

НЕДИФУЗІЙНИЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС У НАНОМАСШТАБНИХ ТРАНЗИСТОРАХ ТА НОВІТНІ ТЕРМОІНТЕРФЕЙСИ ДЛЯ МІКРОПРОЦЕСОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація:

У роботі розглядаються особливості теплопереносу у наномасштабних транзисторних структурах сучасних мікропроцесорів. Показано, що при зменшенні розмірів елементів електронних схем до нанометрів класична дифузійна модель теплопровідності перестає повністю описувати фізичні процеси. Проаналізовано роль фононів у перенесенні теплової енергії, механізми виникнення локальних перегрівів у напівпровідникових структурах та перспективи використання сучасних термоінтерфейсних матеріалів для підвищення ефективності відведення тепла.

Ключові слова: теплоперенос, фониони, нанотранзистори, hotspot, термоінтерфейсні матеріали, мікропроцесори.

Abstract:

The paper examines the peculiarities of heat transfer in nanoscale transistor structures used in modern microprocessors. It is shown that when device dimensions approach nanometer scale the classical Fourier diffusion model cannot fully describe the real thermal processes. The role of phonons in heat transport, the mechanisms of hotspot formation in semiconductor devices, and the prospects of advanced thermal interface materials for improving heat dissipation are discussed.

Keywords: heat transfer, phonons, nanoscale transistors, hotspots, thermal interface materials.

Вступ

Стрімкий розвиток мікроелектроніки протягом останніх десятиліть супроводжується постійним зменшенням геометричних розмірів транзисторів та зростанням щільності інтеграції елементів у мікропроцесорах. Сучасні технологічні процеси дозволяють створювати транзистори з характерними розмірами у декілька нанометрів. Таке масштабування забезпечує підвищення продуктивності обчислювальних систем, однак одночасно породжує нові фізичні проблеми, пов'язані з тепловими процесами в кристалі процесора.

Зі зменшенням розмірів електронних компонентів суттєво зростає щільність тепловиділення на одиницю площі. У результаті цього в напівпровідникових структурах виникають локальні області підвищеної температури, які отримали назву hotspots [1] (рис. 1). Перегрів таких областей призводить до зниження швидкодії транзисторів, збільшення енергоспоживання та скорочення терміну служби мікроелектронних пристроїв.

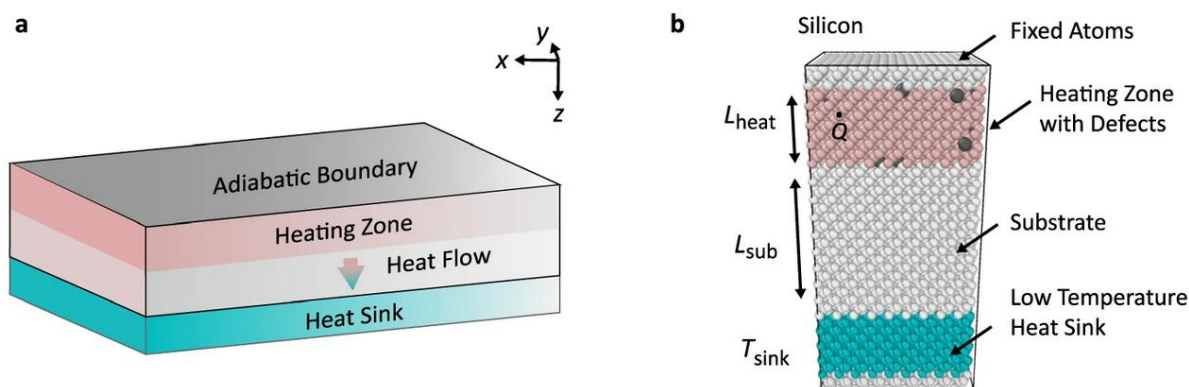


Рис. 1. Фізична модель системи відведення тепла у наноструктурі з локальною зоною нагріву [1]

Фізика теплопереносу та термоінтерфейси

У класичній теорії теплопереносу процес передачі тепла описується законом Фур'є.

$$q = -k\nabla T$$

де q — густина теплового потоку;

k — коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

∇T — градієнт температури.

Однак у наномасштабних структурах ця модель не завжди адекватно описує реальні процеси теплопереносу.

Відповідно до цієї моделі густина теплового потоку пропорційна градієнту температури у матеріалі. Проте така модель була сформована для макроскопічних систем, де розміри об'єктів значно перевищують довжину вільного пробігу носіїв теплової енергії.

У твердих тілах основними переносниками тепла є фонони — квазічастинки, які описують колективні коливання атомів кристалічної ґратки. У наноструктурах довжина вільного пробігу фононів може бути співрозмірною з характерними розмірами транзистора. У такому випадку значна частина теплової енергії переноситься у балістичному режимі, коли фонони проходять через структуру без значного розсіювання.

За таких умов теплоперенос набуває недифузійного характеру, а класична модель Фур'є вже не забезпечує достатньої точності опису температурного поля [3]. Для аналізу таких процесів застосовується рівняння Больцмана для фононів, яке дозволяє врахувати нерівноважні розподіли носіїв теплової енергії та ефекти балістичного транспорту [2, 4].

Сучасні дослідження показують, що у нанотранзисторах виникають складні теплові процеси, пов'язані з розсіюванням фононів на межах поділу матеріалів, дефектах кристалічної ґратки та поверхнях структур. Це призводить до нерівномірного розподілу температури та формування локальних температурних піків у найбільш навантажених ділянках кристала.

Одним із важливих факторів, що впливають на ефективність відведення тепла, є тепловий опір між поверхнею напівпровідникового кристала та системою охолодження. Навіть незначні нерівності контактних поверхонь можуть суттєво зменшувати ефективність передачі тепла між елементами системи.

Для зменшення теплового опору використовуються спеціальні термоінтерфейсні матеріали, які заповнюють мікронерівності між контактними поверхнями та забезпечують більш ефективний тепловий контакт. Традиційно для цього застосовуються термопасти або полімерні матеріали з високою теплопровідністю.

Останніми роками значну увагу дослідників привертають нові термоінтерфейсні матеріали на основі рідких металів. Такі матеріали характеризуються значно вищою теплопровідністю порівняно з традиційними полімерними композиціями та здатністю ефективно передавати тепло між поверхнями.

Перспективним напрямом є створення композитних матеріалів, у яких рідкий метал поєднується з полімерними або волокнистими матрицями [5]. Це дозволяє отримати матеріали, що поєднують високу теплопровідність рідкого металу з механічною стабільністю твердих структур.

Висновки

Таким чином, дослідження недифузійного теплопереносу у наномасштабних транзисторах та розробка нових термоінтерфейсних матеріалів є важливими напрямками сучасної фізики твердого тіла та мікроелектроніки. Подальший розвиток цих напрямів дозволить підвищити ефективність охолодження мікропроцесорів та забезпечити стабільну роботу високопродуктивних електронних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hu Y. Defect scattering can lead to enhanced phonon transport at nanoscale / Y. Hu [et al.] // Nature Communications. — 2024. — Vol. 15. — P. 1–9.
2. Xu J. Quantitative Analysis of Nonequilibrium Phonon Transport Near a Nanoscale Hotspot / J. Xu, Y. Hu, H. Bao // Physical Review Applied. — 2023. — Vol. 19, No. 5. — P. 054020.

3. Non-Fourier phonon heat transport in graphene nanoribbon field-effect transistors // Microelectronics Journal. — 2024. — Vol. 143. — P. 106045.
4. Analysis of ballistic thermal resistance in FinFETs considering Joule heating // Micro and Nanostructures. — 2025. — Vol. 180. — P. 201–210.
5. Liquid Metal Containing Fiber-Reinforced Composites for Thermal Conductivity Enhancement // Applied Composite Materials. — 2025. — Vol. 32. — P. 405–418.

Ярован Денис Олександрович — студент групи ЗПІ-25б, Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: yarovan.dwnis@gmail.com

Мартинюк Володимир Валерійович — кандидат технічних наук, доцент кафедри загальної фізики
Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Yarovan Denys Oleksandrovych — student of group ЗПІ-25b, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia,
e-mail: yarovan.dwnis@gmail.com

Martynyuk Volodymyr Valeriyovych — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua