모델을 해석하기 위해 필요한 *i*번째 밴드(band)의 포논 전달 특성을 대표하는 군속도 $v_{g,i}$ 와 비열 C_i 에는 참고문헌 (8)에 제시된 값을 사용했다. 동일한 포논 모드 사이의 산란에 의한 이완 시간 τ_{ii} 및 서로 다른 포논 모드 사이의 이완 시간 τ_{ij} 는 Narumanchi 등^(5,16)이 계산한 값을 적용했고, 붕소 도핑에 따른 불순물-포논 산란률(scattering rate, $\gamma_{mp,i}$)은 Mazumder 등⁽²⁵⁾이 제시한 방법을 사용했다.

3. 해석결과 및 고찰

소자의 장치 전원(P) 및 Si-층 두께(d) 변화에 따른 포논 MFP 스펙트럼 열전도율 기여 정도를 Fig. 2에 나타냈다. 여기서, Joule 열량 대신에 소자 장치 전원을 사용하였는데, 그 이유는 전자-포논 상호작용 모델 해석결과를 검증하기 위해 사용한 실험적 결과인 참고문헌 (3)에서 소자 장치 전원을 사용하였기 때문이며, 또한, 이 소자 장치 전원이 실제 소자의 작동조건을 표현하기에 더 적합하기 때문이다. 포논 밴드 별(i) 규준화된 열전도율 K_i 와 MFP Λ_i 는 각각 다음 관계식⁽⁸⁾으로 계산했다.

$$K_i = \bar{q}_i / \sum_{i=1}^{N_{\text{band}}} \bar{q}_i \quad (6)$$

여기서 $\bar{q}_i = \int_{4\pi} v_{g,i} \hat{s} e_i^2 d\Omega$ 이다.⁽⁷⁾

$$\Lambda_i = v_{g,i} / \left[\sum_{j=1}^{N_{\text{band}}} (\gamma_{ij} + \gamma_{ii}) + \gamma_{mp,i} \right] \quad (7)$$

Fig. 1에 나타냈듯이, Joule 가열에 의한 발열은 Si-층 우측 및 좌측, 그리고 아래 면을 통해 소산되는데, 발열 지점을 기준으로 우측과 좌측은 대칭으로 볼 수 있으므로 (본 연구의 해석범위에서 좌측과 우측의 열유속(heat flux) 차이는 최대 12% 미만임), Fig. 2에 좌측과 우측은 별도로 구별하지 않고, 좌측과 아래 면 방향 열전도율을 각각 “Lateral”과 “Bottom”으로 표현했다. Fig. 2로부터 알 수 있듯이, Si-층 두께 변화에 대해 측면 방향의 K_i 의 변화는 거의 없고, 아래 면 방향의 K_i 는 Si-층이 두꺼울수록 상대적으로 긴 MFP의 포논 기여도가 증가함을 확인할 수 있다. 아래 면 방향 포논 전달은 박막에 대한 가로방향(cross-plane) 포논 전

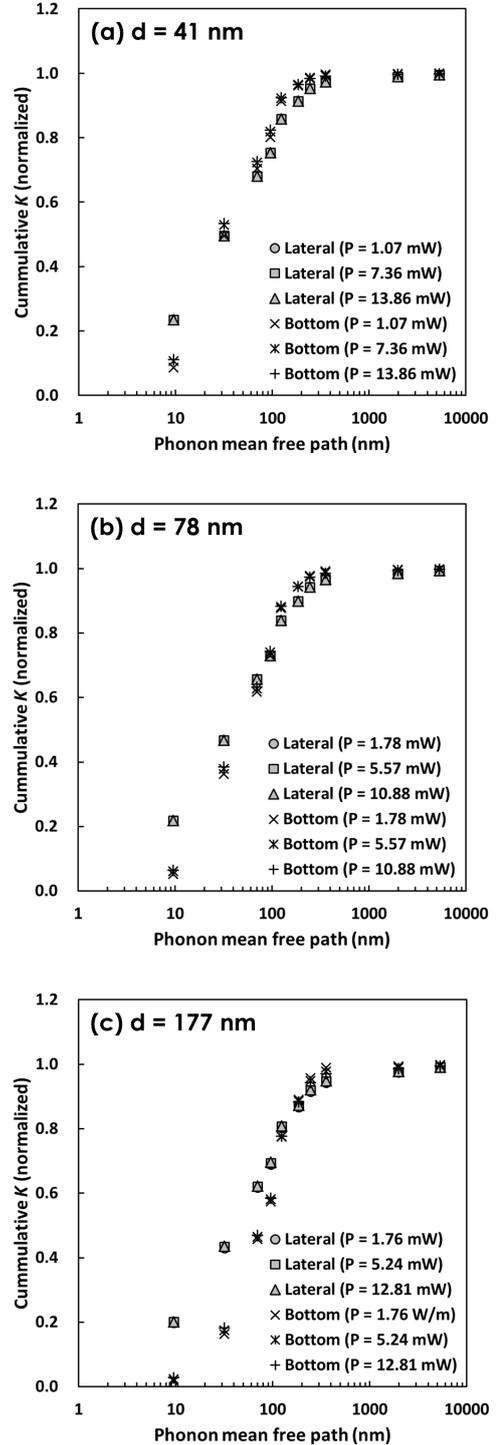


Fig. 2 Normalized cumulative thermal conductivity of three kinds of silicon film thicknesses (d) as a function of phonon mean free path of lateral and bottom sides for varying device power: (a) $d = 41$ nm; (b) $d = 78$ nm; (c) $d = 177$ nm

달로 근사할 수 있고, 따라서 Si-층 두께 변화에 대한 아래 면 방향의 K_i 변화가 측면 보다 상대적으로 더 크다고 할 수 있다. 또한, 박막 실리콘

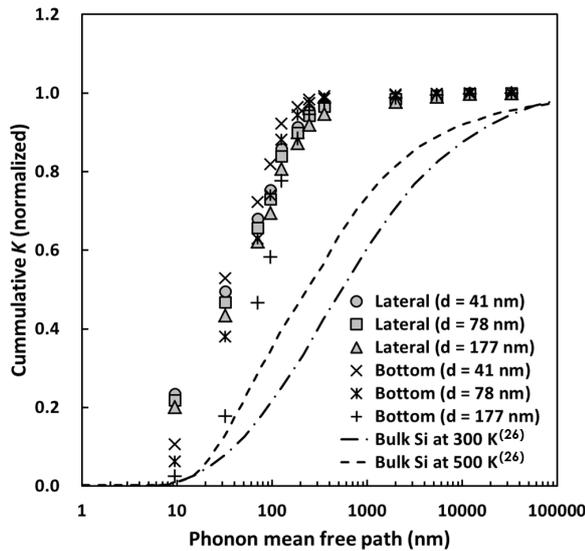


Fig. 3 Normalized cumulative thermal conductivity of three kinds of silicon film thicknesses (d) as a function of phonon mean free path of lateral and bottom sides. The device power (P) is $P = 7.36$ mW, 8.14 mW, and 7.6 mW for $d = 41$ nm, 78 nm, and 177 nm, respectively. Bulk values are from Ref. (26)

두께 41 nm, 78 nm, 177 nm 각각에 대해 소자 장치 전원 변화에 따른 포논 MFP 스펙트럼 열적 특성을 변화를 보면, 소자 장치 전원 변화에 대해 규준화된 누적 열전도율 변화가 없음을 알 수 있다.

Hua 등⁽²⁶⁾은 mean free path spectroscopy 방법으로 300 K와 500 K 온도 조건에서 벌크 실리콘의 포논 MFP 스펙트럼 별 열전도율 기여도를 측정했다. 이 결과를 본 연구의 결과와 비교하여 Fig. 3에 나타냈고, 이를 통해, 벌크 실리콘과 실제 반도체 시스템에 대한 포논 MFP 스펙트럼 별 열전도율 기여도의 차이를 확인할 수 있다. 본 연구의 해석조건에서 Si-층 내 온도는 500 K 미만이고,⁽⁷⁾ Feng 등⁽²⁷⁾의 연구는 이 온도 범위에서는 4-포논 산란(four-phonon scattering) 과정은 3-포논 산란(three phonon scattering) 과정에 비해 무시할 만큼 작아, 3-포논 산란이 중요한 포논-포논 산란 메커니즘임을 보였다. 따라서, 소자 내 온도 상승에 의한 포논 전달 특성 변화는 작으며, 박막 두께로 인한 포논-표면경계 산란 영향이 커져, Fig. 3에서 알 수 있듯이, 벌크 상태에서는 약 100 μm 의 MFP까지 열전도율 기여가 있는 반면, 본 연구의 해석한 Si-층 두께 범위에서 SOI 소자는 이보다 훨씬 작은 약 1 μm 의 MFP까지 열전도율 기여도를 가짐을 알 수 있다. 또한, 실제 SOI 소자는 0.1 μm 이하의 MFP를 가지는 포논에 의해 열전달이 일어남을

확인할 수 있다.

4. 결론

지금까지 실제 반도체 시스템에 대해 Joule 가열에 의한 발열을 엄밀히 해석하여, 포논 MFP 스펙트럼 별 열전달 기여도에 대해 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 박막 소자 내 열해석 예측의 정확성이 검증된 전자-포논 상호작용 모델을 이용하여, 전자-포논 산란에 의한 Joule 가열 메커니즘을 고려하고, 미세 마이크로미터 크기의 반도체 시스템에 대한 다양한 조건의 포논 전달 해석을 수행했다. 소자 장치 전원(device power)과 실리콘 층 두께 변화에 따라 수 nm ~ 수 μm 범위의 폭넓은 포논의 MFP 스펙트럼에 대한 열적 특성을 조사하여, 실제 SOI 소자 내 포논 전달을 이해하고, SOI 소자의 신뢰성 설계 및 고효율 열소산(heat dissipation) 설계전략에 필요한 포논 전달 특성 정보를 제공했다.

참고문헌 (References)

- (1) Marconnet, A. M., Asheghi, M. and Goodson, K. E., 2013, "From the Casimir Limit to Phononic Crystals: 20 Years of Phonon Transport Studies Using Silicon-on-Insulator Technology," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 135, No. 6, Paper Number 061601.
- (2) Tien, C. L., Majumdar, A. and Gerner, F. M., 1998, *MICROSCALE ENERGY TRANSPORT*, Taylor & Francis, Washington D. C.
- (3) Goodson, K. E., Flik, M. I., Su, L. T. and Antoniadis, D. A., 1995, "Prediction and Measurement of Temperature Fields in Silicon-on-Insulator Electronic Circuits," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, No. 3, pp. 574~581.
- (4) Sverdrup, P. G., Ju, Y. S. and Goodson, K. E., 2001, "Sub-Continuum Simulations of Heat Conduction in Silicon-on-Insulator Transistors," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, No. 1, pp. 130~137.
- (5) Narumanchi, S. V. J., Murthy, J. Y. and Amon, C. H., 2004, "Comparison of Different Phonon Transport Models for Predicting Heat Conduction in Silicon-on-insulator Transistors," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 127, No. 7, pp. 713~723.
- (6) Jin, J. S. and Lee, J. S., 2007, "Electron-Phonon Interaction Model and Prediction of Thermal Energy Transport in SOI Transistor," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 7, No. 11, pp. 4094~4100.
- (7) Jin, J. S. and Lee, J. S., 2009, "Electron-Phonon Interaction Model and Its Application to Thermal Transport Simulation during ESD Event in NMOS Transistor," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 131,

- No. 9, Paper Number 092401.
- (8) Kang, H.-S., Koh, Y. H. and Jin, J. S., 2016, "A Numerical Study on the Anisotropic Thermal Conduction by Phonon Mean Free Path Spectrum of Silicon in Silicon-on-Insulator Transistor," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 40, No. 2, pp. 111~117.
- (9) Jin, J. S., 2016, "Direct Determination of Spectral Phonon-Surface Scattering Rate from Experimental Data on Spectral Phonon Mean Free Path Distribution," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 40, No. 9, pp. 621~627.
- (10) Jin, J. S., Lee, B. J. and Lee, H. J., 2013, "Analysis of Phonon Transport in Silicon Nanowires Including Optical Phonons," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 63, No. 5, pp. 1007~1013.
- (11) Jin, J. S., 2014, "Prediction of Phonon and Electron Contributions to Thermal Conduction in Doped Silicon Films," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 6, pp. 2287~2292.
- (12) Jin, J. S. and Lee, J. S., 2009, "Effect of Joule Heating Variation on Phonon Heat Flow in Thin Film Transistor," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 33, No. 10, pp. 820~826.
- (13) Pop, E., Dutton, R. W. and Goodson, K. E., 2005, "Monte Carlo Simulation of Joule Heating in Bulk and Strained Silicon," *Applied Physics Letters*, Vol. 86, No. 8, Paper Number 082101.
- (14) Pop, E., Dutton, R. W. and Goodson, K. E., 2004, "Analytic band Monte Carlo Model for Electron Transport in Si Including Acoustic and Optical Phonon Dispersion," *Journal of Applied Physics*, Vol. 96, No. 9, pp. 4998~5005.
- (15) Liao, B., Qiu, B., Zhou, J., Huberman, S., Esfarjani, K. and Chen, G., 2015, "Significant Reduction of Lattice Thermal Conductivity by Electron-phonon Interaction in Silicon with High Carrier Concentrations; a First-principles Study," *Physical Review Letters*, Vol. 114, No. 11, Paper Number 115901.
- (16) Narumanchi, S. V. J., Murthy, J. Y. and Amon, C. H., 2004, "Submicron Heat Transfer Model in Silicon Accounting for Phonon Dispersion and Polarization," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 126, No. 6, pp. 946~955.
- (17) Minnich, A. J., Johnson, J. A., Schmidt, A. J., Esfarjani, K., Dresselhaus, M. S., Nelson, K. A. and Chen, G., 2011, "Thermal Conductivity Spectroscopy Technique to Measure Phonon Mean Free Paths," *Physical Review Letters*, Vol. 107, No. 9, Paper Number 095901.
- (18) Minnich, A. J., 2012, "Determining Phonon Mean Free Paths from Observations of Quasiballistic Thermal Transport," *Physical Review Letters*, Vol. 109, No. 20, Paper Number 205901.
- (19) Regner, K. T., Sellan, D. P., Su, Z., Amon, C. H., McGaughey, A. J. H. and Malen, J. A., 2013, "Broadband Phonon Mean Free Path Contributions to Thermal Conductivity Measured using Frequency Domain Thermoreflectance," *Nature Communications*, Vol. 4, Paper Number 1640.
- (20) Yang, F. and Dames, C., 2013, "Mean Free Path Spectra as a Tool to Understand Thermal Conductivity in Bulk and Nanostructures," *Physical Review B*, Vol. 87, No. 3, Paper Number 035437.
- (21) Xie, G., Guo, Y., Wei, X., Zhang, K., Sun, L., Zhong, J., Zhang, G. and Zhang, Y.-W., 2014, "Phonon Mean Free Path Spectrum and Thermal Conductivity for Si_{1-x}Ge_x Nanowires," *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 23, Paper Number 233901.
- (22) Hu, Y., Zeng, L., Minnich, A. J., Dresselhaus, M. S. and Chen, G., 2015, "Spectral Mapping of Thermal Conductivity Through Nanoscale Ballistic Transport," *Nature Nanotechnology*, Vol. 10, No. 8, pp. 701~706.
- (23) Brockhouse, B. N., 1959, "Lattice Vibrations in Silicon and Germanium," *Physical Review Letters*, Vol. 2, No. 6, pp. 256~258.
- (24) Mittal, A. and Mazumder, S., 2010, "Monte Carlo Study of Phonon Heat Conduction in Silicon Thin Films Including Contributions of Optical Phonons," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 132, No. 5, Paper Number 052402.
- (25) Mazumder, S. and Majumdar, A., 2001, "Monte Carlo Study of Phonon Transport in Solid Thin Films Including Dispersion and Polarization," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, No. 4, pp. 749~759.
- (26) Hua, C. and Minnich, A. J., 2014, "Transport Regimes in Quasiballistic Heat Conduction," *Physical Review B*, Vol. 89, No. 9, Paper Number 094302.
- (27) Feng, T. and Ruan, X., 2016, "Quantum Mechanical Prediction of Four-phonon Scattering Rates and Reduced Thermal Conductivity of Solids," *Physical Review B*, Vol. 93, No. 4, Paper Number 045202.