

УДК 661.68654.057544.582.4

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЧИСТОГО ТЕТРАХЛОРИДА КРЕМНИЯ-28 ИЗ ТЕТРАФТОРИДА КРЕМНИЯ-28

© 2022 г. О. Ю. Трошин^{1, 2, *}, А. Д. Буланов^{1, 2}, Ю. П. Кириллов¹,
А. М. Потапов¹, П. А. Отопкова¹, М. Е. Комшина^{1, 2}, К. Ф. Игнатова¹, А. А. Ермаков¹

¹Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых Российской академии наук, ул. Троицкая, 49, БОКС-75, Нижний Новгород, 603951 Россия

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022 Россия

*e-mail: troshin@ihps-nnov.ru

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.

После доработки 20.05.2022 г.

Принята к публикации 23.05.2022 г.

Изучено взаимодействие тетрафторида кремния с хлоридом алюминия(III) в закрытом реакторе в интервале температур 473–543 К, протекающее в форме последовательных реакций $\text{SiF}_4 \rightarrow \text{SiClF}_3 \rightarrow \text{SiCl}_2\text{F}_2 \rightarrow \text{SiCl}_3\text{F} \rightarrow \text{SiCl}_4$. Определены значения эффективных констант скоростей и энергия активации последовательных реакций превращения тетрафторида кремния в тетрахлорид кремния. Разработана методика получения изотопно обогащенного $^{28}\text{SiCl}_4$ из $^{28}\text{SiF}_4$, включающая стадии синтеза и дистилляционной очистки $^{28}\text{SiCl}_4$. Содержание примесей химических элементов в высокочистом $^{28}\text{SiCl}_4$, по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, находится на уровне $n \times 10^{-1} - n \times 10^{-4}$ мкг/г, содержание изотопа кремния-28 в составе кремния составляет 99.99757 ± 0.00060 ат. %.

Ключевые слова: кремний, фторид, хлорид, изотопы, получение, очистка

DOI: 10.31857/S0002337X22080127

ВВЕДЕНИЕ

Одним из активно развивающихся направлений фундаментальных и прикладных исследований является получение, характеристика свойств и практическое применение изотопно модифицированных веществ с высокой степенью химической и изотопной чистоты [1]. Особый интерес вызывает получение и изучение влияния изотопного состава на свойства оптических материалов, таких как кварцевое стекло. В ряде работ [2–5] на основании теоретической оценки отмечается возможность снижения оптических потерь и расширения окна прозрачности оптического волокна за счет светопроводящей сердцевины на основе $^{30}\text{Si}^{18}\text{O}_2$ и оболочки на основе $^{28}\text{Si}^{16}\text{O}_2$. Также отмечается возможность обеспечения эффекта полного внутреннего отражения в такой кварцевой световодной структуре за счет различия в изотопном составе кремния и кислорода без использования легирующих добавок [6].

Для получения высокочистого кварцевого стекла различными способами (осаждение из паровой фазы, золь–гель-метод) используется тетрахлорид кремния, а в качестве исходного вещества для разделения изотопов кремния методом газового

центрифугирования используется его тетрафторид [7]. Поэтому разработка методики получения изотопно обогащенного тетрахлорида кремния из тетрафторида кремния представляется актуальной задачей. Следует отметить, что центробежное разделение изотопов кремния можно проводить с использованием тетрахлорида кремния или трихлорсилана [8], однако недостатком этого способа является низкий выход целевого продукта. В литературе описано получение небольших количеств $^{28}\text{SiCl}_4$ [9] и $^{29}\text{SiCl}_4$ [10] путем хлорирования дефицитных изотопов кремния; сведения о степени изотопной и химической чистоты веществ в этих работах отсутствуют. В патенте [11] разработана методика получения $^{28}\text{SiCl}_4$ со степенью обогащения по ^{28}Si на уровне 99.9% из тетрафторида кремния-28.

В работе [12] изучена конверсия летучих фторидов углерода, кремния, германия в хлориды при помощи хлоридов магния, кальция, железа(III), алюминия(III). Практический выход SiCl_4 по SiF_4 в статических условиях составил 83% при использовании избытка хлорида алюминия(III), начальном давлении тетрафторида кремния около 9 атм, температуре 195–244°C; кинетические законо-

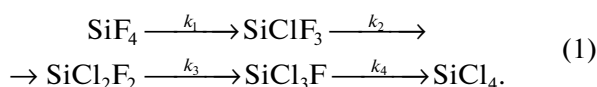
мерности превращения SiF_4 в SiCl_4 в работе не рассматривались. Отмечается наличие фторидов-хлоридов кремния SiCl_3F , SiCl_2F_2 , SiClF_3 в полученном SiCl_4 [12]. Эффективным способом очистки SiCl_4 от примесей фторидов-хлоридов кремния является дистилляция [13].

Целью данной работы является изучение кинетики взаимодействия тетрафторида кремния с хлоридом алюминия(III) в статических условиях, разработка методики получения $^{28}\text{SiCl}_4$ с высокой химической и изотопной чистотой из $^{28}\text{SiF}_4$, исследование примесного состава $^{28}\text{SiCl}_4$ и изотопного состава кремния в $^{28}\text{SiCl}_4$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Опыты по изучению кинетики взаимодействия тетрафторида кремния с хлоридом алюминия(III) в статических условиях проводили на установке, которая включает в себя газораспределительную гребенку с вакуумным насосом, горизонтально установленный фланцевый реактор из нержавеющей стали 12X18H10T с резистивным нагревателем и регулятором температуры “Метакон”, баллон с тетрафторидом кремния, приемный баллон для тетрахлорида кремния. Давление в установке контролировали по показаниям образцового вакуумметра ВО и образцового манометра МО 11201. В опытах использовали хлорид алюминия(III) (ультрасухой, 99.99%; ООО “Ланхит”, г. Москва) и тетрафторид кремния, полученный путем термического разложения Na_2SiF_6 [14].

Методика проведения опытов состояла из следующих этапов. В реактор загружали навеску хлорида алюминия(III), реактор вакуумировали и заполняли тетрафторидом кремния до расчетного давления, обеспечивающего соотношение количеств веществ $n(\text{SiF}_4) : n(\text{AlCl}_3) = 3 : 8$ (двухкратный избыток AlCl_3 относительно стехиометрического). Реактор с реагентами нагревали до заданной температуры (скорость нагрева 10 К/мин) и выдерживали до выхода концентрации тетрахлорида кремния в газовой смеси на плато. Опыты проводили при 200, 235, 270°C. Состав газообразных продуктов реакции определяли хроматографическим методом (газовый хроматограф “Цвет 500” с детектором по теплопроводности) по методике, приведенной в работе [15]; газовые пробы отбирали в стеклянные ампулы с фторопластовыми штоками. На основании результатов газохроматографического анализа получали кинетические кривые для веществ-участников последовательной реакции



Значения эффективных констант скоростей указанных последовательных реакций k_i определяли на основании кинетических кривых для галогенидов кремния в газовой смеси (т.н. обратная задача химической кинетики) путем решения системы дифференциальных уравнений для последовательной необратимой четырехстадийной реакции [16] с применением пакета прикладных программ MATLAB 8. На основании температурной зависимости эффективных скоростей последовательных реакций k_i рассчитывали значения эффективной энергии активации стадий и общее значение энергии активации последовательной реакции (1).

Изотопно обогащенный тетрахлорид кремния-28 получали по реакции $^{28}\text{SiF}_4$ (обогащение по изотопу ^{28}Si 99.99769 ± 0.00026 ат. %, АО “ПО “Электрохимический завод”, г. Зеленогорск) и хлорида алюминия(III) по описанной выше методике при 270°C. Полученный $^{28}\text{SiCl}_4$ очищали методом изотермической дистилляции в кварцевой аппаратуре [17] со средней скоростью перегонки 1.5×10^{-3} см/мин.

Содержание примесей фторидов-хлоридов кремния и примесей HF, HCl, Si_2OF_6 , Si_2OCl_6 , которые образуются в результате гидролиза галогенидов кремния, в $^{28}\text{SiCl}_4$ определяли методом ИК-спектроскопии на приборе BrukerVertex 80v с детектором DTGS в диапазоне 450–7000 cm^{-1} . Разрешение и апертура составляли 1 cm^{-1} и 5 мм соответственно. Пробы отбирали в кювету из нержавеющей стали с окнами из ZnSe (длина оптического пути 10 см), давление пробы 20 мм. рт. ст. Концентрацию примесей фторидов-хлоридов кремния в тетрахлориде кремния рассчитывали по методике, приведенной в работе [18]. Интегральные коэффициенты поглощения для фторидов-хлоридов кремния рассчитывались *ab initio* неэмпирическим методом SCF с учетом электронной корреляции по теории возмущений Меллера–Плесета (MP2) с использованием базисного набора 6-311G(3df, 3pd) [19].

Содержание примесей химических элементов в $^{28}\text{SiCl}_4$ и изотопный состав кремния в составе $^{28}\text{SiF}_4$, $^{28}\text{SiCl}_4$ определяли методом масс-спектрометрии (масс-спектрометр высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой ELEMENT 2 Thermo Scientific) по методике, приведенной в работе [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены кинетические кривые для галогенидов кремния SiF_4 , SiClF_3 , SiCl_2F_2 , SiCl_3F , SiCl_4 , полученные при температуре 270°C. Знаками обозначены экспериментальные данные по содержанию веществ, линиями – расчет содержания веществ по кинетическому уравнению перво-

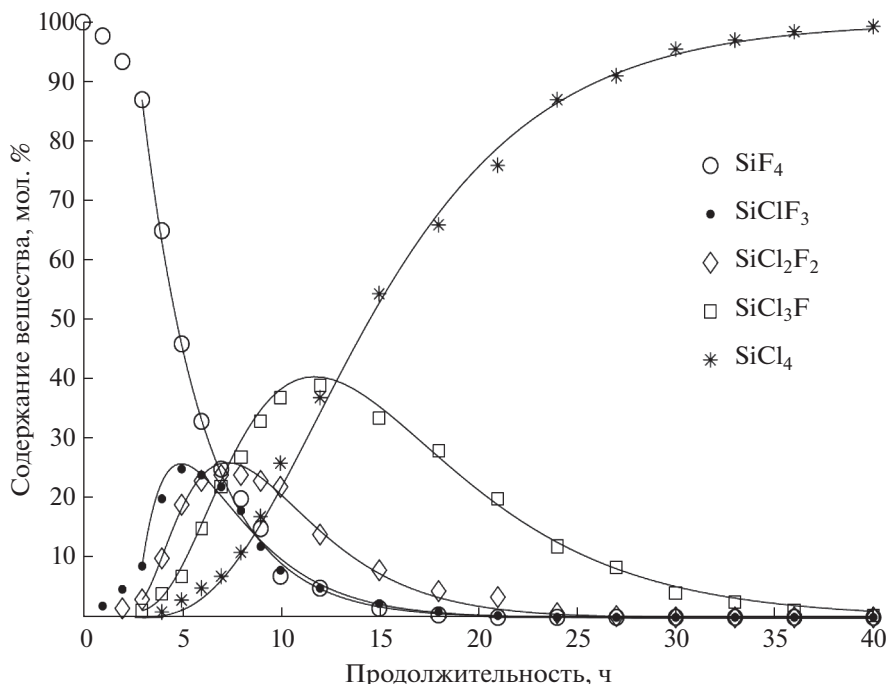


Рис. 1. Кинетические кривые для SiF_4 , SiClF_3 , SiCl_2F_2 , SiCl_3F , SiCl_4 в составе газообразных продуктов реакции $^{28}\text{SiF}_4$ с AlCl_3 при температуре 270°C (сплошные линии – расчет по кинетическому уравнению).

го порядка. Из рис. 1 видно, что экспериментальные данные удовлетворительно соответствуют расчетным; наблюдаемое различие опытных и расчетных данных по содержанию SiF_4 , SiClF_3 в начале опыта (0–3 ч), по-видимому, обусловлено конечной скоростью процессов нагрева реактора, перехода хлорида алюминия(III) в паровую фазу и взаимодействия его с тетрафторидом кремния. В ходе процесса содержание SiF_4 в смеси снижается, образуются промежуточные фториды-хлориды кремния SiClF_3 , SiCl_2F_2 , SiCl_3F и накапливается SiCl_4 ; подобная зависимость характерна для последовательных (консективных) реакций, в которых продукт одной стадии является исходным веществом для последующей [21].

Расчетные значения эффективных констант скоростей последовательных реакций (1) при температуре 473 К составляют (ч^{-1}): $k_1 = 0.11$, $k_2 = 0.30$, $k_3 = 0.19$, $k_4 = 0.04$; при 543 К (ч^{-1}): $k_1 = 0.32$, $k_2 = 0.57$, $k_3 = 0.42$, $k_4 = 0.16$.

При сопоставлении значений эффективных констант скоростей последовательных реакций k_1 – k_4 видно, что лимитирующей стадией процесса синтеза SiCl_4 является реакция образования SiCl_4 из SiCl_3F .

На основании температурной зависимости k определяли значения эффективной энергии активации последовательных реакций (1) (кДж/моль): $E_{a,1} = 32.6$, $E_{a,2} = 19.6$, $E_{a,3} = 24.2$, $E_{a,4} = 42.3$; общая

эффективная энергия активации реакции (1) составляет 118.7 кДж/моль.

Отметим, что хлорид алюминия(III) при повышенной температуре обладает заметной летучестью (тройная точка при 192.6°C , 0.228 МПа [22]), что увеличивает скорость реакции тетрафторида кремния с хлоридом алюминия(III). Пары непрореагировавшего хлорида алюминия(III) конденсируются на фланце реактора, что позволяет отделять его от нелетучего фторида алюминия. Практический выход $^{28}\text{SiCl}_4$ по $^{28}\text{SiF}_4$ составляет $94 \pm 2\%$.

На рис. 2 приведен ИК-спектр $^{28}\text{SiCl}_4$, полученного по реакции $^{28}\text{SiF}_4$ с хлоридом алюминия(III).

В спектре присутствуют полосы поглощения галогенидов кремния SiF_4 , SiClF_3 , SiCl_2F_2 , SiCl_3F , SiCl_4 , а также хлороводорода.

В табл. 1 приведены результаты ИК-спектроскопического определения содержания фторидов-хлоридов кремния, HF , HCl , Si_2OF_6 , Si_2OCl_6 в образцах синтезированного и дистиллированного тетрахлорида кремния-28, а также значения пределов обнаружения указанных веществ. Видно, что в полученном образце тетрахлорида кремния-28 присутствуют примеси SiF_4 , SiCl_3F , SiCl_2F_2 , SiClF_3 и HCl на уровне $n \times 10^{-3}$ – $n \times 10^{-2}$ мол. %. В дистиллированном $^{28}\text{SiCl}_4$ содержание примесей SiCl_2F_2 , SiClF_3 и HCl находится

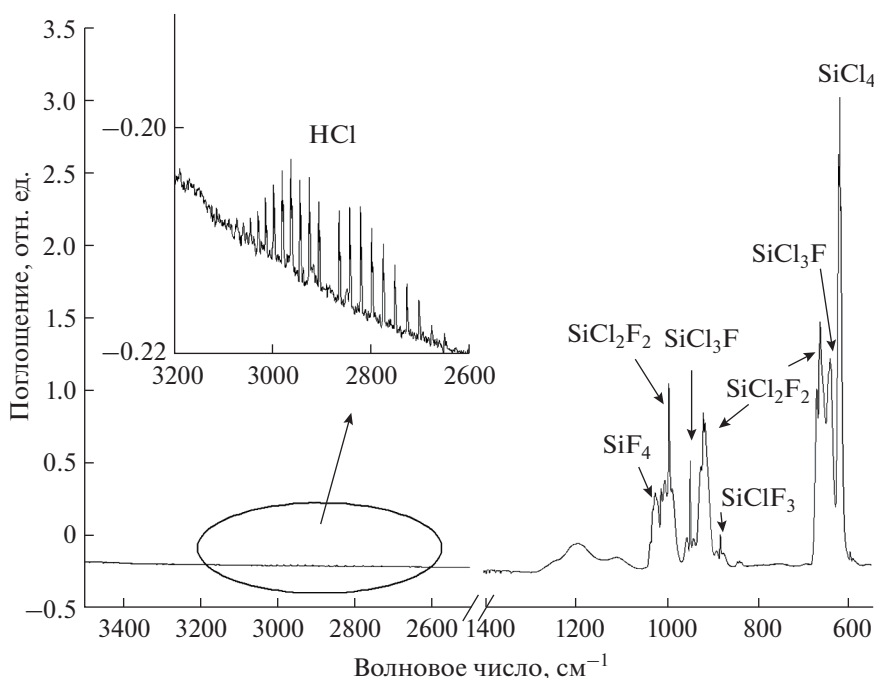


Рис. 2. ИК-спектр $^{28}\text{SiCl}_4$, полученного по реакции $^{28}\text{SiF}_4$ с хлоридом алюминия(III).

ниже уровня ПО методики ИК-спектроскопического анализа ($(1-3) \times 10^{-3}$ мол. %), содержание SiCl_3F находится на уровне ПО методики. Практический выход очищенного $^{28}\text{SiCl}_4$ составил $90 \pm 2\%$.

В табл. 2 приведены результаты определения содержания примесей химических элементов в $^{28}\text{SiCl}_4$, полученном по реакции $^{28}\text{SiF}_4$ с хлоридом алюминия(III), и в $^{28}\text{SiCl}_4$, очищенном методом изотермической дистилляции, методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Из табл. 2 видно, что основной вклад в примесный

состав полученного $^{28}\text{SiCl}_4$ вносят примеси алюминия, кальция и железа, содержание которых находится на уровне $1-2$ мкг/г $^{28}\text{SiCl}_4$. Дистилляционная очистка позволяет снизить содержание распространенных химических элементов до уровня $n \times 10^{-1}$ мкг/г; содержание примесей металлов (хром, никель, железо, медь, натрий, магний и др.) находится ниже уровня ПО данной методики ($n \times 10^{-1} - n \times 10^{-3}$ мкг/г).

В табл. 3 приведены результаты определения изотопного состава кремния в исходном $^{28}\text{SiF}_4$ и

Таблица 1. Значения пределов обнаружения (ПО) и содержание ряда примесей в образцах $^{28}\text{SiCl}_4$ по данным ИК-спектроскопии

Примесь	ν , cm^{-1}	ПО, мол. %	Содержание примеси, мол. %	
			$^{28}\text{SiCl}_4$ исходный	$^{28}\text{SiCl}_4$ дистиллят
SiCl_3F	947	3×10^{-3}	$(4.7 \pm 1.0) \times 10^{-2}$	$(4.3 \pm 1.0) \times 10^{-3}$
SiCl_2F_2	915	1×10^{-3}	$(9.0 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	<ПО
SiClF_3	880	1×10^{-3}	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	<ПО
SiF_4	1031	1×10^{-4}	$(5.0 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	<ПО
HCl	2887	2×10^{-3}	$(2.5 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	<ПО
HF	4038	1×10^{-2}	<ПО	<ПО
Si_2OF_6	838	2×10^{-3}	<ПО	<ПО
Si_2OCl_6	1115	1×10^{-3}	<ПО	<ПО

Примечание. <ПО – содержание вещества ниже предела обнаружения методики.

Таблица 2. Содержание примесей химических элементов в образцах $^{28}\text{SiCl}_4$ по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой

Примесь	Содержание примеси в образце, мкг/г	
	$^{28}\text{SiCl}_4$ после синтеза	$^{28}\text{SiCl}_4$ дистиллят
Al	1.4 ± 0.6	0.20 ± 0.05
As	<0.1	<0.1
B	0.22 ± 0.05	<0.06
Ba	<0.003	<0.003
Ca	1.0 ± 0.4	0.24 ± 0.07
Cd	0.005 ± 0.001	<0.0002
Co	<0.001	<0.001
Cr	0.011 ± 0.004	<0.001
Cu	0.03 ± 0.01	<0.003
Fe	1.9 ± 0.5	<0.2
K	0.08 ± 0.01	<0.02
Li	<0.002	<0.002
Mg	0.052 ± 0.007	<0.04
Mn	0.012 ± 0.004	<0.005
Na	0.21 ± 0.08	<0.02
Ni	<0.03	<0.03
P	<0.05	<0.05
Pb	0.0030 ± 0.0005	0.0008 ± 0.0001
Sn	0.5 ± 0.1	<0.006
Sr	0.0024 ± 0.0003	0.0011 ± 0.0003
Te	<0.004	<0.004
Ti	0.011 ± 0.003	0.005 ± 0.001
Tl	<0.003	<0.003
V	<0.002	<0.002
Zn	0.08 ± 0.02	0.09 ± 0.02

Таблица 3. Изотопный состав кремния в составе $^{28}\text{SiF}_4$, $^{28}\text{SiCl}_4$ по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой

Изотоп кремния	Содержание изотопа кремния в составе Si, ат. %	
	исходный $^{28}\text{SiF}_4$	$^{28}\text{SiCl}_4$ дистиллят
^{28}Si	99.99769 ± 0.00026	99.99757 ± 0.00060
^{29}Si	0.00226 ± 0.00024	0.00223 ± 0.00055
^{30}Si	0.00005 ± 0.00003	0.00020 ± 0.00006

дистиллированном $^{28}\text{SiCl}_4$ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

При сопоставлении данных табл. 3 видно, что содержание изотопов ^{28}Si и ^{29}Si в составе исходного $^{28}\text{SiF}_4$ и дистиллированного $^{28}\text{SiCl}_4$ в пределах погрешности определения не изменяется, различие в содержании изотопа ^{30}Si в этих веществах выходит за рамки погрешности определения. Вероятной причиной этого различия является небольшое изотопное разбавление кремния на стадиях синтеза и очистки в кварцевой аппаратуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено взаимодействие тетрафторида кремния с хлоридом алюминия(III) в закрытом реакторе в интервале температур 200–270°C, протекающее в форме последовательных реакций $\text{SiF}_4 \rightarrow \text{SiClF}_3 \rightarrow \text{SiCl}_2\text{F}_2 \rightarrow \text{SiCl}_3\text{F} \rightarrow \text{SiCl}_4$. Определены значения эффективных констант скоростей этих реакций при 473 и 543 К и энергии активации последовательных реакций превращения тетрафторида кремния в тетрахлорид кремния: $E_{a,1} = 32.6$, $E_{a,2} = 19.6$, $E_{a,3} = 24.2$, $E_{a,4} = 42.3$; общая эффективная энергия активации 118.7 кДж/моль.

Разработана методика получения изотопно обогащенного $^{28}\text{SiCl}_4$ из $^{28}\text{SiF}_4$, включающая стадии синтеза и дистилляционной очистки $^{28}\text{SiCl}_4$. Практический выход $^{28}\text{SiCl}_4$ по $^{28}\text{SiF}_4$ на стадии синтеза составляет $94 \pm 2\%$; практический выход высокочистого $^{28}\text{SiCl}_4$ на стадии очистки – $90 \pm 2\%$. Содержание SiCl_3F в $^{28}\text{SiCl}_4$, по данным ИК-спектроскопии составляет $(4.3 \pm 1.0) \times 10^{-3}$ мол. %, SiCl_2F_2 и SiClF_3 – менее 1×10^{-3} мол. %. Содержание примесей химических элементов в высокочистом $^{28}\text{SiCl}_4$, по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, находится на уровне $n \times 10^{-1} - n \times 10^{-4}$ мкг/г, содержание изотопа кремния-28 в составе кремния составляет 99.99757 ± 0.00060 ат. %.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят научного руководителя Института химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук академика М.Ф. Чурбанова за детальное обсуждение работы.

Работа выполнена по Программе НИР Госзадания FFSR–2022–0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б.М., Арефьев Д.Г., Баранов В.Ю. и др. Изотопы: свойства, получение, применение. М.: Физматлит, 2005. Т. 2. 728 с.
2. Kelsey V., Alexander J.E., Burden S.J. Isotopically Engineered Optical Materials: Пат. США № 20030039865. Оpubл. 27.02.2003.
3. Allan D.C., Brown J.T., Chacon L.C. et al. Isotopically Altered Optical Fiber: Пат. США № 6810197. Оpubл. 26.10.2004.
4. Brown T.G., Painter B.A. Low Loss Isotopic Optical Waveguides: Пат. США № 20030002834. Оpubл. 02.01.2003.
5. Heitmann W., Klein K.F. Glass for Optical Waveguides or the like: Пат. США № 6490399. Оpubл. 03.12.2002.
6. Плеханов В.Г. Изотопическая инженерия // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173. № 7. С. 711–738. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200011i.1245>
7. Abrosimov N.V., Arefev D.G., Becker P. et al. A New Generation of 99.999% Enriched ^{28}Si Single Crystals for the Determination of Avogadro's Constant // Metrologia. 2017. № 54. P. 599–609. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7a62>
8. Тухомиров А.В. Способ разделения изотопов кремния: Пат. РФ № 2172642. Оpubл. 27.09.2001.
9. Bracht H., Staskunaite R., Haller E.E., Fielitz P., Borchardt G., Grambole D. Silicon Diffusion in Sol-Gel Derived Isotopically Enriched Silica Glasses // J. Appl. Phys. 2005. № 97. P. 046107 (1–3). <https://doi.org/10.1063/1.1857051>
10. Palmi M., Szalay R., Barczak D., Varga Z., Nagy L.N., Gollwitzer C., Krumrey M. Total Synthesis of Isotopically Enriched Si-29 Silica NPs as Potential Spikes for Isotope Dilution Quantification of Natural Silica NPs // J. Colloid Interface Sci. 2015. № 445. P. 161–165. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.12.085>
11. Чурбанов М.Ф., Буланов А.Д., Трошин О.Ю., Гребеньков К.С. Способ получения изотопнообогатленного тетрахлорида кремния: Пат. РФ № 2618265. Оpubл. 03.05.2017.
12. Schumb W.C., Breck D.W. Some Metathetical Reactions of the Gaseous Fluorides of Group IV // J. Am. Chem. Soc. 1952. № 74(7). P.1754–1760. <https://doi.org/10.1021/JA01127A043>
13. Трошин О.Ю., Буланов А.Д., Чернова О.Ю. Равновесие жидкость–пар в системе SiCl_4 – примеси $\text{SiCl}_{4-n}\text{F}_n$ ($n = 1-4$) // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 8. С. 888–891. <https://doi.org/10.1134/S0002337X1808016X>
14. Буланов А.Д., Пряхин Д.А., Балабанов В.В. Получение высокочистого тетрафторида кремния термическим разложением Na_2SiF_6 // Журн. прикл. химии. 2003. Т. 76. № 9. С. 1433–1435.
15. Сорочкина Т.Г., Чернова О.Ю., Трошин О.Ю., Солин А.Ю., Буланов А.Д., Ермаков А.А. Газохроматографическое определение фторид-хлоридов кремния $\text{SiCl}_n\text{F}_{4-n}$ ($n = 0-4$), полученных по реакции тетрафторида кремния с хлоридом алюминия(III) // Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 4. С. 525–531. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.4.011>
16. Родигин Н.М., Родигина Э.Н. Последовательные химические реакции: математический анализ и расчеты. М.: Изд. АН СССР, 1960. 138 с.

17. *Мицуике А.* Методы концентрирования микроэлементов в неорганическом анализе: Пер. с англ. М.: Химия, 1986. 152 с.
18. *Чупров Л.А., Сенников П.Г., Тохадзе К.Г., Игнатов С.К., Шремс О.* Примеси в тетрафториде кремния и получаемом из него силане по данным ИК-Фурье-спектроскопии высокого разрешения // Неорган. материалы. 2006. Т. 42. № 8. С. 1017–1024.
19. *Burtsev A.P., Bocharov V.N., Ignatov S.K. et al.* Integral Intensities of Absorption Bands of Silicon Tetrafluoride in the Gas Phase and Cryogenic Solution: Experiment and Calculation // Opt. Spectrosc. 2005. V. 98. № 2. P. 227–234.
<https://doi.org/10.1134/1.1870065>
20. *Отюкова П.А., Потанов А.М., Сучков А.И., Буланов А.Д., Лашков А.Ю., Курганова А.Е.* Изотопный анализ высокообогащенного кристаллического ^{28}Si и исходного $^{28}\text{SiF}_4$ методом масс-спектрометрии высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой // Масс-спектрометрия. 2018. Т. 15. № 3. С. 209–215.
<https://doi.org/10.25703/MS.2018.15.35>
21. *Панченков Г.М., Лебедев В.П.* Химическая кинетика и катализ // Уч. пособие для вузов. 3-е изд. испр. и доп. М.: Химия, 1985. 592 с.
22. *Фурман А.А.* Неорганические хлориды (химия и технология). М.: Химия, 1980. 416 с.