

тухают, нелинейные эффекты продолжают определять поведение пакета на сколь угодно больших расстояниях. Поэтому образующийся после слияния фронтов биполярный импульс остается нелинейной уединенной волной с континуумом спектральной мощности на предельно малых частотах. Анализ эволюции спектра данного типа проведен на примере волнового пакета S-типа.

Выявленные в работе принципиальные особенности эволюции спектров в вязкой нелинейной среде должны проявляться при распространении любых акустических возмущений, включая случайные волны [5].

Автор выражает благодарность проф. Ю. Н. Карамзину за полезное обсуждение методов численной реализации расчета спектров с помощью быстрого преобразования Фурье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков А. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. № 3. С. 38 (Moscow University Phys. Bull. 1994. N 3. P. 34).
2. Karamzin Yu. N., Potashnikov A. S., Sukhorukov A. A. // 8-th Laser Optics Conference. Technical Digest. St. Petersburg, 1995. V. 2. P. 360.
3. Уизем Д. Линейные и нелинейные волны. М., 1977.
4. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. 2-е изд. М., 1990.
5. Гурбатов С. Н., Малахов А. Н., Санчев А. Н. Нелинейные случайные волны в средах без дисперсии. М., 1990.

Поступила в редакцию
31.07.96

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 6

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.632; 538.975

ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ТОЛЩИНЫ МАГНИТНОГО КЛИНА В СЭНДВИЧАХ Au/Co-КЛИН/Au (001)

Е. Е. Шалыгина, А. В. Ведяев, А. Марти, Б. Джиллис, М. В. Лазарев,
О. А. Шалыгина

(кафедра магнетизма)

Представлены результаты исследования магнитных и магнитооптических свойств сэндвичей Au/Co-клин/Au(001). Обнаружены осцилляции экваториального эффекта Керра (ЭЭК) при изменении толщины Со-клина от 0 до 20 Å. Найдено, что период этих осцилляций $T \approx 4-5$ Å. Установлено, что значение T зависит от энергии квантов падающего света. Доказано, что осцилляции ЭЭК обусловлены влиянием квантовых размерных эффектов.

В последние годы уделяется большое внимание исследованию многослойных структур, представляющих собой чередование ферромагнитных (Ф) и парамагнитных (П) слоев субмикронной толщины: Ф/П/Ф. Ряд таких уникальных свойств, как большая перпендикулярная анизотропия, огромное керровское вращение, гигантское магнитное сопротивление, осцилляция энергии обменного взаимодействия между Ф-слоями при изменении толщины Ф- и П-слоев, были обнаружены в этих структурах (см., напр., [1]). Более того, исследования указанных мно-

гослойных систем с помощью метода фотоэмиссионной спектроскопии позволили обнаружить существование пространственного квантования электронного спектра (Quantum Well States — QWS) [2]. В настоящее время общепринято, что именно QWS обуславливают осцилляцию энергии обменного взаимодействия в Ф/П/Ф-структурах при изменении толщины Ф- или П-слоя [3], а также осцилляции гигантского магнитного сопротивления [4] и магнитооптического эффекта. В работе [5] для анализа магнитооптических свойств Ф/П/Ф-структур был успешно применен весьма эффективный подход, использующий формализм Кубо и метод функций Грина в смешанном координатно-импульсном представлении. Было доказано, что в большей степени QWS могут проявиться при измерении магнитооптических эффектов Керра (МОЭК) вблизи резонансов. Объяснено это тем, что ответственными за МОЭК являются d -электроны. Для d -электронов эффекты благодаря QWS являются более заметными, поскольку их ферми-поверхность имеет меньшее значение импульса Ферми, что приводит к увеличению периода осцилляции МОЭК при изменении толщины Ф- или П-слоя и соответственно делает их более легко наблюдаемыми. При исследовании же гигантского магнитного сопротивления вклад от квантовых осцилляций маскируется большим вкладом s -электронов. Следует указать, что в самое последнее время квантовые осцилляции МОЭК экспериментально были обнаружены в трехслойных структурах П/Fe/П, где в качестве парамагнитного слоя использовались золото и серебро, а магнитный слой имел клиновидную форму (см., напр., [6]).

Цель данной работы — изучение влияния квантовых размерных эффектов на магнитооптические свойства Au/Co-клин/Au (100) сэндвичей. Для выполнения этих исследований необходимо проводить измерения на достаточно малых участках образца. В связи с этим был использован магнитооптический микромагнитометр. Подробное описание установки дано в работе [7].

Изучаемые образцы были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии при базовом давлении в камере 10^{-10} мм рт. ст. В качестве подложек использовались полированные кристаллы MgO (001). Чтобы удалить адсорбционные газы и снять напряжения, подложки предварительно отжигались при температуре 950° в течение 1 мин. После охлаждения до комнатной температуры напылялся Au-слой толщиной 1000 Å. На вершину этого слоя напылялся Co-клин, имеющий наклон $2,7$ Å/мм и длину 18,5 мм. Для предотвращения окисления Co-клин был покрыт Au-слоем толщиной 20 Å. Вид поперечного сечения образца приведен на рис. 1.

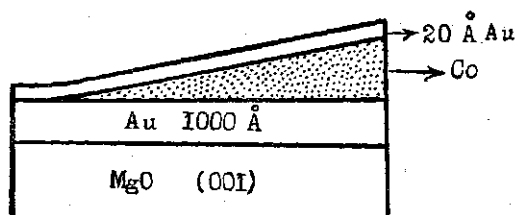


Рис. 1

Исследования гистерезисных и магнитооптических свойств описанных выше образцов были выполнены с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК) (внешнее магнитное поле перпендикулярно плоскости падения света и параллельно поверхности магнетика). В данном случае переменное магнитное поле H частотой $f=80$ Гц прикладывалось в плоскости образца вдоль длины клина L_{Co} . Магнитооптический сигнал δ регистрировался при отражении света от микроучаст-

ка поверхности диаметром $D=30$ мкм. Измерения локальных кривых намагничивания $\delta(H) \sim M(H)$ и зависимостей $\delta(L_{Co})$, что эквивалентно $\delta(t_{Co})$, где t_{Co} — толщина клина, выполнялись с шагом, равным $D/2$, при этом сканирование светового пятна осуществлялось по центральному срезу вдоль длины клина. Энергия квантов падающего света была фиксирована. Зависимости $\delta(H)$ снимались с помощью двухкоординатного самописца ЛКД-4.

Типичные локальные кривые намагничивания $\delta(H) \sim M(H)$ приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что, начиная с некоторого поля

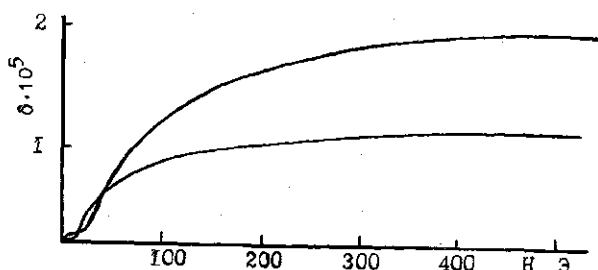


Рис. 2

$H=H_s$, ЭЭК не изменяется по величине. Значение H_s соответствует полю технического насыщения данного микроучастка образца. Анализ таких кривых позволил определить максимальное значение H_s^{max} для изучаемого образца. При $H=H_s^{max}$ и фиксированных значениях энергии квантов падающего света $\hbar\omega$ были измерены зависимости $\delta(t_{Co})$. На рис. 3 приведена зависимость $\delta(t_{Co})$, измеренная при $\hbar\omega=2,7$ эВ

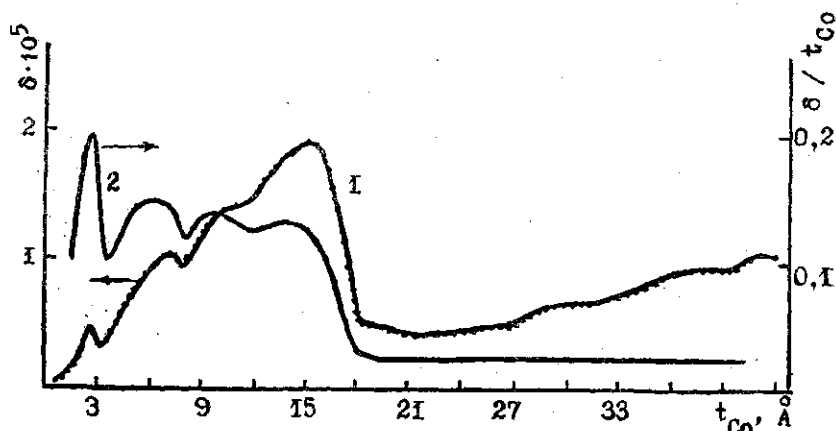


Рис. 3

(кривая 1). На этом же рисунке представлена зависимость значений $\delta(t_{Co})$, нормированных на толщину Co-клина, $\delta(t_{Co})/t_{Co}$ (кривая 2). Из рисунка видно, что при изменении t_{Co} от 0 до 20 Å кривые 1 и 2 имеют осциллирующий характер. Период осцилляций δ порядка 5 Å. При $t_{Co} > 20$ Å значение δ линейно увеличивается с ростом t_{Co} , а δ/t_{Co} остается постоянным. Следует указать, что измерения зависимостей $\delta(t_{Co})$ при других значениях энергии квантов падающего света показали, что с ростом $\hbar\omega$ период осцилляций увеличивается: при

$\hbar\omega = 2,7; 3,4$ и $4,0$ эВ период осцилляций ЭЭК соответственно равен $4,5; 5,0$ и $5,5$ Å.

Остановимся на объяснении полученных данных. Измерения $\delta(t_{co})$ были выполнены при максимальном по длине Со-клину значении H_s^{max} . Следовательно, осцилляции δ при $t_{co} < 20$ Å не могут быть обусловлены локальным изменением константы анизотропии, т. е. изменение δ за счет недомгничивания образца исключается.

Осцилляции δ нельзя интерпретировать и как результат наблюдения магнитооптической интерференции, поскольку из простых оценок (см., напр., [8]) следует, что период осцилляций в этом случае должен быть порядка 500 Å, что намного больше наблюдаемого нами.

Вместе с тем расчеты [5] недиагональной (обуславливающей магнитооптические эффекты) компоненты тензора диэлектрической проницаемости для ультратонких ($t \ll \lambda$, λ — длина волны падающего света) образцов $\epsilon_{off-diag}^t$ позволили сделать следующие выводы: $\epsilon_{off-diag}^t$ отличается от $\epsilon_{off-diag}^{bulk}$ для объемного кристалла; $\epsilon_{off-diag}^t$ осциллирует с изменением толщины магнитной пленки t ; период осцилляций зависит от энергии квантов падающего света. В частности, в области $\hbar\omega$ от 2 до 4 эВ период осцилляций магнитооптического эффекта должен изменяться от 4 до 8 Å.

На основе изложенного выше можно утверждать, что наблюдаемые нами осцилляции ЭЭК в Со-клине обусловлены влиянием квантовых размерных эффектов.

И наконец, обсудим полученные зависимости $\delta(t_{co})$ и $\delta(t_{co})/t_{co}$ при $t_{co} > 20$ Å. Из расчетов, выполненных, например, в [9], следует, что в магнитных сильно поглощающих кристаллах толщиной меньше глубины формирования магнитооптического сигнала (в области $\hbar\omega \sim 2,0 - 4,5$ эВ не превышающей 100 Å) магнитооптические эффекты отражения должны быть линейной функцией толщины образца (соответственно значение $\delta(t_{co})/t_{co}$ должно быть постоянным), что экспериментально и наблюдалось нами. Уместно отметить, что аналогичный результат был получен нами при магнитооптическом исследовании ультратонких пленок железа и кобальта [10].

Работа выполнена при частичной поддержке фонда «Университеты России» и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-19681а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. of the Intern. Conf. on Magnetism. Amsterdam, 1995. Part 1.
2. Dongqi L., Pearson J., Mattson J. E., Bader S. D. // Phys. Rev. 1995. В 51, N 11. P. 1503.
3. Ortega J. E., Himpelf F. J. // Phys. Rev. Lett. 1992. 69. P. 844.
4. Okuno S. N., Inomata K. // Ibid. 1992. 72. P. 1553.
5. Vedyayev A. V., Ryzhanova N., Young S., Dieny B. // Phys. Lett. 1996. 215 A. P. 317.
6. Geerts Wim, Suzuki Y., Katayama T. et al. // Phys. Rev. 1994. B50, N 17. P. 12581.
7. Кринчик Г. С., Чепурова (Шалыгина) Е. Е., Усов Н. Н., Самров Н. П. // Письма в ЖТФ. 1981. 7, № 22. С. 1372.
8. Кринчик Г. С., Чепурова Е. Е., Кузнецова И. М., Пронина Н. И. // Изв. вузов, Физика. 1989. № 11. С. 10.
9. Traeger G., Wenzel L., Hubert A. // Phys. Stat. Solidi (a). 1992. 131. P. 201.
10. Шалыгина Е. Е., Козловский Л. В., Ду Сяньбо // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 5. С. 51 (Moscow University Phys. Bull. 1995. N 5).