
Streszczenie

Cienkie warstwy magnetyczne oraz nanostruktury warstwowe stanowią bazę szybko rozwijającej się magnetoelektroniki (spintroniki), która wykorzystuje, oprócz ładunku elektronu, także jego spin. Aplikacyjne znaczenie spintroniki w zastosowaniu do technologii informatycznej (MRAM – magnetic random access memory, GMR – giant magnetoresistance) związane jest z burzliwym rozwojem technologii cienkowarstwowej mającej na celu wykorzystanie zależnych od spinu procesów transportu elektronów w powiązaniu z konwencjonalną elektroniką. Aplikacje te prowadzą do urządzeń pracujących w coraz wyższych częstotliwościach i miniaturyzacji osiągającej skalę submikronową. w związku z tym istotne jest zbadanie i określenie właściwości magnetycznych tych struktur w zakresie wysokich częstotliwości. w tym aspekcie od ponad pięćdziesięciu lat uznaną techniką eksperymentalną jest rezonans ferromagnetyczny (FMR) stanowiący cenne narzędzie do dokładnej charakteryzacji właściwości materiałów ferromagnetycznych, a w szczególności struktur cienkowarstwowych.

Niniejsza rozprawa poświęcona jest badaniom dynamiki namagnesowania przy pomocy szerokopasmowego FMR z wykorzystaniem wektorowego analizatora obwodów (VNA) szeregu wybranych struktur warstwowych w celu ich pełniejszej charakteryzacji, niż jest to możliwe przy stosowaniu klasycznej metody FMR. Szerokopasmowy spektrometr VNA-FMR jest przyrządem umożliwiającym indukcyjny pomiar przenikalności magnetycznej w szerokim zakresie częstotliwości (do kilkudziesięciu GHz) i określenia szeregu aspektów dynamiki namagnesowania niedostępnych przy użyciu klasycznego FMR. Zamiast wykonywać przy pomocy wnęki rezonansowej pomiary ograniczone do jednej częstotliwości rezonansowej, paskowy falowód koplanarny (CPW) umożliwia wytworzenie zmiennego pola mikrofalowego wzbudzającego oscylacje namagnesowania w szerokim pasmie częstotliwości: od MHz do kilkudziesięciu GHz. Dzięki temu można uzyskać dane pomiarowe w trybie „prze-miatania” częstotliwością bez zmiany konfiguracji magnetycznej próbki, np. przy pomiarach w małych polach bez zmiany struktury domenowej. Inną ważną zaletą VNA-FMR jest możliwość uzyskania globalnych zależności dyspersyjnych $\omega(H)$ opisanych relacjami Kittla odpowiednimi dla danej nanostruktury (np. kryształy ma-

gnoniczne). Ważną cechą VNA-FMR jest także możliwość precyzyjnego określenia tłumienia wzbudzeń spinowych. Mając do dyspozycji możliwość niezależnej zmiany pola magnetycznego i częstotliwości, można przy pomocy VNA-FMR ilościowo zbadać parametr tłumienia i precyzyjnie rozdzielić przyczynęk „wewnętrzny” związany z tłumieniem Gilberta oraz „zewnątrzny”, związany z defektami strukturalnymi.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono rezultaty badań VNA-FMR szeregu warstwowych układów magnetycznych o zróżnicowanej strukturze i o zróżnicowanej grubości: od ultracienkich warstw magnetycznych (≈ 1 nm) do „grubych” taśm amorficznych (≈ 20 mikronów). W ultracienkich warstwach kluczową rolę odgrywają anizotropie związane z powierzchnią warstw: anizotropia prostopadła oraz jednozwrotowa. Na przykładzie warstw Co/IrMn, NiFe/NiMn oraz Co₂FeSi/IrMn opisano dynamikę namagnesowania w układach z anizotropią jednozwrotową. Pokazano również, jak wyznaczyć stałą anizotropii rotacyjnej występującej w układach FM/AFM, której obecność zwiększa częstotliwość rezonansu. W układach Co/Au oraz CoFeB/MgO określono na podstawie pomiarów próbek z liniową zmianą grubości (warstwy klinowe) parametry anizotropii prostopadłej powierzchniowej i objętościowej. Pomiar na falowodzie koplanarnym umożliwił lokalne pomiary rezonansu na próbce klinowej i wyznaczenie zależności namagnesowania efektywnego od grubości ferromagnetyka, a z niej parametrów anizotropii powierzchniowej i objętościowej. Przygotowano również i scharakteryzowano magnetycznie podwójne zawory spinowe, składające się z prostopadle namagnesowanego polaryzatora (warstwa wielokrotna Co/Au), warstwy swobodnej (złożonej z warstw NiFe oraz Co) oraz analizatora (warstwy Co sprzężonej wymiennie z warstwą IrMn). Każdy z podsystemów różnił się anizotropią, więc wykonując pomiar VNA-FMR piki rezonansowe występowały przy innych polach i można opisać ich dynamikę osobno. Ponadto poszczególne podsystemy zostały rozdzielone na tyle grubą niemagnetyczną przekładką, że nie występowały pomiędzy nimi silne oddziaływania, co umożliwiała analizę wyników na bazie rezultatów pomiarów układów opisanych w poprzednich rozdziałach.

Próbka umieszczona na falowodzie koplanarnym zostaje poddana działaniu pola mikrofalowego magnetycznego i elektrycznego w odróżnieniu od pomiarów we wnęce mikrofalowej, gdzie próbka jest umieszczona w miejscu, gdzie występuje jedynie mikrofalowe pole magnetyczne. Nie wszystkie konsekwencje tej sytuacji są znane. Podczas realizacji pracy doktorskiej zaobserwowano, że intensywność sygnału VNA-FMR wzrastała wraz ze zmniejszaniem się oporu warstwy buforowej. Efekt ten wytłumaczono poprzez ekranowanie pól mikrofalowych i pułapkowanie ich w przestrzeni pomiędzy falowodem koplanarnym a przewodzącą warstwą buforową.

Dodatkowo w pracy przedstawiono pomiary VNA-FMR taśm amorficznych o grubości rzędu dziesiątek μm . W tak grubych warstwach występuje zjawisko antyrezonansu ferromagnetycznego, związane z głębokością wnikania fali elektroma-

gnetycznej do ferromagnetyka. Dla taśmy amorficznej zaobserwowano występowanie maksimum (rezonans ferromagnetyczny) i minimum (antyrezonans ferromagnetyczny) absorpcji. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości, wyznaczono zależności dyspersyjne rezonansu i antyrezonansu ferromagnetycznego.

Niniejszą rozprawę charakteryzują trzy aspekty związane z szeroko pojętą fizyką doświadczalną w dziedzinie magnetyzmu cienkich warstw: zbudowanie pierwszego w Polsce stanowiska do pomiaru szerokopasmowego rezonansu ferromagnetycznego VNA-FMR, wytworzenie szeregu struktur cienkowarstwowych przy pomocy technologii wysoko próżniowej oraz charakteryzacja dynamiki namagnesowania w tych strukturach.