

Magnetyczna spektroskopia i spektro-mikroskopia na materiałach spintronicznych

Iwona A. Kowalik¹, Miguel A. Niño², Andrea Locatelli³, Tevfik Onur Menteş³, Alberta Bonanni⁴, Tomasz Dietl^{1,5}, Dimitri Arvanitis⁶

1. *Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw 02-668, Poland* 2. *IMDEA Nanoscience, Facultad de Ciencias Módulo C-IX, Madrid 28049, Spain* 3. *Sincrotrone Trieste (ELETTRA), Basovizza (Trieste) 34012, Italy* 4. *Institut für Halbleiter-und-Festkörperphysik, J. Kepler University, Linz 4040, Austria* 5. *Institute of Theoretical Physics, University of Warsaw, Warsaw 00-681, Poland* 6. *Department of Physics and Astronomy, Uppsala University, Uppsala 75120, Sweden*

e-mail: ikowalik@ifpan.edu.pl

Pomimo postępów w zakresie badań rozcieńczonych materiałów typu DMS, zrozumienie i kontrola tych materiałów wciąż jest tematem kontrowersyjnym i trudnym dla dzisiejszej inżynierii materiałowej oraz fizyki materii skondensowanej. W szczególności, zrozumienie własności magnetycznych tego typu układów na poziomie atomowym stanowi wciąż otwarty problem. Dla magnetycznie domieszkowanych azotków i tlenków niektóre grupy badawcze raportują tylko paramagnetyczne własności, tymczasem inni znajdują w nich ferromagnetyczny sygnał nawet powyżej temperatury pokojowej, dla teoretycznie takich samych materiałów. Najnowsze prace dotyczące DMS pokazały, że ograniczona rozpuszczalność metali przejściowych w półprzewodnikach prowadzi do rozkładu spinoidalnego oraz separacji faz krystalograficznych w nanoskalowych obszarach, zawierających dużą koncentrację jonów magnetycznych, zatopionych w niemagnetycznej sieci [1,2], jak na przykład Fe N w GaN. Takie efekty zostały już zademonstrowane dla (Ge,Mn), (Ge,Fe), (Ga,Mn)N, (Al,Cr)N, (Ga,Cr)N oraz (Ga,Fe)N [3]. Efekt ten może wnieść zupełnie nowe możliwości zastosowań w przemyśle i technologii, ważne dla spintroniki, nanoelektroniki i fotoniki. Zatopione metaliczne i półprzewodnikowe nanokryształy już zrewolucjonizowały produkcję różnego rodzaju komercyjnych urządzeń, takich jak pamięci typu flash i niskoprądowe lasery półprzewodnikowe. Pytania dotyczące mechanizmu formowania się nanostruktur, jak również kontrola rozmiarów wytrąceń, stanowią wciąż otwarty problem. Nie wiadomo także w jakich warunkach otrzymuje się zatopione wytrącenia ferromagnetyczne, ferrimagnetyczne czy antyferromagnetyczne oraz jak kontrolować ich własności magnetyczne. Obecnie dyskutowane jest pochodzenie ferromagnetyzmu w tego typu materiałach, gdyż w większości przypadków teoria średniego pola nie tłumaczy obserwowanych własności magnetycznych. Przedstawione tu wyniki badań oparte są na zrozumieniu problemu od strony atomowego pochodzenia magneto-anizotropii krystalicznej w tego typu układach.

Prezentujemy wyniki badań magnetycznych, wykonanych w temperaturze pokojowej dla warstw (Ga,Fe)N, otrzymane przy użyciu technik spektroskopowych czułych na dany pierwiastek oraz spin, bazujących na miękkim promieniowaniu X [4]. Badane próbki otrzymane zostały metodą metal-organicznej epitaksji z fazy gazowej MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) w JKU (Linz, Austria) i scharakteryzowane wcześniej za pomocą magneto-

metrii SQUID, transmisyjnej mikroskopii elektronowej, rentgenowskich technik dyfrakcyjnych bazujących na promieniowaniu synchrotronowym [3,5] oraz za pomocą techniki EXAFS i XANES [6]. W celu zbadania relacji między strukturą nanokryształów i ich własnościami magnetycznymi, przeprowadzone zostały pomiary XMCD, XLMD oraz XMCD-PEEM na krawędzi L żelaza oraz XMCD na krawędzi K azotu.

Wyniki otrzymane przy zastosowaniu rentgenowskiej fotoemisyjnej mikroskopii elektronowej (X-PEEM) w modzie absorpcyjnym (XAS), wykonane dla krawędzi L żelaza wskazują, że większość atomów Fe uformowała wytrącenia o rozmiarach 30-80 nm (lub mniejsze, poniżej zdolności rozdzielczej PEEM), ale część z nich wbudowana jest jednorodnie w sieć GaN, podstawieniowo w miejscach Ga. Obrazy otrzymane w modzie XAS potwierdzają, że atomy Fe znajdują się w różnych lokalnych otoczeniach. Przy pomocy modu XMCD-PEEM zidentyfikowane zostały magnetyczne nanokryształy bogate w żelazo. Zbadana została także struktura domenowa nanokryształów. Kontrast magnetyczny wyraźnie widoczny jest powyżej temperatury pokojowej w obszarze nanokryształów wielkości 30-40 nm. W przypadku większych nanokryształów obserwowana jest struktura domenowa typu „vortex”. Stosując spektroskopię XAS w modzie XMCD wyznaczony został spinowy i orbitalny moment magnetyczny przypadający na atom Fe. Ponieważ nie wszystkie nanokryształy w badaniach XMCD-PEEM wykazały kontrast magnetyczny, wykonane zostały także badania XLMD. Uzyskane dane pozwoliły zidentyfikować zarówno wkład ferromagnetyczny jak i antyferromagnetyczny - pochodzące od różnych faz nanokryształów. Prezentowane wyniki ilustrują komplementarność rozdzielczych przestrzennie badań X-PEEM i XMCD-PEEM z pomiarami XAS i XMCD bez przestrzennej rozdzielczości.

- [1] T. Dietl, *J. Phys. Cond. Mat.* **19**, 165204 (2007)
- [2] H. Katayama-Yoshida *et al.*, *Phys. Status Solidi (a)* **204**, 15 (2007)
- [3] A. Bonanni *et al.*, *Phys. Rev.* **B75**, 125210 (2007); *Phys. Rev. Lett.* **101**, 135502 (2008).
- [4] I. Kowalik *et al.*, *Phys. Rev. B*, in press [arXiv: 1011.0847].
- [5] A. Navarro-Quezada *et al.*, *Phys. Rev.* **B81**, 205206 (2010).
- [6] M. Rovezzi *et al.*, *Phys. Rev.* **B79**, 195209 (2009).

