

Помимо оптимизации фотонного пучка по интенсивности излучения, актуальной задачей является фокусировка излучения до размеров меньших, чем длина волны. С практической точки зрения, эта проблема возникает при разработке устройств оптической записи с повышенной плотностью. На рис. 6 показана зависимость ширины фотонного пучка от диаметра цилиндра при неизменной длине волны падающего излучения.

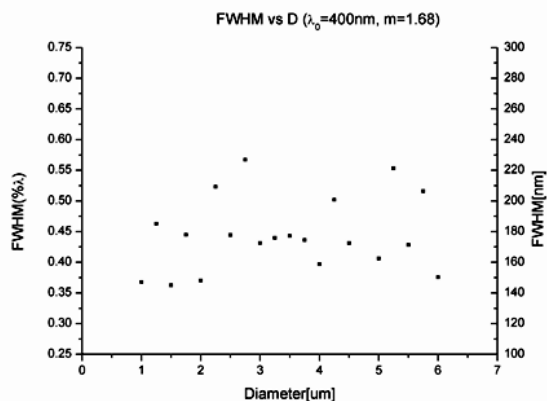


Рис. 6. Зависимость ширины фотонного пучка от диаметра цилиндра с показателем преломления 1,68 при длине волны падающего излучения 400 нм

Рисунок 6 наглядно демонстрирует, что ширина фотонного пучка (центрального максимума) колеблется вблизи $0,43\lambda_0$ и не зависит от диаметра цилиндра. С учетом данных моделирования интенсивности пучка можно утверждать, что при длине волны 400 нм и показателе преломления материала микрорезонатора оптимальные интенсивность и ширина фотонного пучка достигаются при размерах цилиндра от 4 до 6 микрометров.

Заключение. Показано, что распределение рассеянного излучения существенно изменяется с изменением возбуждающей длины волны, хотя фотонные нанопучки не являются результатом резонансного эффекта. Это позволяет подобрать такие диаметры преломляющих цилиндров или сфер, при которых происходит усиление интенсивности центрального дифракционного максимума и уменьшение интенсивности смежных дифракционных максимумов. Установлено, что ширина фотонного нанопучка колеблется вблизи вели-

чины равной, $0,43\lambda_0$. Хотя рассеяние возникает случайным образом, тем не менее, для описания этого явления может быть использована теория Ми. Таким образом, можно подобрать оптимальный размер сферы, чтобы одновременно увеличить максимальную интенсивность центрального максимума, и уменьшить ширину фотонного нанопучка.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Itagi, A.V. Optics of photonic nanojets / A.V. Itagi, W.A. Challenor // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – Vol. 22. – № 12. – P. 2847–2858.
2. Lecler, S. Properties of a three-dimensional photonic jet / S. Lecler, Y. Takakura, P. Meyrueis // Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30. – № 19. – P. 2641–2643.
3. Gerlach, M. Nanojets and directional emission in symmetric photonic molecules / M. Gerlach, Y.P. Rakovich, J.F. Donegan // Opt. Express. – 2007. – Vol. 15. – № 25. – P. 17343–17350.
4. Ferrand, P. Direct imaging of photonic nanojets / P. Ferrand [et al.] // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16. – № 10. – P. 6930–6940.
5. Devilez, A. Spectral analysis of three-dimensional photonic jets / A. Devilez [et al.] // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16. – № 18. – P. 14200–14212.
6. Alexander, H. Experimental confirmation of backscattering enhancement induced by a photonic jet / H. Alexander [et al.] // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89. – № 22. – P. 221118.
7. Chen Z. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Opt. Express. – 2004. – Vol. 12. – № 7. – P. 1214–1220.
8. Gérard, D. Strong electromagnetic confinement near dielectric microspheres to enhance single-molecule fluorescence / Gérard D. [et al.] // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16. – № 19. – P. 15297–15303.
9. McLeod, E. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // Nat Nano. – 2008. – Vol. 3. – № 7. – P. 413–417.
10. Yang, S. Photonic nanojet-induced modes in chains of size-disordered microspheres with an attenuation of only 0.08 dB per sphere / S. Yang, V.N. Astratov // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 92. – № 26. – P. 261111–3.
11. Kong, S.-C. Photonic nanojet-enabled optical data storage / S.-C. Kong [et al.] // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16. – № 18. – P. 13713–13719.

Материал поступил в редакцию 26.11.10

RAKOVICH Y.P., RUSAKOV K.I., GLADYSHCHUK A.A., RUSAKOVA Z.V., CHUGUNOV S.V. Modelling of Photonic Nanojets in Spherical Microcavities

We study the properties of these jets such as beam waist, focal intensity, divergence angle, as a function of refractive index and incident beam diameter. On this way we explore the dependence of the jet properties of this system, proposing propose the optimum sphere size, wavelength and refractive index to minimise the full width at half maximum of the photonic nanojet, while maximising the power in the jet. Our angular spectrum analyses of the photonic nanojets reveals that it is the higher order spatial frequency components bellow the light cone that contribute to the PNJs shape and not the evanescent components. We also show that the evanescent components contribute a small amount to the intensity of the central peak, however the angular intensity distribution is determined by the spherical geometry.

УДК 669.046:539.4.019.3

Пинчук А.И.

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ СКОЛЬЖЕНИЕМ И ДВОЙНИКОВАНИЕМ В КРИСТАЛЛАХ ПОЛУМЕТАЛЛОВ

Введение. В последнее время широко изучается вопрос влияния внешнего электрического и магнитного поля на физико-механические свойства металлов. Использование электромагнитных методов воздействия привлекательно возможностью значительного

изменения пластических и прочностных характеристик металлов, легкостью осуществления, локальностью воздействия, максимально возможным в природе быстродействием и другими преимуществами. В последние два десятилетия активно исследуется магнитопла-

Пинчук А.И., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, информатика

стический эффект (МПЭ) в металлах. Влияние слабого магнитного поля (МП) (для которого выполняется соотношение $\mu_B B = kT$, где μ_B – магнетон Бора, B – индукция МП, k – постоянная Больцмана) проявляется в пластификации диамагнитных кристаллов. В таких материалах магнитная энергия, приходящаяся на одну элементарную ячейку, по порядку величины равняется $U_m \approx B^2 a^3 / \mu$, что на два порядка меньше энергии теплового движения молекул. Однако итоги интенсивных исследований МПЭ последнего десятилетия, проведенных несколькими независимыми группами исследователей в разных странах, убедили даже скептиков в реальности эффектов существенного влияния слабых МП на механические свойства многих немагнитных материалов [1].

К настоящему времени практически не изучен вопрос о механизмах влияния МП на пластическую деформацию в кристаллах, в которых она реализуется как скольжением, так и двойникованием. Двойникование наблюдается во многих кристаллических системах. Известно, что двойниковые границы влияют на электрические, магнитные и оптические свойства кристаллических тел, на сверхпроводимость. Поэтому установление закономерностей магнитоэластического эффекта в кристаллах полуметаллов позволит углубить представления о МПЭ в металлах с низкосимметричными кристаллическими решетками и разработать основу для нового метода управления процессом пластической деформации в двойниующихся кристаллах.

Методика исследования. Удобным модельным объектом для исследований в этом направлении являются клиновидные двойники, образующиеся при вдавлении алмазного индентора в плоскость спайности (111) кристаллов висмута и сурьмы. Процесс пластической деформации при механическом двойниковании локализован на границе двойника. Это дает основания полагать, что изучение движения границ двойника позволит понять основные закономерности пластического течения материала при одновременном воздействии механической нагрузки и МП.

Для исследования были выбраны монокристаллы висмута и сурьмы, выращенные по методу Бриджмена из сырья химической чистоты. Образцы получались раскалыванием по плоскости спайности и имели вид прямоугольных призм и размеры порядка $10 \times 5 \times 5$ мм. Измерения проводились с помощью микротвердомера ПМТ-3, алмазная пирамидка которого представляет собой сосредоточенную нагрузку. Алмазный индентор внедрялся в плоскость совершенной спайности (111) кристаллов сурьмы и висмута. Изучалось поведение клиновидных двойников системы $\{110\} \langle 001 \rangle$ в зависимости от различных условий приложения сосредоточенной нагрузки и постоянного МП.

Полученные в работе результаты не могут быть следствием действия на образец таких инструментальных факторов, как поперечные силы или вихревое электрическое поле, возникающее при включении МП или внесении в него образца. Нами были выполнены многочисленные контрольные опыты. Они показали, что резкое или плавное включение или выключение МП не меняет размер отпечатков алмазной пирамидки, получаемых с «нулевой» нагрузкой на штоке индентора. Это объясняется тем, что нагрузочный узел микротвердомера и экспериментальная установка, изготовленная как приставка к микротвердомеру ПМТ-3, состояли исключительно из неферромагнитных металлов.

В опытах с помощью окуляр-микрометра ПМТ-3 непосредственно измерялись длина и ширина клиновидных двойников, а также их число у отпечатка алмазного индентора. Точки на экспериментальных кривых получены путем усреднения результатов измерений размеров клиновидных двойников, заклинившихся вокруг 20 и более отпечатков. Экспериментальная погрешность не превышала 3%.

Металлографический анализ поверхности образцов при различных режимах воздействия МП и без него дает возможность судить о характере и кинетике развития двойниковых прослоек и формоизменения, обусловленного скольжением. Деформированные зоны во-

круг отпечатков алмазной пирамидки изучались с помощью оптической и растровой электронной микроскопии.

Влияние магнитного поля на двойникование. В нашей первой работе, посвященной МПЭ, было отмечено, что двойникование в кристаллах висмута, возникающее при воздействии сосредоточенной нагрузки и МП, частично подавляется приложением поля [2]. Для подтверждения данного вывода нами был проведен опыт с МПЭ в кристаллах сурьмы. Как известно, температура плавления в этих кристаллах существенно больше, чем температура плавления висмута, поэтому двойникование в сурьме является более предпочтительным видом пластической деформации. Известно, что работа силы тяжести груза на штоке индентора расходуется на зарождение и рост двойников. Но скорость процесса двойникования велика по сравнению со скольжением (сотни метров в секунду). Поэтому двойники быстро уносят упругую энергию от концентраторов напряжений. Как и в случае кристаллов висмута, получено, что приложение МП к кристаллам сурьмы ведет к снижению средней длины L клиновидных двойников, заклинившихся у отпечатка индентора. Однако важно отметить тот факт, что МП стимулирует работу источников двойниующих дислокаций, поскольку отношение толщин двойников h/h_0 больше в присутствии МП. Пластифицирующее влияние МП проявляется также в увеличении числа клиновидных двойников у устья, в пользу чего свидетельствует рост отношения числа двойников N/N_0 в поле и без него. По этим причинам увеличивается площадь границ раздела двойник-матрица, а также сдвойникованный объем. Подтверждение полученных результатов можно видеть на приведенных ниже микрофотографиях. При экспозиции образца в МП длина двойников снижается, но число их растет. Особенно это заметно для двойников, имеющих малую длину.



Рис. 1. Картина деформации без приложения МП. $\times 200$



Рис. 2. Картина деформации при воздействии МП. $\times 200$

В плане энергетического баланса важно отметить, что уменьшение длины клиновидных двойников в кристаллах полуметаллов при приложении постоянного МП не сопровождается изменением объемной упругой энергии, запасенной в клиновидных двойниках. Приложение МП снижает поверхностную энергию межфазной границы раздела двойник-матрица. Объемная упругая энергия двойника оценивалась из соотношения:

$$W_V = \frac{G(sh)^2}{L^2}VN,$$

где h – ширина клиновидного двойника у устья, L – его длина, $s=0,694$ – множитель, V – усредненный объем двойника, G – модуль сдвига [3]. Поверхностная энергия границ раздела двойник-матрица находилась как

$$W_S = GaSN,$$

где a – параметр решетки кристалла, S – усредненная площадь границ раздела двойник-матрица. Поскольку форму двойниковых прослоек, возникающих при точечном нагружении, можно аппроксимировать линзой, то объем двойника находился из формулы объема шарового сегмента. Радиус основания шарового сегмента принимался равным усредненной длине клиновидного двойника, а толщина сегмента равной средней толщине клиновидного двойника у устья.

Влияние магнитного поля на скольжение. Для исследования влияния МП на скольжение использовались монокристаллы висмута. Они имеют меньшую температуру плавления, и поэтому скольжение в них более развито, чем в кристаллах сурьмы.

Процесс индентирования сопровождается либо вмятием материала вглубь кристалла, либо выдавливанием материала на поверхность и образованием навалов около отпечатков. При внедрении индентора в плоскость спайности (111) кристаллов типа висмута

активны системы скольжения $\{11\bar{1}\}$. Они подразделяются на две

подгруппы. Первая образована плоскостями, образующими тупой угол с направлением действия силы (расходящиеся плоскости). При внедрении индентора материал смещается вглубь по этим плоскостям. Вторая подгруппа образована плоскостями, образующими острый угол с направлением действия силы (сходящиеся плоскости). Вынос материала на поверхность и, как следствие, образование навалов вокруг отпечатка индентора происходит вдоль сходящихся плоскостей. При комнатных температурах, без приложения внешних полей пластическое течение материала имеет место только вдоль расходящихся плоскостей благодаря тому, что двойники препятствуют переносу материала по сходящимся плоскостям [4]. Навальные плоскости активны только при повышенных температурах. Вследствие пластической деформации имеет место отклонение формы отпечатков индентора (алмазной пирамиды с квадратным основанием) от квадратной. Около вогнутых сторон имеет место опускание материала, около выпуклых – вспучивание [5].

МП поле оказывает стимулирующее воздействие на пластическую деформацию скольжением, в пользу чего свидетельствует увеличение размеров дислокационной розетки. В [6] нами был обнаружен пороговый характер магнитоэластического эффекта в кристаллах висмута при одновременном приложении сосредоточенной нагрузки и постоянного МП, который заключается в скачкообразном падении средней длины клиновидных двойников на плоскости спайности (111) кристаллов висмута и, как следствие, в скачкообразном уменьшении суммарного сдвоенного объема кристалла. По достижении порогового уровня МП в 0,2 Тл происходит существенное изменение и в характере скольжения. Навальные плоскости, которые активны только при повышенных температурах, при внесении образца в МП вносят вклад в скольжение.

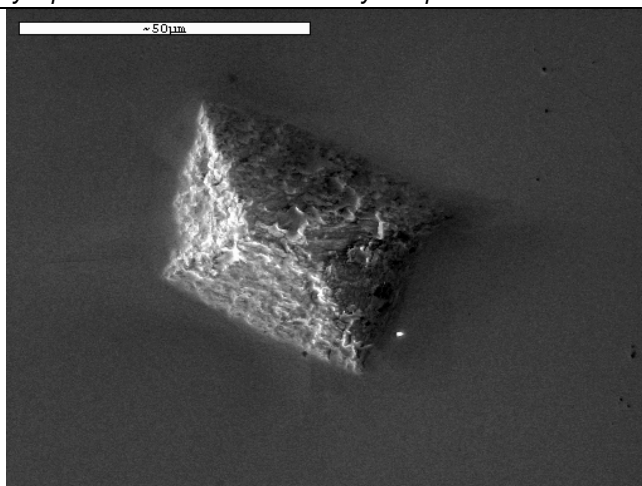


Рис. 3. Форма отпечатка при нагрузке 0,14 Н и индукции МП 0,1. Тл

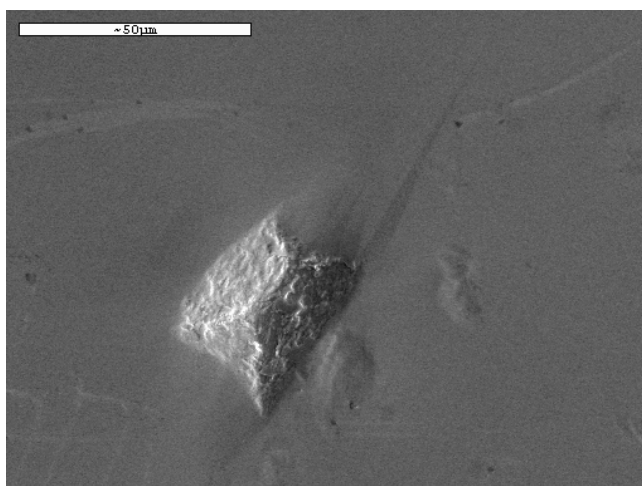


Рис. 4. Форма отпечатка при нагрузке 0,14 Н и индукции МП 0,2. Тл

Как видно из приведенных микрофотографий, форма отпечатков алмазного индентора, которая в отсутствии МП является прямоугольной (рис. 3), в поле становится выпуклой (или округлой) (рис. 4). Это свидетельствует в пользу интенсификации скольжения в кристаллах висмута по навальным плоскостям, по которым материал движется к поверхности кристалла. Можно также видеть навалы материала около сторон отпечатка.

Микротвердость кристаллов висмута плавно изменяется и обнаруживает тенденцию к повышению с увеличением индукции МП. Последнее явление объясняется упрочнением кристалла под индентором при приложении магнитного поля за счет работы нескольких систем скольжения [6].

Заключение. Приложение постоянного магнитного поля к кристаллам полуметаллов позволяет влиять на процессы зарождения и развития двойниковых прослоек в условиях сопутствующего скольжения. Воздействие постоянного магнитного поля увеличивает интенсивность пластической деформации в этих кристаллах как скольжением, так и двойникованием. Пластифицирующее влияние МП в случае двойникования выражается в интенсификации работы источников двойнивающих дислокаций, в случае скольжения – в возникновении движения материала вверх по навальным плоскостям.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Головин, Ю.И. Магнитоэластичность твердых тел / Ю.И. Головин // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, вып. 5. – С. 769–803.
2. Магнитоэластический эффект в случае двойникования кристаллов висмута под воздействием сосредоточенной нагрузки / А.И. Пинчук [и др.] // Физика твердого тела.. – 2001. – Т. 43, вып. 1. – С. 39–41.

3. Объемная упругая энергия двойников кристаллов висмута и поверхностная энергия границы раздела двойник-матрица в магнитном поле / А.И. Пинчук [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, вып. 11. – С. 1964–1966.
4. Боярская Ю.С. Физика процессов микроиндентирования / Ю.С. Боярская, Д.З. Грабко, М.С. Кац; под ред. Ю.С. Боярской. – Кишинев: Штиинца, 1986. – 294 с.
5. Грабко Д.З. Механические свойства полуметаллов типа висмута / Д.З. Грабко, Ю.С. Боярская, М.П. Дынту; под ред. Д.З. Грабко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 132 с.
6. Пороговый характер магнитоэластического эффекта при двойниковании в кристаллах висмута / А.И. Пинчук [и др.] // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, вып. 9. – С. 1603–1604.

Материал поступил в редакцию 29.11.10

PINCHUK A.I. The influence of constant magnetic field on plastic deformation in case of gliding and twinning in semimetals crystals

It has been established that the application of weak constant magnetic field (less than 1 T) to semimetals crystals (bismuth and antimony) plasticizes the samples in case of micro indentation. In case of twinning, magnetic field facilitates the nucleation of twinning dislocations. In case of gliding, magnetic field promotes material's movement to the surface of samples.

УДК 004.8

Якимов Е.А., Замураев В.Г., Якимов А.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С РАВНОМЕРНЫМ, НОРМАЛЬНЫМ И ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМ ШУМОМ С ПОМОЩЬЮ SSA-МЕТОДА

Введение. В практике имитационного моделирования исследованию входных последовательностей данных должно быть уделено значительное внимание. Это подтверждается и анализом публикаций по материалам работы Winter Simulation Conference. Например, Л. Лимис (L. Leemis, 2003) выделяет отдельным этапом моделирование исходных данных [1]. А. Гупта и Е. Парзен (A. Gupta, E. Parzen, 2004) предлагают статистические методы моделирования входных данных. При этом выдвигается гипотеза о характере распределения, выбираются возможные модели, оцениваются параметры и проводится анализ наиболее подходящей из них [2]. Е. К. Лада (E. K. Lada [etc.], 2005) проводит анализ методов моделирования входных данных, обращая особое внимание на бета-распределение и распределение Джонсона, а также на непараметрические методы исследования [3]. В то же время практика требует дальнейших исследований входных последовательностей данных.

Метод сингулярного спектрального анализа (SSA-метод) используется для анализа временных рядов и может быть использован на каждом из этапов эксплуатации имитационной модели (ИМ). Он позволяет выделить ряды, которые описывают тренд первоначального ряда, гармонические колебания и те составляющие рядов, которые относят к «шуму». При этом метод не требует стационарности ряда, знания модели тренда, а также сведений о наличии в ряде периодических составляющих и их периодах [4]. Также с помощью данного метода можно определить модель тренда и использовать это знание для дальнейшей обработки ряда уже с известной моделью тренда, что важно, например, при автоматизации определения длительности переходного процесса в ИМ [5].

Методика исследования SSA-метода на основе информационных технологий. Для исследования SSA-метода применяется комплекс информационных технологий, представленный табличным процессором MS Excel, математическим пакетом Mathcad и пакетом статистической обработки данных Statistica.

Этап вложения. Для экспериментальных исследований исходный ряд $G = (g_0, g_1, \dots, g_{N-1})$ может быть задан по известным функциям либо определен результатами функционирования исследуемой системы. По известным функциям ряд формируется на рабочем листе MS Excel и затем в пакете Mathcad формируется матрица A , которая по правилам построения является ганкелевой [6].

Процедура вложения является преобразованием исходного одномерного ряда $G = (g_0, g_1, \dots, g_{N-1})$ в последовательность L -мерных векторов, число которых равно $K=N-L+1$:

$$A_i = (g_{i-1}, \dots, g_{i+L-2})^T, \quad 1 \leq i \leq K. \quad (1)$$

Эти вектора образуют траекторную матрицу $A = [A_1; \dots; A_K]$ ряда G , в которой $a_{ij} = g_{i+j-2}$, т. е. матрица A имеет одинаковые элементы на диагонали $i+j = \text{const}$.

Этап сингулярного разложения. Обозначим $S = A \cdot A^T \in R^{L \times L}$. Матрица $A \cdot A^T$ симметричная и неотрицательно определенная, а значит ее собственные числа $\{\lambda_k\}_{k=1}^L$ вещественны и неотрицательны. Представленные в виде $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ собственные числа называют сингулярными значениями матрицы A . Пусть U_1, \dots, U_L – соответствующие им ортонормированные собственные вектора. Будем называть $p = \max\{k | \lambda_k > 0\}$ порядком сингулярного разложения. Обозначим

$$V_k = \frac{1}{\sqrt{\lambda_k}} A^T U_k, \quad k = 1, \dots, p. \quad (2)$$

Тогда сингулярным разложением матрицы A называется ее представление в виде суммы элементарных матриц

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_p, \quad A_k = \sqrt{\lambda_k} U_k V_k^T. \quad (3)$$

Каждая из матриц A_k имеет ранг, равный единице. Поэтому их можно назвать элементарными матрицами. Вектор U_k называют k -м левым сингулярным вектором или просто k -м собственным вектором, вектор V_k – правым сингулярным вектором. Набор $\langle \sqrt{\lambda_k}, U_k, V_k \rangle$ называют k -ой собственной тройкой.

Собственные числа $\{\lambda_k\}_{k=1}^L$ матрицы A в пакете Mathcad представлены вектором d . Вектор d сингулярных значений в Mathcad определяется с использованием функции svds() [7]:

Якимов Евгений Анатольевич, аспирант кафедры «Автоматизированные системы управления» Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Замураев Виталий Геннадьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Высшая математика» Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Якимов Анатолий Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет». 212030, Республика Беларусь, г. Могилев, просп. Мира, 43.