

Komplementarne podejście do badania dynamiki nośników w nowoczesnych strukturach półprzewodnikowych

Czasy życia nośników (elektronów i dziur) w półprzewodnikach odgrywają kluczową rolę w zastosowaniu tych materiałów w przyrządach półprzewodnikowych takich jak detektory światła, ogniwa słoneczne, tranzystory oraz emitery światła, a w tym lasery. Poznanie tzw. wrodzonego czasu życia nośnika (tj. czasu życia który odpowiadał by sytuacji w idealnym kryształ) nie jest proste ze względu na dodatkowe procesy zachodzące w półprzewodnikach takie jak wychwyty nośników przez centra rekombinacji niepromienistej (tj. punktowe defekty takie jak wakanse, atomy zanieczyszczeń, atomy w pozycjach międzywęzłowych), stany powierzchniowe kryształu, dyslokacje lub inne niedoskonałości kryształu. O ile wymienione procesy prowadzą do skracania czasu życia nośników istnieją również procesy, które prowadzą do wydłużania czasu życia nośników i jednym z ich jest przestrzenna separacja nośników wywołana wbudowanym polem elektrycznym. Na skutek takiej przestrzennej separacji nośniki nie mogą rekombinować promieniście i w związku z tym ich czas życia wydłuża się.

Eksperymentalne badanie czasów życia nośników polega na badaniu dynamiki procesów fizycznych w których uczestniczą nośniki nadmiarowe. Sprowadza się to do tego, że czas życia nośnika nie jest mierzony wprost. W pomiarach czasowo-rozdzielczego mikrofalowego fotoprzewodnictwa (TRMC – time-resolved microwave photoconductivity) bada się dynamikę zmian fotoprzewodnictwa wywołaną krótkim impulsem światła. Fotoprzewodnictwo proporcjonalne jest do koncentracji nadmiarowych nośników i w pomiarach TRMC próbkowane jest mikrofalami. Stąd przyjmuje się, że czas życia nadmiarowych nośników opisuje zanik intensywności sygnału TRMC. W pomiarach czasowo-rozdzielczej fotoluminescencji (TRPL – time-resolved photoluminescence) bada się dynamikę fotoluminescencji po pobudzeniu próbki półprzewodnikowej krótkim impulsem laserowym o energii fotonów większej niż przerwa energetyczna badanego półprzewodnika. W ten sposób uzyskuje się czas zaniku fotoluminescencji, który zależy od czasu rekombinacji promienistej, niepromienistej oraz innych procesów nie prowadzących do emisji (procesy Augera i inne). O ile w pomiarach TRMC wystarczy jeden rodzaj nośników do uzyskania fotoprzewodnictwa to w pomiarach TRPL potrzebne są dwa rodzaje nośników aby zaszła rekombinacja promienista i obserwowany był sygnał TRPL. Oznacza to, że czas życia nośników odgrywa kluczową rolę w dynamice procesów odpowiedzialnych za generowanie sygnału TRMC and TRPL ale dynamika TRMC i TRPL nie musi być taka sama nawet wtedy kiedy czas życia nośników jest taki sam. Oprócz czasu życia nośników o dynamice sygnałów TRMC i TRPL decydują dodatkowe procesy, które mogą być bardzo ważne w przyrządach półprzewodnikowych i które warto poznać.

Obecne konstrukcje układów do pomiaru TRMC pozwalają na pomiary czasów życia dłuższych niż ~10 ns podczas gdy w wielu półprzewodnikach z prostą przerwą energetyczną dynamika nośników jest dużo szybsza. Dlatego jak dotąd metoda TRMC wykorzystywana była głównie do badania czasu życia nośników w półprzewodnikach ze skośną przerwą energetyczną w których czasy życia nośników są dużo dłuższe (tj. μ s). W tego typu materiałach nie bada się czasu życia nośników metodą TRPL ze względu na słabą wydajność emisji spowodowaną skośną przerwą energetyczną. W perowskitach czasy zaniku fotoluminescencji są dużo dłuższe i materiały te badano zarówno metodą TRMC oraz TRPL ale jak dotąd nie przeprowadzono tego typu pomiarów w dokładnie takich samych warunkach pobudzania podczas gdy wiadomo, że różne procesy fizyczne ujawniają się i dominują przy różnych warunkach pobudzania.

Obecnie w pomiarach metodą TRMC sygnał fotoluminescencji nie jest mierzony i analizowany co jest zrozumiałe jeżeli weźmie się pod uwagę fakt, że metoda ta była rozwinięta do badania półprzewodników ze skośną przerwą energetyczną, które nie emitują światła. Poprawa rozdzielczości czasowej w pomiarach TRMC jest obecnie możliwa dzięki szybszym oscyloskopom i w związku z tym pojawia się możliwość badania dynamiki nośników metodą TRMC w półprzewodnikach z prostą przerwą energetyczną. Ponadto dla materiałów z prostą przerwą energetyczną, które emitują światło, istnieje możliwość pomiarów TRPL jako dodatkowego zjawiska w badaniach TRMC. Dlatego celem tego projektu jest zbudowanie specjalnego układu badawczego do jednoczesnych pomiarów TRMC i TRPL oraz przeprowadzenie badania dynamiki nośników dla wybranych materiałów półprzewodnikowych dla których spodziewamy się dużej komplementarności tych dwóch metod.

Ponieważ układ eksperymentalny opracowany w ramach tego projektu będzie wyjątkowy w skali światowej, będziemy mieli okazję przeprowadzić wyjątkowe badania dynamiki nośników w wielu materiałach półprzewodnikowych. W ramach tego projektu chcemy skoncentrować się na perowskitach, kryształach van der Waalsa i strukturach hybrydowych zawierających te materiały, które są obecnie przedmiotem intensywnych badań. Wierzmy, że korzystając z połączonych TRMC i TRPL będziemy w stanie znacznie lepiej zrozumieć rolę powierzchni i stanów defektów w dynamice nośników oraz wpływ separacji/akumulacji nośników na ich dynamikę. Wyniki uzyskane na różnych systemach materiałowych pozwolą zweryfikować naszą hipotezę dotyczącą komplementarności obu technik, tj. TRMC i TRPL. Ponadto planowane eksperymenty pozwolą odpowiedzieć na wiele aktualnych pytań dotyczących dynamiki nośników w perowskitach i kryształach van der Waalsa, które zostały sformułowane w niniejszym wniosku badawczym.