

Kryształy dla kwantowej elektroniki przyszłości

Nowe materiały elektroniczne, topologiczne izolatory krystaliczne, wytworzono i zbadano w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. Odkrycie, dokonane przez polskich naukowców w grupie kierowanej przez prof. Tomasza Storego we współpracy ze szwedzkimi kolegami z laboratorium synchrotronowego MAX-lab Uniwersytetu w Lund i Królewskiego Instytutu Techniki (KTH) w Sztokholmie zostało właśnie opublikowane w prestiżowym miesięczniku „Nature Materials”.

Jednym z najważniejszych wyników badań w dziedzinie fizyki materii skondensowanej ostatnich lat jest odkrycie nowej klasy materiałów, tzw. izolatorów topologicznych. Ku zdumieniu świata fizyki wykazano, że uwzględnienie w opisie materii skondensowanej subtelnych efektów kwantowych, opisujących zjawiska w mikroświecie atomów, oraz efektów relatywistycznych, kluczowych dla elektronów poruszających się z prędkościami porównywalnymi z prędkością światła, powinno prowadzić do istnienia materiałów o niespotykanych dotychczas właściwościach, nieopisanych w podręcznikach i nieznanymi wcześniej eksperymentatorom. Będąc idealnymi izolatorami, czyli materiałami nieprzewodzącymi elektryczności w objętości kryształu, izolatory topologiczne na swojej powierzchni są metalami. Spontaniczne powstawanie metalicznego przewodnictwa elektrycznego na powierzchni związane jest z symetrią oddziaływań kwantowych względem odwrócenia czasu i zjawisk relatywistycznych w szczególnej klasie materiałów utworzonych z tzw. „ciężkich” pierwiastków układu okresowego. Opis matematyczny tych szczególnych właściwości ruchu elektronów posługuje się metodami topologii, działu matematyki związanego z badaniem kształtu - stąd nazwa tych materiałów „izolatory topologiczne”.

Dla przyszłych zastosowań elektronicznych kluczową cechą tych materiałów jest bardzo duże przewodnictwo elektryczne ich powierzchni. Jest to rezultat właśnie tych szczególnych, topologicznych, właściwości elektronowych stanów powierzchniowych przewodzących prąd, które uniemożliwiają rozpraszanie elektronów. Oczekuje się, że taka ochrona topologiczna pozwoli na znacznie szybszy przepływ prądu elektrycznego i wydajne zmniejszenie wydzielania ciepła w układach mikro- i nanoelektronicznych. Egzotyczne własności kwantowe stanów elektronowych, a zwłaszcza sprzężenie ruchu orbitalnego elektronów z ich spinowym momentem magnetycznym budzi także nadzieję na nowe zastosowania takich powierzchniowych prądów spinowych w spintronice - nowej gałęzi elektroniki, rozwijanej także w IF PAN.

Dotychczas wytworzono i zbadano właściwości elektronowe szeregu kryształów i wykazano, że izolatorem topologicznym jest na przykład selenek bizmutu i podobne materiały utworzone z pierwiastków V i VI grupy układu okresowego. Są to materiały dobrze znane, wykorzystywane na przykład w termoelektrycznych chłodziarkach w komputerach. Jednak bardzo duże koncentracje defektów krystalicznych w tych kryształach uniemożliwiają kontrolowanie właściwości elektrycznych tych materiałów w zakresie niezbędnym dla zastosowań elektronicznych, np. w szybkich tranzystorach.

Naukowcy z Politechniki Stanu Massachusetts (MIT) w ubiegłym roku wskazali na możliwość istnienia nowej klasy materiałów, tzw. krystalicznych izolatorów topologicznych, w których kluczową rolę odgrywają nie efekty relatywistyczne, a odpowiednio symetryczne rozmieszczenie atomów w sieci krystalicznej i na powierzchni kryształu. Przewidywano, że takim materiałem może być tellurek cyny,

znany z zastosowań w laserach i detektorach promieniowania podczerwonego oraz w generatorach termoelektrycznych.

Równocześnie z ukazaniem się amerykańskich prac teoretycznych zespół prof. Storego doświadczalnie odkrył przewodzące powierzchniowe stany elektronowe krystalicznego izolatora topologicznego w wytworzonych w tym celu w IF PAN trójskładnikowych kryształach (Pb,Sn)Se, zbudowanych z ołowiu, cyny i selenu.

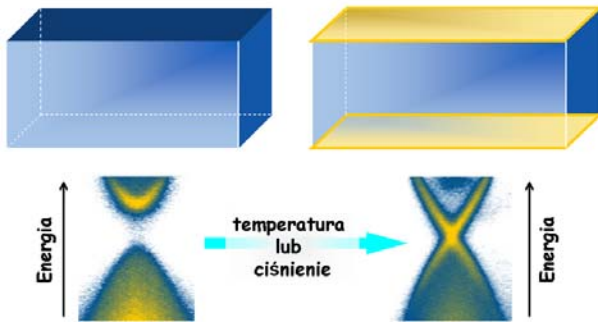
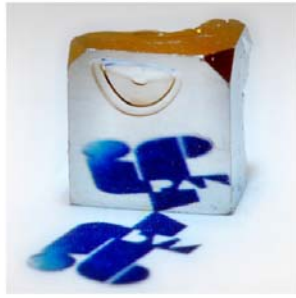
Do wytwarzania wysokiej jakości monokryształów (Pb,Sn)Se zastosowano oryginalną metodę samoselekcjonującego wzrostu kryształów z fazy gazowej opracowaną w IF PAN przez dr hab. Andrzeja Szczerbakowa.

Kluczowym dowodem istnienia na powierzchni kryształów (Pb,Sn)Se stanów izolatora topologicznego są wyniki pomiarów struktury elektronowej wykonane metodą kątowno-rozdzielczej fotoemisyjnej spektroskopii elektronowej ARPES (od skrótu nazwy metody w języku angielskim). W tej metodzie doświadczalnej, wyjaśnia prof. Bogdan Kowalski, precyzyjnie analizowane są energia i pęd elektronów wybijanych z kryształu do próżni w wyniku naświetlania promieniowaniem ultrafioletowym. Pomiary metodą ARPES kryształów wytworzonych w IF PAN polscy naukowcy wykonali we współpracy ze szwedzkimi kolegami. Analiza wyników pomiarów fotoemisyjnych jednoznacznie potwierdziła także obliczenia struktury elektronowej tych materiałów wykonane w IF PAN przez prof. Ryszarda Buczkę.

Wyniki pomiarów fotoemisyjnych kryształów (Pb,Sn)Se i (Pb,Sn)Te pokazały że można sterować ich właściwościami za pomocą zewnętrznych parametrów. W szczególności, jak podkreśla prof. Story, zademonstrowano, że w (Pb,Sn)Se przejście od fazy izolatora pasmowego do fazy izolatora topologicznego, z metalicznymi stanami powierzchniowymi, może być indukowane temperaturą.

Zdaniem autorów, odkrycie właściwości izolatorów topologicznych w kryształach (Pb,Sn)Se i (Pb,Sn)Te stworzyło możliwość zastosowań niezwykle ciekawych zjawisk elektronicznych w następnej generacji przyrządów. W tej grupie materiałów, domieszkowanych magnetycznymi jonami manganu, jak (Sn,Mn)Te, obserwuje się także ferromagnetyzm. Postulowana teoretycznie możliwość współistnienia ferromagnetyzmu i stanu krystalicznego izolatora topologicznego jest jednym z najbardziej intrygujących wyzwań badawczych spintroniki.

Technologia wytwarzania kryształów (Pb,Sn)Se jest rozwijana w IF PAN w projekcie badawczym „Nowoczesne materiały i innowacyjne metody dla przetwarzania i monitorowania energii (MIME)” w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.



Monokryształ topologicznego izolatora krystalicznego SnTe wyhodowany w Instytucie Fizyki PAN. W naturalnych zwierciadlanych powierzchniach tego kryształu odbija się logo instytutu. Poniżej, ilustracja topologicznego przejścia w kryształach (Pb,Sn)Se od fazy izolatora trywialnego (po lewej) do izolatora topologicznego, z metalicznymi stanami powierzchniowymi (po prawej). Takie przejście może być wywołane, np. temperaturą lub ciśnieniem hydrostatycznym. W izolatorze topologicznym przerwa w widmie energii dozwolonych kwantowych stanów elektronowych jest zamknięta przez powierzchniowe stany metaliczne (charakterystyczny kształt „X”).