

界面热输运特性的研究

臧毅，马登科，杨诺*

<http://nanoheat.energy.hust.edu.cn/>

华中科技大学 能源与动力工程学院

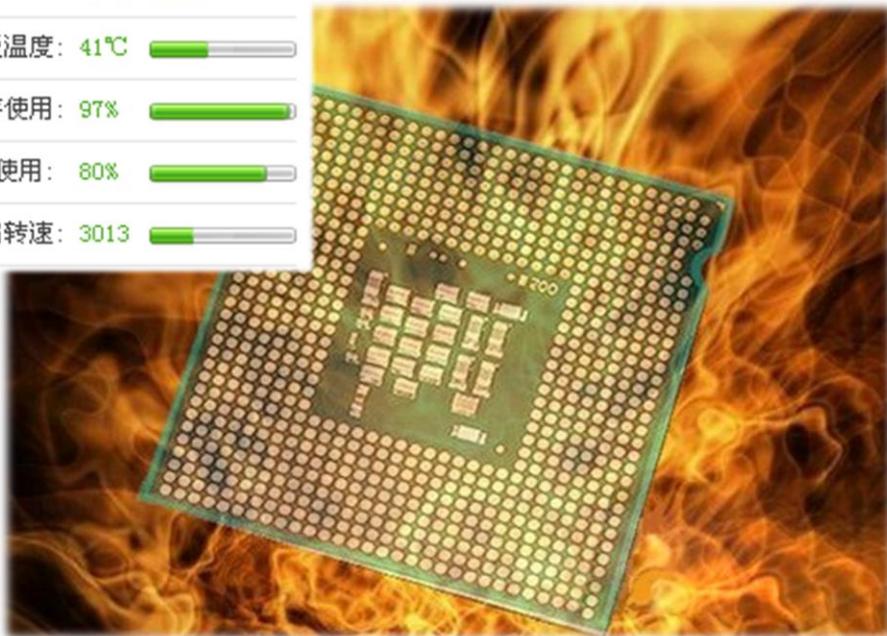


主要内容

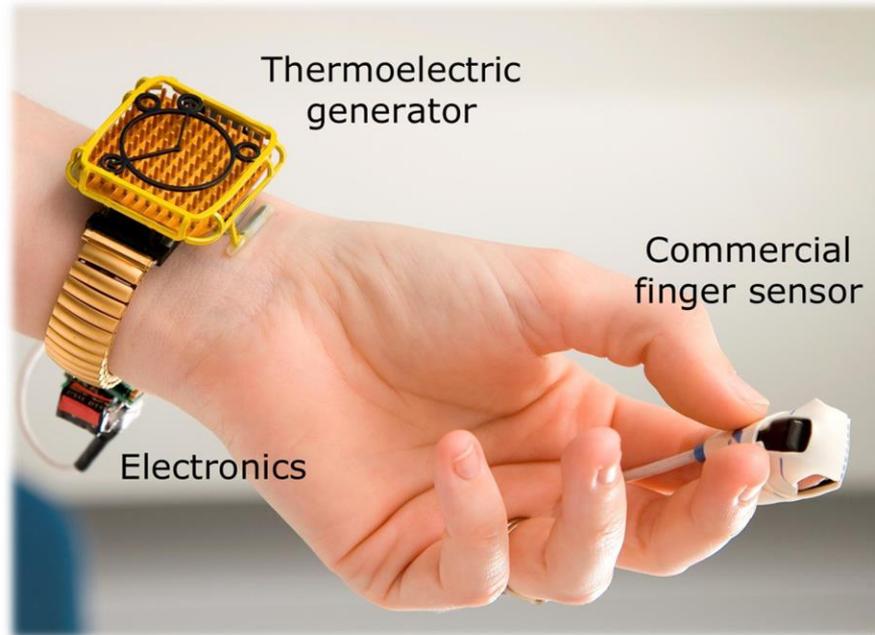
- 背景现状
- 研究内容
 1. 基于界面热阻的研究提出界面态
 2. 超晶格结构对界面热运输的影响
 3. 提出混合失配界面透射理论模型



微纳尺度下界面的重要性



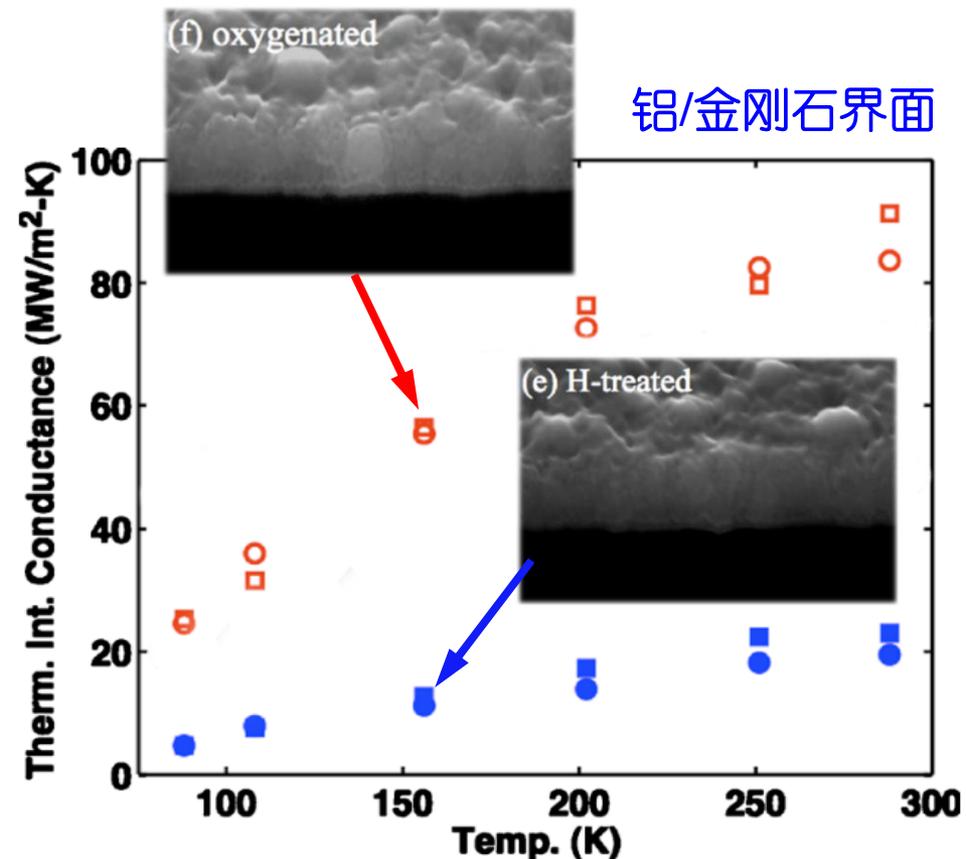
电子器件散热



提高热电转化效率

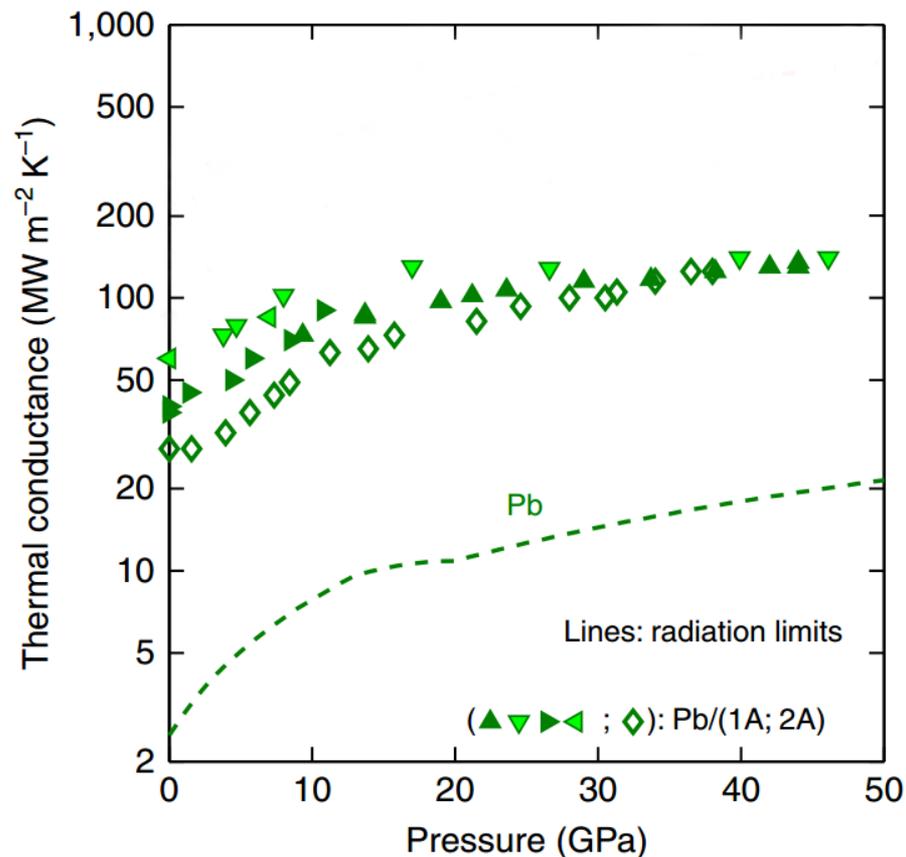
界面热运输的研究现状

G. Chen et al. Appl. Phys. Lett. 97 083102 (2010)



材料表面化学修饰影响界面热运输

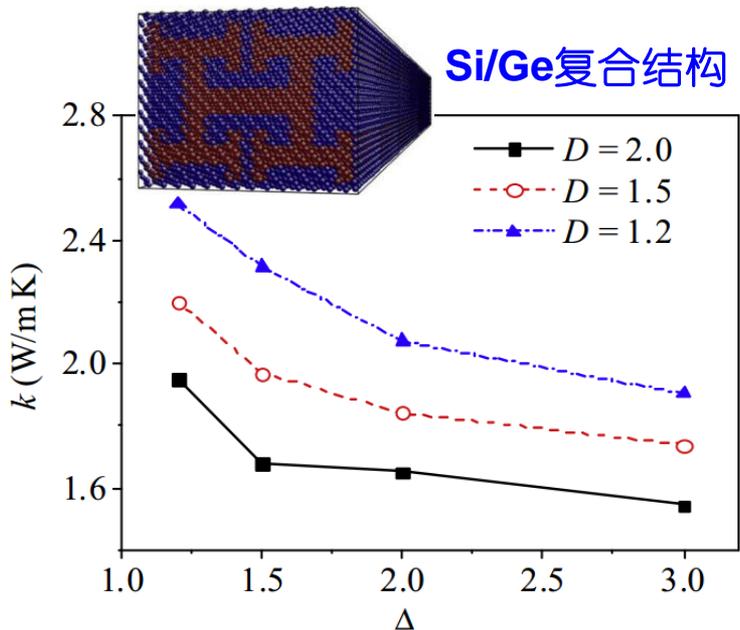
Hohensee et al. Nat. Commun. 6 6578 (2015)



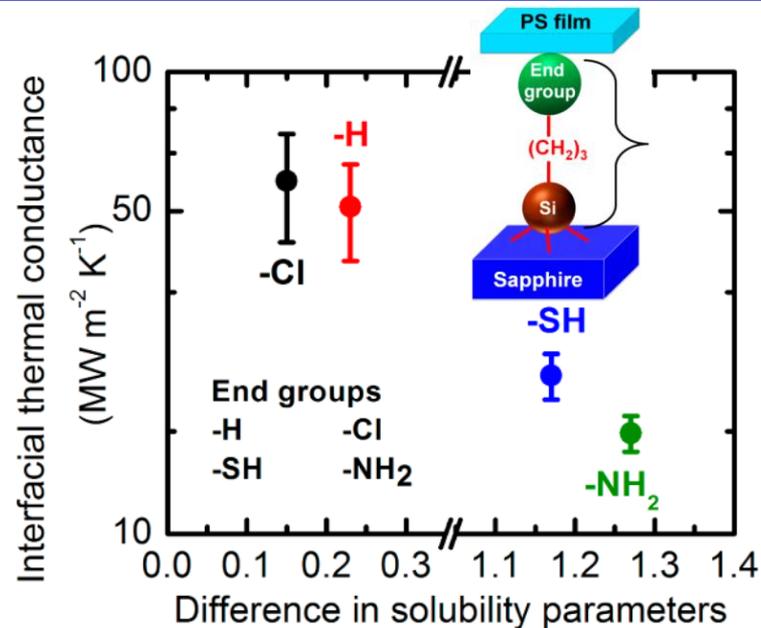
改变压力



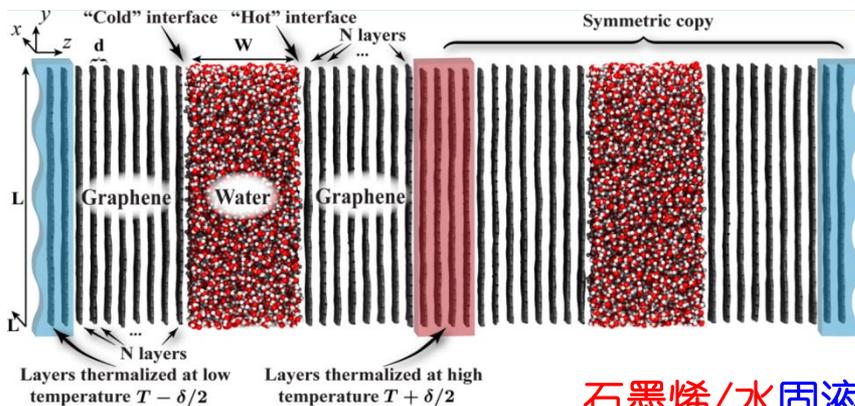
界面热运输的研究现状



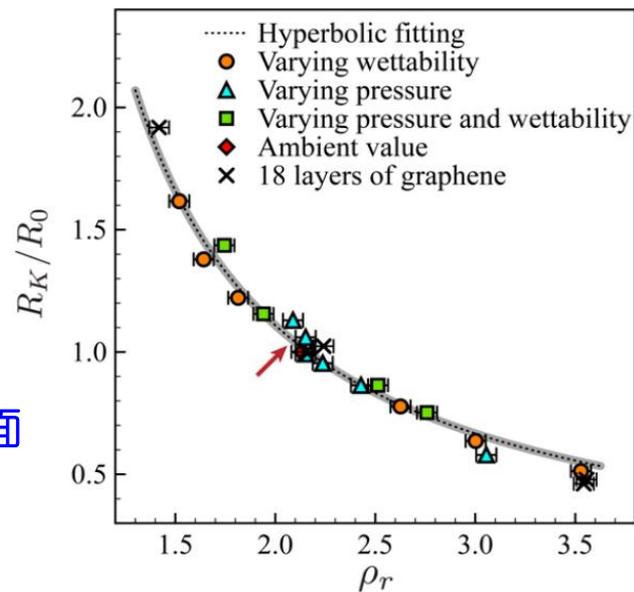
树状分形结构增加接触界面降低热导率



自组装分子层强化界面热运输



石墨烯/水固液界面



Y. Chen et al. INT J HEAT MASS TRAN 88 572 (2015)

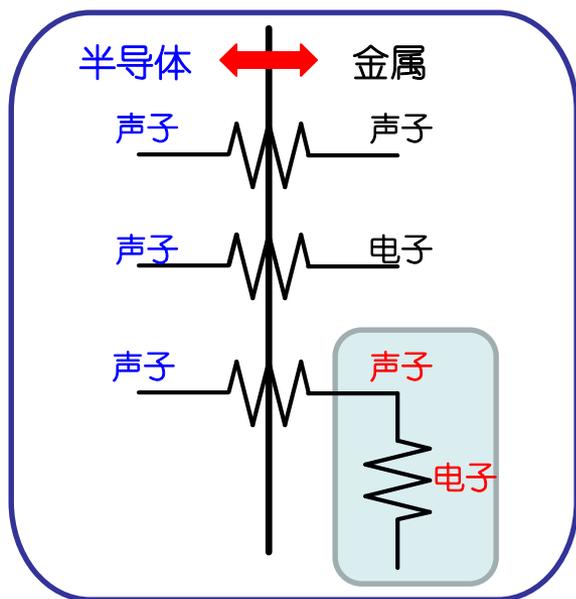
K. Zheng et al. ACS Nano 10 7792 (2016)

J.Chen et al. Nano lett 15 5744 (2015).



1. 基于铝硅界面热阻的研究提出界面态

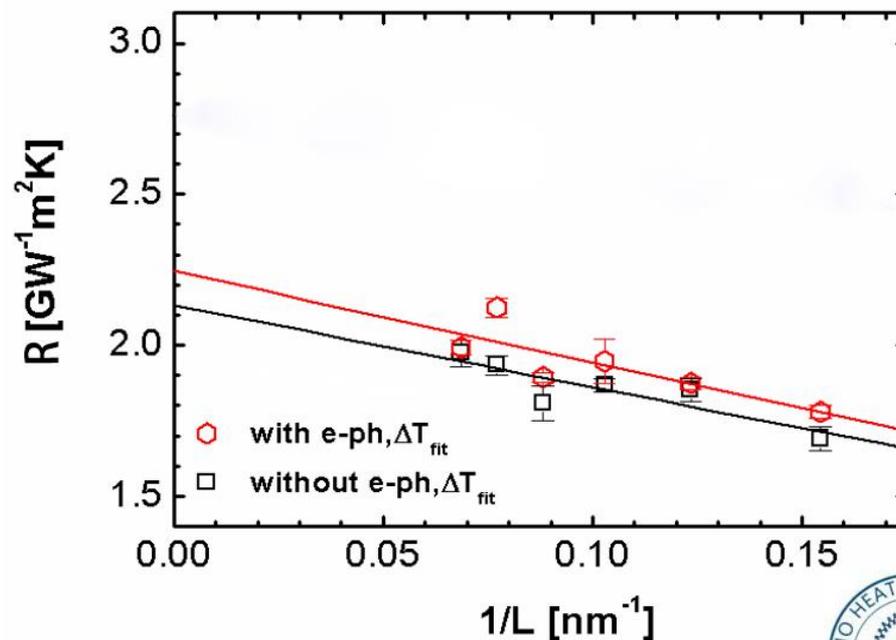
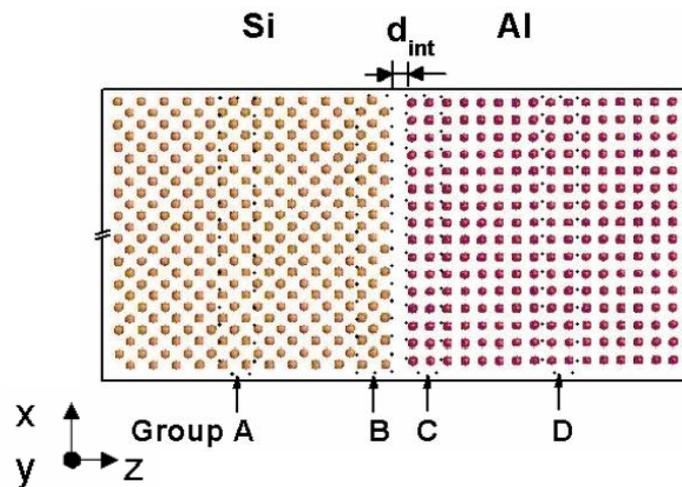
半导体——金属界面热运输通道



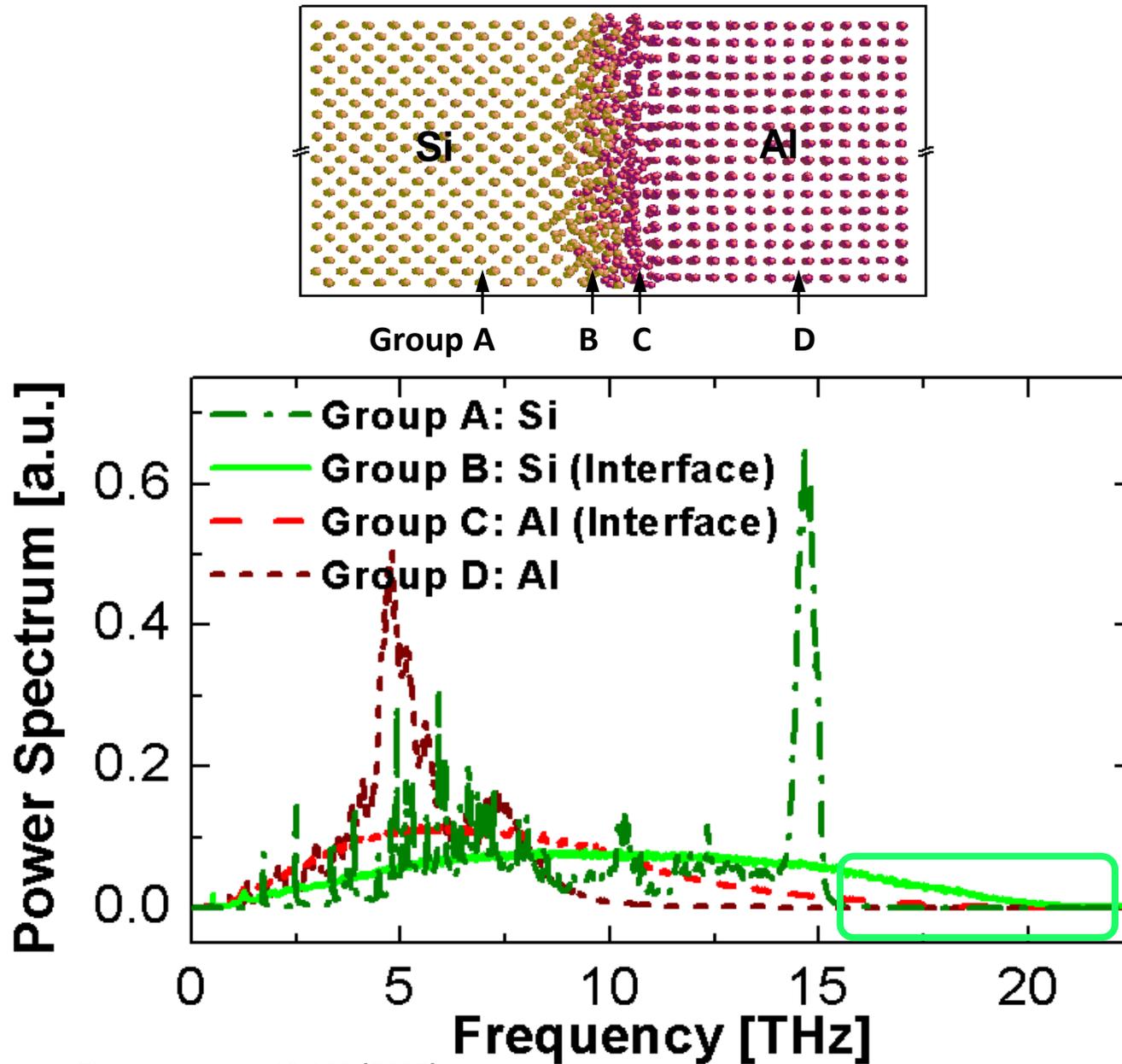
考虑间接电声相互作用:

Al原子内引入随机扰动

电声散射增加界面热阻



界面态

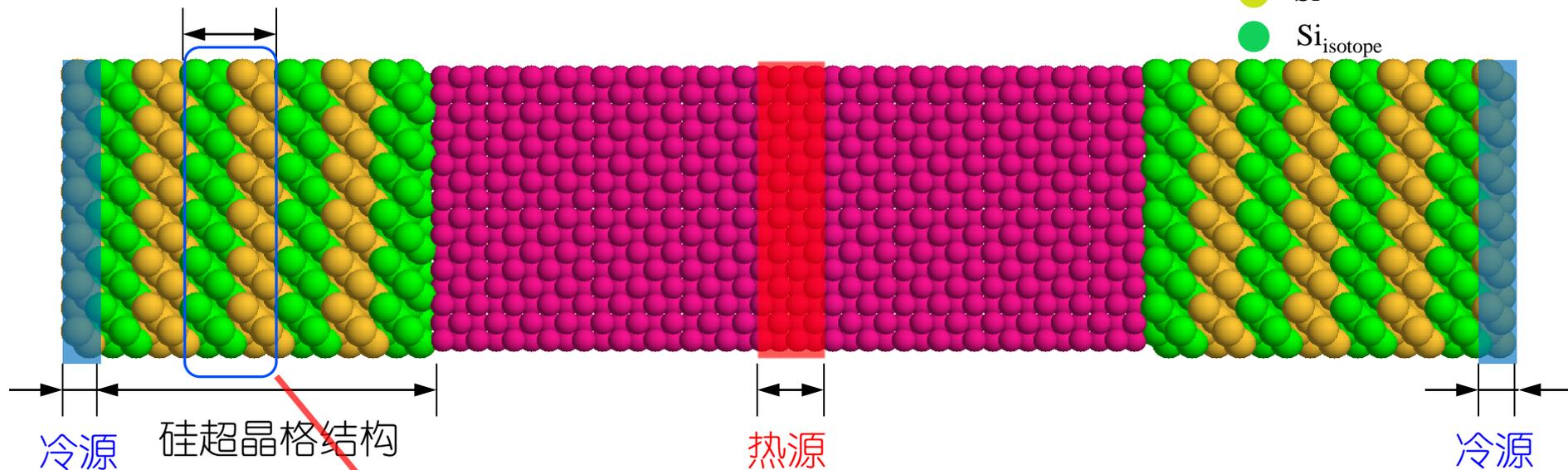


2. 超晶格结构对界面热运输的影响

超晶格硅/铝界面结构

周期长度 (8层原子)

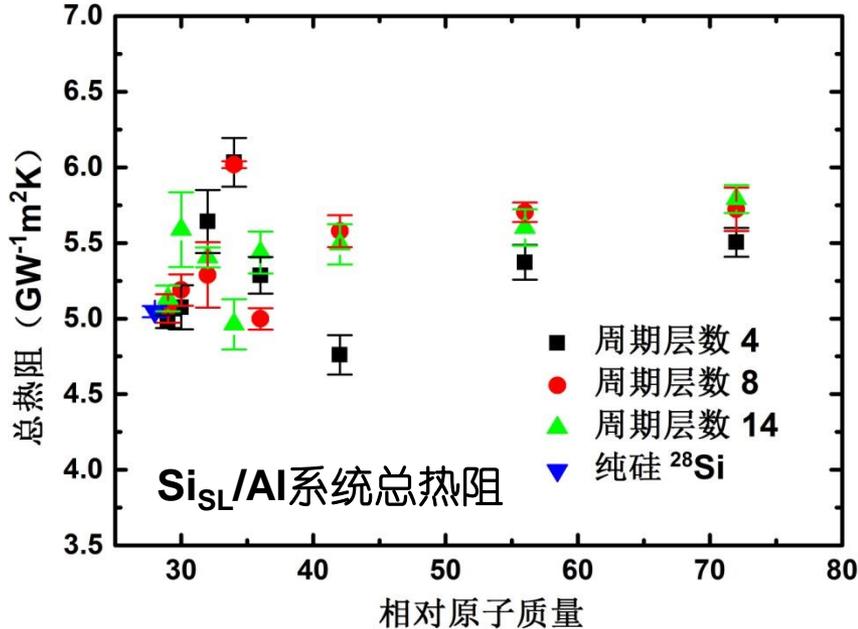
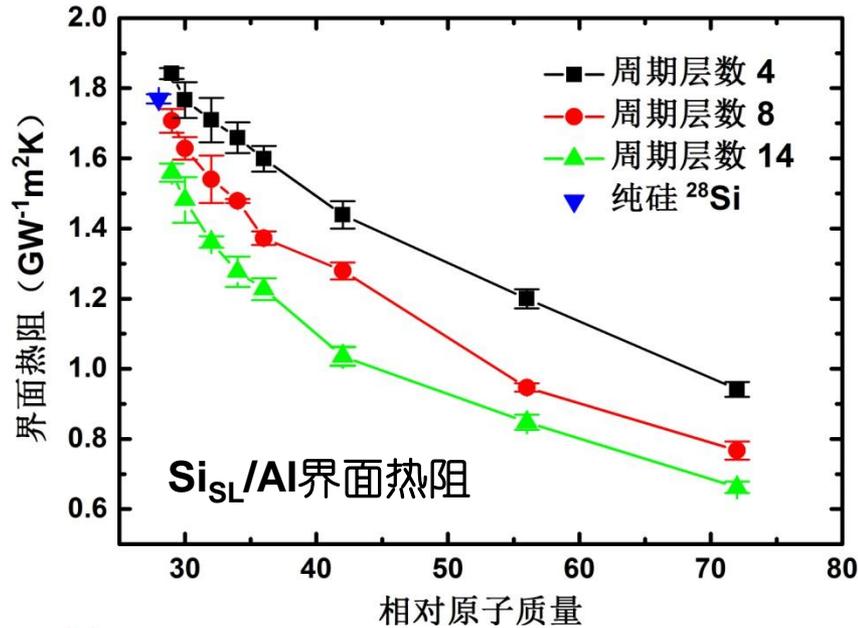
● Al
● ^{28}Si
● $\text{Si}_{\text{isotope}}$



SL周期选择 4层、8层、14层

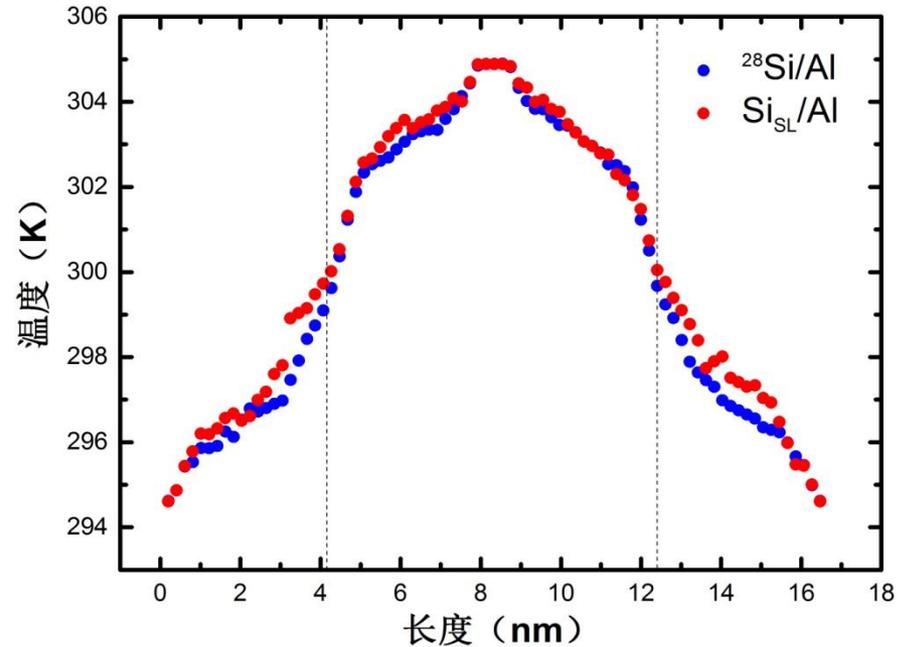
改变 Si_{SL} 周期长度及 Si 质量 研究热阻变化

界面热阻及总热阻



周期增大，界面热阻降低

同位素质量增大，界面热阻降低

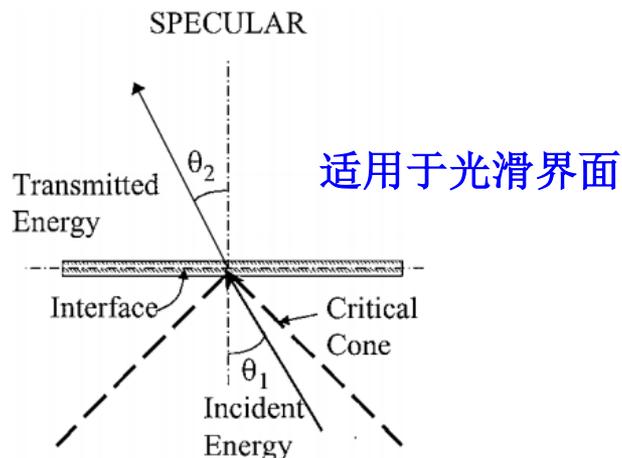


总热阻变化范围在15%以内

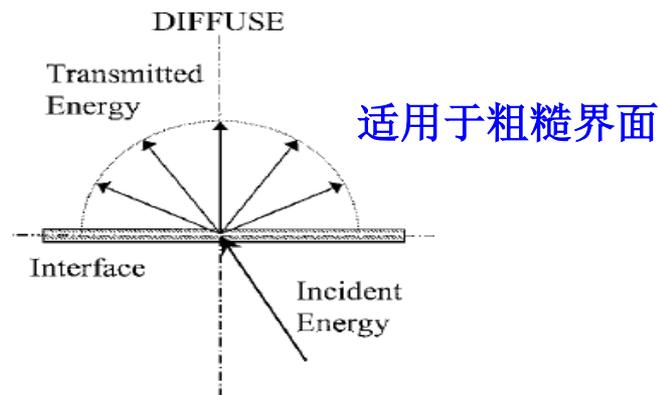
提高界面热运输同时，改善了局部温度梯度



3. 提出混合失配界面透射理论模型



声学失配模型 (AMM) ¹



漫散射失配模型 (DMM) ¹

混合失配模型 (MMM) :

$$\alpha_{MMM,A \rightarrow B} = (1 - p) \cdot \alpha_{DMM,A \rightarrow B} + p \cdot \alpha_{AMM,A \rightarrow B} \quad ^2$$

p 与界面粗糙度 η 有关³, 利用声子态密度描述粗糙度 η

优点: 适用于任何粗糙度界面

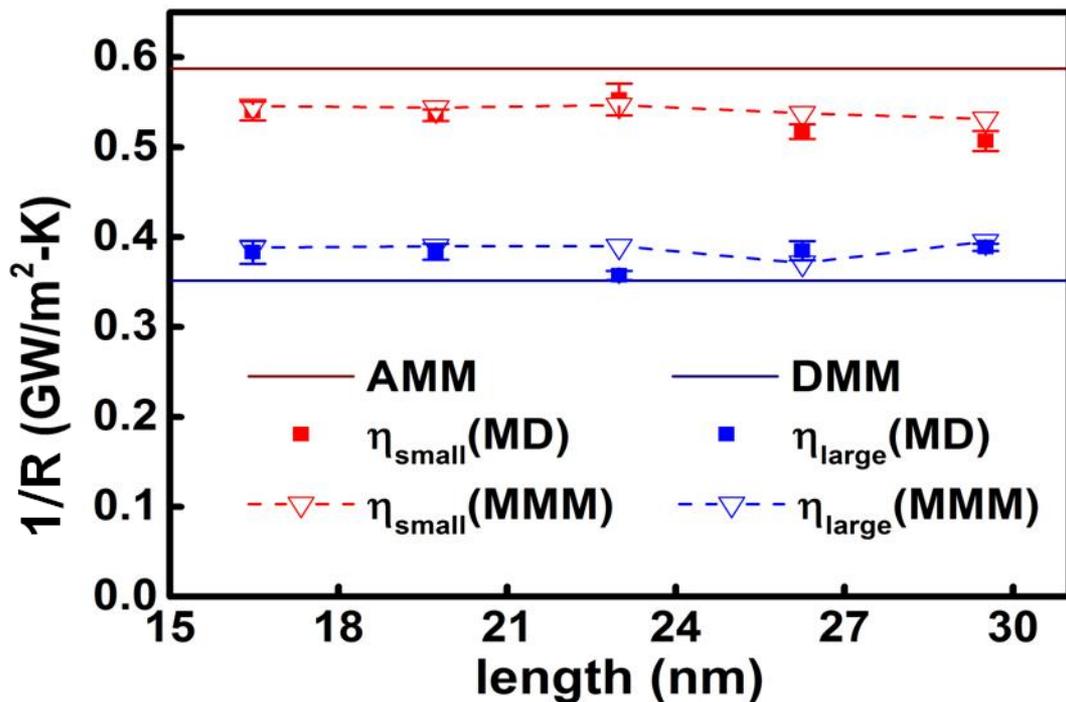
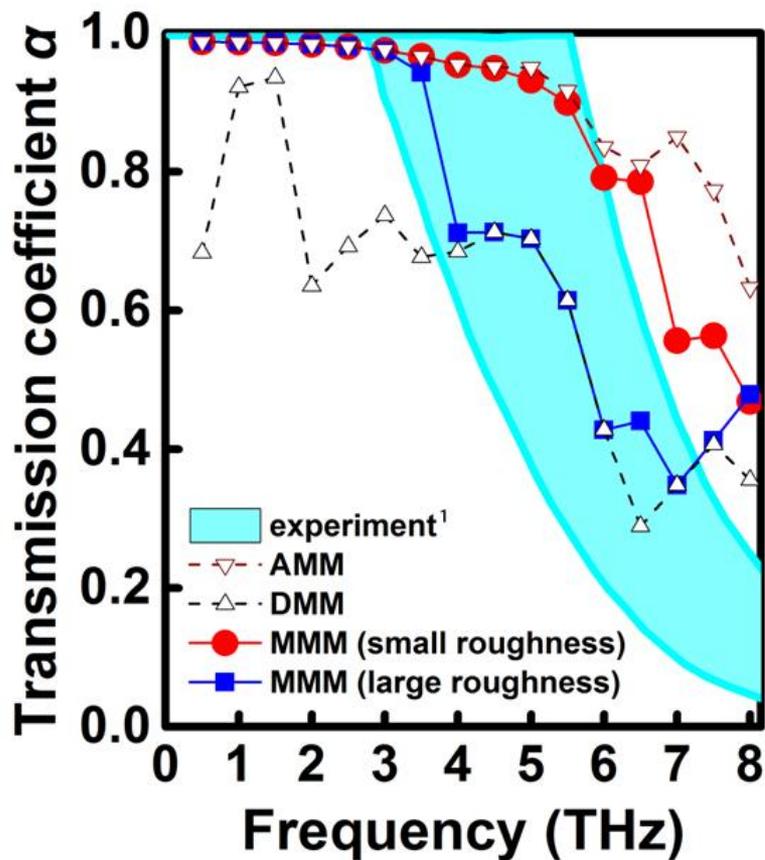
[1] Swartz et al. Rev. Mod. Phys **61** 605 (1989).

[2] Chen, J. Heat Transf. **119**, 220 (1997).

[3] Soffer, J APPL PHYS **38** 1710 (1967).



对混合适配模型验证



模型透射率与实验测量的结果对比

优点：适用于任何粗糙度界面

[1] Hua et al. arXiv:1509.07806 (2015).



总结

- 计算铝硅界面热阻，考虑间接电声相互作用；提出界面态概念
- 超晶格结构降低界面热阻，并且改变局部温度梯度
- 态密度描述粗糙度，提出界面混合失配模型（MMM），适用于任何粗糙度



致谢

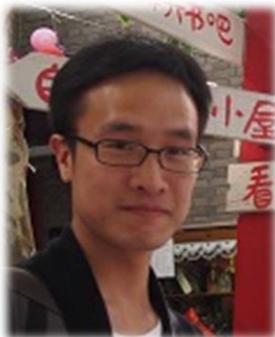
基金项目：国家自然科学基金资助项目（NO. 51576076）

指导老师



杨诺 教授

合作者



马登科



纳米传热实验室

谢谢大家！

