

STRESZCZENIE POPULARNONAUKOWE PROJEKTU

Nanosystemy elektroniczne są obecnie powszechnie spotykane w różnych dziedzinach codziennego życia, min. w elektronice użytkowej i samochodowej, badaniach stopnia zanieczyszczenia środowiska, diagnostyce medycznej a nawet w terapiach nowotworów. Krańcowo małe rozmiary takich struktur jak i subtelność oddziaływań decydujących o ich działaniu sprawiają jednak, iż zjawiska związane z generacją i transportem ciepła wpływają na ich poprawne działanie w stopniu znacznie większym niż to miało miejsce w przypadku systemów mikroelektronicznych. Zatem badanie zjawisk cieplnych, a w szczególności precyzyjne określenie temperatury pracy tych systemów oraz jej wpływ na powstawanie naprężeń mechanicznych jest niezwykle ważne.

Od blisko 200 lat procesy cieplne zachodzące w ciałach stałych powszechnie modelowane są przy pomocy cząstkowego równania różniczkowego otrzymywanego na podstawie prawa przewodnictwa ciepła Fouriera stanowiącego, iż gęstość strumienia ciepła jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury. Prawo to odpowiada jednocześnie założeniu nieskończenie dużej prędkości rozchodzenia się ciepła, co pozostaje w oczywistej sprzeczności z podstawowymi zasadami fizyki, a mimo to pozwala na obliczanie temperatury z zadowalającą dokładnością, szczególnie dla obszarów położonych w znacznej odległości od źródeł ciepła oraz dla długich czasów analizy.

Niestety w przypadku matematycznego modelowania wymiany ciepła, podobnie jak i innych dziedzin nauki, równania opisujące badane zjawiska przestają być słuszne dla struktur o skrajnie niskich wymiarach oraz bardzo szybkich procesów. Zatem biorąc pod uwagę, że najnowszej generacji nanostruktury elektroniczne mają często rozmiary o grubości zaledwie kilku warstw atomowych, a najnowocześniejsze tranzystory mają wymiary nawet kilkadziesiąt tysięcy razy mniejsze od grubości ludzkiego włosa oraz wykorzystują sygnały gigahercowych częstotliwości, stosowanie do modelowania zjawisk termicznych w tego typu strukturach klasycznej teorii przewodnictwa ciepła na ogół prowadzi do znaczących błędów symulacji.

Najwłaściwszym podejściem do modelowania zjawisk cieplnych w nanoskali byłoby wykorzystanie znanych z teorii mikroskopowych modeli fizycznych pozwalających na obliczanie temperatury systemu na poziomie pojedynczych atomów, lecz z uwagi na dużą złożoność obliczeniową tych modeli i nieakceptowalnie długi czas symulacji można je wykorzystywać jedynie do analizy pojedynczych struktur i przyrządów. W związku z powyższym konieczne stało się opracowanie nowych metod modelowania procesów cieplnych w nanoskali pozwalających na analizę bardziej złożonych systemów.

Głównym celem niniejszego projektu będzie zatem wykazanie istnienia w nanostrukturach elektronicznych zjawisk niefourierowskich oraz zaproponowanie do ich opisu odpowiednich modeli matematycznych wykorzystujących równanie różniczkowe oparte na zmodyfikowanym prawie Fouriera. Dzięki temu podejściu możliwe będzie uwzględnienie występowania pewnych istotnych efektów mikroskopowych. W wyniku realizacji projektu opracowane zostaną także trójwymiarowe symulatory termiczne pozwalające na poprawne obliczanie temperatury pracy nanosystemów elektronicznych. Ponadto w projekcie podjęta będzie też próba określenia relacji pomiędzy wartościami parametrów znanych i powszechnie stosowanych modeli mikroskopowych z parametrami modelu zaproponowanego w projekcie.

Opracowane w ramach projektu makroskopowe modele zostaną zweryfikowane eksperymentalnie poprzez pomiary dedykowanych systemów nanoelektromechanicznych NEMS zaprojektowanych dla celów projektu tak, aby umożliwić badanie przepływu ciepła w nanoskali oraz zintegrowanych układów elektronicznych zawierających tranzystory FinFET, które od niedawna, w coraz większym stopniu zaczynają zastępować tradycyjne struktury planarne tranzystorów. Badania eksperymentalne będą wymagały wykonania pomiarów elektrycznych i termicznych z nanometrową oraz nanosekundową rozdzielczością. Do tego celu zostaną wykorzystane specjalne mikroskopowe techniki pomiarowe opracowywane aktualnie w ramach realizacji projektu europejskiego NANOHEAT.

Proponowane w niniejszym projekcie badania naukowe będą miały znaczący wpływ dla projektowania nowoczesnych nanosystemów elektronicznych, w których możliwość poprawnego zrozumienia zjawisk termicznych w skali nano oraz określania temperatury jest kluczowa dla poprawnego funkcjonowania całości systemu. Poza opracowaniem nowych modeli matematycznych przepływu ciepła projekt ten ma na celu wykazanie występowania w tego typu strukturach zjawisk fizycznych nie obserwowanych w makroskali. Dzięki zaproponowanemu podejściu możliwe stanie się przeprowadzanie symulacji termicznych złożonych nanosystemów z uwzględnieniem istotnych efektów mikroskopowych. Uzyskane rezultaty mogą pozwolić w przyszłości na znaczne skrócenie czasu symulacji złożonych nanosystemów elektronicznych, a praktyczna aplikacja wyników przeprowadzonych w ramach projektu prac teoretycznych oraz badań eksperymentalnych umożliwi wydatną optymalizację i poprawę niezawodności takich systemów.