05

Композитный зонд для сканирующей туннельной микроскопии на основе топологического изолятора BiSb

© *А.А. Мазилкин*[1,2], *О.В. Кононенко*[3], *С.В. Чекмазов*[1], *Е.А. Першина*[1], *А.М. Ионов*[1,2], *С.Г. Протасова*[1], *Р.Н. Можчиль*[1], *С.И. Божко*[1]

[1] Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия
[2] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия
[3] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия
E-mail: mazilkin@issp.ac.ru

Поступило в Редакцию 18 августа 2026 г.
В окончательной редакции 31 августа 2026 г.
Принято к публикации 31 августа 2026 г.

Созданы композитные зонды для сканирующей туннельной микроскопии на основе нитевидных кристаллов (НК) топологического изолятора BiSb. НК присоединялись к кончикам игл вольфрама методом фокусированного ионного пучка. Исследования подтвердили монокристаллическую структуру НК BiSb и однородность состава. Работоспособность и высокая стабильность разработанных зондов продемонстрированы в исследованиях поверхности Sb(111) методом сканирующей туннельной микроскопии с атомным разрешением. Результаты подтверждают применимость композитных зондов для исследований методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии. В перспективе они могут быть использованы для исследования структуры магнитных материалов с высоким пространственным разрешением.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, сканирующая туннельная спектроскопия, композитный зонд, топологический изолятор, нитевидный кристалл BiSb, поверхностные состояния Дирака.

DOI: 10.61011/PJTF.2027.01.64118.20876

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), известная более 40 лет [1,2], является одним из наиболее мощных методов исследования поверхности. Возможность достижения атомного разрешения и визуализации отдельных электронных орбиталей [3–8] определяется геометрией и электронной структурой кончика зонда, что делает разработку специализированных зондов ключевой задачей развития СТМ.

Наиболее распространены зонды из проволоки PtIr, получаемые механическим перерезанием с натяжением [9]. Несмотря на простоту, этот метод характеризуется низкой воспроизводимостью формы при высокой стоимости материала. Альтернативой является электрохимическая полировка [3,10], позволяющая получать более воспроизводимые зонды с радиусом кривизны 50–100 nm. Вольфрамовые (W) зонды, изготавливаемые электрохимическим травлением, позволяют получить радиус острия менее 30 nm [3,5–8]. Их недостаток — образование оксидно-углеродного слоя, снижающего проводимость [7,11], который удаляют *in situ* высокотемпературным нагревом или ионным распылением [8,11,12].

Независимо от материала зонд должен обладать механической стабильностью, контролируемой электронной структурой, а его проводимость должна значительно превышать проводимость туннельного контакта. Атомная структура острия влияет на разрешение и правильность формы объектов, на результаты сканирующей туннельной спектроскопии (СТС) и их интерпретацию. Ключевая проблема — низкая воспроизводимость: даже зонды, изготовленные по одной методике, дают разный контраст из-за вариаций формы. Это связано с экспоненциальной зависимостью туннельного тока от зазора: основная часть тока проходит через одиночный атом, расположенный на вершине острия. Поэтому необходимы строгий контроль геометрии и стандартизация методов подготовки, а также разработка зондов с предсказуемой атомной структурой для минимизации артефактов.

Согласно теории туннелирования, туннельный ток определяется локальной плотностью состояний зонда $\rho_t(\varepsilon)$ и образца $\rho_s(\varepsilon)$. В СТМ-исследованиях полагают, что ρ_t слабо зависит от энергии туннелирующего электрона в интервале $\left((E_F - eU), E_\mathrm{F}\right)$, где E_F — энергия Ферми зонда, а U — разность потенциалов, приложенная между зондом и образцом, что оправдано для металлических зондов, например из Pt, Ir, PtIr, Au, Ag. Тогда сигнал dI/dU в СТС отражает ρ_s. Однако для задач субатомного разрешения или получения магнитного контраста необходимо учитывать электронную структуру зонда, особенно когда вклад вносят определенные парциальные состояния или проекции спина. В этом плане интересны топологические изоляторы, поверхностные состояния которых обладают линейной дисперсией и спин-импульсной корреляцией, что позволяет генерировать спин-поляризованный туннельный ток без магнитного порядка и внешнего поля [13].

Настоящая работа представляет собой первый шаг к созданию спин-чувствительных зондов для СТМ. Предложен композитный зонд, состоящий из W-иглы с при-

варенным нитевидным кристаллом (НК) топологического изолятора BiSb. Функциональным острием является кончик НК, через который протекает туннельный ток. Спиновая поляризация тока обеспечивается топологическими поверхностными состояниями НК. Созданный зонд позволил визуализировать поверхность с атомным разрешением. Уникальность предложенного подхода состоит в том, что он открывает путь к реализации спин-поляризованной СТМ без использования магнитных материалов и внешнего поля, что существенно расширяет возможности метода.

В качестве держателя НК использовалось вольфрамовое острие. Монокристаллические W-иглы с ориентацией [100] изготавливались электрохимическим травлением в 2M-растворе NaOH при напряжении 3.8−4.1 V с использованием кольцевого катода из нержавеющей стали. Аналогично готовились иглы из поликристаллической проволоки диаметром 0.3 mm; радиус закругления острия составлял < 50 nm (рис. 1). НК BiSb (состав $Bi_{1-x}Sb_x$, $x = 0.12-0.14$) были выращены методом ионно-лучевого осаждения [14] на подложке Si(111) при комнатной температуре и остаточном давлении в камере $\sim 10^{-6}$ Torr. Скорость осаждения, контролируемая кварцевым толщиномером, составляла ~ 20 nm/min, при этом номинальная толщина созданных пленок варьировалась в диапазоне 250−350 nm. Ввиду наличия неоднородного рельефа поверхности, обусловленного ростом отдельных НК, значения толщины, зафиксированные толщиномером, следует рассматривать как усредненные по площади поверхности подложки.

Морфология и структура НК исследовались методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке Versa 3D DualBeam и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL 2010. Элементный состав определялся методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре Kratos Ultra DLD. СТМ-измерения проводились при комнатной температуре в сверхвысоком вакууме на установке OMICRON VT AFM XA.

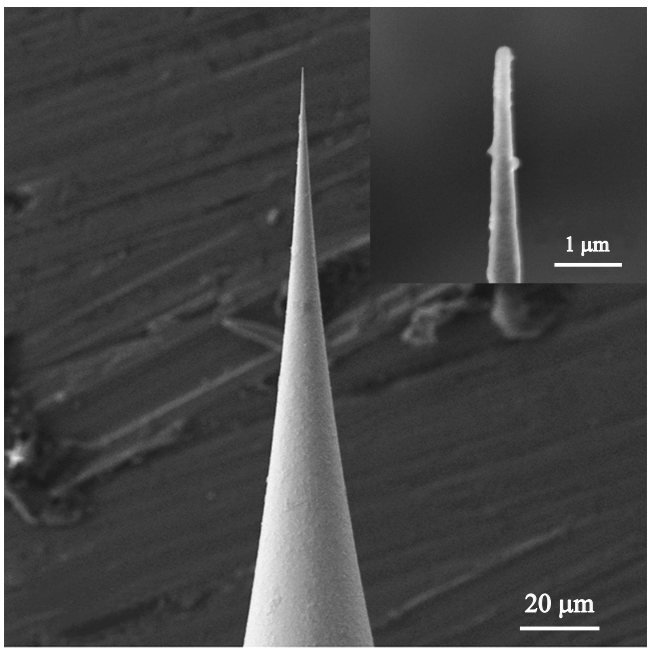


Рис. 1. РЭМ-изображение острой W-иглы из поликристаллической проволоки. На вставке представлено изображение при большем увеличении.

Для изготовления композитного зонда были проведены предварительные работы: получены острые W-иглы, изготовленные из монокристаллических заготовок и поликристаллической проволоки, и выращены НК BiSb с требуемым составом.

На рис. 2, *a* показан массив выращенных НК, а на вставке — отдельный НК. По данным РЭМ их длина достигала 50 μm, поперечный размер составлял около 100 nm.

Состав НК, определенный при измерениях методом РФЭС (рис. 2, *b*), показал, что концентрация сурьмы в пленке с НК составляет около 13 at.%. Химический состав монокристаллического сплава $Bi_{0.87}Sb_{0.13}$ указывает на то, что данное соединение является трехмерным топологическим изолятором с энергетической щелью в спектре объемных состояний и топологическими поверхностными состояниями, локализованными на (111) поверхности кристалла [15].

Для исследования методом ПЭМ индивидуальные НК были отделены от подложки и помещены на углеродную пленку (рис. 2, *c*). Исследования показали, что синтезированные НК BiSb представляют собой монокристаллы вытянутой формы с ромбоэдрической структурой типа $R\bar{3}m$. Они обладают совершенной структурой, так как на картине электронной дифракции (вставка к рис. 2, *c*) отсутствуют дополнительные рефлексы.

Анализ электронограммы показал, что направление роста НК лежит в направлении вектора $\mathbf{g} = 110$. В ромбоэдрической ячейке BiSb этому вектору обратной решетки приблизительно соответствует кристаллографическое направление (индицирование дифракции проведено в ромбоэдрической системе координат). Было исследовано несколько НК, для которых были выявлены такие же параметры структуры. Как видно из микрофотографии на рис. 2, *c*, вершина НК огранена несколькими фасетками, одна из которых наклонена к оси роста под углом приблизительно 72°. В данной проекции такая ориентация наиболее близка к проекции плоскости (111).

Такая геометрия кончика зонда представляется наиболее перспективной с точки зрения генерации спин-поляризованного туннельного тока, поскольку именно на поверхности BiSb(111) локализованы электроны топологически защищенных поверхностных состояний, характеризующиеся невырожденным по спину коническим спектром [15].

Для создания композитного СТМ-зонда к кончику изготовленной W-иглы прикреплялся НК BiSb. Монтаж НК выполнялся с использованием двухлучевой электронно-ионной системы Versa 3D HighVac

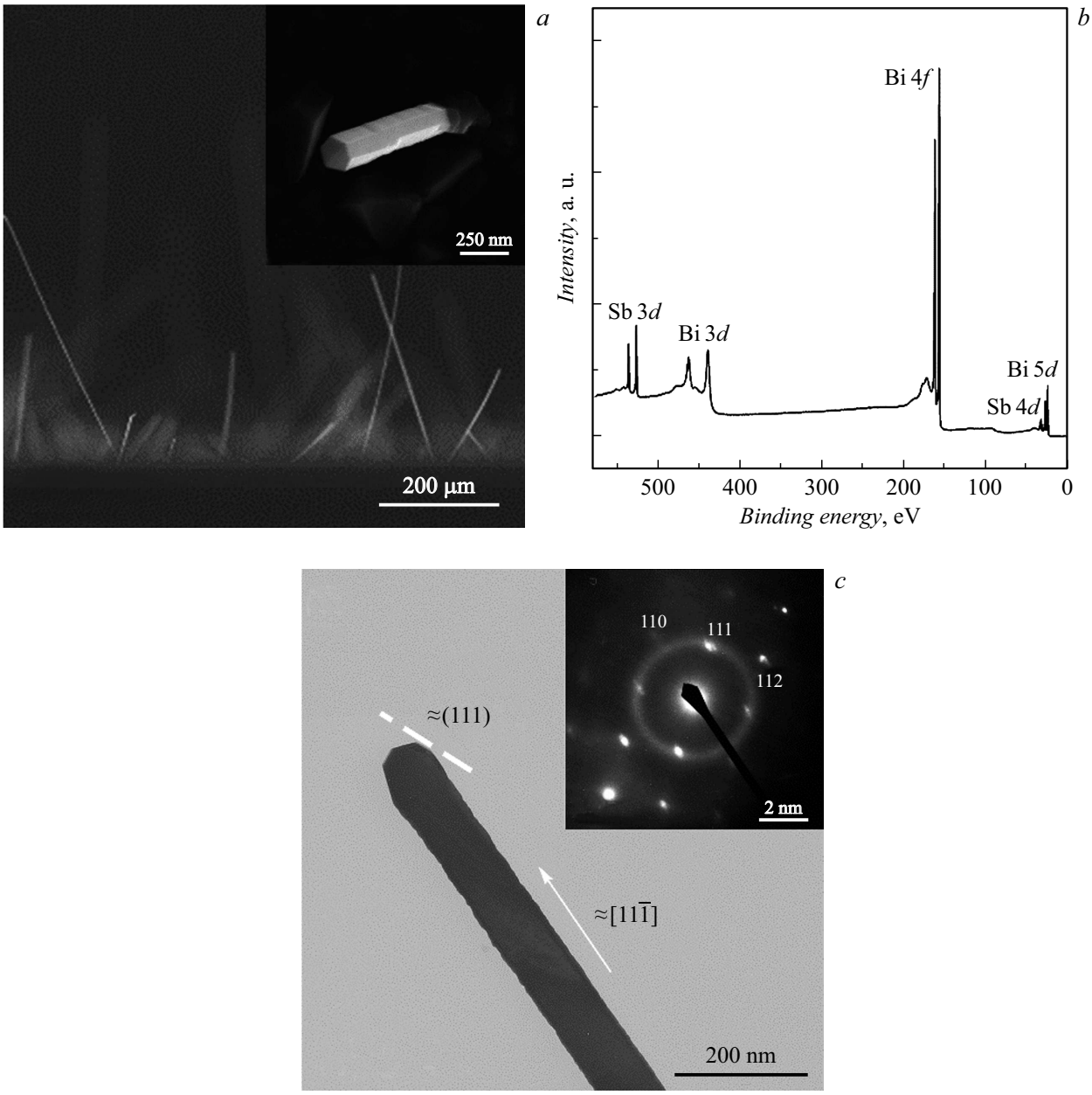


Рис. 2. *a* — РЭМ-изображение пленки с НК BiSb, выращенными на подложке Si(111). На вставке — изображение отдельного НК BiSb. *b* — РФЭС-спектр, подтверждающий элементный состав НК $Bi_{0.87}Sb_{0.13}$. *c* — ПЭМ-изображение отдельного НК BiSb. На вставке — электронная дифракция.

DualBeam (FEI), оснащенной микроманипулятором Omniprobe, и состоял из нескольких этапов. Сначала выбирался НК с удобной пространственной ориентацией относительно оси микроманипулятора. Такая ориентация подбиралась эмпирически. Затем выбранный НК фиксировался на кончике манипулятора посредством электронно-индуцированного осаждения Pt в месте их соприкосновения. Далее НК последовательно отделялся от подложки сфокусированным ионным пучком Ga^+, припаивался соосно к кончику W-иглы с помощью ионно-индуцированного осаждения Pt и отделялся от манипулятора с помощью ионного пучка (рис. 3, *a*). Для минимизации имплантации галлия все манипуляции проводились при минимальном токе ионного пучка (1.1 pA) без длительного непрерывного облучения. Длина изготовленного НК составляла около 100 μm, что несколько меньше исходной длины на подложке вследствие удаления материала при резке ионным пучком.

Работоспособность изготовленного композитного зонда была проверена на чистой плоской атомно-гладкой поверхности Sb(111). На рис. 3, *b* представлено СТМ-изображение с атомным разрешением, демонстрирующее периодическую атомную решетку поверхности. При этом амплитуда атомных корругаций составила

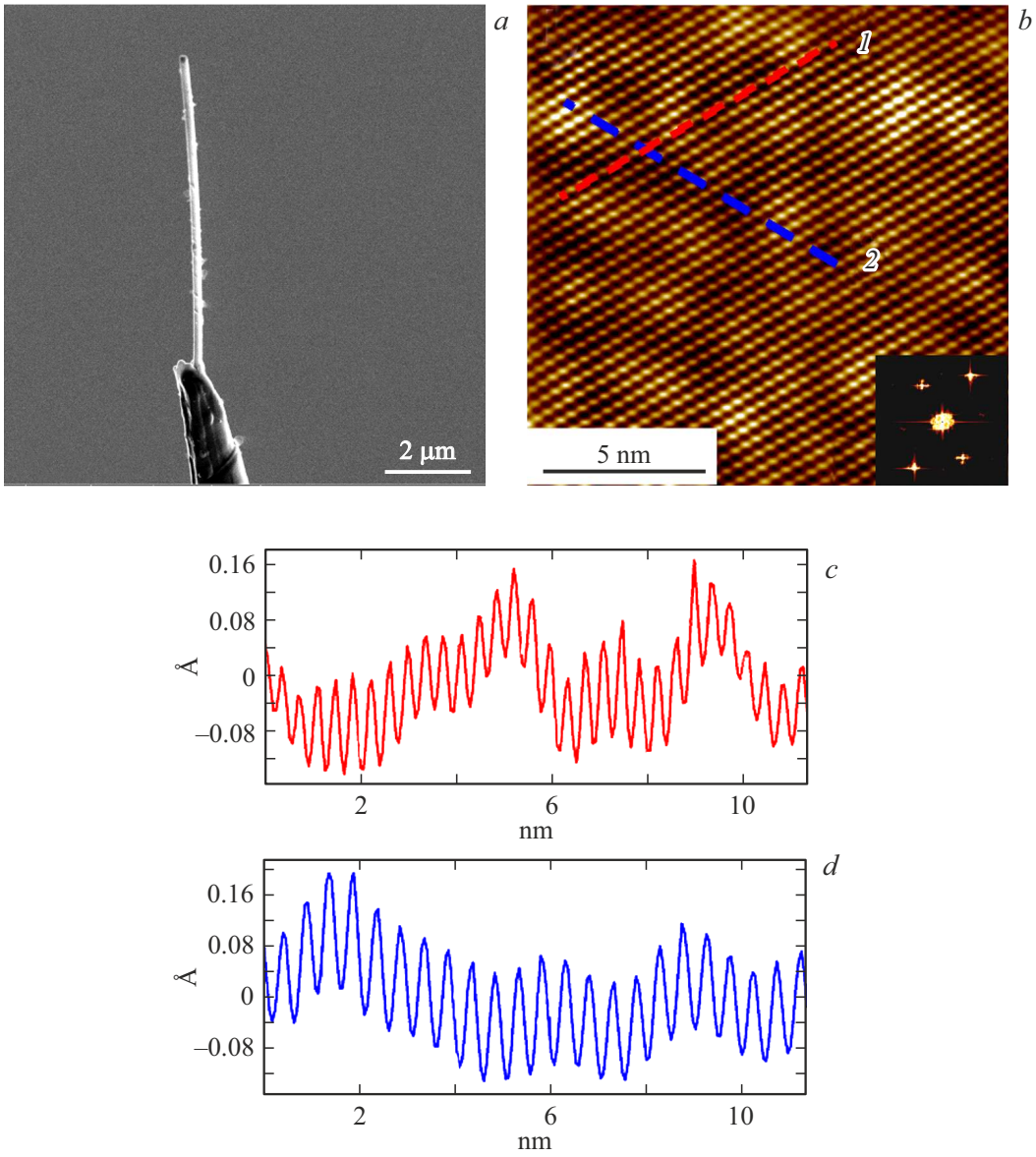


Рис. 3. *a* — НК BiSb, соосно прикрепленный к кончику W-иглы. *b* — СТМ-изображение поверхности Sb(111) (15×15 nm, получено при $U_b = +0.1$ V и $I_t = 300$ pA). На вставке — фурье-образ СТМ-изображения. *c*, *d* — профили топографического изображения вдоль линий *1* и *2* на части *b* соответственно.

около 0.1 Å (рис. 3, *c*, *d*). Анализ СТМ-данных (фурье-образ на вставке к рис. 3, *b*) показал, что параметр элементарной ячейки у поверхностной структуры Sb(111) составляет $a_{\mathrm{Sb}(111)} \approx 4.35$ Å, что хорошо согласуется со справочным значением 4.33 Å для монокристалла сурьмы [16]. Полученные СТМ-данные подтверждают способность композитного зонда визуализировать структуру поверхности с высоким пространственным разрешением. При этом зонд демонстрирует высокую стабильность в процессе сканирования, несмотря на большое аспектное отношение его функционального кончика: в используемых НК эта величина более 100.

Разработанная технология создания композитных СТМ-зондов, ключевым этапом которой является соосное закрепление НК BiSb на кончике W-иглы, обеспечила получение атомного разрешения на поверхности Sb(111) с корректным воспроизведением параметров решетки, что подтверждает высокую механическую стабильность зонда и его способность обеспечивать высокое пространственное разрешение. Созданные зонды лишены недостатков ферромагнитных аналогов (остаточное поле и магнитострикционная нестабильность), что открывает возможность использования спин-поляризованной СТМ без внешнего поля. Подтверждение спиновой чувствительности планируется в ходе испытаний на магнитных наноструктурах. В настоящее время зонд используется для исследований поверхности магнитных пле-

нок Fe/Sb, результаты которых будут представлены отдельно.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИФТТ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, Appl. Phys. Lett., **40** (2), 178 (1982). DOI: 10.1063 /1.92999
[2] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, Phys. Rev. Lett., **49** (1), 57 (1982). DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.57
[3] A.J. Melmed, J. Vac. Sci. Technol. B, **9** (2), 601 (1991). DOI: 10.1116/1.585467
[4] W. Paul, P. Grütter, in *Surface science tools for nanomaterials characterization*, ed. by C.S.S.R. Kumar (Springer, Berlin–Heidelberg, 2015), p. 159–198. DOI: 10.1007/978-3-662-44551-8_5
[5] J.P. Ibe, P.P. Bey, S.L. Brandow, R.A. Brizzolara, N.A. Burnham, D.P. DiLella, K.P. Lee, C.R.K. Marrian, R.J. Colton, J. Vac. Sci. Technol. A, **8** (4), 3570 (1990). DOI: 10.1116 1.576509
[6] R. Zhang, D.G. Ivey, J. Vac. Sci. Technol. B, **14** (1), 1 (1996). DOI: 10.1116/1.589029
[7] A.I. Oliva, A. Romero G., J.L. Peña, E. Anguiano, M. Aguilar, Rev. Sci. Instrum., **67** (5), 1917 (1996). DOI: 10.1063/1.1146996
[8] I. Ekvall, E. Wahlström, D. Claesson, H. Olin, E. Olsson, Meas. Sci. Technol., **10** (1), 11 (1999). DOI: 10.1088/0957-0233/10/1/006
[9] C.J. Chen, *Introduction to scanning tunneling microscopy*, 2nd ed. (Oxford University Press, Oxford, 2008), p. 28.
[10] A.H. Sørensen, U. Hvid, M.W. Mortensen, K.A. Mørch, Rev. Sci. Instrum., **70** (7), 3059 (1999). DOI: 10.1063 /1.1149891
[11] A. Cricenti, E. Paparazzo, M.A. Scarselli, L. Moretto, S. Selci, Rev. Sci. Instrum., **65** (5), 1558 (1994). DOI: 10.1063 /1.1144891
[12] A.N. Chaika, N.N. Orlova, V.N. Semenov, E.Yu. Postnova, S.A. Krasnikov, M.G. Lazarev, S.V. Chekmazov, V.Yu. Aristov, V.G. Glebovsky, S.I. Bozhko, I.V. Shvets, Sci. Rep., **4** (1), 37424 (2014). DOI: 10.1038/srep03742
[13] V.M. Edelstein, Solid State Commun., **73** (3), 233 (1990). DOI: 10.1016/0038-1098(90)90963-C
[14] O.V. Kononenko, V.N. Matveev, A.Yu. Kasumov, N.A. Kislov, I.I. Khodos, Vacuum, **46** (7), 685 (1995). DOI: 10.1016/0042-207X(94)00148-0
[15] L. Fu, C.L. Kane, Phys. Rev. B, **76** (4), 045302 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevB.76.045302
[16] Y. Mozharivskyj, A.O. Pecharsky, S. Bud'ko, G.J. Miller, Chem. Mater., **16** (8), 1580 (2004). DOI: 10.1021/CM035274A