

## Магнитоэлектрический эффект в гибридных системах сегнетоэлектрик/ферромагнитная пленка с анизотропией типа „легкая плоскость“ и „легкая ось“

© Н.С. Гусев, М.В. Сапожников, О.Г. Удалов, И.Ю. Пашенькин, П.А. Юнин

Институт физики микроструктур РАН,  
603087 Афонино, Нижегородская обл., Россия  
e-mail: gusevns@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 9 апреля 2020 г.  
В окончательной редакции 9 апреля 2020 г.  
Принято к публикации 9 апреля 2020 г.

Проведено исследование стрикционного магнитоэлектрического эффекта в гибридных системах, состоящих из магнитной пленки, нанесенной на поверхность сегнетоэлектрика. Использовались пленки с плоскостной (галфенол, никель) и перпендикулярной (многослойные структуры Co/Pt) анизотропией. В качестве сегнетоэлектрика использовался кристалл PMN–PT. Петли гистерезиса магнитных пленок были исследованы в зависимости от электрического напряжения, приложенного к сегнетоэлектрическому кристаллу. В пленках с анизотропией типа „легкая плоскость“ обнаружен поворот оси анизотропии в плоскости образца при приложении электрического напряжения. В структурах с анизотропией типа „легкая ось“ наблюдается изменение формы петли гистерезиса, которое, согласно моделированию, может быть связано с изменением поверхностного взаимодействия Дзялошинского–Мория на границе Co и Pt.

**Ключевые слова:** магнитные пленки, магнитоэлектрический эффект, магнитная анизотропия, магнитооптика, гибридные структуры.

DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49984.124-20

### Введение

Гибридные структуры, состоящие из ферромагнитных (ФМ) и сегнетоэлектрических (СЭ) материалов, представляют в настоящее время значительный интерес [1–4]. В таких системах может быть реализовано управление магнитным состоянием за счет электрических полей. Такие свойства могут быть использованы во многих приложениях спиновой электроники, микромеханики и медицины [5–8]. Использование магнитоэлектрических явлений для контроля магнитных свойств вместо традиционного пропускания тока через катушки позволяет существенно уменьшить энергопотери в системе. Последние в настоящее время являются основным препятствием для применения устройств спиновой электроники в повседневной жизни [9].

Большой интерес в настоящее время вызывают магнитные пленки на поверхности сегнетоэлектрических кристаллов. В таких системах связь между магнитными и электрическими степенями свободы возникает за счет комбинации магнитоупругих и электрострикционных явлений [10]. В магнитных пленках с плоскостной и перпендикулярной анизотропией была продемонстрирована возможность поворота оси анизотропии за счет приложения электрического напряжения к сегнетоэлектрику [11–15].

Недавно было продемонстрировано, что в пленках Co/Pt возможно управление поверхностным взаимодействием Дзялошинского–Мория (ВДМ) за счет созда-

ния деформаций в таких пленках [16]. В этой связи интересным является вопрос о возможности контроля взаимодействия Дзялошинского–Мория в таких пленках электрическим полем в гибридных структурах Co/Pt/сегнетоэлектрик.

В настоящей работе методами магнитооптического эффекта Керра исследовано поведение намагниченности в пленках Co/Pt, нанесенных на сегнетоэлектрический кристалл PMN–PT, при приложении электрического напряжения к такому кристаллу. Проведен анализ поведения петель гистерезиса в зависимости от приложенного электрического поля. Также в работе исследован стрикционный магнитоэлектрический эффект в пленках с плоскостной анизотропией на поверхности сегнетоэлектрического кристалла.

### 1. Изготовление образцов

Были изготовлены гибридные структуры СЭ/ФМ, в которых в качестве магнитного слоя использовались пленки Ni и FeGa, а также многослойные структуры Ta/Pt/Co/Pt. Ферромагнитные пленки наносились на рабочую поверхность СЭ путем магнетронного осаждения в вакуумной камере при комнатной температуре на неподвижные подложки в атмосфере аргона  $4 \cdot 10^{-3}$  Torr. Предварительная откачка осуществлялась до  $10^{-6}$  Torr. В качестве сегнетоэлектрика использовался кристалл PMN–PT ( $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – $\text{PbTiO}_3$ ) фирмы AtomOptics (Китай). Кристалл представляет собой по-

лированную плоскопараллельную пластину толщиной 0.5 mm. Латеральный размер СЭ пластины составляет порядка 5 mm. На одну из поверхностей кристалла наносилась магнитная пленка. На обратную сторону напылялись металлические слои Ta и Pt с толщинами 90 и 10 nm соответственно. Это позволяет прикладывать разность потенциалов и создавать электрическое поле внутри СЭ, перпендикулярное поверхности пластины. В настоящей работе использовались кристаллы PMN–PT с двумя типами ориентаций осей:

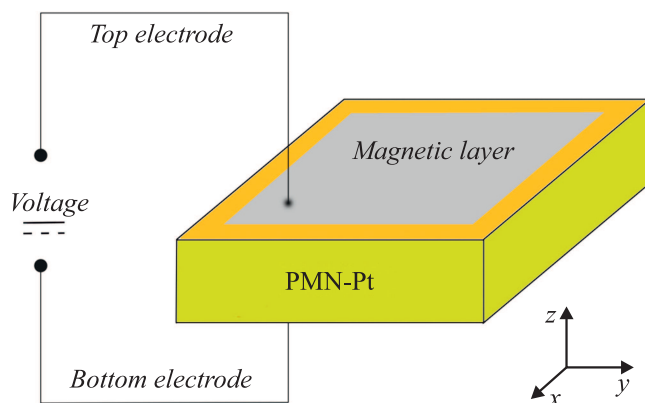
1) Кристалл со срезом [011]. При приложении напряжения между верхним и нижним электродами в таком кристалле возникают анизотропные деформации в плоскости пластины (плоскости магнитной пленки).

2) Кристалл со срезом [001]. Такой срез позволяет создавать изотропные деформации в магнитной пленке.

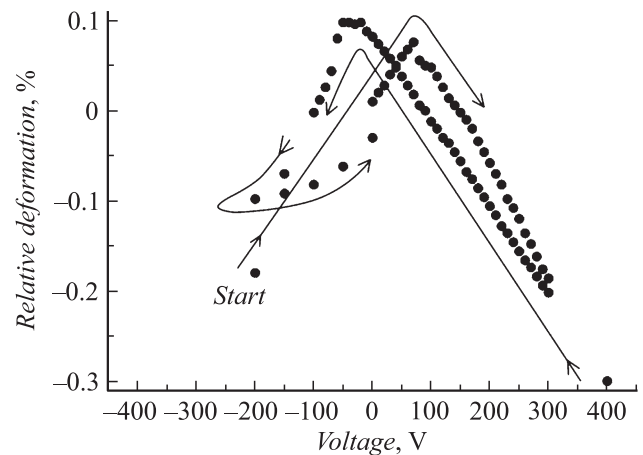
Металлические пленки толщиной 30 nm с плоскостной магнитной анизотропией (Ni и FeGa) напылялись на кристалл первого типа со срезом [011]. Весовой состав галфенола — 80%–Fe/20%–Ga. На кристаллы второго типа (срез [001]) наносились пленки Ta/Pt/Co/Pt с толщинами слоев 2 nm/1.8 nm/1.3 nm/2 nm. Контроль толщин слоев осуществлялся при помощи предварительной калибровки толщин отдельных слоев методом рентгеновской дифрактометрии. Средняя скорость напыления составляет  $\sim 0.2$  nm/s, что позволяет с хорошей точностью воспроизводить многослойные структуры с заданными параметрами.

## 2. Методика измерений

Исследования магнитных свойств ферромагнитных пленок проводилось при помощи измерения магнитооптического эффекта Керра на длине волны 632 nm в меридиональной и полярной геометриях. Измерения проводились при приложении постоянного напряжения к СЭ. Для этого использовался высоковольтный источник питания (до 3 kV).



**Рис. 1.** Схематическое изображение гибридной структуры. В качестве магнитного слоя — Ni, FeGa, TaPtCoPt. Нижний электрод — TaPt.

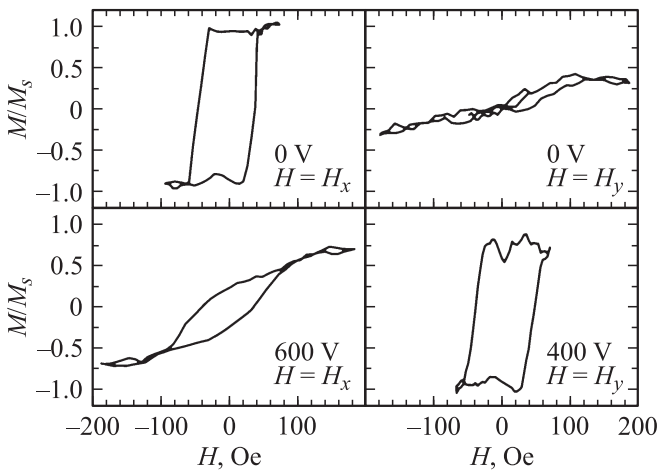


**Рис. 2.** Зависимость относительных деформаций в плоскости XY от напряжения, приложенного к электродам гибридной структуры СЭ/ФМ. PMN–PT срез [011] (первый тип). Стрелками указана очередность измерений.

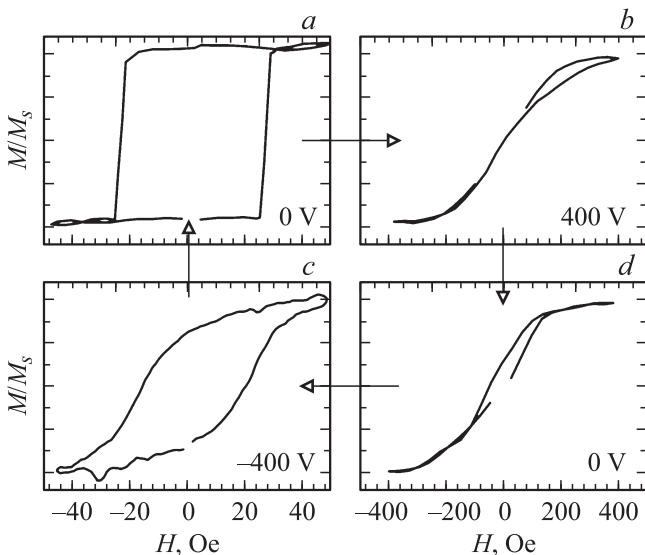
При напряжениях свыше 0.7 kV кристалл PMN–PT либо раскалывается на несколько частей, либо покрывается большим количеством трещин, что затрудняет проведение дальнейших измерений. Поэтому максимальное напряжение, которое прикладывалось к гибридной структуре, составляло не более 0.6 kV. Такие напряжения приводят к возникновению в кристалле PMN–PT (со срезом первого типа) относительных деформаций в плоскости кристалла порядка 0.2–0.3% (см. данные измерений деформаций тензодатчиком КФ5П1 на рис. 2). На рис. 2 показаны деформации вдоль оси [100]. Важно отметить, что деформации вдоль другой оси имеют противоположный знак [17]. Приложение напряжения к кристаллу со срезом [001] приводит к изотропным деформациям того же порядка величины на поверхности пластины.

## 3. Магнитоэлектрический эффект в пленках с плоскостной анизотропией

Характерной особенностью пленок галфенола и никеля является наличие спонтанной магнитной анизотропии в плоскости. В настоящей работе направление осей легкого и тяжелого намагничивания в плоскости определялось путем измерения магнитооптического эффекта Керра для плоскостей падения излучения, ориентированных вдоль осей X и Y в плоскости пленки. На рис. 3 представлены петли гистерезиса пленки Ni для двух ориентаций плоскости падения (левая колонка — X, правая колонка — Y). Верхний и нижний ряды на рис. 3 соответствуют различным напряжениям, приложенным к СЭ. При нулевом напряжении (верхний ряд) на электродах гибридной структуры в направлении Y намагниченность ведет себя линейно с магнитным полем. Для



**Рис. 3.** Петли намагничивания пленки Ni (30 nm) в зависимости от приложенного напряжения. Левая колонка — намагниченность вдоль оси X. Правая колонка — вдоль оси Y.



**Рис. 4.** Петли намагничивания пленки FeGa (30 nm) (вдоль оси X) для различных напряжений, приложенных к гибридной структуре. Стрелками указана последовательность измерения петель.

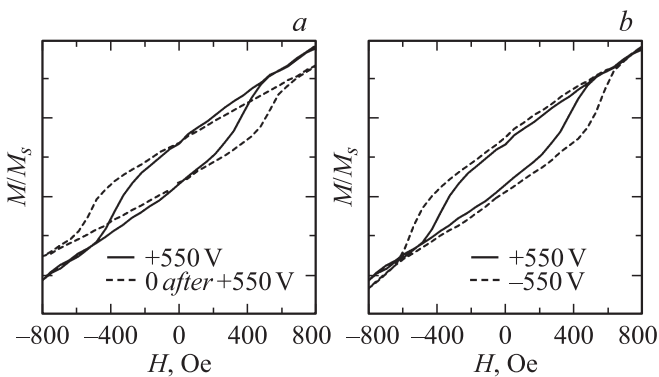
направления X наблюдается петля гистерезиса. Таким образом, в отсутствие напряжения, ось анизотропии направлена вдоль оси X. При конечном напряжении (верхний ряд) ось Y становится осью легкого намагничивания, а ось X — тяжелого. Таким образом, при приложении напряжения удастся повернуть ось анизотропии Ni на  $90^\circ$ . Отметим, что петля гистерезиса вдоль оси X имеет остаточную ширину даже при высоких напряжениях, что говорит о разориентации главных осей механических деформаций СЭ и осей магнитной анизотропии ФМ пленки.

На рис. 4 представлены данные для пленки FeGa на PMN–PT. Показана петля гистерезиса при намагничива-

нии вдоль оси X для различных напряжений. Стрелки показывают последовательность приложения напряжения. Пленка галфенола намагничена в плоскости слоя, но имеет выделенное направление в этой плоскости. В отсутствие напряжения легкая ось намагничивания направлена вдоль оси X (рис. 4, a). При приложении напряжения 400 V ось легкого намагничивания (X) переходит в трудную: увеличиваются поля насыщения, коэрцитивность практически исчезает (рис. 4, b). После возвращения напряжения к нулевому значению кривая намагничивания остается неизменной (рис. 4, c). Для того чтобы вернуть пленке FeGa исходное направление оси магнитной анизотропии, необходимо подать отрицательное напряжение на электроды гибридной структуры (рис. 4, d). После выключения напряжения петля принимает первоначальный вид. Таким образом, видно, что можно проводить управляемое переключение между двумя состояниями с различной магнитной анизотропией с помощью электрического поля. Изменение ориентации оси анизотропии в магнитной пленке связано со стрикционным магнитоэлектрическим эффектом в исследуемой системе. Наличие двух стабильных состояний с различной ориентацией оси анизотропии, по-видимому, связано с остаточными деформациями поверхности СЭ при переполяризации.

#### 4. Магнитоэлектрический эффект в пленках с перпендикулярной анизотропией

Были проведены измерения кривых намагничивания многослойных структур Ta/Pt/Co/Pt. Как упоминалось выше, толщины слоев составляют 2 nm/1.8 nm/1.3 nm/2 nm соответственно. Они подбирались таким образом, чтобы величина перпендикулярной анизотропии находилась вблизи критического значения, при котором происходит переориентация намагниченности пленки с перпендикулярной на плоскостную. Петля гистерезиса для такой пленки показана на рис. 5. Комбинация линейного роста намагниченности с полем и небольшой петли гистерезиса свидетельствует о том, что образец находится на границе перехода между плоскостной и перпендикулярной намагниченностью. Можно предположить, что часть образца имеет анизотропию типа легкая ось (перпендикулярная плоскости образца), а часть имеет анизотропию типа легкая плоскость. Как показали предыдущие исследования, вблизи такого ориентационного перехода пленки показывают значительную зависимость петли гистерезиса от механических деформаций [11,16]. В настоящей работе деформации магнитной пленки вызывались приложением напряжения к сегнетоэлектрическому кристаллу. Зависимость формы петли перемагничивания от приложенного к электродам гибридной структуры напряжения приведена на рис. 5.



**Рис. 5.** Петли намагничивания многослойной структуры Ta (2 nm)Pt (~2 nm)Co (1.3 nm)Pt (2 nm) при различных значениях напряжения на электродах гибридной структуры. Полярная геометрия измерений.

На рис. 5, а представлены две петли, соответствующие нулевому и конечному напряжениям. Видно, что при приложении напряжения происходит изменение формы петли гистерезиса. В частности, увеличивается наклон линейной компоненты и увеличивается поле коэрцитивности. На рис. 5, б показаны петли гистерезиса для больших положительного и отрицательного напряжений. Видно, что при изменении полярности напряжения коэрцитивность образца изменяется на величину  $\sim 200 \text{ Oe}$ . Также происходит незначительное изменение величины магнитооптического сигнала.

Схожие изменения петли гистерезиса наблюдались в работе [16] при изгибе магнитной пленки. В [16] было продемонстрировано, что подобное изменение петли намагниченности не может быть связано с изменением магнитной анизотропии пленки Co/Pt из-за деформаций. Данные мандельштам-бриллюэновского рассеяния и результаты микромагнитного моделирования свидетельствуют о том, что изменение величины поля коэрцитивности в подобных образцах при деформациях связано с изменением величины поверхностного ВДМ, возникающего на границе Co и Pt. По-видимому, изменение петли гистерезиса, показанное на рис. 5, также вызвано изменением величины ВДМ.

Важно отметить, что в работе [16] использовался изгиб пластины для создания деформаций. В настоящей работе деформации вызваны приложением напряжения к сегнетоэлектрику. Возникновение деформаций при приложении напряжения может объяснить изменение петли гистерезиса на рис. 5, а, где сравнивается случай нулевого и конечного напряжения.

Однако можно ожидать, что в больших полях (существенно превышающих поля переключения поляризации) величина деформаций не должна зависеть от знака электрического поля. При этом, как видно из рис. 5, б, петли гистерезиса имеют существенное различие для положительного и отрицательного напряжений. Возможно два объяснения данного эффекта. Одно состоит в

том, что в действительности деформации не являются четной функцией электрического поля. Такое поведение мы наблюдали для кристалла PMN–PT со срезом [011]. На зависимости деформаций от приложенного напряжения (рис. 2) видна асимметрия. Второй причиной возникновения разницы петель гистерезиса при положительных и отрицательных напряжениях может являться влияние поляризации сегнетоэлектрика. Поляризация СЭ перпендикулярна плоскости пленки ФМ, поэтому она должна приводить к зарядовой аккумуляции на поверхности магнитной пленки. При смене знака электрического поля направление поляризации PMN–PT изменяется, и меняется знак аккумуляции заряда. Важно отметить, что рассмотренные в настоящей работе пленки являются довольно тонкими. Поэтому влияние зарядовой аккумуляции на них может быть заметным. Ранее в литературе демонстрировалось влияние зарядовой аккумуляции на перпендикулярную анизотропию в пленках CoPt [18], а также было отмечено, что зарядовая аккумуляция может приводить к изменению величины ВДМ [19]. Возможно, что разница петель гистерезиса при положительном и отрицательном напряжениях связана именно с переключением поляризации СЭ.

## Заключение

В работе приведены экспериментальные исследования магнитоэлектрического эффекта в гибридных структурах сегнетоэлектрик–ферромагнетик. В частности, методами магнитооптики исследованы пленки FeGa, Ni и Co/Pt на поверхности СЭ кристалла PMN–PT в зависимости от напряжения, приложенного к СЭ. В пленках с анизотропией типа легкая плоскость, таких, как Ni и FeGa продемонстрировано переключение направления осей магнитной плоскостной анизотропии при приложении напряжения к электродам гибридной структуры. В структурах Co/Pt/PMN–PT также наблюдается магнитоэлектрический эффект. Форма петли гистерезиса изменяется при приложении напряжения. Обнаруженные изменения формы петли гистерезиса могут быть объяснены изменением величины ВДМ на границе Co и Pt, возникающие как за счет деформаций магнитной пленки, так и за счет зарядовой аккумуляции.

## Финансирование работы

Изготовление пленок выполнено при поддержке РФФИ № 18-42-520013P\_A. Магнитооптические исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант номер 18-72-10026).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Zavaliche F, Zhao T, Zheng H, Straub F, Cruz M.P., Yang P.-L., Hao D, Ramesh R. // Nano Lett. 2007. Vol. 7. P. 1586.
- [2] Sahoo S, Polisetty S, Duan C.-G., Jaswal S.S., Tsymbal E.Y., Binek C. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. P. 092108.
- [3] Brintlinger T, Lim S.-H., Baloch K.H., Alexander P, Qi Y, Barry J, Melngailis J, Salamanca-Riba L, Takeuchi I, Cumings J // Nano Lett. 2010. Vol. 10. P. 1219.
- [4] Hu J.-M., Yang T, Wang J, Huang H, Zhang J, Chen L.-Q., Nan C.-W. // Nano Lett. 2015. Vol. 15. P. 616.
- [5] Liu M., Zhou Z, Nan T, Howe B.M., Brown G.J., Sun N.X. // Adv. Mater. 2013. Vol. 25. P. 1435.
- [6] Zhang S, Zhao Y.G., Li P.S., Yang J.J., Rizwan S, Zhang J.X., Seidel J, Qu T.L., Yang Y.J., Luo Z.L., He Q, Zou T, Chen Q.P., Wang J.W., Yang L.F., Sun Y, Wu Y.Z., Xiao X, Jin X.F., Huang J, Gao C, Han X.F., Ramesh R. // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108. P. 137203.
- [7] Yamasaki Y, Miyasaka S, Kaneko Y, He J.-P., Arima T, Tokura Y // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. P. 207204.
- [8] Mair L.O., Martinez-Miranda L.J., Kurihara L.K., Nacev A., Hilaman R., Chowdhury S., Jafari S., Ijanaten S., da Silva C., Baker-McKee J, Stepanov P.Y., Weinberg I.N. // AIP Adv. 2018. Vol. 8. P. 056731.
- [9] Carman G.P., et al. IEEE Magnetics Society Distinguished Lecturers for 2016. IEEE Transactions on Magn. 2015. Vol. 51. N 12. P. 1–4.
- [10] Ce-Wen Nan // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. P. 6082.
- [11] Гусев Н.С., Пашенькин И.Ю., Удалов О.Г., Сапожников М.В., Юнин П.А. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 11. С. 1736–1741.
- [12] Peng B, Zhou Z, Nan T, Dong G, Feng M, Yang Q, Wang X, Zhao S, Xian D, Jiang Z.-D., Ren W, Ye Z.-G., Sun N.X., Liu M. // ACS Nano. 2017. Vol. 11. P. 4337.
- [13] Thiele C, Dorr K, Bilani O, Rodel J, Schultz L. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. P. 054408.
- [14] Leufke P.M., Kruk R, Brand R.A., Hahn H. // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 87. P. 094416.
- [15] Lu H, George T.A., Wang Y, Ketsman I, Burton J.D., Bark C.-W., Ryu S, Kim D.J., Wang J, Binek C, Dowben P.A., Sokolov A, Eom C.-B., Tsymbal E.Y., Gruverman A. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 232904.
- [16] Gusev N.S., Sapozhnikov M.V., Sadovnikov A.V., Nikitov S.A., Udalov O.G. ArXiv 2020.
- [17] Sohn H, Nowakowski M.E., Liang C.Y., Hockel J.L., Wetzlar K, Keller S, McLellan B.M., Marcus M.A., Doran A, Young A, Klauli M, Carman G.P., Bokor J, Candler R.N. // ACS Nano. 2015. Vol. 9. P. 4814.
- [18] Hu J.-M., Nan C.-W., Chen L.-Q. // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. P. 134408.
- [19] Titiksha Srivastava, Marine Schott, Roméo Juge, Viola Křižáková, Mohamed Belmeguenai, Yves Roussigné, Anne Bernand-Mantel, Laurent Ranno, Stefania Pizzini, Salim-Mourad Chérif, Andrey Stashkevich, Stéphane Auffret, Olivier Boulle, Gilles Gaudin, Mairbek Chshiev, Claire Baraduc, Hélène Béa // Nano Lett. 2018. Vol. 18. P. 4871–4877.