

Dwuwymiarowe heterostruktury van der Waalsa o asymetrycznym transporcie ciepła.

W ramach tego projektu planujemy **wykorzystać inżynierię materiałową w skali atomowej**, aby zrewolucjonizować zarządzanie ciepłem. Wyobraź sobie kontrolowanie przepływu ciepła z taką samą precyzją, z jaką kontrolujemy przepływ prądu elektrycznego. Celem projektu jest stworzenie nowej generacji nanourządzeń do rozpraszania ciepła, działających jak „zawory jednokierunkowe” dla przepływu ciepła, wykorzystując przełomowe osiągnięcia w dziedzinie materiałów dwuwymiarowych (materiały o grubości jednego atomu). Te atomowo cienkie warstwy, układane jak ultradokładne klocki LEGO, mogą zrewolucjonizować sposób zarządzania ciepłem w elektronice, systemach energetycznych i nie tylko.

Dlaczego to jest ważne? Ciepło to niewidzialny wróg nowoczesnych technologii. Od przegrzewających się smartfonów po straty energii w sieciach energetycznych – nieefektywne zarządzanie ciepłem ogranicza wydajność i zrównoważony rozwój. Podczas gdy diody elektryczne zrewolucjonizowały elektronikę dekady temu, kierunkowa kontrola przepływu ciepła pozostaje poważnym wyzwaniem naukowym. Obecne rozwiązania działają słabo w temperaturze pokojowej lub opierają się na nieporęcznych materiałach. Projekt ten mierzy się z tymi ograniczeniami, wykorzystując unikalne właściwości materiałów dwuwymiarowych (2D) do zaprojektowania nanourządzenia posiadającego właściwości asymetrycznego transportu ciepła, które przewyższy istniejące technologie.

Dlaczego materiały 2D? W przeciwieństwie do konwencjonalnych materiałów objętościowych, struktury dwuwymiarowe oferują wyjątkową kontrolę nad właściwościami fizycznymi: (i) Ich ekstremalna cienkość minimalizuje niepożądane wycieki ciepła. (ii) Interfejsy można projektować bez defektów, które ograniczają przepływ ciepła. (iii) Właściwości takie jak rozszerzalność cieplna i drgania sieci atomów można dostrajać na poziomie atomowym.

Rdzeniem tych badań są heterostruktury van der Waalsa: sztucznie zaprojektowane stosy materiałów 2D, takich jak grafen, heksagonalny azotek boru (hBN) oraz dichalkogenki metali przejściowych (np. MoS_2 i WSe_2). Wybór tych struktur wynika z ich niedopasowanych właściwości drgań – wyobraź sobie dwie siatki atomów wibrujące z zupełnie różnymi częstotliwościami. Po ułożeniu ich jedna na drugiej, ciepło może przepływać łatwiej w jednym kierunku (z góry na dół) niż w przeciwnym, co nazywane jest efektem diody termicznej (asymetryczny przepływ ciepła).

Kluczowe innowacje projektu obejmują: (i) Połączenie materiałów z ciężkimi pierwiastkami (np. warstwy na bazie wolframu) z lekkimi odpowiednikami (np. grafen), aby zmaksymalizować niedopasowanie drgań sieci atomów. (ii) Wykorzystanie zaawansowanych technik, takich jak deterministyczny transfer i litografia wiązką elektronów, do budowy interfejsów wolnych od defektów. (iii) Obracanie monowarstw pod określonymi kątami w celu precyzyjnego dostrojenia przepływu ciepła, podobnie jak regulacja zębatek w maszynie. (iv) Stosowanie mikroskopijnego naprężenia na warstwach w celu zmiany ich właściwości przewodzenia ciepła. Jak przejść z laboratorium do rzeczywistego zastosowania? Zespół projektowy opracuje prototypy innowacyjnych nanourządzeń cieplnych, stosując podejście trójstopniowe:

- Modelowanie predykcyjne: Symulacje na poziomie kwantowym pozwolą zidentyfikować optymalne pary materiałów i konfiguracje układania warstw.
- Fabrykacja w skali nano: Najnowocześniejsze techniki cleanroom umożliwią tworzenie urządzeń z wbudowanymi grzałkami i czujnikami mniejszymi niż ludzki włos.
- Ultraprecyzyjne testy: Połączenie spektroskopii Ramana i termometrii elektrycznej pozwoli mierzyć przepływ ciepła z rozdzielczością atomową.

Oczekiwany przełom to: (i) Prototyp nanourządzenia wykazujący pionowy asymetryczny przepływ ciepła – znacznie wykraczający poza obecny stan techniki. (ii) Eksperymentalna identyfikacja oraz zasady projektowania umożliwiające „dostrajanie” pożądanych właściwości termicznych poprzez dobór materiału, grubość oraz kąty skreślenia warstw. (iii) Zrozumienie, w jaki sposób drgania w skali atomowej (fonony) rządzą transferem ciepła na interfejsach.

Przełomowe możliwości w szerszej perspektywie. Projekt ten może otworzyć drogę do:

- Chłodniejszych, szybszych układów elektronicznych: Zapobieganie przegrzewaniu się układów scalonych nowej generacji.
- Inteligentnego pozyskiwania energii: Efektywniejsza konwersja ciepła odpadowego na energię elektryczną.
- Zaawansowanych układów cieplnych: Pionierskich systemów obliczeniowych zasilanych ciepłem zamiast elektronów.

Ostatecznie głównym celem tego projektu jest rzucenie światła na problem, który od lat intryguje naukowców, potencjalnie otwierając drzwi do zupełnie nowego świata technologii zarządzania ciepłem.