

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 542.973

ВЛИЯНИЕ ТИПА И КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ
ПРИМЕСИ НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ
ВИСМУТАТА СТРОНЦИЯ $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$

© 2022 г. Д. С. Штарев^{а, *}, А. В. Штарева^а, А. Ю. Петрова^б

^аДальневосточный федеральный университет, о. Русский, п. Аякс, 10, Владивосток, 690922 Россия

^бИнститут тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю. Чена, 65, Хабаровск, 680000 Россия

*e-mail: shtarev@mail.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022 г.

После доработки 07.04.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

Исследованы оптические и фотокаталитические свойства висмутата стронция, легированного различными редкоземельными элементами. Представленные данные свидетельствуют о том, что тип и концентрация легирующей примеси по-разному влияют на такие параметры данного полупроводникового фотокатализатора, как ширина оптической запрещенной зоны, поглощение в несобственной области и фотокаталитическая активность. На основании проведенных исследований определены наиболее перспективные редкоземельные элементы и установлены их оптимальные концентрации для легирования такого представителя висмутатов щелочноземельных металлов, как $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$.

Ключевые слова: фотокатализаторы видимого света, висмутаты стронция, легирование, редкоземельные элементы

DOI: 10.31857/S0044457X22090148

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия вырос интерес исследователей к изучению структуры и свойств сложных оксидов на основе висмута в целом [1–41] и висмутатов различных щелочноземельных металлов: магния [1–5], кальция [6–15], стронция [17–27] и бария [28–38] в частности. Одной из наиболее перспективных областей их применения является гетерогенный фотокатализ. Перспективностью применения в этой области именно висмутатов щелочноземельных металлов обусловлена рядом факторов. Во-первых, ширина их запрещенной зоны, как правило, достаточно мала для поглощения излучения видимого оптического диапазона. Во-вторых, в работах [42, 43] было показано, что данный класс полупроводниковых материалов можно выделить в отдельный класс фотоактивных материалов с нетипичной зависимостью потенциалов энергетических зон (валентной зоны и зоны проводимости) от ширины запрещенной зоны. Эти два фактора делают возможным применение висмутатов щелочноземельных металлов для фотокаталитической минерализации органических гидро- и аэроплютантов [3, 5, 6, 10, 19, 24, 26], фотолитиза воды [7, 8, 35, 36], синтеза солнечного топлива за счет восстановления углекислого газа в присутствии воды

[31, 38], селективного восстановления ионов металлов из растворов [44] или прямого преобразования солнечной энергии в электрическую [37]. Отдельно можно выделить работы по исследованию антибактериальной активности висмутатов щелочноземельных металлов [17, 19].

Наряду с исследованием свойств чистых висмутатов щелочноземельных металлов проводятся работы по повышению их фотокаталитической активности. Можно выделить два основных подхода: создание гетероструктур на основе висмутатов щелочноземельных металлов [8, 13, 17, 19] или их легирование [12, 20, 21, 36]. Однако, как правило, в работах, где исследуются свойства легированных висмутатов щелочноземельных металлов, авторы используют очень большие концентрации легирующей примеси. Так, в работе [36] концентрация ниобия в структуре BaBiO_3 достигает 0.465 атомов на элементарную ячейку, в работе [20] концентрация лантана в структуре $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ – 0.2 атомов на элементарную ячейку. При таких значительных концентрациях сложно говорить о том, что авторы работают с легированными образцами висмутатов щелочноземельных металлов. Исследователи обычно концентрируются на изучении влияния одной легирующей примеси, при этом не всегда понятна мотивация ее выбора.

Цель работы – установление степени влияния, типа и концентрации легирующей примеси на оптические и фотокаталитические свойства висмутата щелочноземельного металла на примере висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$. Выбор данного висмутата стронция обусловлен тем, что его фотокаталитические и оптические свойства детально исследованы рядом научных групп [16, 20–22, 26, 27]; он прост в получении и имеет высокую толерантность к дефектам, что позволяет вводить в него легирующие примеси без существенных деформаций кристаллической решетки с сохранением ее фазовой однородности [26].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы. Все прекурсоры, используемые для синтеза висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ (тетрагидрат нитрата стронция $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и оксид висмута Bi_2O_3) и его легирования редкоземельными металлами (оксиды церия CeO_2 , иттрия Y_2O_3 и лантана La_2O_3), имели квалификацию “х. ч.”; метиленовый синий (МС), использованный для оценки фотокаталитической активности, – квалификацию “ч. д. а.”.

Методики синтеза объектов исследования. Для получения как чистого, так и легированных образцов висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ использовали твердофазный синтез, показавший ранее [26, 27] свою эффективность. Прекурсоры смешивали в стехиометрических соотношениях, после чего подвергали двустадийному нагреву на воздухе: при 650°C в течение 12 ч и при 750°C в течение 72 ч. Концентрации легирующих элементов составляли 0.00002, 0.0002, 0.002, 0.02 и 0.2 атома на элементарную ячейку, что соответствует атомным концентрациям $2 \cdot (2) \times 10^{-7}$, $2 \cdot (2) \times 10^{-6}$, $2 \cdot (2) \times 10^{-5}$, $2 \cdot (2) \times 10^{-4}$ и $2 \cdot (2) \times 10^{-3}$ ат. % соответственно. В дальнейшем использовали следующую систему обозначения образцов: $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5 + \text{XM}$, где X – концентрация легирующего элемента, а M – легирующий элемент (Ce, Y, La). Чистый висмутат стронция без легирующей примеси обозначается как $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$.

Методы характеристики объектов исследования. Фазовый состав полученных образцов контролировали методом рентгенофазового анализа. Для этого использовали порошковый дифрактометр Rigaku Miniflex II с источником $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Данные собирали в диапазоне углов 2θ от 10° до 80° с интервалом 0.016° и временем накопления 1 с.

Влияние типа и количества легирующей примеси на оптические свойства исследовали методом спектроскопии диффузного отражения. Для этого применяли УФ-Вид-БИК спектрофото-

метр Cary 5000 с внешней интегрирующей сферой DRA 2500. В качестве стандарта использовали оптически чистый сульфат бария BaSO_4 .

Определение фотокаталитической активности. Фотокаталитическую активность объектов исследования определяли по скорости разложения МС в водной суспензии. Концентрация красителя в водном растворе составляла 5 мг/л. В водный раствор МС вносили порошок исследуемого висмутата стронция из расчета 300 мг порошка на 300 мл водного раствора красителя. Перед облучением суспензии выдерживали при постоянном перемешивании в темноте в течение 45 мин для достижения абсорбционно-десорбционного равновесия. Облучение осуществляли Хелампой мощностью 150 Вт (Osram, Germany) через фильтр отсечки ($\lambda > 410$ нм). Освещенность у поверхности реакторов составляла 7 мВт/см². Через равные промежутки времени из реакторов отбирали аликвоты, которые затем центрифугировали для отделения жидкой фазы. Концентрацию МС в ней определяли с помощью спектрофотометра Helios Alpha (Thermo Scientific) по площади пика характерного поглощения.

Расчет потенциалов потолка валентной зоны и дна зоны проводимости. Потенциалы потолка валентной зоны и дна зоны проводимости полупроводников в точке нулевого заряда (pH_{zpc}) рассчитывали по эмпирическим формулам, предложенным Батлером и Гинли [45]:

$$E_{CB} = X - E_e - 0.5E_g, \quad (1)$$

$$E_{VB} = X - E_e + 0.5E_g, \quad (2)$$

где E_{CB} , E_{VB} – потенциалы потолка валентной зоны и дна зоны проводимости соответственно; X – абсолютная электроотрицательность полупроводника в милликеновском смысле; E_e – энергия свободного электрона в водородной шкале (~ 4.5 эВ); E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Абсолютная электроотрицательность полупроводника может быть рассчитана как среднее геометрическое абсолютных электроотрицательностей атомов в элементарной ячейке кристаллической решетки:

$$X = \left(\prod_{i=1}^n \chi_i \right)^{1/n}, \quad (3)$$

где χ_i – абсолютная электроотрицательность i -го атома в элементарной ячейке полупроводника, n – количество атомов в элементарной ячейке полупроводника.

Обобщенную формулу исследуемого висмутата стронция в первом приближении можно запи-

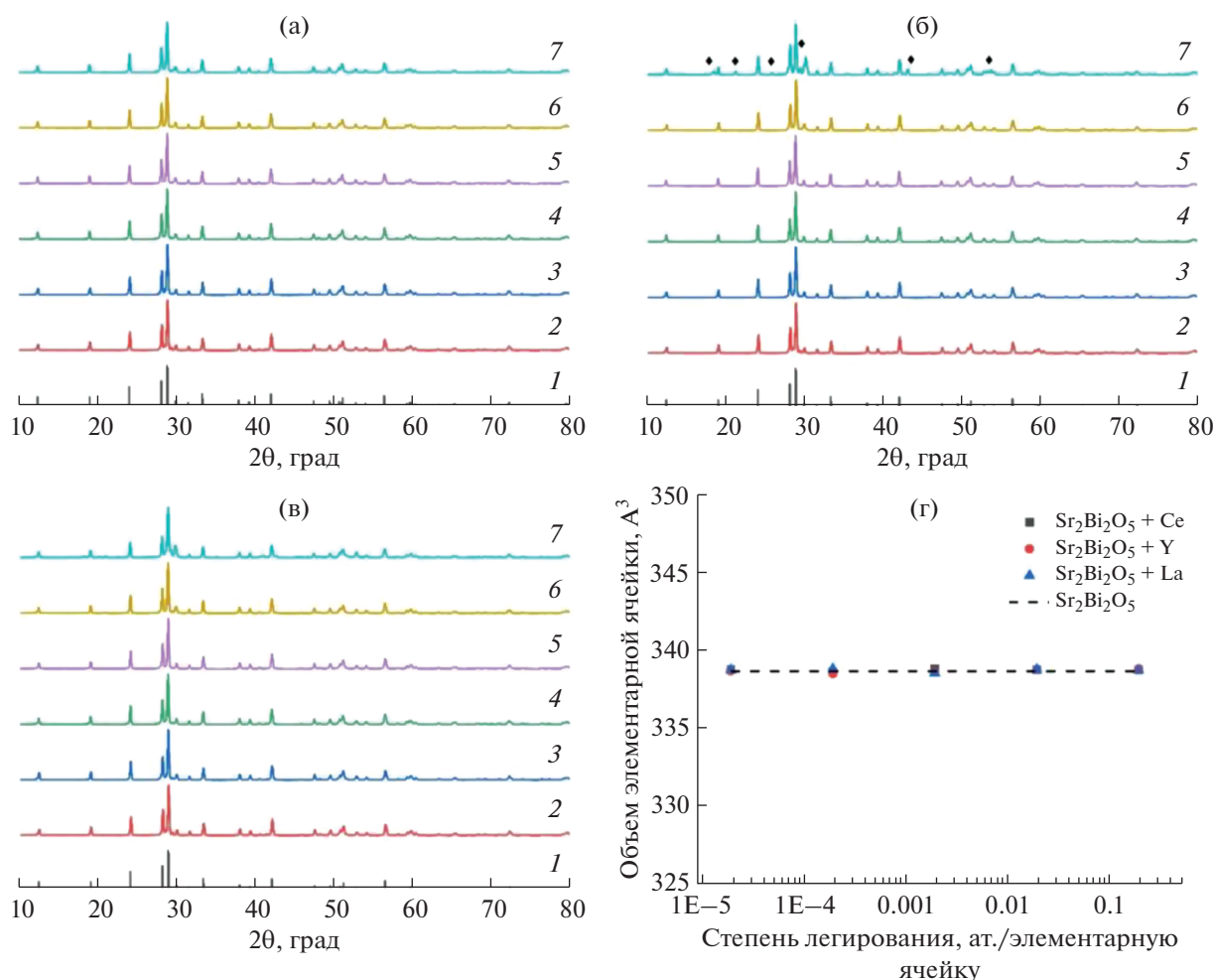


Рис. 1. Рентгенограммы образцов висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$, легированных Ce (а), Y (б) и La (в): 1 – эталонная рентгенограмма $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ (PDF-2, card № 01-089-1553); 2 – экспериментальная рентгенограмма чистого $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$; 3–7 – рентгенограммы легированных образцов $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5 + \text{XM}$, где $X = 0.00002$ (3), 0.0002 (4), 0.002 (5), 0.02 (6), 0.2 (7); ♦ – рефлексы примесной фазы SrBi_2O_4 . На графике (г) представлена зависимость объема элементарной ячейки от типа и степени легирования висмутата стронция.

сать как $\text{Sr}_{2-x/2}\text{Bi}_{2-x/2}\text{M}_x\text{O}_5$. С учетом этого формулы (1), (2) можно переписать в виде:

$$E_{CB}(\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5 + \text{XM}) = \sqrt[9]{\chi_{\text{Sr}}^{2-x/2} + \chi_{\text{Bi}}^{2-x/2} + \chi_{\text{M}}^x + \chi_{\text{O}}^5 - E_e - 0.5E_g}, \quad (4)$$

$$E_{VB}(\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5 + \text{XM}) = \sqrt[9]{\chi_{\text{Sr}}^{2-x/2} + \chi_{\text{Bi}}^{2-x/2} + \chi_{\text{M}}^x + \chi_{\text{O}}^5 - E_e + 0.5E_g}. \quad (5)$$

Далее анализ влияния типа и концентрации легирующих примесей на потенциалы потолка валентной зоны и дна зоны проводимости будет вестись на основе расчетов, выполненных по формулам (4), (5) с учетом значений ширины запрещенных зон, определенных для каждого образца экспериментально.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый состав всех синтезированных описанным выше способом легированных образцов висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ исследовали методом рентгенофазового анализа, результаты приведены на рис. 1.

Видно, что введение легирующих примесей в структуру висмутата стронция проявляется в виде увеличения поглощения в несобственной области. Однако тип легирующей примеси по-разному влияет на подобное увеличение поглощения (рис. 2б). Введение Ce и La в структуру висмутата стронция проявляется одинаково: чем больше легирующей примеси, тем большее поглощение в несобственной области возникает. При этом при введении лантана данный эффект чуть более выражен, чем при введении церия. Изменение же количества иттрия в структуре висмутата строн-

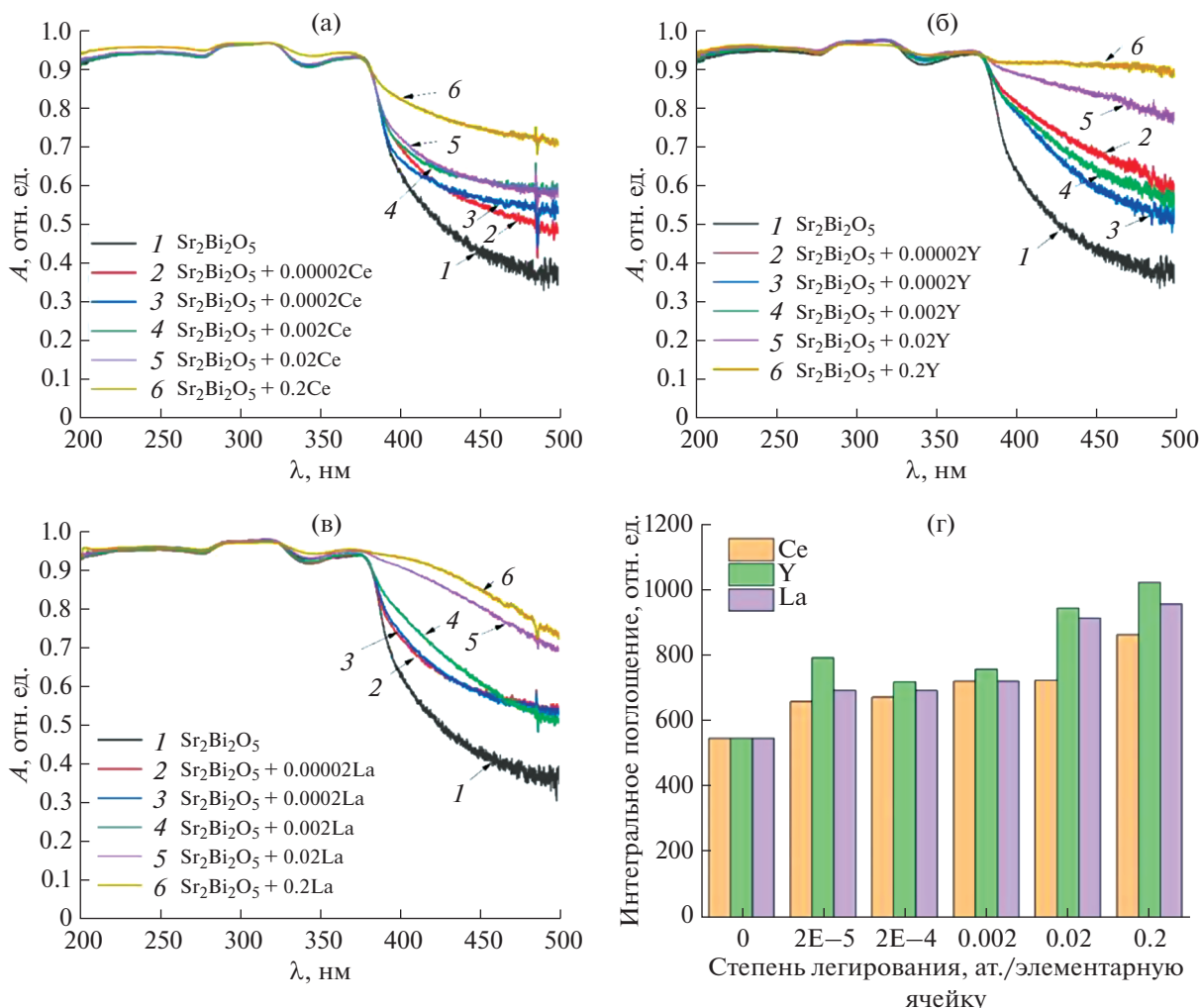


Рис. 2. Спектры диффузного отражения висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$, легированного Ce (а), Y (б) и La (в), а также общее поглощение в несобственной области (г).

ция проявляется нелинейно: содержание 0.00002 атомов Y на элементарную ячейку характеризуется резким увеличением поглощения в несобственной области (рис. 2г). Полученные спектры диффузного отражения позволяют применить подход Тауца для определения ширины запрещенной зоны легированных образцов висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ (рис. 3). При этом целесообразно использовать приближение прямых разрешенных переходов, так как ранее было показано [20], что висмутат стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ является примозонным полупроводником.

Видно, что легирующие примеси по-разному влияют на изменение оптической ширины запрещенной зоны. Исследование чистого висмутата стронция показало, что он обладает шириной запрещенной зоны $E_g = 3.21$ эВ, что хорошо согласуется с полученными ранее данными [20, 21, 26]. Введение церия в состав образца никак не влияет

на E_g во всем диапазоне концентраций. Напротив, введение иттрия в состав висмутата стронция сопровождается постепенным уменьшением E_g с 3.21 до 3.18 эВ (рис. 3г). Введение в качестве легирующей примеси лантана проявляется следующим образом: малые его концентрации (до 0.002) не влияют на E_g , тогда как введение La в больших количествах сопровождается уменьшением E_g до 3.05 эВ, что также согласуется с данными [20].

Проведенные измерения ширины запрещенной зоны для висмутата стронция, легированного различными концентрациями разных редкоземельных элементов, позволяют произвести оценку потенциалов дна зоны проводимости и потолка валентной зоны по формулам (4), (5). Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Фотокаталитическую активность как чистого висмутата стронция, так и образцов висмутата стронция, легированного различными редкозе-

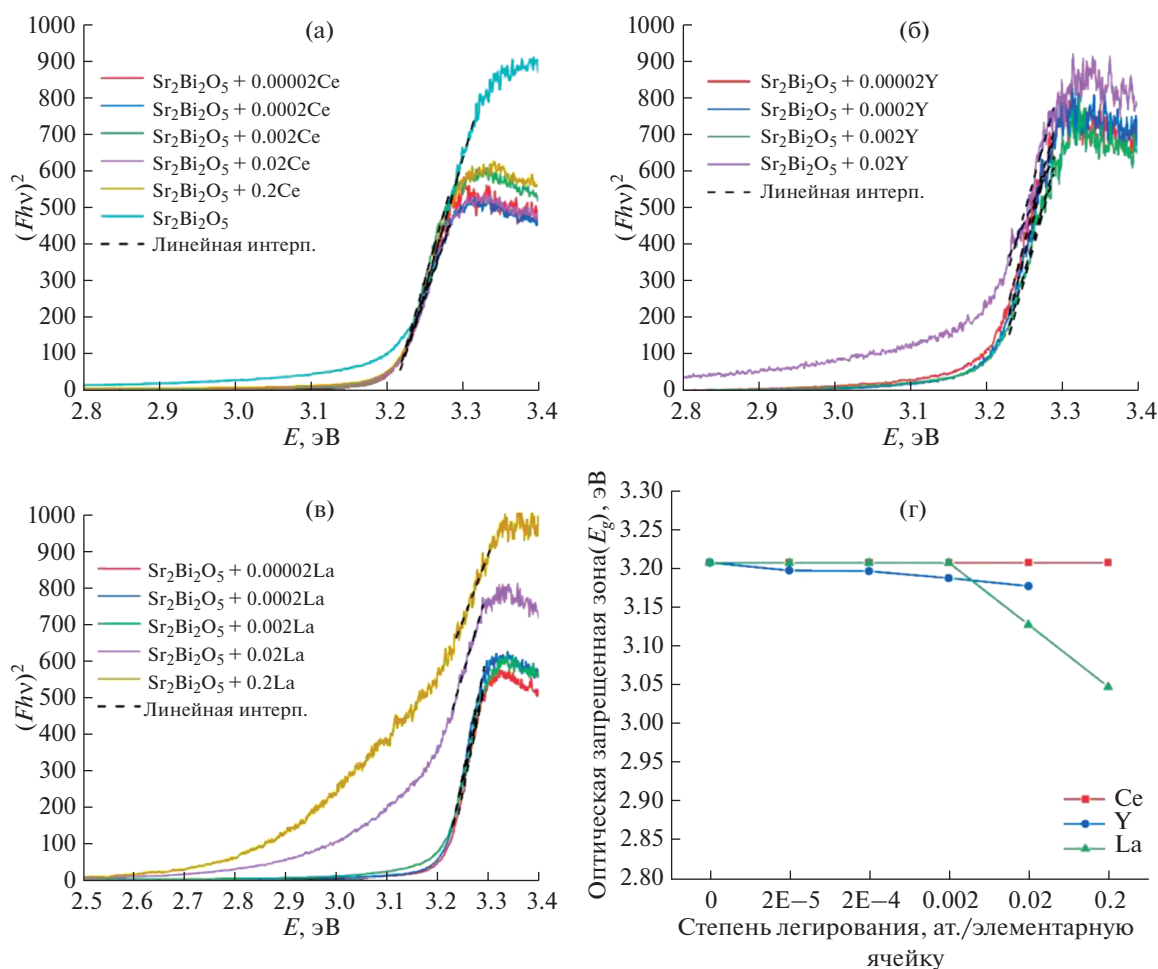


Рис. 3. Графики Тауца для висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$, легированного Ce (а), Y (б), La (в), и определенная по ним ширина запрещенных зон (г).

Таблица 1. Потенциалы потолка валентной зоны и дна зоны проводимости висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ в зависимости от типа и концентрации легирующей примеси

Легирующий элемент	Концентрация, ат. на элементарную ячейку	E_{VB} , эВ	E_{CB} , эВ
—	—	+0.177	−3.033
Y	0.00002	+0.172	−3.028
	0.0002	+0.172	−3.027
	0.002	+0.167	−3.023
	0.02	+0.162	−3.018
Ce	0.00002	+0.177	−3.033
	0.0002	+0.177	−3.033
	0.002	+0.177	−3.033
	0.02	+0.177	−3.033
La	0.2	+0.177	−3.033
	0.00002	+0.177	−3.033
	0.0002	+0.177	−3.033
	0.002	+0.177	−3.033
	0.02	+0.137	−2.993
	0.2	+0.097	−2.953

мельными металлами, исследовали по скорости разложения метиленового синего в водном растворе. На рис. 4а–4в приведены кривые разложения МС в присутствии как чистого висмутата стронция, так и образцов, легированных различными металлами, а также кривая некаталитического разложения МС.

Видно, что некаталитическое разложение МС хорошо описывается линейной кинетикой (пунктирная линия на рис. 4а), тогда как в присутствии висмутатов стронция уменьшение концентрации МС в растворе можно описать уравнением вида:

$$C(\tau)/C(0) = Ae^{-k\tau}, \quad (6)$$

где $C(0)$ и $C(\tau)$ – концентрации МС в начальный момент (до установления адсорбционно-десорбционного равновесия) и спустя τ мин облучения, A – константа, k – скорость разложения.

Видно, что скорость разложения МС зависит как от типа легирующей примеси, так и от ее количества (рис. 4г). Так, введение иттрия в висму-

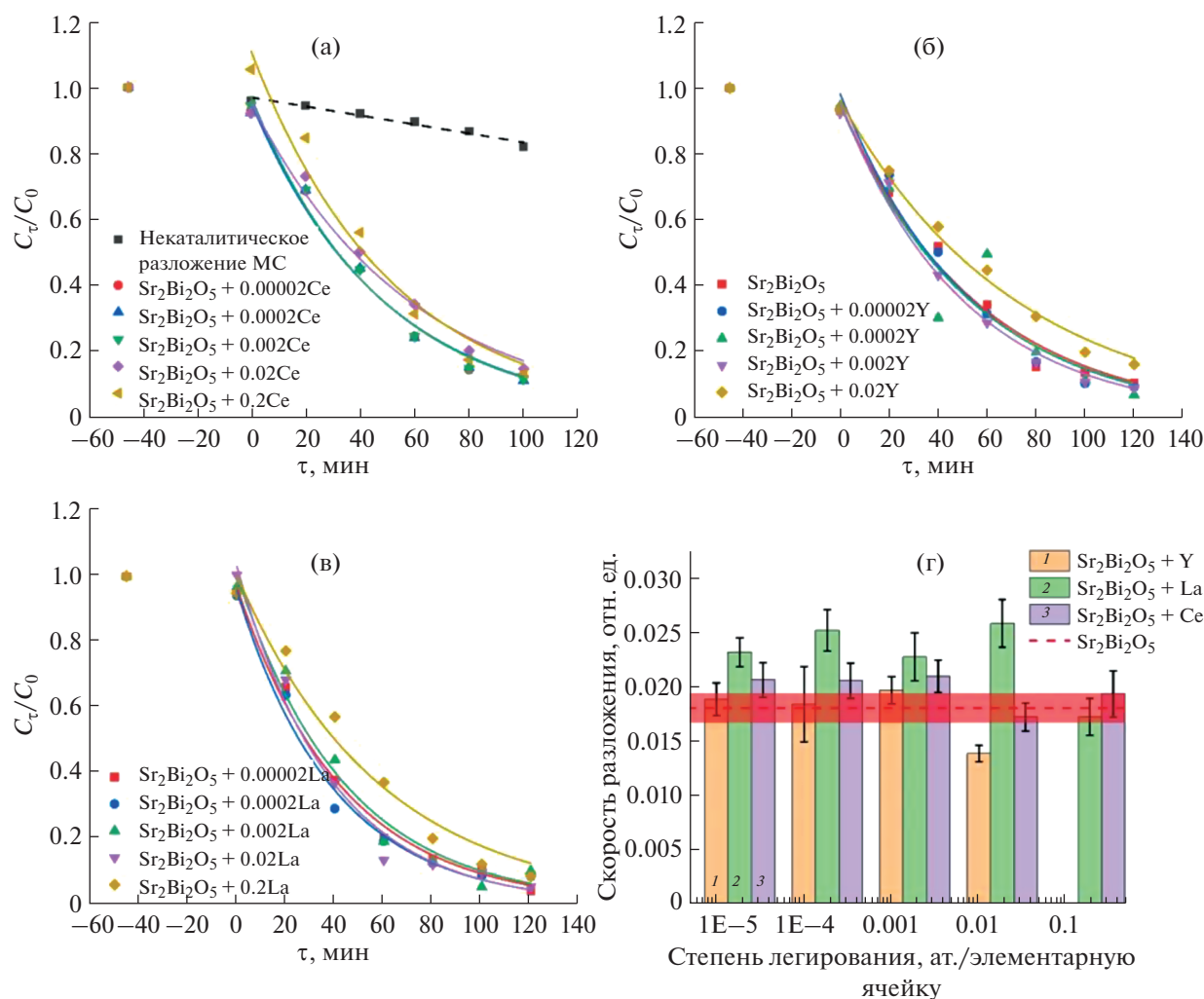


Рис. 4. Кривые разложения (сплошные линии) МС в присутствии чистого висмутата стронция и $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$, легированного Се (а), Y (б) и La (в), а также определенная по ним скорость разложения (г). Пунктирная линия на рисунке (а) – кривая разложения МС без фотокатализатора, пунктирная линия на рисунке (г) – скорость разложения МС в присутствии чистого висмутата стронция, полупрозрачная область вокруг нее – доверительный интервал.

тат стронция или никак не сказывается на его фотокаталитической активности (для образцов 0.00002–0.002), или снижает ее (для образца 0.02). Для церия область оптимальных концентраций легирующей примеси составляет от 0.00002 до 0.002, для лантана несколько шире – от 0.00002 до 0.02, дальнейшее увеличение количества примесей в обоих случаях сопровождается падением фотокаталитической активности до значений, характерных для чистого висмутата стронция $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$. При этом введение La сопровождается несколько большим увеличением фотокаталитической активности, чем введение Се.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Предельная концентрация иттрия, которая может быть внедрена в матрицу $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$, лежит в области от 0.02 до 0.2 атомов Y на элементарную ячейку.

Тип легирующей примеси по-разному сказывается на изменении оптической ширины запрещенной зоны $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$. Введение Се не влияет на оптическую ширину запрещенной зоны в отличие от Y и La.

Установлено, что введение Се и La в определенных концентрациях в структуру $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ увеличивает его фотокаталитическую активность.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 19-73-10013.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumada N., Takahashi N., Kinomura N. // Mater. Res. Bull. 1997. V. 32. P. 1003.
[https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(97\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(97)00071-8)
2. Mizoguchi H., Bhuvanesh N.S.P., Woodward P.M. // Chem. Commun. 2003. P. 1084.
<https://doi.org/10.1039/B300635B>
3. Zhong L., Hu C., Zhu B. et al. // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2018. V. 121.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022022>
4. Liu L., Wang D., Zhong Y. et al. // Appl. Sci. 2019. V. 9. P. 1267.
<https://doi.org/10.3390/app9071267>
5. Shtarev D.S., Kevorkyants R., Molokeyev M.S. et al. // Inorg. Chem. 2020. V. 59. P. 8173.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c00486>
6. Wang Y., He Y., Li T. et al. // Catalysis Commun. 2012. V. 18. P. 161.
<https://doi.org/10.1016/j.catcom.2011.12.011>
7. Liu Z., Wang X., Cai Q. et al. // J. Mater. Chem. A. 2017. V. 5. P. 8545.
<https://doi.org/10.1039/C7TA01875D>
8. Liu Z., Wang X. // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. P. 13276.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.117>
9. Li W., Kong D., Cui X. et al. // Mater. Res. Bull. 2014. V. 51. P. 69.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.12.007>
10. Tang J., Zou Z., Ye J. // Angew. Chem. Int. Ed. 2004. V. 43. P. 4463.
<https://doi.org/10.1002/anie.200353594>
11. Obata K., Matsumoto K., Uehara T. et al. // Chem. Lett. 2011. V. 40. P. 288.
<https://doi.org/10.1246/cl.2011.288>
12. Ji X., Lu J.-F., Wang Q. et al. // Powder Technol. 2020. V. 376. P. 708.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.029>
13. Ji X., Lu J.-F., Wang Q. et al. // Ceram. Int. 2020. V. 46. P. 13630.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.149>
14. Luo W., Tang J., Zou Z. et al. // J. Alloys Compd. 2008. V. 455. P. 346.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.01.096>
15. Shtarev D.S., Ryabchuk V.K., Makarevich K.S. et al. // Chem. Select. 2017. V. 2. P. 9851.
<https://doi.org/10.1002/slct.201702204>
16. Shan Z., Xia Y., Yang Y. et al. // Mater. Lett. 2009. V. 63. P. 75.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.09.009>
17. Hu C., Hu X., Guo J. et al. // Environ. Sci. Technol. 2006. V. 40. P. 5508.
<https://doi.org/10.1021/es052405v>
18. Yingchun Y., Xinzhi W., Jing Q. // Appl. Mech. Mater. 2014. V. 522. P. 411.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.522-524.411>
19. Hu X., Hu C., Qu J. // Appl. Catalysis B: Environ. 2006. V. 69. P. 17.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.05.008>
20. Obukuro Y., Matsushima S., Obata K. et al. // J. Alloys Compd. 2016. V. 658. P. 139.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.199>
21. Wu P., Luo X., Zhang S. et al. // Appl. Catal., A: General. 2015. V. 497. P. 216.
<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.02.032>
22. Zhou W., Yu X. // Desalin. Water Treatment. 2011. V. 30. P. 295.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2172>
23. Yang Y., Li J., Yuan Y. et al. // Dalton Trans. 2018. V. 47. P. 1888.
<https://doi.org/10.1039/C7DT04610C>
24. Yang Y., Zhang G., Yu S. et al. // Chem. Eng. J. 2010. V. 162. P. 171.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.024>
25. Штареv Д.С., Карпович Н.Ф., Штарева А.В. и др. // Вестн. ДВО РАН. 2018. Т. 2. С. 237.
26. Shtarev D.S., Shtareva A.V., Ryabchuk V.K. et al. // Catal. Today. 2020. V. 340. P. 70.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.09.035>
27. Shtarev D.S., Shtareva A.V., Selivanov N.I. et al. // ChemPhotoChem. 2020. V. 4. P. 5209.
<https://doi.org/10.1002/cptc.202000128>
28. Namatame H., Fujimori A., Takagi H. et al. // Phys. Rev. B: Condens. Matter. 1993. V. 48. P. 16917.
<https://doi.org/10.1103/physrevb.48.16917>
29. Tang J., Zou Z., Ye J. // The J. Phys. Chem. C. 2007. V. 111. P. 12779.
<https://doi.org/10.1021/jp0733441>
30. Yan B., Jansen M., Fesler C. // Nature Phys. 2013. V. 9. P. 709.
<https://doi.org/10.1038/nphys2762>
31. Khraisheh M., Khazndar A., Al-Ghouti M.A. // Int. J. Energy Res. 2015. V. 39. P. 1142.
<https://doi.org/10.1002/er.3318>
32. Kumar N., Golledge S.L., Cann D.P. // J. Adv. Dielectrics. 2016. V. 6. P. 1650032.
<https://doi.org/10.1142/S2010135X16500326>
33. Plumb N.C., Gawryluk D.J., Wang Y. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.037002>
34. Bhatia A., Hautier G., Nilgianskul T. et al. // Chem. Mater. 2016. V. 28. P. 30.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b03794>
35. Weng B., Xiao Z., Meng W. et al. // Adv. Energy Mater. 2017. V. 7. P. 1602260.
<https://doi.org/10.1002/aenm.201602260>
36. Ge J., Yin W.-J., Yan Y. // Chem. Mater. 2018. V. 30. P. 1017.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b04880>

37. Chouhan A.S., Athresh E., Ranjan R. et al. // Mater. Lett. 2018. V. 210. P. 218.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.09.038>
38. Shtarev D.S., Shtareva A.V., Kevorkyants R. et al. // J. Mater. Chem. C. 2020. V. 8. P. 3509.
<https://doi.org/10.1039/C9TC06457E>
39. Ershov D.S., Besprozvannykh N.V., Sinel'shchikova O.Yu. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 105.
<https://doi.org/10.1134/S003602362201003X>
40. Gapanovich M.V., Rakitin V.V., Novikov G.F. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 1.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622010041>
41. Phuruangrat A., Sakhon T., Kuntalue B. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 1829.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621120135>
42. Shtarev D.S., Shtareva A.V., Ryabchuk V.K. et al. // ChemCatChem. 2019. V. 11. P. 3534.
<https://doi.org/10.1002/cctc.201900439>
43. Shtarev D.S., Ryabchuk V.K., Rudakova A.V. et al. // ChemCatChem. 2020. V. 12. P. 1551.
<https://doi.org/10.1002/cctc.201902236>
44. Штарев Д.С., Штарева А.В., Бердников Н.В. // Вестн. ДВО РАН. 2020. Т. 5. С. 125.
45. Butler M.A., Ginley D.S. // J. Electrochem. Soc. 1978. V. 125. P. 228.
<https://doi.org/10.1149/1.2131419>