
**КООРДИНАЦИОННЫЕ
СОЕДИНЕНИЯ**

УДК 547-38+546.87

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ГИБРИДНЫХ ГАЛОВИСМУТАТОВ ПРОИЗВОДНЫХ 2,2'-БИПИРИДИНИЯ© 2022 г. С. П. Балабанова^а, П. А. Буйкин^{а, б, с, *}, А. Б. Илюхин^б, А. Ю. Руденко^д, П. В. Дороватовский^е, А. А. Корлюков^с, В. Ю. Котов^{а, б}^аНаучно-исследовательский университет “Высшая школа экономики”, ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000 Россия^бИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия^сИнститут элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, ул. Вавилова, 28, Москва, 119991 Россия^дИнститут органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Ленинский пр-т, 47, Москва, 119991 Россия^еНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

*e-mail: peterzz@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.2021 г.

После доработки 22.12.2021 г.

Принята к публикации 17.01.2022 г.

Получены и структурно охарактеризованы новые гибридные галовисмутаты 2,2'-бипиридиния ($[\text{bipyH}]^+$) I и II, 7,8-дигидро-6Н-дипиридо[1,2-а:2',1'-с][1,4]дiazепин-5,9-дия ($[\text{bipyC}_3]^{2+}$) III, 6,7,8,9-тетрагидродипиридо[1,2-а:2',1'-с][1,4]дiazоцин-5,10-дия ($[\text{bipyC}_4]^{2+}$) IV и 1,1'-(пентандирил)бис(2,2'-бипиридиния) ($(\text{bipyH})_2\text{C}_5]^{4+}$) V. В структуре I присутствуют монопротонированный катион 2,2'-бипиридиния и изолированный анион $[\text{Bi}_2\text{Br}_{10}]^{4-}$. Бромовисмутат 2,2'-бипиридиния II содержит полимерный анион $[\text{BiBr}_4]_n^{n-}$ и изоструктурен ранее описанному иодовисмутату. Бромовисмутат III включает в свой состав анионы $[\text{BiBr}_6]^{3-}$ и молекулы воды. Иодовисмутат $[\text{bipyC}_3]_2[\text{Bi}_2\text{I}_{10}]$ (VI) изоструктурен IV. В структуре V присутствуют катионы $(\text{bipyH})_2\text{C}_5]^{4+}$ и три вида анионов: $[\text{Bi}_2\text{Br}_{10}]^{4-}$, $[\text{BiBr}_6]^{3-}$ и Br^- . Соединения I, III и VI выделены в чистом виде. Значения оптической ширины запрещенной зоны для них составляют 2.84, 2.88 и 2.11 эВ соответственно.

Ключевые слова: гибридные галовисмутаты, кристаллическая структура, ширина запрещенной зоны

DOI: 10.31857/S0044457X22070030

ВВЕДЕНИЕ

Гибридные галовисмутаты представляют значительный интерес для химиков и материаловедов благодаря разнообразию их физических свойств [1–8], обусловленных различным строением входящих в их состав галовисмутат-анионов [9–14]. Активное изучение гибридных галогенидов висмута началось в 90-х гг. прошлого столетия [15, 16]. В настоящее время внимание исследователей уделяется поиску новых соединений, обладающих низкими значениями ширины запрещенной зоны (E_g) [17] и хорошим оптическим поглощением [18], которые рассматриваются в качестве перспективных светопоглощающих материалов в фотовольтаике [19–21], фотодетекторах [22, 23] и светодиодах [24]. Известно, что соединения, в кристаллической структуре которых есть полимерные линейные

анионы $[\text{BiX}_5]_n^{2n-}$, обладают низкими значениями оптической ширины запрещенной зоны. Среди этих соединений можно выделить иодовисмутат 1,1'-(1,5-пентандирил)бис(4-метилпиридиния) [25], бромовисмутат 2-бромпиридиния [26], галовисмутаты метилвиологена [27–29] и 4,4'-аминобипиридиния [30]. Производные 2,2'-бипиридина (bipy) близки по строению к катиону метилвиологена, и можно ожидать, что такие соединения будут проявлять необычные оптические свойства. Недавно был получен бромовисмутат 9,10-дигидро-8а,10а-дiazонияфенантрена (схема 1) состава $[\text{bipyC}_2]_6(\text{H}_3\text{O})_3[\text{BiBr}_5]_6[\text{BiBr}_6]$ [31], содержащий полимерные анионы $[\text{BiBr}_5]_n^{2n-}$. Кристаллы этого соединения имеют желтую окраску, что косвенно свидетельствует о достаточно низком для бромовисмутатов значении E_g .

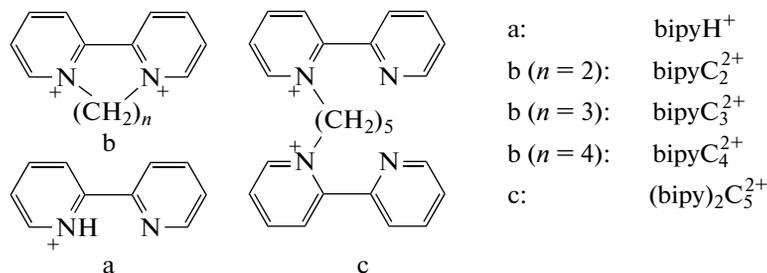


Схема 1. Катион 2,2'-бипиридиния (а); 9,10-дигидро-8а,10а-дизонияфенантрен (b, $n = 2$); 7,8-дигидро-6Н-дипиридо[1,2-а:2',1'-с][1,4]дизаепин-5,9-диия (b, $n = 3$); 6,7,8,9-тетрагидродипиридо[1,2-а:2',1'-с][1,4]дизоцин-5,10-диия (b, $n = 4$); 1,1'-(пентандиил)бис(2,2'-бипиридиния) (в).

В литературе известно несколько галовисмутатов производных 2,2'-бипиридина. Среди них хлоровисмутаты 2,2'-бипиридиния с анионами $[\text{Bi}_2\text{Cl}_9]^{3-}$ и $[\text{Bi}_4\text{Cl}_{20}]^{8-}$ [32]; иодовисмутаты 2,2'-бипиридиния с анионами $[\text{BiI}_4]_n^{n-}$ и $[\text{Bi}_2\text{I}_{10}]^{4-}$ [32], $[\text{Bi}_2\text{I}_9]^{3-}$ [33] и $[\text{Bi}_3\text{I}_{11}]_n^{2n-}$ [34]; а также изоструктурные хлоро- и бромовисмутаты N-метил-2,2'-бипиридиния с анионом $[\text{Bi}_2\text{X}_{10}]^{4-}$ [35]. В перечисленных кристаллических структурах ионы 2,2'-бипиридиния моно- и дипротонированы. В Кембриджской базе структурных данных [36] отсутствуют сведения о галовисмутатах производных 2,2'-бипиридина с алкильными цепями, содержащими более чем два атома углерода. В настоящей работе сообщается о получении новых гибридных галовисмутатов производных 2,2'-бипиридина, их кристаллической структуре и оптических свойствах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез $[\text{bipyH}]_4[\text{Bi}_2\text{Br}_{10}]$ (I). К 25 мл 0.04 М раствора BiBr_3 в 2 М НВг добавляли 50 мл 0.04 М раствора 2,2'-бипиридина в 2 М НВг. Выпавший светло-желтый кристаллический осадок $[\text{bipyH}]_4[\text{Bi}_2\text{Br}_{10}]$ отфильтровывали под вакуумом, промывали этанолом и сушили на воздухе. По данным РФА, (рис. S1a) полученный продукт является однофазным. Выход 0.77 г (83%). Детали уточнения по Ритвельду: пр. гр. $P\bar{1}$, $a = 13.4421(4)$, $b = 13.8834(5)$, $c = 13.9117(5)$ Å, $\alpha = 89.328(2)^\circ$, $\beta = 76.115(3)^\circ$, $\gamma = 85.393(4)^\circ$, $R_{\text{exp}} = 2.39\%$, $R_{\text{wp}} = 5.18\%$, $R_p = 4.02\%$, GOF = 2.17. Ниже приведены результаты элементного CHN-анализа.

	C	H	N
Найдено, %:	26.00;	2.00;	6.02.
Для $\text{C}_{40}\text{H}_{36}\text{N}_8\text{Bi}_2\text{Br}_{10}$ (1845.78)			
рассчитано, %:	26.03;	1.97;	6.07.

Изменение мольного соотношения реагентов BiBr_3 и 2,2'-бипиридина с 1 : 2 на 2 : 1 приводит к образованию продукта, содержащего фазу $[\text{bipyH}][\text{BiBr}_4]$ (II) наряду с основной фазой I. По данным РФА (рис. S1b), выделенный продукт содержит 77 (± 1)% фазы I и 23 (± 1)% фазы II. Детали уточнения по Ритвельду: I – пр. гр. $P\bar{1}$, $a = 13.4430(6)$, $b = 13.8829(8)$, $c = 13.9145(9)$ Å, $\alpha = 89.346(4)^\circ$, $\beta = 76.148(5)^\circ$, $\gamma = 85.320(6)^\circ$; II – пр. гр. $C2/c$, $a = 11.9937(10)$, $b = 17.8031(13)$, $c = 7.4039(6)$ Å, $\beta = 94.605(6)^\circ$; $R_{\text{exp}} = 2.35\%$, $R_{\text{wp}} = 5.28\%$, $R_p = 4.10\%$, GOF = 2.25.

Синтез дибромидов производных 2,2'-бипиридина. Синтез проводили путем взаимодействия 2,2'-бипиридина с соответствующими 1, n -дибромалканами ($n = 3-5$). В круглодонной колбе объемом 100 мл растворяли 2,2'-бипиридин (1.00 г, 6.40 ммоль) в 50 мл 1,1'-дибромалкана. Полученный раствор нагревали на магнитной мешалке с температурой рабочей поверхности 170–200°C с обратным холодильником при перемешивании в течение 6 ч. После охлаждения белый осадок отфильтровывали под вакуумом, промывали ацетоном и сушили на воздухе при температуре 95°C. В случае образования $[\text{bipyC}_3]\text{Br}_2$ выход продукта значительно превосходит выход в работе [37]. $[\text{bipyC}_3]\text{Br}_2$. Выход 2.19 г (95%). ^1H ЯМР (600 МГц, ДМСО- d_6), δ : 9.50 (д, 2H), 8.93 (т, 2H), 8.50 (д, 2H), 8.48 (т, 2H), 5.11 (д, 2H), 4.47 (м, 2H), 2.78 (м, 2H).

Согласно данным ^1H ЯМР, взаимодействие 2,2'-бипиридина с 1,4-дибромбутаном и 1,5-дибромпентаном в этих же условиях приводит к получению смеси продуктов $[\text{bipyC}_4]\text{Br}_2$ или $[(\text{bipy})_2\text{C}_5]\text{Br}_2$ (возможно в протонированной форме), а также бромиды 2,2'-бипиридила. Содержание $[\text{bipyC}_4]\text{Br}_2$ и $[(\text{bipy})_2\text{C}_5]\text{Br}_2$ в полученных смесях не превышает 15 мол. %.

Синтез $[\text{bipyC}_3]_3[\text{BiBr}_6]_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (III). К раствору $[\text{bipyC}_3]\text{Br}_2$ (0.358 г, 1.00 ммоль) в 25 мл 2 М НВг добавляли 0.04 М раствор BiBr_3 (25 мл) в 2 М НВг. Выпавший светло-желтый осадок $[\text{bipyC}_3]_3[\text{BiBr}_6]_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ отфильтровывали под вакуумом, промыва-

ли этанолом и сушили на воздухе. По данным РФА (рис. S1c), полученный продукт является однофазным. Выход 0.49 г (49%). Детали уточнения по Ритвельду: пр. гр. $P_{срн}$, $a = 22.3996(5)$, $b = 15.4264(3)$, $c = 15.7709(5)$ Å, $R_{exp} = 1.33\%$, $R_{wp} = 3.74\%$, $R_p = 2.87\%$, $GOF = 2.82$.

	C	H	N
Найдено, %:	23.66;	2.18;	4.25.
Для $C_{39}H_{44}N_6Bi_2Br_{12}O$ (1989.62)			
рассчитано, %:	23.52;	2.21;	4.22.

Выращивание кристаллов $[biruC_4]_2[Bi_2I_{10}]$ (IV).

К раствору полученной ранее смеси дибромидом $[biruC_4]Br_2$ и бромида 2,2'-бипиридила (0.372 г) в 40 мл H_2O добавляли 60 мл раствора, содержащего $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (1.94 г, 4.00 ммоль) и KI (13.3 г, 78 ммоль). Выпавший оранжевый осадок отфильтровывали под вакуумом, промывали этанолом и сушили на воздухе. Из полученного оранжевого порошка механически были выделены отдельные кристаллы $[biruC_4]_2[Bi_2I_{10}]$.

Выращивание кристаллов $[(biruH)_2C_5]_2[Bi_2Br_{10}][BiBr_6]Br \cdot 3H_2O$ (V). К раствору полученной ранее смеси дибромидом $[(biru)_2C_5]Br_2$ и бромида 2,2'-бипиридила (0.386 г) в 25 мл 2 М HBr добавляли 25 мл 0.04 М раствора $BiBr_3$ в 2 М HBr. Выпавший светло-желтый осадок отфильтровывали под вакуумом, промывали этанолом и сушили на воздухе. В полученном порошке наряду с соединением I были обнаружены отдельные кристаллы $[(biruH)_2C_5]_2[Bi_2Br_{10}][BiBr_6]Br \cdot 3H_2O$.

Синтез $[biruC_3]_2[Bi_2I_{10}]$ (VI). К раствору дибромидом $[biruC_3]Br_2$ (0.358 г, 1.00 ммоль) в 40 мл H_2O добавляли 60 мл раствора, содержащего $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (1.94 г, 4.00 ммоль) и KI (13.3 г, 78 ммоль). Выпавший оранжевый осадок $[biruC_3]_2[Bi_2I_{10}]$ отфильтровывали под вакуумом, промывали этанолом и сушили на воздухе. По данным РФА (рис. S1d), полученный продукт является однофазным. Выход 0.84 г (81%). Детали уточнения по Ритвельду: пр. гр. $P_{21/n}$, $a = 20.149(4)$, $b = 11.634(3)$, $c = 20.327(7)$ Å, $\beta = 115.468(15)^\circ$, $R_{exp} = 1.41\%$, $R_{wp} = 2.20\%$, $R_p = 1.66\%$, $GOF = 1.56$.

	C	H	N
Найдено, %:	15.03;	1.24;	2.71.
Для $C_{26}H_{28}N_4Bi_2I_{10}$ (2083.55)			
рассчитано, %:	14.99;	1.35;	2.69.

Рентгеноструктурный анализ (РСА). Экспериментальные данные для соединений I–V получены на дифрактометре Bruker SMART APEX2 (λMoK_α , графитовый монохроматор; ЦКП ИОНХ РАН) [38] (табл. S1). Поглощение учтено

полуэмпирическим методом по эквивалентам (программа SADABS) [39]. Структуры определены комбинацией прямого метода и Фурье-синтезов. Уточнение проведено полноматричным анизотропно-изотропным МНК. Кристаллы I невысокого качества, что определяет высокий пик в разностном Фурье-синтезе ($2.6 e/\text{Å}^3$). Заселенности разупорядоченных фрагментов в структуре V получены при изотропном уточнении с фиксированными тепловыми параметрами разупорядоченных атомов и в последующем уточнении фиксировались. Все расчеты выполнены по программам Shelxs и Shelxl [40].

Экспериментальные данные для структур I–V депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2122720–2122724; deposit@ccdc.cam.ac.uk или <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

Рентгенофазовый анализ (РФА) проведен на дифрактометре Bruker D8 Advance (CuK_α -излучение, позиционно-чувствительный 1D-детектор LynxEye, геометрия на отражение). Диапазон измерений $2\theta = 5^\circ - 50^\circ$ для всех образцов. Полнопрофильный анализ порошков проведен с помощью программы TOPAS 4.2 [41]. Уточнение по Ритвельду проводили с использованием структурных моделей I–III.

Спектры диффузного отражения (СДО) регистрировали на спектрофотометре Ocean Optics модель QE65000 в диапазоне частот $11000 - 50000 \text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре. Спектры были перестроены в координатах зависимости функции Кубелки–Мунка [42] от энергии света (рис. S2). Для получения функции Кубелки–Мунка использовали уравнение:

$$F(R_d) = \frac{(1 - R_d)^2}{2R_d},$$

где $F(R_d)$ – абсолютное отражение слоя образца. Оптическую ширину запрещенной зоны (E_g) оценивали экстраполяцией линейной части соответствующей кривой на $F(R_d) = 0$.

Спектры 1H ЯМР регистрировали на спектрометре Bruker Avance 600 (600 МГц) в $DMSO-d_6$ при 303 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате взаимодействия 2,2'-бипиридина (2 экв) с $BiBr_3$ (1 экв) в сильноокислой среде получен однофазный $[biruH]_4[Bi_2Br_{10}]$ (I) ($E_g = 2.84$ эВ). Структура I образована катионами монопротонированного бипиридина и centrosymmetric анионами $[Bi_2Br_{10}]^{4-}$ (рис. 1). Каждый анион посредством водородных связей $N-H \cdots Br$ объединяет четыре катиона (рис. S3a). Стекинг-взаимодействия между катионами объединяют струк-

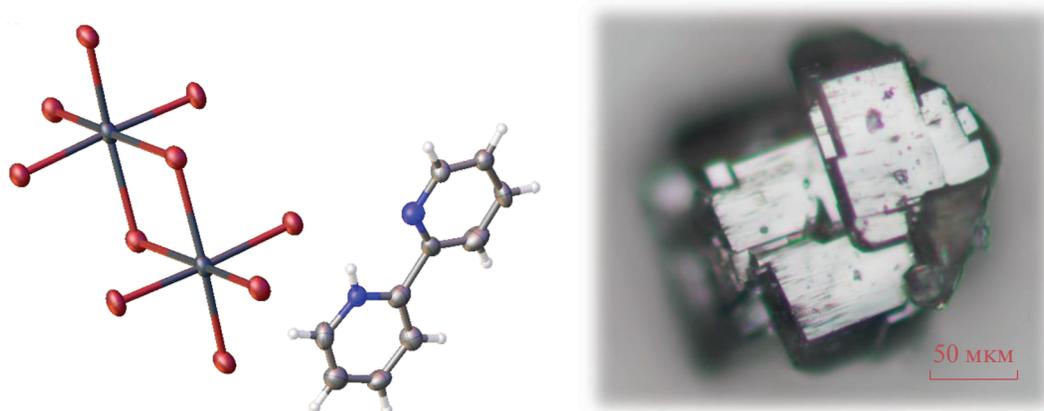


Рис. 1. Поликристаллический сросток и фрагмент структуры I.

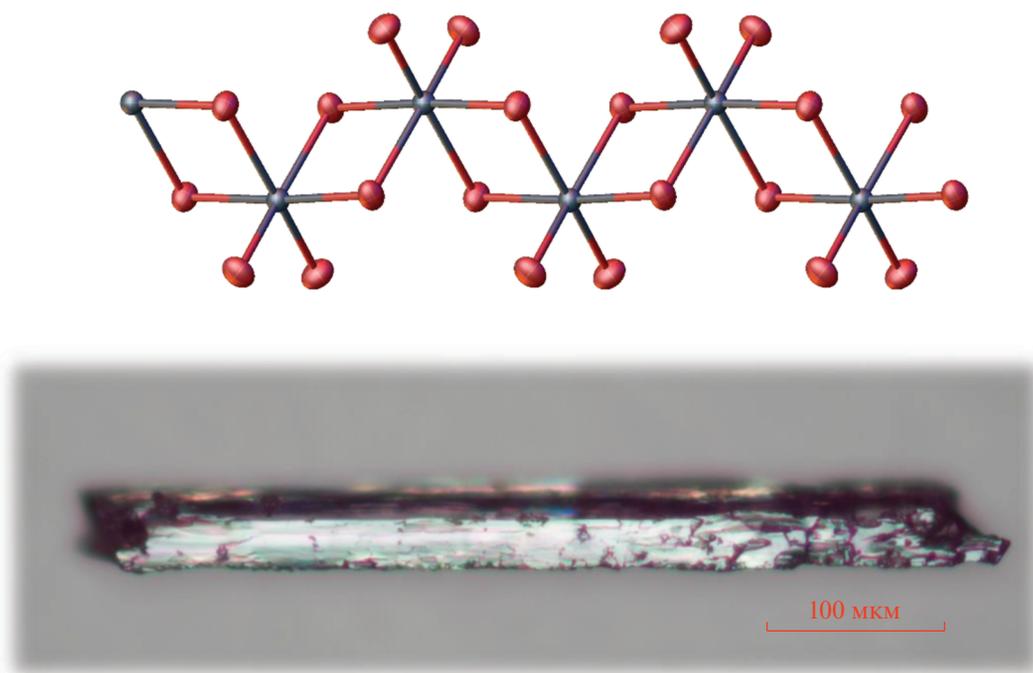


Рис. 2. Монокристалл и строение анионной 1D-цепи в структуре II.

турные единицы в слое (рис. S3b). Кратчайшие контакты $\text{Vg} \cdots \text{Vg}$ составляют 4.14 и 4.28 Å.

При уменьшении соотношения 2,2'-бипиридина и BiVg_3 до 1 : 1 и 1 : 2 не происходит образования чистых продуктов. В последнем случае наблюдали образование кристаллов $[\text{bipyH}][\text{BiVg}_4]$ (II) наряду с основной фазой I. По данным РФА, содержание фазы II в полученной смеси составляет 23%. В структуре II катион $[\text{bipyH}]^+$ разупорядочен вокруг оси 2, строение 1D-цепей аниона (рис. 2) характерно для подобных структур. Соединение изоструктурно иодовисмутату 2,2'-би-

пиридиния, описанному в [32]. Кратчайший контакт $\text{Vg} \cdots \text{Vg}$ составляет 4.03 Å.

С целью изучения кристаллических структур N,N'-дизамещенных 2,2'-бипиридинов были получены галовисмутаты с катионами $[\text{bipyC}_3]^{2+}$, $[\text{bipyC}_4]^{2+}$ и $[(\text{bipyH})_2\text{C}_5]^{4+}$ (два последних в смеси с галовисмутатами 2,2'-бипиридиния). Однофазный бромовисмутат $[\text{bipyC}_3]_3[\text{BiVg}_6]_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (III) ($E_g = 2.88$ эВ) был получен при взаимодействии дибромидом $[\text{bipyC}_3]\text{Vg}_2$ с BiVg_3 в сильноокислой среде. Один из катионов $[\text{bipyC}_3]^{2+}$ (рис. 3) в структуре III расположен на оси 2, кристаллиза-

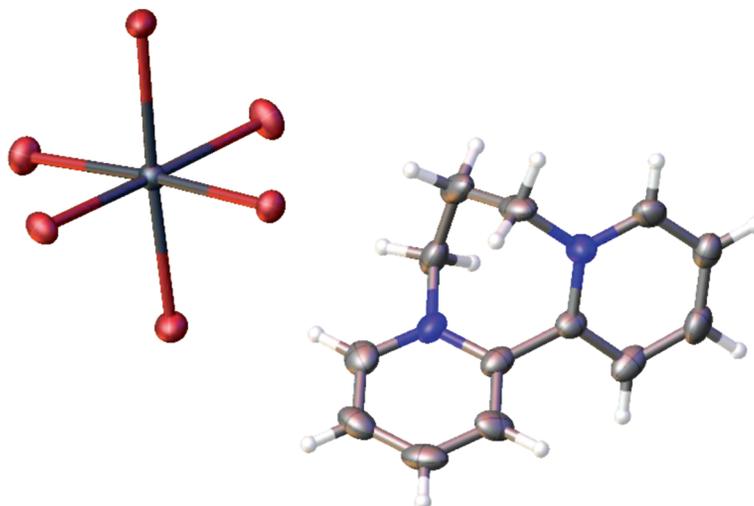


Рис. 3. Фрагмент структуры III.

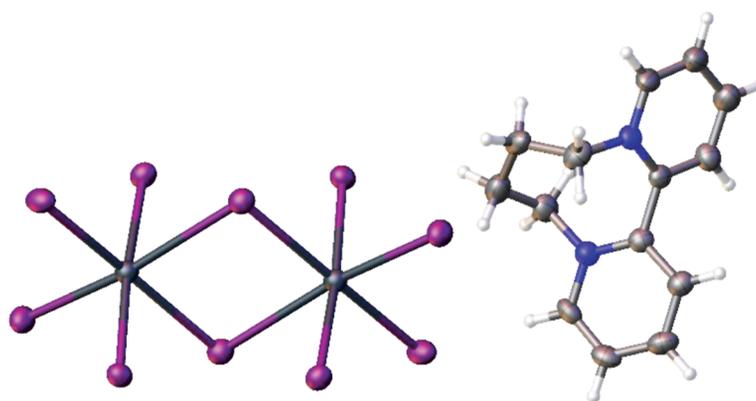


Рис. 4. Фрагмент структуры IV.

ционная молекула H_2O находится в обширной полости и разупорядочена вокруг центра инверсии. Анионы $[\text{BiBr}_6]^{3-}$ расположены далеко друг от друга, в результате кратчайшие контакты $\text{Br}\cdots\text{Br}$ значительно больше, чем в остальных структурах, и составляют 5.10 \AA .

Иодовисмутаты $[\text{biryC}_3]_2[\text{Bi}_2\text{I}_{10}]$ (VI) ($E_g = 2.11 \text{ эВ}$) и $[\text{biryC}_4]_2[\text{Bi}_2\text{I}_{10}]$ (IV) были выделены из слабых кислотных растворов, содержащих соответствующие дибромиды, $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ и KI . Соединение VI кристаллизуется в пр. гр. $P2_1/n$ и является однофазным. Параметры кристаллической решетки при 100 K : $a = 19.960$, $b = 11.570$, $c = 20.217 \text{ \AA}$, $\beta = 115.12^\circ$ [43]. Сопоставление данных РСА и РФА для VI и IV позволяет утверждать, что эти соединения изоструктурны. В структуре IV (рис. 4) кристаллографически независимый катион находится в общей позиции, а анион — на центрах симметрии. Кратчайшие контакты $\text{I}\cdots\text{I}$ составляют 4.34 и 4.37 \AA .

Отдельные кристаллы бромовисмутата $[(\text{biryH})_2\text{C}_5]_2[\text{Bi}_2\text{Br}_{10}][\text{BiBr}_6]\text{Br} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (V) были извлечены из продукта взаимодействия смеси, содержащей дибромид $[(\text{biry})_2\text{C}_5]\text{Br}_2$ и BiBr_3 в сильно-кислой среде. Структура V образована катионами $[(\text{biryH})_2\text{C}_5]^{4+}$ (рис. 5), анионами трех типов ($[\text{Bi}_2\text{Br}_{10}]^{2-}$, $[\text{BiBr}_6]^{3-}$, Br^-) и кристаллизационными молекулами H_2O . Оба комплексных аниона расположены на центрах инверсии, анион $[\text{Bi}_2\text{Br}_{10}]^{2-}$ упорядочен, в то время как в анионе $[\text{BiBr}_6]^{3-}$ атом Bi и один из атомов Br разупорядочены. Анион Br^- по статистике занимает одну позицию с молекулой H_2O (расстояние $\text{Br}\cdots\text{O}$ 0.39 \AA). Кратчайшие контакты упорядоченных атомов $\text{Br}\cdots\text{Br}$ составляют 3.56 и 3.96 \AA .

Значение оптической ширины запрещенной зоны было определено для соединений I, III и VI, выделенных в чистом виде. Для бромовисмутатов I и III оно составило 2.84 и 2.88 эВ соответствен-

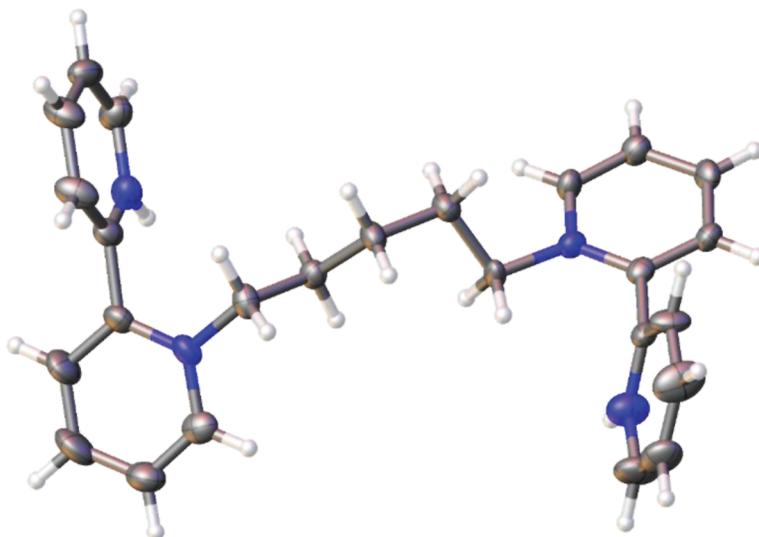


Рис. 5. Строение катиона $[(\text{bipyH})_2\text{C}_5]^{4+}$ в структуре V.

но. Указанные величины характерны для большинства известных бромовисмутатов с изолированными анионами в структуре. Более низкое значение E_g для I может быть обусловлено наличием более коротких расстояний $\text{Br}\cdots\text{Br}$ (4.14 и 4.28 Å в I по сравнению с 5.10 Å в III). Значение E_g для иодовисмутата VI составляет 2.11 эВ и также характерно для большинства гибридных соединений с изолированными иодовисмутат-анионами. Таким образом, в полученных соединениях отсутствуют цепи анионов, наличие которых может приводить к понижению оптической ширины запрещенной зоны, как это произошло в $[\text{bipyC}_2]_6(\text{H}_3\text{O})_3[\text{BiBr}_5][\text{BiBr}_6]$ [31].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН, функционирующего при поддержке государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований и ЦКП ИНЭОС РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0044457X22070030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mencil K., Starynowicz P., Siczek M. et al. // Dalton Trans. 2019. V. 48. № 39. P. 14829. <https://doi.org/10.1039/c9dt02916h>
2. Jakubas R., Gągor A., Winiarski M.J. et al. // Inorg. Chem. 2020. V. 59. № 6. P. 3417. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b03193>
3. Moskwa M., Bator G., Rok M. et al. // Dalton Trans. 2018. V. 47. № 38. P. 13507. <https://doi.org/10.1039/c8dt03121e>
4. Wang Y.L., Chen X.H., Shu W. et al. // J. Coord. Chem. 2019. V. 72. № 4. P. 573. <https://doi.org/10.1080/00958972.2019.1570167>
5. Pandey S., Chattopadhyay T., Dev S. et al. // Polyhedron. 2020. V. 179. P. 114335. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2019.114335>
6. Wang P., Sheng W.W., Chen Z.R. et al. // J. Clust. Sci. 2021. V. 32. № 3. P. 727. <https://doi.org/10.1007/s10876-020-01829-0>
7. Adonin S.A., Gorokh I.D., Samsonenko D.G. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2018. V. 469. P. 32. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2017.08.058>
8. Wang Y.-Y., Song L., Dai Z.-Q. et al. // J. Solid State Chem. 2021. V. 304. P. 122611. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122611>
9. Adonin S.A., Sokolov M.N., Fedin V.P. // Coord. Chem. Rev. 2016. V. 312. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.10.010>
10. Buikin P.A., Rudenko A.Y., Ilyukhin A.B. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 2. P. 111. <https://doi.org/10.1134/S1070328420020049>
11. Buikin P.A., Rudenko A.Y., Ilyukhin A.B. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 4. P. 482. <https://doi.org/10.1134/S0036023621040057>
12. Buikin P.A., Ilyukhin A.B., Laurinavichyute V.K. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 2. P. 133. <https://doi.org/10.1134/S0036023621020042>

13. *Sharutin V.V., Yegorova I.V., Klepikov N.N. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2009. V. 54. № 1. P. 52.
<https://doi.org/10.1134/S0036023609010124>
14. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Khisamov R.M. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2017. V. 62. № 6. P. 766.
<https://doi.org/10.1134/S0036023617060201>
15. *Krautscheid H.* // ZAAC. 1995. V. 621. № 12. P. 2049.
<https://doi.org/10.1002/zaac.19956211212>
16. *Carmalt C.J., Farrugia L.J., Norman N.C.* // Z. Naturforsch., Sect. B: J. Chem. Sci. 1995. V. 50. № 11. P. 1591.
<https://doi.org/10.1515/znb-1995-1104>
17. *Kotov V.Y., Buikin P.A., Ilyukhin A.B. et al.* // New J. Chem. 2021. V. 45. № 39. P. 18349.
<https://doi.org/10.1039/d1nj02390j>
18. *Ganose A.M., Savory C.N., Scanlon D.O.* // Chem. Commun. 2017. V. 53. № 1. P. 20.
<https://doi.org/10.1039/c6cc06475b>
19. *Lee L.C., Huq T.N., Macmanus-Driscoll J.L. et al.* // APL Mater. 2018. V. 6. № 8.
<https://doi.org/10.1063/1.5029484>
20. *Stroyuk O.* // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. V. 9. № 1. P. 2209.
<https://doi.org/10.3762/bjnano.9.207>
21. *Waykar R., Bhorde A., Nair S. et al.* // J. Phys. Chem. Solids. 2020. V. 146. P. 109608.
<https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2020.109608>
22. *Usoltsev A.N., Elshobaki M., Adonin S.A. et al.* // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. № 11. P. 5957.
<https://doi.org/10.1039/c8ta09204d>
23. *Premkumar S., Liu D., Zhang Y. et al.* // ACS Appl. Nano Mater. 2020. V. 3. № 9. P. 9141.
<https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01787>
24. *Vassilakopoulou A., Papadatos D., Zakouras I. et al.* // J. Alloys Compd. 2017. V. 692. P. 589.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.076>
25. *Kotov V.Y., Ilyukhin A.B., Korlyukov A.A. et al.* // New J. Chem. 2018. V. 42. № 8. P. 6354.
<https://doi.org/10.1039/c7nj04948j>
26. *Adonin S.A., Gorokh I.D., Novikov A.S. et al.* // Chem. – A Eur. J. 2017. V. 23. № 62. P. 15612.
<https://doi.org/10.1002/chem.201703747>
27. *Bi W., Leblanc N., Mercier N. et al.* // Chem. Mater. 2009. V. 21. № 18. P. 4099.
<https://doi.org/10.1021/cm9016003>
28. *Leblanc N., Mercier N., Zorina L. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2011. V. 133. № 38. P. 14924.
<https://doi.org/10.1021/ja206171s>
29. *Chen Y., Yang Z., Guo C.X. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2010. № 33. P. 5326.
<https://doi.org/10.1002/ejic.201000755>
30. *Skorokhod A., Mercier N., Allain M. et al.* // Inorg. Chem. 2021. V. 60. P. 17123.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c02384>
31. *Adonin S.A., Gorokh I.D., Samsonenko D.G. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2016. V. 61. № 8. P. 958.
<https://doi.org/10.1134/S0036023616080027>
32. *Bowmaker G.A., Junk P.C., Lee Aaron M. et al.* // Aust. J. Chem. 1998. V. 51. № 4. P. 293.
<https://doi.org/10.1071/C97036>
33. *Oswald I.W.H., Ahn H., Neilson J.R.* // Dalton Trans. 2019. V. 48. № 43. P. 16340.
<https://doi.org/10.1039/c9dt03207j>
34. *Goforth A.M., Tershansy M.A., Smith M.D. et al.* // Acta Crystallogr., Sect. C. 2006. V. 62. № 9. P. M381.
<https://doi.org/10.1107/S0108270106025972>
35. *Adonin S.A., Gorokh I.D., Samsonenko D.G. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2016. V. 42. № 11. P. 695.
<https://doi.org/10.1134/S1070328416110014>
36. *Groom C.R., Bruno I.J., Lightfoot M.P. et al.* // Acta Crystallogr., Sect. B. 2016. V. 72. № 2. P. 171.
<https://doi.org/10.1107/S2052520616003954>
37. *Popp F.D., Chesney D.K.* // J. Heterocycl. Chem. 1972. V. 9. № 5. P. 1165.
<https://doi.org/10.1002/jhet.5570090541>
38. *Bruker* // Apex II 2009. P. Bruker AXS Inc.
39. *Sheldrick G.M.* // Programs Scaling Absorpt. Correct. Area Detect. Data. 1997.
40. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr., Sect. C. 2015. V. 71. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
41. *Coelho A.* // Bruker AXS GmbH 2009.
42. *Kubelka P., Munk F.* // Z. Tech. Phys. 1931. V. 12. № 1930. P. 593. <http://www.graphics.cornell.edu/~westin/pubs/kubelka.pdf>
43. *Balabanova S., Buikin P., Ilyukhin A. et al.* // CSD Commun. 2021.
<https://doi.org/10.5517/ccdc.csd.cc298r1d>