

УДК 537.632

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР ТИПА W/Pu И $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Pu}$

© 2019 г. П. В. Пенкина^{1, 3, *}, М. А. Кожаев^{2, 3}, П. О. Капралов², А. Н. Кузьмичев², Х. Хашим⁴,
Л. В. Панина⁴, А. В. Гопал⁵, Дж. Ч. Ву⁶, Дж. Ч. Э. Хуанг⁷, К. А. Звездин^{2, 3},
А. К. Звездин^{1, 2, 3}, В. И. Белотелов^{2, 8}

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

²Российский квантовый центр, Сколково, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики имени А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия

⁵Институт фундаментальных исследований Тата, Мумбаи, Индия

⁶Национальный университет образования Чанхуа, Тайчжун, Тайвань

⁷Национальный университет Чэн Гун, Тайнань, Тайвань

⁸Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

*E-mail: pvpennina@edu.hse.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.06.2019 г.

Получены зависимости величины экваториального магнитооптического эффекта Керра от напряженности внешнего магнитного поля для наноструктур типа W/Pu и $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Pu}$. Продемонстрировано влияние геометрии Pu-содержащих структур на экваториальный магнитооптический эффект Керра в проходящем свете и их магнитную анизотропию.

DOI: 10.1134/S036767651910020X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается спиновая электроника (спинтроника), которая включает в себя изучение и использование спиновых степеней свободы электронов в твердотельных системах [1, 2]. Спинтроника позволяет значительно повысить энергоэффективность различных устройств, а также уменьшить их размеры [3]. Для создания спинтронных устройств хорошо подходят различные магнитные наноструктуры. Путем наноструктурирования материалов можно эффективно изменять их магнитные и оптические свойства [4]. Одним из способов управления спинтронными устройствами является оптический контроль [5, 6]. Для эффективного использования этого метода управления необходимо знать какими магнитооптическими свойствами обладает материал, из которого изготовлено данное устройство.

Вещества с сильным спин-орбитальным взаимодействием, такие как золото, вольфрам и топологические изоляторы, являются весьма перспек-

тивными для применения в спинтронных устройствах, так как они позволяют осуществлять переход от спиновых токов к зарядовым и обратно, что дает возможность эффективно интегрировать спинтронные компоненты в привычные устройства, работающие под действием зарядовых токов [7–9].

В данной работе были рассмотрены Pu-содержащие структуры, нанесенные поверх материалы с большим спин-орбитальным взаимодействием. Исследовано влияние формы и размеров наноструктур пермаллоя на магнитные и магнитооптические свойства. Продемонстрировано, что от выбора материала, на который наносится слой пермаллоя, зависит влияние форм-фактора наноструктур на их магнитные свойства.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованы магнитооптические свойства наноструктур типа W/Pu и $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Pu}$. Данные образцы представляют собой структуры W[5 нм]/Pu[4 нм]/Ta[1 нм],

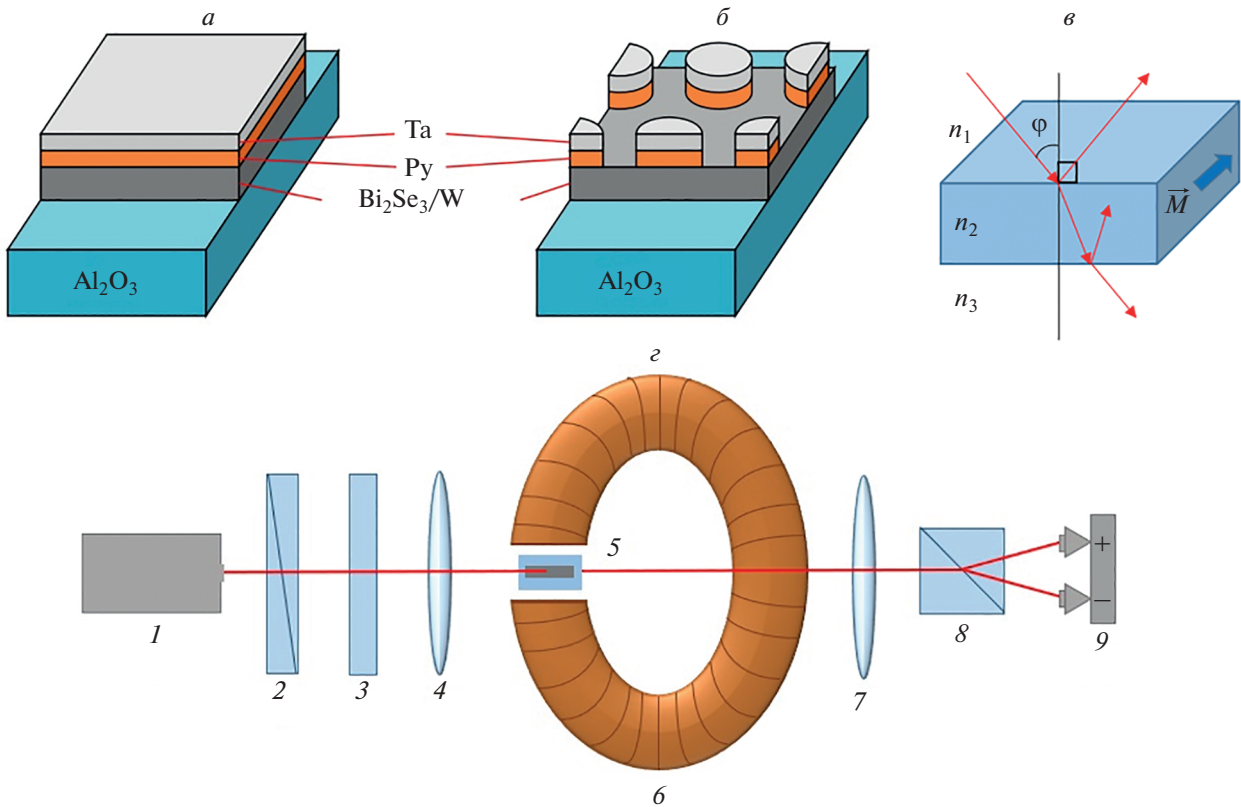


Рис. 1. Схематичные изображения образцов *a)* со сплошным слоем Py; *b)* с нанодисками из Py; *в)* схема прохождения света через намагниченную ферромагнитную пленку; *г)* схема установки для измерения магнитооптического эффекта Керра в прохождении: 1 – лазерный источник света, 2 – поляризатор, 3 – полуволновая пластинка, 4 – линза, фокусирующая свет на образец, 5 – исследуемый образец, 6 – электромагнит, 7 – коллимирующая линза, 8 – призма Волластона, 9 – балансный фотодетектор.

$\text{Bi}_2\text{Se}_3[25 \text{ нм}]/\text{Py}[4 \text{ нм}]/\text{Ta}[1 \text{ нм}]$
и
 $\text{Cr:Bi}_2\text{Se}_3[25 \text{ нм}]/\text{Py}[4\text{--}10 \text{ нм}]/\text{Ta}[1 \text{ нм}]$ на подложке из сапфира, со сплошным слоем Py (рис. 1*a*) и с наноструктурированными дисками из Py диаметрами 200 и 500 нм (рис. 1*b*).

Измеряли величину экваториального магнитооптического эффекта Керра (ЭЭК) в проходящем свете [10–13]. Эффект проявляется в магнитной пленке, если оптические свойства сред, граничащих с ней, различны, и является нечетным по намагниченности. Величина ЭЭК равна относительно изменению интенсивности прошедшего света, и пропорциональна разности коэффициентов отражения на верхней и нижней границах ферромагнитной пленки. ЭЭК, теоретически предсказанный В.М. Маевским и Г.А. Болотиним [14] в пропускании, впервые был изучен экспериментально в ферромагнитных металлических пленках [15, 16]. Изменение интенсивности *p*-поляризованного света при прохождении через ферромагнитную пленку (рис. 1*в*) может быть представлено в виде [16]:

$$\delta_p^{123} = -\text{Im} \left[\left(r_{21}^p - r_{23}^p \right) \frac{n_1 Q \sin \varphi}{g_2} \right], \quad (1)$$

где r_{21}^p и r_{23}^p – это коэффициенты отражения *p*-поляризованной волны на границах раздела 1–2, 2–3 (среда 2 – ферромагнитная пленка); Q – магнитооптический параметр, пропорциональный намагниченности; n_1, n_2 – показатели преломления сред 1 и 2; $g_2 = (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$, φ – угол падения света.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1*г*. Измерения проводили при комнатной температуре. Использовали лазерный диод с длиной волны 785 нм и мощностью 15 мВт. Плоскость поляризации задавали при помощи поляризатора и полуволновой пластинки, пучок света фокусировался на образец с помощью собирающей линзы. Образец находился в переменном магнитном поле с частотой 2570 Гц, угол падения света равен 20 градусам. Плоскость падения света перпендикулярна направлению внешнего магнитного поля. После прохождения через образец пучок света попадал на призму Волластона, где он делился на два пучка с вертикальной и горизонтальной поляризациями, разность интенсивностей ΔI которых регистрировали при помощи балансного фотодетектора. Также измеряли ин-

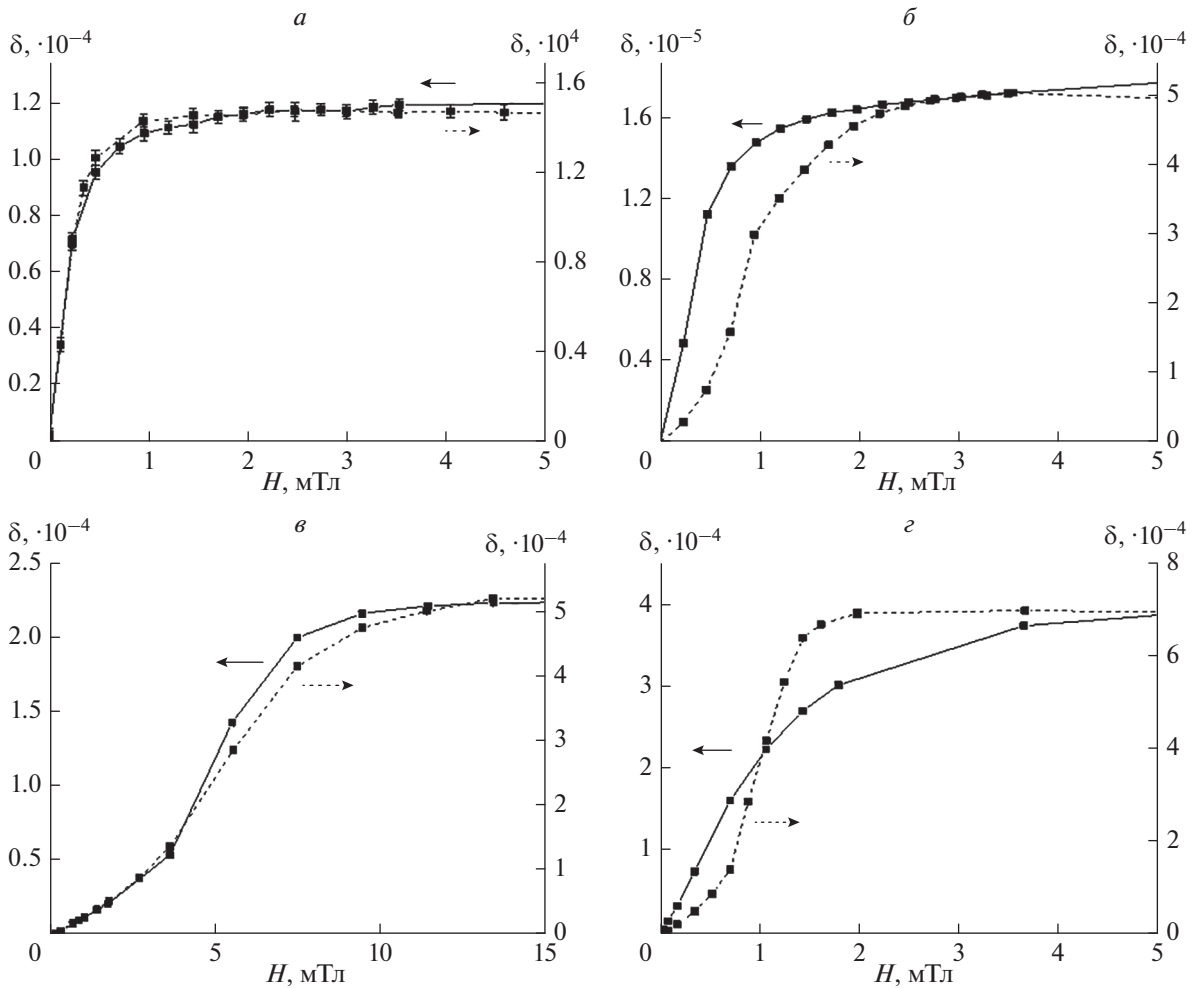


Рис. 2. Графики зависимости величины экваториального магнитооптического эффекта Керра в пропускании от внешнего магнитного поля для образцов: *а*) W[5 нм]/Py[4 нм]/Ta[1 нм] со сплошным слоем Ru (пунктирная линия) и с нанодисками из Ru диаметром 200 нм (сплошная линия); *б*) Bi₂Se₃[25 нм]/Py[4 нм]/Ta[1 нм] со сплошным слоем пермаллоя (пунктирная линия) и с нанодисками диаметром 200 нм (сплошная линия); *в*) Sr:Bi₂Se₃[25 нм]/Py[10 нм]/Ta[1 нм] с различным диаметром нанодисков (200 нм – сплошная линия, и 500 нм – пунктирная линия); *г*) Sr:Bi₂Se₃[25 нм]/Py[4/10 нм]/Ta[1 нм], сплошной линией показана зависимость для образца с пермаллоем толщиной 4 нм, а пунктирной – для образца с пермаллоем толщиной 10 нм.

тенсивность света $I(0)$, прошедшего через не намагниченный образец.

Величина измеряемого экваториального магнитооптического эффекта Керра в проходящем свете определяется формулой

$$\delta = \frac{I(M) - I(-M)}{2I(0)} = \frac{\Delta I}{2I(0)}, \quad (2)$$

где $I(M)$ – интенсивность света, прошедшего через образец с намагниченностью M .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено сравнение зависимости величины ЭЭК в проходящем свете от амплитуды внешнего магнитного поля для различных образцов. На

рис. 2а показана зависимость ЭЭК в пропускании от внешнего магнитного поля для образцов W[5 нм]/Py[4 нм]/Ta[1 нм] со сплошным слоем Ru и с нанодисками из Ru диаметром 200 нм. Видно, что насыщение для данных структур наступает при одинаковых значениях внешнего магнитного поля, из чего можно сделать вывод, что при наноструктурировании не изменяется магнитная анизотропия данных образцов. Величина ЭЭК в пропускании в свою очередь выше на 20% для образца со сплошным слоем пермаллоя, при том, что степень покрытия образцов данным магнитным материалом отличается в 5 раз. Соответственно, данный эффект нельзя объяснить только изменением площади пермаллоя на поверхности образцов. Такая разница может быть связана

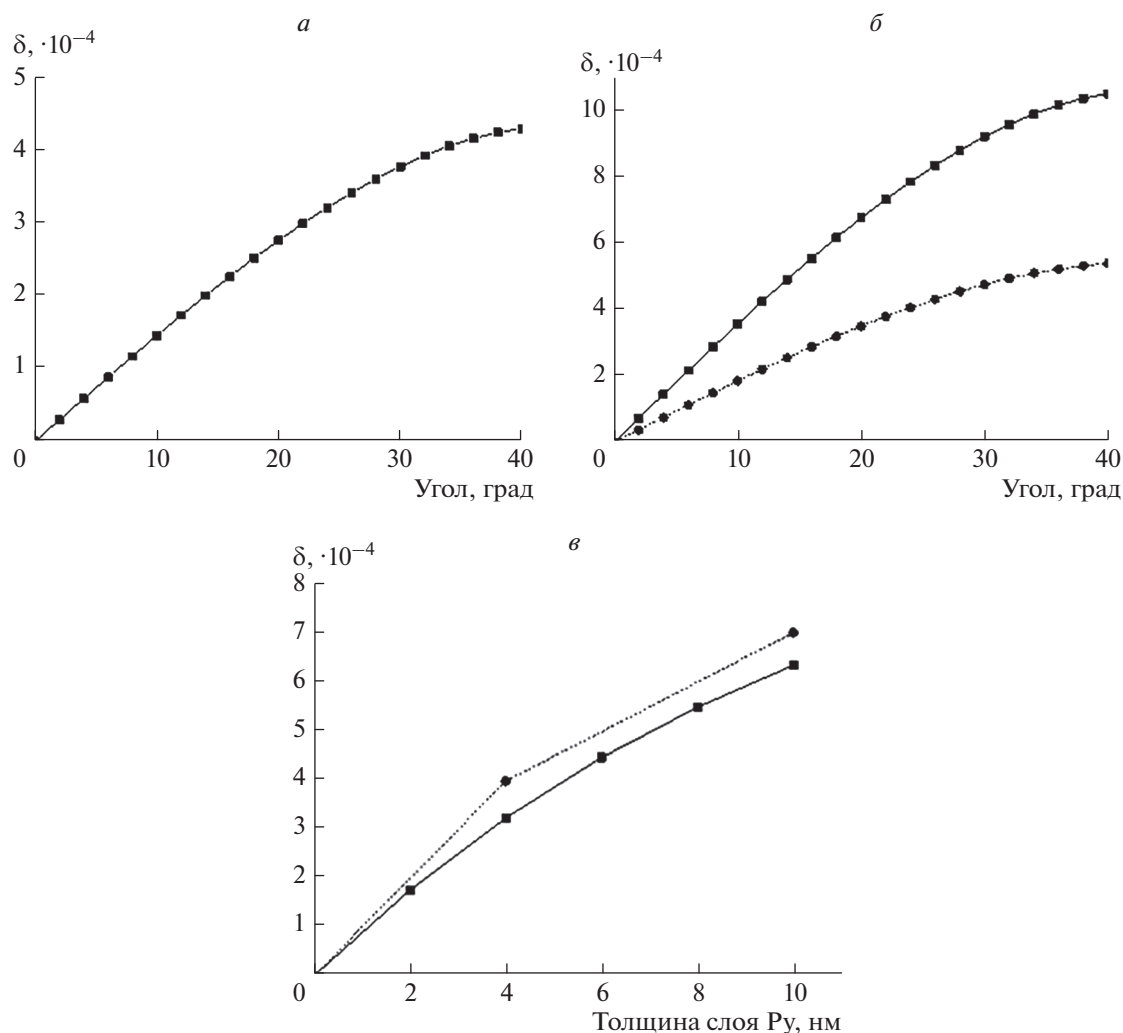


Рис. 3. Графики зависимости теоретически рассчитанной величины экваториального магнитооптического эффекта Керра в пропускании от угла падения света на образец: *а*) W[5 нм]/Ru[4 нм]/Ta[1 нм] со сплошным слоем Ru, *б*) Cr:Bi₂Se₃[25 нм]/Ru[4/10 нм]/Ta[1 нм] со сплошным слоем Ru, пунктирной линией показана зависимость для образца с пермаллоем толщиной 4 нм, а сплошной — для образца с пермаллоем толщиной 10 нм, *в*) зависимость величины ЭЭК в пропускании от толщины пермаллоя для структур Cr:Bi₂Se₃[25 нм]/Ru/Ta[1 нм], пунктирной линией показана экспериментальная зависимость, а сплошной — теоретически рассчитанная.

с особенностями распределения поля наноструктурах.

Для образцов Bi₂Se₃[25 нм]/Ru[4 нм]/Ta[1 нм] (рис. 2б) со сплошным слоем пермаллоя и с нанодисками насыщение наступает при различных значениях внешнего магнитного поля, что говорит о том, что в таких образцах при наноструктурировании изменяется магнитная анизотропия. Предположительно данные изменения связаны с размерным эффектом. А именно, при уменьшении размера дисков все большую роль начинают играть границы структуры. Вблизи границы магнитная система испытывает влияние размагничивающих магнитоэлектростатических полей. Таким образом, среднее поле анизотропии наноструктурированных объектов становится отличным от

такового для сплошных слоев. Как видно из сравнения результатов для W/Ru/Ta и Bi₂Se₃/Ru/Ta структур (рис. 2а, 2б), наноструктурирование неодинаковым образом сказывается на коэрцитивной силе образцов, и немаловажную роль играет окружение магнитного слоя. Величина ЭЭК в пропускании для образца с нанодисками из пермаллоя примерно в 2.5 раза ниже, чем для образца со сплошным слоем, несмотря на различие в степени покрытия образца пермаллоем в 5 раз. Мы предполагаем, что, как и для образцов с вольфрамом, это обусловлено особенностями распределения поля для наноструктурированных образцов.

При сравнении результатов, полученных для образцов Cr:Bi₂Se₃[25 нм]/Ru[10 нм]/Ta[1 нм] с различным диаметром нанодисков (200 и 500 нм)

(рис. 2в), видно, что при одинаковой степени покрытия поверхности пермаллоем (около 20%) величина эффекта Керра отличается примерно в 2.5 раза, а насыщение наступает при одинаковых значениях магнитного поля. Следовательно, геометрическая структура образца значительно влияет на величину ЭЭК в пропускании при одинаковом объеме магнитного материала, не изменяя магнитную анизотропию.

Для образцов $\text{Cr:Bi}_2\text{Se}_3$ [25 нм]/ Py [4/10 нм]/ Ta [1 нм] со сплошным слоем пермаллоя различной толщины (4 и 10 нм) (рис. 2г) величина ЭЭК в пропускании отличается примерно в 2 раза. Насыщение для образца с более толстым слоем пермаллоя наступает при меньшем значении внешнего магнитного поля.

Также были рассчитаны зависимости величины ЭЭК в пропускании от угла падения света методом связанных мод в обратном пространстве для структур W [5 нм]/ Py [4 нм]/ Ta [1 нм] (рис. 3а) и $\text{Cr:Bi}_2\text{Se}_3$ [25 нм]/ Py [4/10 нм]/ Ta [1 нм] (рис. 3б). Результаты, полученные из расчетов для угла падения 20 градусов, длины волны 785 нм, коэффициента преломления $n = 3.085$ и $g = 0.2$ пермаллоя, хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 3в). Как и в эксперименте, при увеличении толщины ферромагнитной пленки величина ЭЭК в пропускании увеличивается.

ВЫВОДЫ

Были получены зависимости величины ЭЭК в проходящем свете от напряженности внешнего магнитного поля. При увеличении толщины слоя пермаллоя в образцах $\text{Cr:Bi}_2\text{Se}_3$ [25 нм]/ Py [4–10 нм]/ Ta [1 нм] с 4 до 10 нм величина эффекта увеличивается в 2 раза. При наноструктурировании пермаллоя в образцах Bi_2Se_3 [25 нм]/ Py [4 нм]/ Ta [1 нм] магнитная анизотропия изменяется, а в образцах W [5 нм]/ Py [4 нм]/ Ta [1 нм] остается неизменной. Также при наноструктурировании данных образцов уменьшение ЭЭК в пропускании нелинейно зависит от изменения степени покрытия поверхности пермаллоем. Увеличение диаметров нанодисков из пермаллоя с 200 до 500 нм в образцах

$\text{Cr:Bi}_2\text{Se}_3$ [25 нм]/ Py [10 нм]/ Ta [1 нм] при одинаковой степени покрытия поверхности пермаллоем ведет к увеличению ЭЭК в пропускании в 2.5 раза.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-12-01333), и РФФИ (проект № 18-52-80038). Х. Хашим благодарит за финансовую поддержку Министерство науки и высшего образования РФ в рамках программы повышения конкурентоспособности МИСиС (проект поддержки молодых ученых).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976.
2. Žutić I., Fabian J., Das Sarma S. // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. С. 323.
3. Hirohata A., Takahashi K. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2014. V. 47. № 19. Art. № 193001.
4. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M. et al. // Nat. Nanotechnol. 2011. V. 6. № 6. P. 370.
5. Hu W.J., Wang Z., Yu W., Wu T. // Nat. Commun. 2016. V. 7. Art. № 10808.
6. Wolf S.A., Awschalom D.D., Buhrman R.A. et al. // Science. 2001. V. 294. № 5546. P. 1488.
7. Politano A., Viti L., Vitiello M.S. // APL Mater. 2017. M. 5. № 3. Art. № 035504.
8. Petrov P.N., Davydova M.D., Skirdkov P.N. et al. // EPJ Web Conf. 2018. V. 185. Art. № 01005.
9. Han H.C., Chen Y.S., Davydova M.D. et al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111. № 18. Art. № 182411.
10. Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М: Наука, 1988.
11. Zvezdin A.K., Kotov V.A. Modern magneto-optics and magneto-optical materials. Boca Raton: CRC Press, 1997.
12. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2011. V. 303. № 1. Art. № 012038.
13. Borovkova O.V., Hashim H., Kozhaev M.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. № 6. Art. № 063101.
14. Маевский В.М., Болотин Г.А. // ФММ. 1973. Т. 36. С. 241.
15. Дружинин А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. С. 1100.
16. Дружинин А.В. и др. // ФММ. 1983. Т. 56. С. 58.