

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.05

ИНТЕРКАЛЯЦИЯ ЛИТИЯ В  $\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$  С ПОМОЩЬЮ  $\text{LiH}$

© 2022 г. Г. А. Бузанов<sup>a, \*</sup>, Е. А. Строганова<sup>a, b</sup>, А. Ю. Быков<sup>a</sup>, К. Ю. Жижин<sup>a</sup>, Н. Т. Кузнецов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 111071 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: gbuzanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.11.2021 г.

После доработки 29.12.2021 г.

Принята к публикации 30.12.2021 г.

С целью расширения методов интеркаляции лития в слоистые многокомпонентные матрицы изучено взаимодействие гидрида лития со слоистым теллуридом  $\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$  через стадию образования механокомпозигов. Показано образование интеркаляционных соединений  $\text{Li}_x\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$  ( $0 \leq x \leq 0.3$ ) при отжиге механокомпозигов матрицы и интеркалирующего агента ( $\text{LiH}$ ) в аргоне. Изучены каналы конверсии гидрид-иона и описаны превращения с участием матрицы при различных мольных соотношениях матрицы и интеркалирующего агента и температурах.

**Ключевые слова:** слоистые халькогениды, теллуриды никеля и галлия, механохимическая активация, гидрид лития

DOI: 10.31857/S0044457X22050038

ВВЕДЕНИЕ

Низкоразмерные системы связей металл–металл являются интересными объектами для изучения в неорганической химии и химии твердого тела, так как их присутствие в кристаллических соединениях часто обуславливает нетривиальное строение и физико-химические свойства последних. Один из таких типов соединений представлен семейством смешанных теллуридов никеля-*p*-металла, имеющих слоистую структуру и состав  $\text{Ni}_3\text{MTe}_2$ , где  $\text{M} = \text{Ga, In, Ge, Sn, Sb}$ ,  $0 \leq x \leq 1$  [1–8]. Все эти соединения кристаллизуются в гексагональной сингонии с пр. гр.  $R\bar{6}_3/mmc$  и  $Z = 2$ , кроме  $\text{Ni}_{2.58}\text{SnTe}_2$ , описанного в пр. гр.  $P\bar{3}1c$ . Структура слоистых соединений является производной от комбинации структурного типа  $\text{NiAs}$  и структурного типа  $\text{Ni}_2\text{In}$ . Она основана на двумерно-бесконечных гетерометаллических фрагментах, ограниченных атомами теллура вдоль оси *c*, которые, в свою очередь, посредством слабых взаимодействий  $\text{Te}–\text{Te}$  образуют ван-дер-ваальсову щель. Наиболее изученной является система  $\text{Ni}–\text{Ga}–\text{Te}$ , в которой синтезирован ряд образцов состава  $\text{Ni}_{2.98}\text{GaTe}_2$ ,  $\text{Ni}_{2.75}\text{GaTe}_2$ ,  $\text{Ni}_{2.5}\text{GaTe}_2$  и  $\text{Ni}_{2.3}\text{GaTe}_2$  [1, 2]. Структура  $\text{Ni}_{2.98}\text{GaTe}_2$  основана на чередующихся гетерометаллических фрагментах  ${}^2_{\infty}[\text{Ni}_{2.6}\text{Ga}]$ , ограниченных терминальными атомами теллура, расположенных вдоль оси *c*. В данном случае гетерометаллические фрагменты относятся к де-

фектной структуре  $\text{Ni}_2\text{In}$ . Длины гомо- и гетерометаллических связей  $\text{Ni}–\text{Ni}$  и  $\text{Ni}–\text{M}$  близки по значению во всех соединениях  $\text{Ni}_{3-x}\text{GaTe}_2$ . Расстояние  $\text{Ni}(1)–\text{Ga}$  и  $\text{Ni}(1)–\text{Te}$  в тройных соединениях схожи с аналогичными расстояниями в структуре интерметаллида  $\text{Ni}_{1.8}\text{Ga}$ , который относится к структурному типу  $\text{Ni}_2\text{In}$  ( $\text{Ni}(1)–\text{Ga} = 2.625 \text{ \AA}$ ) [2].

В отличие от интерметаллических соединений ближайшее октаэдрическое окружение  $\text{Ni}(1)$  образовано тремя атомами галлия и тремя атомами теллура. Это объясняется тем, что позиция мышьяка в исходной структуре  $\text{NiAs}$  в нашем случае заселяется галлием и теллуrom упорядоченно, что приводит к ее разделению на две независимые позиции и утроению исходной элементарной ячейки по оси *c*. Три атома галлия, занимающие экваториальные вершины тригональной бипирамиды, и два атома теллура, занимающие аксиальные вершины тригональной бипирамиды, образуют координационный полиэдр для атома  $\text{Ni}(2)$ . Относительно короткое расстояние  $\text{Ni}(2)–\text{Ga}$  аналогично расстоянию в интерметаллиде  $\text{Ni}_2\text{Ga}$  ( $d(\text{Ni}(2)–\text{Ga}) = 2.311 \text{ \AA}$ ). Частичную занятость позиции *d*-металла авторы работы [2] объясняют тем, что короткая гетерометаллическая связь не типична для пары элементов  $\text{Ni}–\text{Ga}$ . Это не является, с нашей точки зрения, рациональным объяснением наблюдаемого явления. Координационный полиэдр для  $\text{Ni}(3)$  представляет собой октаэдр, образованный только атомами теллура.

**Таблица 1.** Кристаллографические параметры соединений  $Ni_{3-x}GaTe_2$  ( $x = 0, 0.25, 0.5$ )

Параметр	$Ni_{2.98(1)}GaTe_2$	$Ni_{2.79(1)}GaTe_2$	$Ni_{2.58(1)}GaTe_2$
$a, \text{Å}$	3.93933(3)	3.93190(2)	3.9291(2)
$c, \text{Å}$	15.7933(2)	15.8571(1)	15.9060(6)
$V, \text{Å}^3$	212.250(3)	212.305(2)	212.65(2)
Заселенность Ni(2)	0.612(2)	0.500(3)	0.358(4)
Заселенность Ni(3)	0.372(3)	0.287(4)	0.224(5)

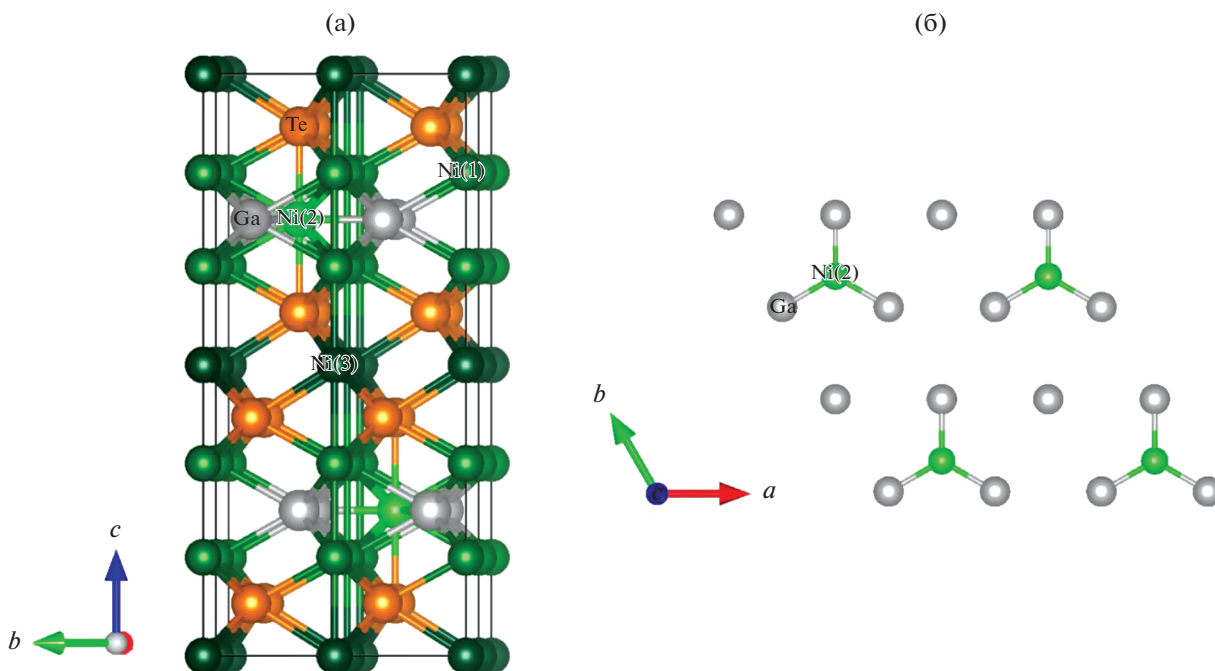
Расстояние Ni–Te в перечисленных тройных соединениях схоже с типичными межатомными расстояниями, обнаруженными в структурах большого числа бинарных теллуридов никеля, особенно в твердом растворе  $Ni_{1-x}Te$ , который представляет собой дефектную структуру NiAs. В работе [2] кристаллические структуры обедненных никелем соединений типа  $Ni_{3-x}GaTe_2$  ( $x = 0.25, 0.5$ ) были уточнены методом Ритвельда.

Следует отметить относительно постоянную заселенность позиции Ni(3) внутри ван-дер-ваальсовой щели (~25–30%), которая сопровождается снижением заселенности позиции Ni(2) внутри гетерометаллического фрагмента по мере уменьшения общего содержания Ni (50% в  $Ni_{2.79}GaTe_2$ , 36% в  $Ni_{2.58}GaTe_2$ ) (табл. 1). Увеличение параметра  $c$  при переходе от  $Ni_{2.79}GaTe_2$  к  $Ni_{2.58}GaTe_2$  объясняется уменьшением заселенности позиции Ni(3), поскольку ван-дер-ваальсова щель становится более ярко выраженной и меньше “стягивается” за счет нахождения в ней атомов никеля в части ячеек. Авторы [2] также полагают, что позиция Ni(2) в  $Ni_{3-x}GaTe_2$  не может быть полностью свободной. При попытках синтезировать соединение состава  $Ni_2GaTe_2$  была получена тройная фаза, содержащая  $Ni_{2.3}GaTe_2$  и  $Ga_2Te_3$ . Это является доказательством существования нижней границы содержания Ni в соединениях типа  $Ni_{3-x}GaTe_2$ . Возникновение сверхструктуры связано с упорядоченным заполнением позиции Ni(3) в плоскости  $ab$ , что наблюдается для соединений состава  $Ni_{3-x}GaTe_2$ , где  $0.5 \leq x \leq 0.65$ , 3/4 атомов никеля регулярно отсутствуют в позиции Ni(2), в отличие от соединения  $Ni_3GaTe_2$ , где позиции Ni(3)' и Ni(3)'' полностью заняты (рис. 1) [2]. В сверхъячейке с удвоенными параметрами  $a$  и  $b$  бывшие позиции Ni(2) в гетерометаллическом слое преобразуются в позиции Ni(2)' и Ni(2)'' . В предложенной симметрии первая позиция занята, в то время как вторая остается вакантной, что приводит к возникновению гетерометаллических фрагментов типа  ${}^2_{\infty}[Ni_{2.25}Ga]$ . Учитывая, что заселенность позиции Ni(3) в ван-дер-ваальсовой щели составляет ~30% (согласно данным уточнения по методу Ритвельда), авторы [2] считают, что идеальный состав для наблюдения данного типа

упорядочения близок к  $Ni_{2.55}GaTe_2$ . Это согласуется с верхним пределом содержания никеля, для которого идентифицирована сверхструктура данного типа. При  $x < 0.45$  наблюдается “стандартная” ячейка типа  $Ni_{2.98}GaTe_2$  с утроенным по сравнению с NiAs параметром  $c$ . Авторы [2] предполагают, что занятость позиции никеля внутри ван-дер-ваальсой щели постоянна. Однако в реальной структуре суммарная занятость может варьироваться, меняя соотношение между занятостью двух позиций  $d$ -металла и общим содержанием никеля [2].

Изучение процесса интеркаляции в структуры со слоистым строением имеет значение как для теоретической неорганической химии и физико-химии твердого тела, так и для направленного синтеза функциональных неорганических материалов, в том числе модельных. Особый интерес представляет использование интеркалятов слоистых халькогенидов щелочных металлов для получения наноматериалов, в частности электродов для металл-ионных аккумуляторов, при их обработке протонными растворителями [9–12]. Для интеркаляции лития в слоистые структуры-матрицы в настоящее время используют элементарный металлический Li [13], металлоорганические соединения лития:  $n$ -бутиллитий [14, 15], трет-бутиллитий [16], гидроксид лития [12], а также растворы металлического лития в жидком аммиаке [9]. Следует отметить, что ни один из этих методов не может гарантировать получение продуктов с заданным составом. Это обстоятельство определяет возможность более глубокого изучения свойств интеркалятов с различным содержанием атома-интеркалянта.

Первым примером применения гидрида лития в качестве интеркалирующего агента стала интеркаляция в графит, широко используемый как модельный объект [17, 18]. В дальнейшем LiH применяли для синтеза технологически важного продукта – литированной шпинели  $Li_{1+x}Mn_2O_{4-\delta}$ , используемой в качестве электрохимически активного материала перезаряжаемых литий-ионных батарей, в результате чего были получены однофазные продукты-шпинели с рекордным содержанием лития [19, 20]. Обнаружено, что в качестве побочных продуктов выделяются водо-



**Рис. 1.** Вид элементарной ячейки  $\text{Ni}_{3-x}\text{GaTe}_2$  со сверхструктурой,  $a_{\text{sup}} = b_{\text{sup}} = 2a_{\text{sub}}$  (а). Атомы Ni(2) и Ga упорядочены в плоскости  $ab$ , 2D-срез одного гетерометаллического слоя (б).

род и вода, соотношение которых меняется в зависимости от мольного соотношения интеркалирующего агента и матрицы, а также от режима отжига.

Таким образом, расширение систем, в которых возможно применение гидрида лития в качестве интеркалирующего агента, и изучение происходящих при этом превращений представляют актуальную задачу как для неорганической химии, так и для материаловедения в целом [21–28].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Прекурсоры.** В настоящей работе использовали  $\text{LiH}$  с содержанием основного вещества не менее 98% (по данным волюмометрического анализа). В качестве исходных веществ для синтеза  $\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$  использовали никель (порошок, 99.98%), галлий (слиток), теллур (порошок, 99.999%). Никель предварительно отжигали в течение нескольких часов при  $550^\circ\text{C}$  в токе сухого водорода хроматографической чистоты для восстановления оксидного слоя. Синтез исходной тройной матрицы  $\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$  проводили по стандартной высокотемпературной ампульной методике: стехиометрическую смесь исходных простых веществ помещали в прокаленную кварцевую ампулу диаметром 8–15 мм и длиной 50–100 мм, которую затем вакуумировали до остаточного давления  $5\text{--}10 \times 10^{-3}$  мм рт. ст., отплавляли в пламени кислородной горелки и отжигали в печи

при  $1023\text{ K}$  в течение 168 ч. Согласно результатам РФА, образец  $\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$  является однофазным. Исследования методом РФА выполняли на оборудовании ЦКП ИОНХ РАН (рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Advance,  $\text{CuK}\alpha$ -излучение, Ni-фильтр, детектор Lynxeye, геометрия на отражение) в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований. Регистрацию дифрактограмм литийсодержащих образцов проводили во фторопластовой кювете, образец в ней покрывали полиамидной пленкой Captone, которую фиксировали прижимным кольцом. Операции с веществами, чувствительными к компонентам воздуха (разгрузка и загрузка размольных стаканов, работа с гидридом лития, пробоподготовка литированных образцов к РФА), проводили в герметичном перчаточном боксе СПЕКС ГБ 22М (10 и 5 м.д.  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  соответственно), образцы помещали в низкофоновые кюветы с подложками из ориентированного монокристалла кремния (диапазон углов  $2\theta = 5^\circ\text{--}90^\circ$ , шаг  $0.01023^\circ$ , время накопления 0.15–0.3 с). Элементный анализ (Li, Ga, Ni, Te) выполняли с использованием эмиссионного спектрометра iCAP 6300 Duo с индуктивно связанной плазмой. Для перевода образца в раствор навеску определяемого вещества обрабатывали царской водкой, для приготовления которой использовали соляную и азотную кислоты особой чистоты. Содержание водорода определяли гравиметрическим методом путем сжигания

**Таблица 2.** Элементный состав изучаемых образцов, мол. д.

Образец, условия обработки	H	Li	Ga	Ni	Te
Ni <sub>3</sub> GaTe <sub>2</sub> , прекурсор	0	0	1.0014	2.9996	2.0014
Ni <sub>3</sub> GaTe <sub>2</sub> + 0.1 LiH, МХА*	0.0980	0.1012	1.0006	3.0011	2.0023
Ni <sub>3</sub> GaTe <sub>2</sub> + 0.5 LiH, МХА*	0.4967	0.5042	1.0011	3.0020	2.0013
Ni <sub>3</sub> GaTe <sub>2</sub> + 0.3 LiH, 523 К, 3 ч, Ar	0.2133	0.2999	1.0015	3.0021	2.0007
Ni <sub>3</sub> GaTe <sub>2</sub> + 0.1 LiH, 747 К, 24 ч, Ar	0	0.1013	1.0004	3.0017	2.0023
Ni <sub>3</sub> GaTe <sub>2</sub> + 0.3 LiH, 747 К, 36 ч, Ar	0	0.2996	0.9994	3.0021	1.9994
Ni <sub>3</sub> GaTe <sub>2</sub> + 0.7 LiH, 747 К, 36 ч, Ar	0	0.6766	1.0020	3.0022	1.5834

\* Препарат, полученный при совместном помоле прекурсоров LiH и Ni<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> (3–5 мин, 30 Гц), до отжига. МХА – механохимическая активация.

навески исследуемого вещества в токе кислорода высокой чистоты с улавливанием образовавшихся паров воды в U-образных трубках с безводным Mg(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Относительная погрешность определения данным методом составляет 1.5%. Во избежание потери определяемого водорода в виде простого вещества осуществляли дожиг газов, поступающих в U-образную трубку с Mg(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> над проволокой CuO. Механохимическую активацию проводили с использованием шаровой вибрационной мельницы Retsch MM400 с размольными стаканами (V = 25 мл), футерованными ZrO<sub>2</sub>, и размольными шарами (5 мм) из ZrO<sub>2</sub>. Соотношение массы обрабатываемой навески вещества к массе шаров поддерживали на уровне 20 : 1.

Измерения рН проводили с помощью анализатора жидкости “Мультитест” ИПЛ-201 с диапазоном измерения рХ (–2...+20) с погрешностью ±0.02 рХ (рН). Навеску гидролизующего препарата Li<sub>x</sub>Ni<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> подбирали достаточной для образования 0.01 М раствора LiOH по окончании гидролиза. Для гидролиза использовали бидистиллированную воду, величину рН измеряли при постоянном перемешивании суспензии интеркалята в воде магнитной мешалкой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения интеркаляции заданное количество гидрида лития подвергали механохимической активации (25 мин, 30 Гц), затем в размольный стакан вносили требуемое количество однофазного образца Ni<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> (матрицы) и полученную смесь активировали в течение 3–5 мин в том же режиме. Такой порядок активации был выбран ввиду возможности механолиза теллурида, обладающего слоистой структурой. В настоящей работе исследовали смеси с мольной долей вводимого LiH, равной 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 и 0.7. Полученные таким образом механокомпозиаты имели заданное расчетное соотношение элементов (табл. 2) и фазовый состав, отвечающий механической смеси

(рис. 2). Извлеченные из размольного сосуда механокомпозиаты переносили в алундовые тигли (l = 35 мм, d<sub>внутр</sub> = 6 мм, d<sub>внеш</sub> = 8 мм) и помещали в проточную кварцевую трубку-реактор. Отжиг проводили в атмосфере аргона высокой чистоты (p(O<sub>2</sub>) ~ 0.0001 атм). На дифрактограммах образцов, прошедших отжиг при 523 К (2 ч) все еще наблюдаются рефлексы LiH, а элементный состав остается практически без изменения, незначительно уменьшается только содержание водорода, что свидетельствует о выделении его в молекулярной форме. Увеличение продолжительности отжига до 24–48 ч и температуры до 747 К в случае LiH с мольной долей, не превышающей x = 0.3, приводит к образованию однофазных образцов Li<sub>x</sub>Ni<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> с сохранением структуры исходной матрицы Ni<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> (рис. 2). Полученные таким образом образцы не содержат водорода (табл. 2). При интеркаляции лития элементарная ячейка Ni<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> претерпевает незначительное сжатие, например, для x = 0.3 a = 3.9557(5), c = 15.6555(18) Å, V = 212.51(4) Å<sup>3</sup>.

При увеличении мольной доли LiH в смесях (>0.3) или температуры выше 823 К наряду с полным выделением водорода наблюдается разложение матрицы – на стенках реакционной кварцевой трубки образуется зеркало элементного теллура, что также заметно по изменению элементного состава (табл. 2). Массоперенос теллура возможен как вследствие испарения из матрицы, так и в результате термолиза H<sub>2</sub>Te, источником водорода для образования которого служит гидрид-ион, вносимый с LiH.

На рис. 3 представлены результаты гидролиза интеркалятов, свидетельствующие о том, что гидрилиз проходит с выраженным индукционным периодом. Величина рН начинает возрастать вследствие образования LiOH спустя определенное время после внесения препарата Li<sub>x</sub>Ni<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> в воду, чего нельзя ожидать от взаимодействия с водой LiH или металлического Li, локализованных на

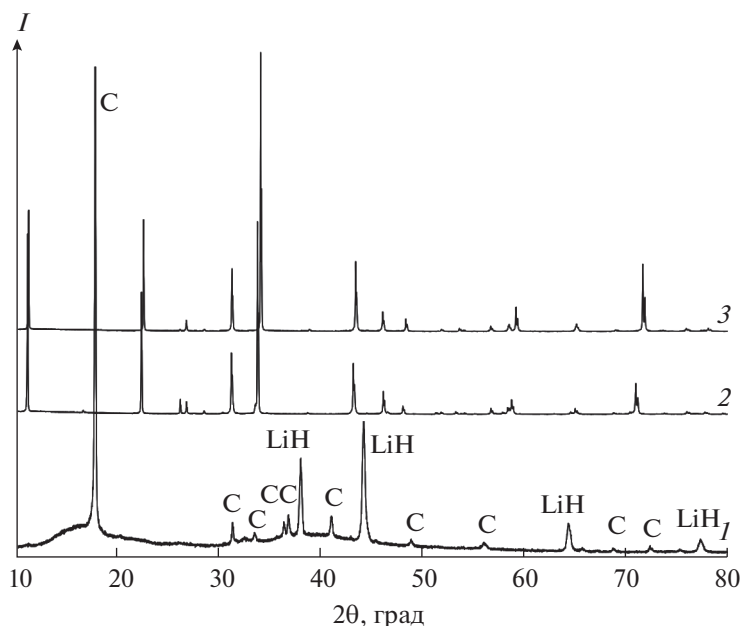


Рис. 2. Дифрактограммы: 1 – LiH в кювете из фторопласта (C), 2 – исходная матрица  $\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$ , 3 – интеркалят  $\text{Li}_{0.3}\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$ .

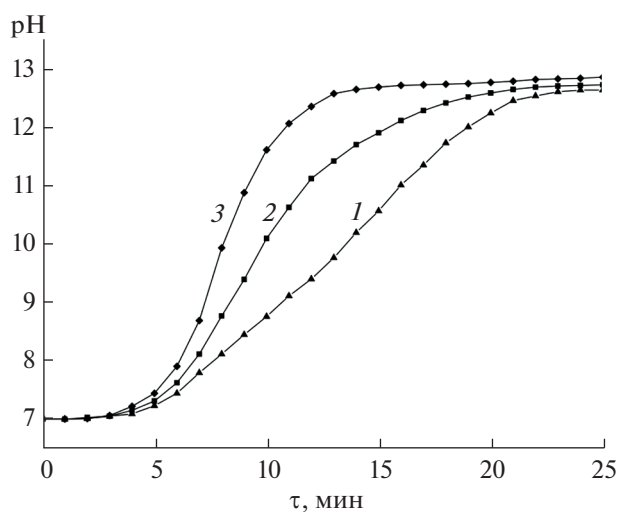


Рис. 3. Гидролиз интеркалятов  $\text{Li}_x\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$ ,  $x = 0.11$  (1), 0.2 (2), 0.305 (3).

поверхности кристаллитов образца или находящихся в виде механической смеси с матрицей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые показана возможность применения гидрида лития LiH в качестве интеркалирующего агента для получения чистых образцов интеркалятов слоистого многокомпонентного теллурида  $\text{Li}_x\text{Ni}_3\text{GaTe}_2$  со структурой исходной матрицы и заданным содержанием лития по твердофазной

реакции. Определены возможности и ограничения данного метода, описаны сопутствующие превращения в широком диапазоне мольных долей LiH в исходных смесях и температур. Данные, полученные в настоящее время, позволяют предполагать статистическое распределение лития в ван-дер-ваальсовой щели матрицы. Для более детального изучения интеркалятов необходимы исследования монокристаллических интеркалированных образцов.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП НИЦ “Курчатовский институт” – ИРЕА.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-13-00451).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litvinenko O.N., Kuznetsov A.N., Olenev A.V. et al. // Russ. Chem. Bull. 2007. V. 56. № 10. P. 1945. <https://doi.org/10.1007/s11172-007-0301-z>

2. *Isaeva A.A., Makarevich O.N., Kuznetsov A.N. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2010. P. 1395.  
<https://doi.org/10.1002/ejic.200901027>
3. *Larsson A.-K., Noren L., Withers R.L. et al.* // J. Solid State Chem. 2007. V. 180. P. 2723.  
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.07.020>
4. *Noren L., Withers R.L., Brink F.J.* // J. Alloys Compd. 2003. V. 353. P. 133.  
[https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)01309-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)01309-9)
5. *Deiseroth H.-J., Aleksandrov K., Reiner et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2006. V. 8. P. 1561.  
<https://doi.org/10.1002/ejic.200501020>
6. *Deiseroth H.-J., Sprirovski F., Reiner C. et al.* // Z. Kristallogr. – New Cryst. Struct. 2007. V. 222. P. 169.  
<https://doi.org/10.1524/ncrs.2007.0070>
7. *Dankwort T., Duppel V., Deiseroth H.-J. et al.* // Sci. Technol. 2016. V. 31. P. 7.  
<https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/9/094001>
8. *Reynolds T.K., Kelley R.F., DiSalvo F.J.* // J. Alloys Compd. 2004. V. 366. P. 136.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.07.008>
9. *Ding S., Bux S.K., King D.J. et al.* // J. Mater. Chem. 2009. V. 19. P. 2588.  
<https://doi.org/10.1039/B820226E>
10. *Raza A., Hassan J.Z., Ikram M. et al.* // Adv. Mater. Interfaces. 2021. V. 8. № 14. P. 2002205.  
<https://doi.org/10.1002/admi.202002205>
11. *Zhang L., Chen C., Zhou J. et al.* // Adv. Funct. Mater. 2020. V. 30. № 45. P. 2004139.  
<https://doi.org/10.1002/adfm.202004139>
12. *Ren L., Qi X., Liu Y. et al.* // J. Mater. Chem. 2012. V. 22. № 11. P. 4921.  
<https://doi.org/10.1039/c2jm15973b>
13. *Yajima T., Koshiko M., Zhang Y. et al.* // Nat. Comm. 2016. № 7. P. 13809.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms13809>
14. *Guzmán R., Morales J., Tirado J.L.* // J. Mater. Chem. 1993. V. 3. № 12. P. 1271.  
<https://doi.org/10.1039/jm9930301271>
15. *Yang D., Frindt R.F.* // J. Phys. Chem. Solids. 1996. V. 57. № 6–8. P. 1113.  
[https://doi.org/10.1016/0022-3697\(95\)00406](https://doi.org/10.1016/0022-3697(95)00406)
16. *Golden J.H., DiSalvo F.J., Fréchet J.M.J.* // Mater. Sci. Forum. 1994. V. 152–153. P. 209.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.152-153.209>
17. *Elansari L., Marassl R., Tossici R. et al.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol., Sect. A. 1998. V. 310. № 1. P. 309.  
<https://doi.org/10.1080/10587259808045354>
18. *Konar S., Häusserman U., Svensson G.* // Chem. Mater. 2015. V. 27. № 7. P. 2566.  
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b00235>
19. *Бузанов Г.А., Нипан Г.Д., Жижин К.Ю. и др.* Пат. РФ RU2591154. Бюл. изобр. № 19. Оpubл. 10.07.2016.
20. *Buzanov G.A., Nipan G.D., Zhizhin K.Yu. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 471. № 1. P. 330.  
<https://doi.org/10.1134/s0012500816110082>
21. *Lapshin O.V., Boldyreva E.V., Boldyrev V.V.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 433.  
<https://doi.org/10.1134/S0036023621030116>
22. *Davydova A.A., Raksha E.V., Glazunova V.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 324.  
<https://doi.org/10.1134/S0036023621030062>
23. *Pechen L.S., Makhonina E.V., Medvedeva A.E. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 777.  
<https://doi.org/10.1134/S0036023621050144>
24. *Shelyapina M.G., Lushpinskaya I.P., Kurnosenko S.A. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2020. V. 90. P. 760.  
<https://doi.org/10.1134/S1070363220040337>
25. *Leont'eva N.N., Drozdov V.A., Bel'skaya O.B. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2020. V. 90. P. 509.  
<https://doi.org/10.1134/S1070363220030275>
26. *Makaryan I.A., Sedov I.V.* // Russ. J. Gen. Chem. 2021. V. 91. P. 1912.  
<https://doi.org/10.1134/S1070363221090371>
27. *Doinikov D.A., Zavgorodnii A.S., Kazakov I.V. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2021. V. 91. P. 1969.  
<https://doi.org/10.1134/S1070363221100078>
28. *Postnikova I.V.* // Russ. J. Gen. Chem. 2021. V. 91. P. 1218.  
<https://doi.org/10.1134/S1070363221060360>