

УДК 66.091:548.55:546.34'882

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННОЙ ШИХТЫ НА УСЛОВИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ И ИХ СВОЙСТВА

© 2022 г. И. В. Бирюкова¹, И. Н. Ефремов¹, С. М. Маслбоева¹ *, М. Н. Палатников¹

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”, Академгородок, 26а, Апатиты, 184209 Россия

*e-mail: sofia_masloboeva@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 28.04.2022 г.

Принята к публикации 05.05.2022 г.

Проведен сравнительный анализ распределения примеси магния в системе расплав–кристалл при выращивании методом Чохральского монокристаллов ниобата лития $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$, полученных из расплава методом его последовательного разбавления номинально чистой шихтой LiNbO_3 . В исследовании использована гранулированная шихта различного генезиса, синтезированная методом гомогенного легирования из прекурсора $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{:V:Mg} + \text{Li}_2\text{CO}_3$ и полученная твердофазным синтезом из смеси $\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{H}_3\text{BO}_3 + \text{MgO}$. Установлено, что гомогенное легирование позволяет ввести в кристалл при одинаковых условиях выращивания больше примеси магния (на ~25%), при этом концентрация бора остается на уровне следовых количеств. Проведена экспресс-оценка оптического качества кристаллов и рассчитаны значения пьезомодуля d_{333} . Данные свидетельствуют, что независимо от способа легирования можно получить монокристаллы ниобата лития высокого оптического качества. Выбор технологии выращивания монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ будет определяться ее рентабельностью.

Ключевые слова: ниобат лития, легирование, плотность микродефектов, статический пьезомодуль, монодоменизация

DOI: 10.31857/S0002337X22090020

ВВЕДЕНИЕ

Сегнетоэлектрические кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) конгруэнтного состава являются универсальными диэлектриками, которые находят широкое применение в оптоэлектронных устройствах, лазерных приложениях и перспективны в области разработок оптических датчиков и быстрой оптической связи. Существенным недостатком этого материала является наблюдаемое фоторефрактивное повреждение при выращивании кристаллов LiNbO_3 , характеризующееся низким порогом фоторефракции [1–3]. Установлено, что порог оптического повреждения зависит от количества собственных дефектов, присутствующих в решетке конгруэнтного кристалла, и может быть значительно увеличен за счет легирования LiNbO_3 ионами Mg^{2+} , Zn^{2+} , Sc^{3+} , In^{3+} , Hf^{4+} , Gd^{3+} , Er^{3+} , V^{3+} , Y^{3+} , Ta^{5+} и др. в концентрациях, превышающих “пороговые” значения. Это позволяет во много раз снизить фоторефрактивный эффект и даже полностью погасить его [3–10]. В настоящее время для улучшения свойств ниобата лития и расшире-

ния областей его применения разработаны и изучены методы по двойному легированию LiNbO_3 [11–21], основанные на различных способах синтеза шихты, из которой проводится выращивание монокристаллов.

Практическое применение новых перспективных материалов с низким фоторефрактивным эффектом на основе ниобата лития требует высоко воспроизводимого получения монокристаллов с заданным содержанием примеси. При этом важны не только исследования оптимальных условий выращивания, но и разработка эффективных методов синтеза легированной шихты LiNbO_3 , из которой можно получать оптически однородные кристаллы с содержанием легирующей примеси выше “пороговых” значений.

Целью настоящей работы является исследование влияния генезиса легированной бором и магнием шихты ниобата лития на характер распределения примеси в системе расплав–кристалл, однородность и свойства монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Монокристаллы ниобата лития выращивали методом Чохральского из расплава с применением гранулированной шихты $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ конгруэнтного состава (мольное отношение $R = [\text{Li}]/[\text{Nb}] = 0.946$). Использовали шихту различного генезиса. В первом случае легирующие компоненты (бор, магний) вводили на стадии получения оксида ниобия Nb_2O_5 из высокочистых фторидных ниобийсодержащих растворов. Технологическая схема процесса синтеза гомогенно легированной шихты $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ (ГЛ-шихта) представлена в работе [22]. Во втором случае процесс синтеза-грануляции проводили из смеси $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{:Nb}_2\text{O}_5\text{:H}_3\text{BO}_3\text{:MgO}$, при этом бор добавляли в виде борной кислоты, магний в виде оксида магния. В результате получили шихту $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ твердофазным синтезом (ТС-шихта). Все реагенты имели квалификацию “ос. ч.”.

При расчете необходимого количества карбоната лития для получения ГЛ- и ТС-шихт ниобата лития учитывали содержание магния в смеси. Ввиду малой концентрации бора, сравнимой с концентрацией примесного состава, расчет необходимого количества карбоната лития осуществляли без учета содержания бора в шихте. Для проведения сравнительного анализа кристаллов, полученных по разным схемам легирования, в процессе получения ТС-шихты $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ обеспечивали концентрацию легирующих компонентов, приведенную в работе [22].

Синтез-грануляцию каждого вида смеси проводили в отжиговой печи ПВК-1.4-25 при температуре 1230°C в течение 5 ч, скорость нагрева составляла $200^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Концентрацию магния в шихте и кристаллах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ICPS-9000 фирмы Shimadzu) с точностью до $1 \times 10^{-3}\%$, содержание бора – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) с точностью до $1 \times 10^{-7}\%$.

Рентгенофазовый анализ (РФА) шихты $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ проводили на дифрактометре XRD-6100 (Shimadzu, Япония).

Монокристаллы ниобата лития, легированные бором и магнием, Z-среза выращивали методом Чохральского из расплава. При получении первой серии монокристаллов использовали ГЛ-шихту [22], вторую серию монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ получали из ТС-шихты.

Рост легированных кристаллов обеих серий проводили из платиновых тиглей диаметром 85 мм на воздухе в ростовой установке индукционного типа “Кристалл 2”, оснащенной тиристорным генератором при одинаковых тепловых условиях и технологических режимах. Конструкция теплового узла обеспечивала сочетание осевого темпе-

ратурного градиента над расплавом $3^\circ\text{C}/\text{мм}$ и протяженной изотермической области в зоне отжига монокристалла. Скорость перемещения составляла $0.6 \text{ мм}/\text{ч}$, скорость вращения – $12 \text{ об.}/\text{мин}$, что обеспечивало формирование плоского фронта кристаллизации.

С целью снятия термоупругих напряжений монокристаллы подвергали термической обработке при $t = 1230^\circ\text{C}$ в течение 15 ч в высокотемпературной отжиговой печи ПВК-1.4-25. Скорость нагрева и охлаждения составляла $50^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Для определения концентрации примесей в кристалле после термообработки с верхней (конусной – концентрация C_k) и нижней (торцевой – концентрация C_r) частей были срезали пластины толщиной 0.8 мм для приготовления порошковых проб.

Монодоменизацию оставшейся части монокристаллов второй серии проводили посредством высокотемпературного электродиффузионного отжига (ВТЭДО) при охлаждении образцов со скоростью $20^\circ\text{C}/\text{ч}$ в температурном интервале от 1235 до 735°C под постоянным электрическим полем на установке “Лантан”. Для монокристаллов серии 1 ВТЭДО была проведена повторно в указанном выше температурном диапазоне, поскольку исследования монокристаллов пьезоакустическим методом [22] показали необходимость корректировки технологического режима процесса.

Контроль степени монодоменичности, определение статического пьезоэффекта и оценку оптической чистоты выращенных монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ проводили по методикам, описанным в [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Серия монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$, представленная в [22], была получена из ГЛ-шихты ($[\text{Mg}] = 0.5831 \text{ мас. } \%$, $[\text{V}] = 0.00857 \text{ мас. } \%$) путем пошагового разбавления исходного расплава вследствие догрузки номинально чистой шихтой ниобата лития к плаву, оставшемуся после выращивания каждого предыдущего кристалла. Исследуемый диапазон концентрации магния в расплаве составил от 2.5 до $3.4 \text{ мол. } \%$ [22].

Аналогичный подход применяли и при выращивании серии монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ из ТС-шихты. Для проведения эксперимента была получена шихта в виде крупных гранул с насыщенным весом $2.8 \text{ г}/\text{см}^3$ и концентрацией легирующих примесей: $[\text{Mg}] = 0.67 \text{ мас. } \%$, $[\text{V}] = 0.009 \text{ мас. } \%$. По результатам РФА она соответствовала однофазному LiNbO_3 [24].

Первые два монокристалла были выращены из легированной шихты исходного состава и далее, путем последовательного пошагового разбавле-

Таблица 1. Концентрация магния в расплаве, кристаллах и коэффициент распределения магния в кристаллах LiNbO₃:В:Мg (серия 1)

Кристалл	Вес, г	[Mg] в расплаве		[Mg] в кристалле				$K_{эф}$
		мас. %	мол. %	конус		торец		
				мас. %	мол. %	мас. %	мол. %	
1.1	104	0.5831	3.4	0.71	4.2	0.71	4.2	1.22
1.2	104.2	0.49	2.9	0.66	3.9	0.66	3.9	1.35
1.3	105.6	0.45	2.7	0.62	3.7	0.61	3.7	1.38
1.4	106.1	0.41	2.5	0.61	3.6	0.60	3.5	1.47

Таблица 2. Концентрация магния в расплаве, кристаллах и коэффициент распределения магния в кристаллах LiNbO₃:В:Мg (серия 2)

Кристалл	Вес, г	[Mg] в расплаве		[Mg] в кристалле				$K_{эф}$
		мас. %	мол. %	конус		торец		
				мас. %	мол. %	мас. %	мол. %	
2.1	140.8	0.62	3.66	0.60	3.54	0.59	3.48	0.97
2.2	137.6	0.57	3.37	0.55	3.25	0.54	3.20	0.96
2.3	134.1	0.53	3.14	0.51	3.02	0.50	2.97	0.96
2.4	134.0	0.48	2.85	0.46	2.73	0.46	2.73	0.96
2.5	133.0	0.45	2.67	0.43	2.56	0.43	2.56	0.96

ния исходного расплава номинально чистой шихтой LiNbO₃, была получена серия из пяти монокристаллов.

Уровень расплава поддерживали постоянным, т.к. масса загружаемой шихты для выращивания каждого следующего монокристалла равнялась массе снятого предыдущего.

Вес выращенного кристалла, соответствующий количеству ушедшей из расплава примеси, фактически регулировал шаг разбавления расплава. Концентрацию магния в расплаве (C_p) и величины эффективного коэффициента распределения ($K_{эф}$) вычисляли на основании значений концентраций примеси C_k и C_t аналогично расчетам, приведенным в работе [22].

Масса полной загрузки тигля составляла 1770 г, на выращивание каждого монокристалла расходовалось не более 8% расплава. Тепловые условия и технологические режимы роста полностью соответствовали условиям получения серии ГЛ-монокристаллов LiNbO₃:В:Мg (серия 1) [22].

Результаты обработки экспериментальных данных монокристаллов LiNbO₃:В:Мg серии 1 (ГЛ-шихта) и монокристаллов LiNbO₃:В:Мg, полученных из ТС-шихты методом разбавления (серия 2), представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Анализ экспериментальных данных показывает, что монокристаллы серии 2, выращенные из расплава с содержанием магния 2.67–3.66 мол. %, так же как и монокристаллы серии 1, полученные из аналогичного концентрационного диапазона (2.5–3.4 мол. % Mg), обладают высокой степенью химической однородности. В большинстве случаев наблюдается незначительное (0.05 мол. %) снижение концентрации магния от конуса к торцу були, а в образцах 2.4 и 2.5 (табл. 2) содержание магния остается постоянным по всей длине монокристаллов. Однако если для серии 1 максимальная химическая однородность наблюдается у кристаллов, выращенных из расплава с концентрацией магния, приближенной к верхней границе исследуемого концентрационного диапазона, – 3.4 мол. %, то для серии 2 – к нижней границе – 2.67 мол. %.

На рис. 1, 2 представлены графики зависимости $C_{кр} = f(C_p)$ и $K_{эф} = f(C_p)$ для 1- и 2-й серий монокристаллов LiNbO₃:В:Мg. Сравнительный анализ показывает, что изменение концентрации магния в кристаллах обеих серий, выращенных из расплава в исследуемом диапазоне концентрации примеси, происходит линейно, от меньшей концентрации к большей. Однако обращает на себя внимание тот факт, что при всех прочих равных условиях получения монокристаллов LiNbO₃:В:Мg концентрация магния в кристаллах, выращенных из ГЛ-шихты, примерно на 25% выше, чем в кристаллах, выращенных из ТС-шихты, во всем исследуемом концентрационном диапазоне расплава.

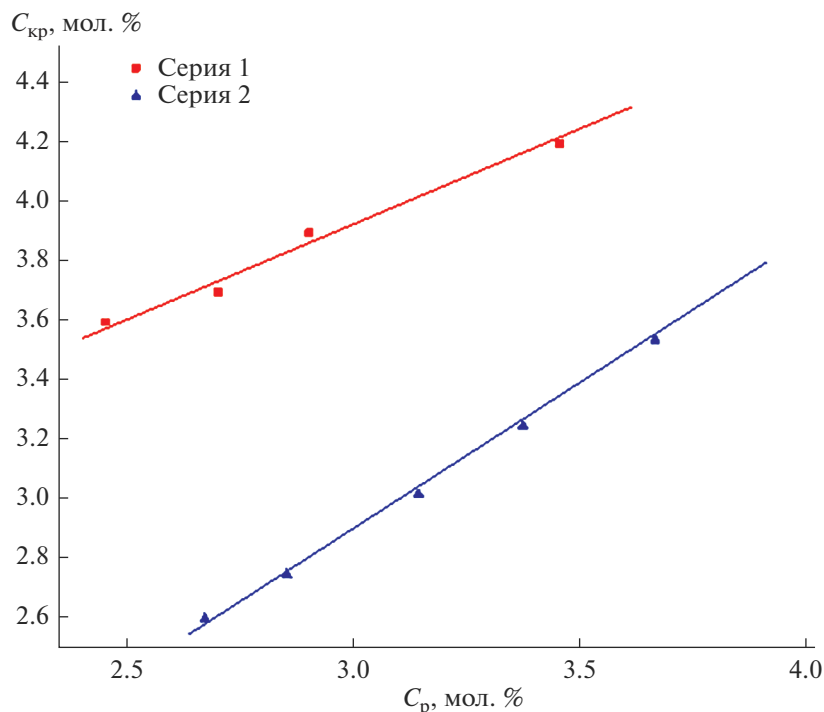


Рис. 1. Зависимости концентрации Mg в кристалле от концентрации Mg в расплаве.

Одновременно с этим, графики $K_{эф} = f(C_p)$ (рис. 2) показывают, что коэффициент распределения магния в ТС-кристаллах не зависит от концентрации примеси в расплаве и является величиной постоянной, равной 0.96. И напротив, значительное снижение $K_{эф}$ в ГЛ-кристаллах от 1.47 до 1.22 при увеличении концентрации магния в расплаве свидетельствует о высокой активности катионов магния.

Следует отметить, что концентрация бора в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{V}:\text{Mg}$ 1- и 2-й серий, по данным МС-ИСП, составляла следовые количества, не более 2.07×10^{-4} мас. %.

После ВТЭДО с целью определения оптического качества серии монокристаллов, выращенных из ТС-шихты, была проведена полировка их торцевых поверхностей и базы. Фотография исследуемых образцов представлена на рис. 3.

В табл. 3 приведены результаты экспресс-оценки оптического качества выращенных кристаллов. Анализ экспериментальных данных показывает, что кристаллы 2.1 и 2.5 имеют высокое оптическое качество, однако в кристалле 2.1 имеется одна дефектная плоскость. Данная плоскость располагается на расстоянии 10 мм от торца кристалла, она перпендикулярна оси Z и имеет толщину порядка 1 мм. Наличие данной дефектной области связано с нестабильностью условий выращивания монокристалла. В остальном объеме кристалла центры рассеяния и протяженные де-

фекты не выявлены. Кристалл 2.5 отличается высоким оптическим качеством. Во всем объеме образца центры рассеяния не обнаружены.

Кристаллы 2.2, 2.3 и 2.4, выращенные из расплава с концентрацией магния 2.85–3.37 мол. %, показали примерно одинаковое оптическое качество: в них отсутствуют протяженные дефекты, в то же время все образцы содержат значительное количество микродефектов (центров рассеяния). Плотность микродефектов в них варьируется от 33 до 39 см^{-3} . Основное количество дефектов локализовано вдоль оптической оси, в радиусе 8–10 мм от нее. При этом вблизи боковой поверхности кристаллов, на расстоянии 7–9 мм от нее, центры рассеяния не наблюдаются. Обнаруженные в кристаллах 2.2, 2.3, 2.4 объемные области скопления центров рассеяния не являются дефектами, полученными при выращивании. Их появление, вероятно, связано с процессами, происходящими в период ВТЭДО при прохождении электрического тока через кристалл.

Исследования пьезоакустических свойств ТС-монокристаллов показали, что параметры процесса ВТЭДО (охлаждение образцов со скоростью $20^\circ\text{C}/\text{ч}$ в температурном интервале от 1235 до 735°C под постоянным электрическим полем) не позволили получить достаточно высокий коэффициент d_{333} (рис. 4). Для кристаллов 2.1, 2.2 и 2.5 он находился в диапазоне $(6-7) \times 10^{-12}$ Кл/Н. Самые низкие значения пьезомодуля показал кри-

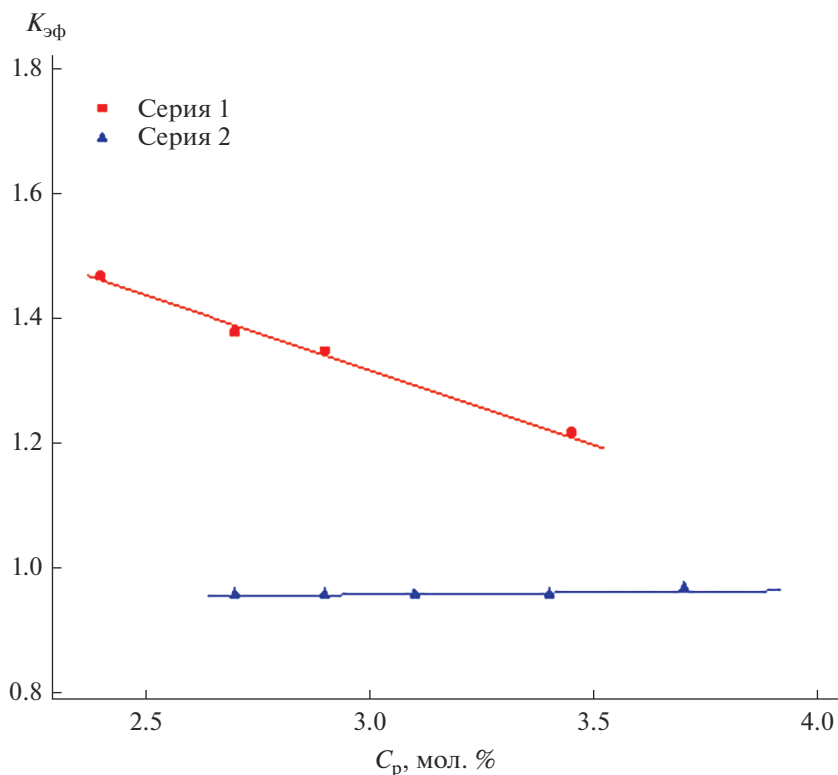


Рис. 2. Зависимости $K_{эф}$ от концентрации Mg в расплаве.

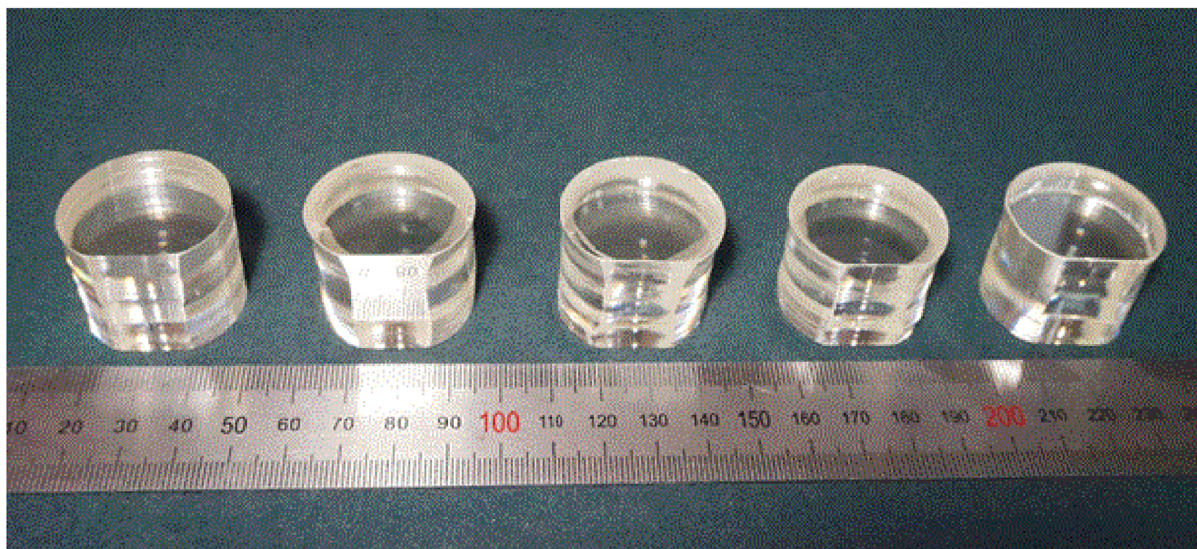


Рис. 3. Монокристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{V}:\text{Mg}$ серии 2, выращенные из расплава путем последовательного разбавления плавы номинально чистой шихтой конгруэнтного состава.

сталл 2.3: $d_{333} = 5.08 \times 10^{-12}$ Кл/Н. В то же время величина пьезомодуля для кристалла 2.4 имеет максимальное значение ($d_{333} = 8.21 \times 10^{-12}$ Кл/Н), близкое к справочному для монокристаллов [25]. Из проведенных ранее исследований оптической чистоты образцов видно, что

присутствие описанного выше объемного дефекта не повлияло на степень униполярности данного кристалла.

Для монокристаллов серии 1 была проведена корректировка технологических параметров ВТЭДО: увеличена максимальная температура с 1223 [22]

Таблица 3. Результаты экспресс-оценки оптического качества исследуемых кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{V:Mg}$

Кристалл	Суммарное количество центров рассеяния	Среднее количество центров рассеяния в ряду	Плотность микродефектов, см^{-3}
2.1	0	0	0
2.2	28	1.12	35.6
2.3	31	1.24	39.5
2.4	26	1.04	33.1
2.5	0	0	0

Примечание. Количество рядов – 25.

до 1235°C и расширен диапазон приложения постоянного электрического поля. Это позволило получить высокие значения пьезомодуля для кристаллов с наименьшим содержанием магния (1.3 и 1.4), причем пьезомодуль кристалла 1.3 в результате увеличился почти в два раза: от 4.2×10^{-12} [22] до 7.87×10^{-12} Кл/Н.

Изменение технологических параметров ВТЭДО не повлияло на значения пьезомодуля кристаллов 1.1 и 1.2, выращенных из расплава с более высо-

кой концентрацией магния. Величины пьезомодуля $d_{333} = 5.03 \times 10^{-12}$ Кл/Н для кристалла 1.1 и $d_{333} = 6.67 \times 10^{-12}$ Кл/Н для кристалла 1.2 остались на прежнем уровне (рис. 5).

Таким образом, исследования пьезоакустических свойств высоколегированных монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{V:Mg}$ показали, что независимо от генезиса используемой шихты требуется индивидуальный подход в выборе технологических режимов монодоменизации.

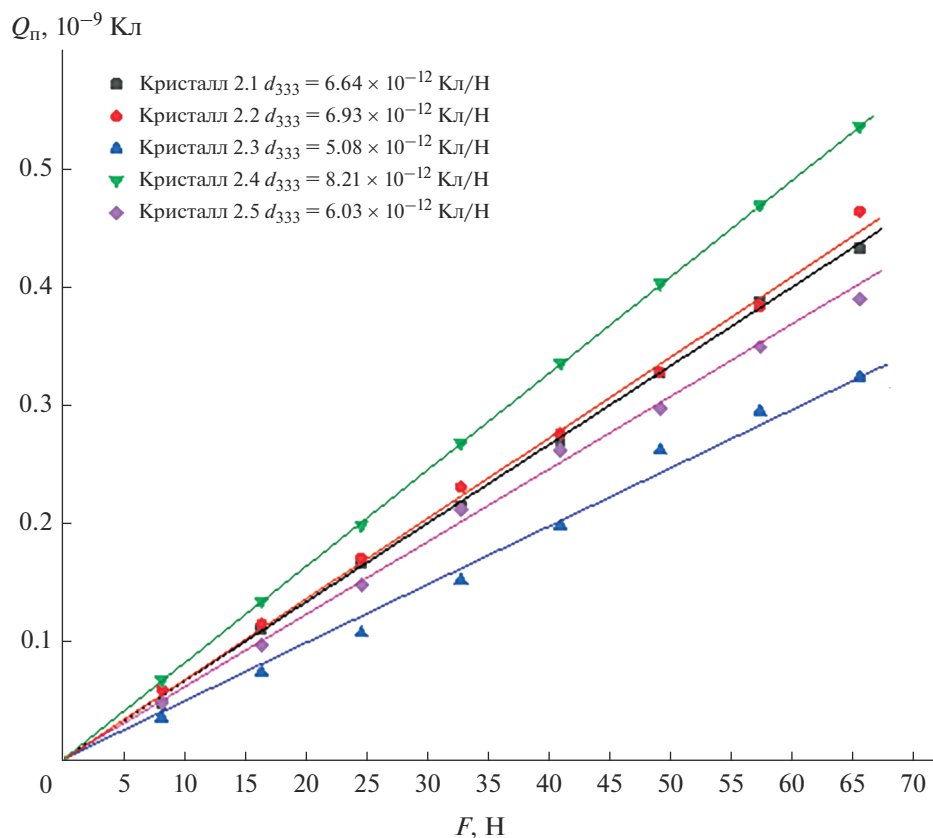


Рис. 4. Зависимости $Q_{\text{п}} = f(F)$ кристаллов серии 2 после монодоменизации: $Q_{\text{п}}$ – величина поляризационного заряда, F – прилагаемая сила.

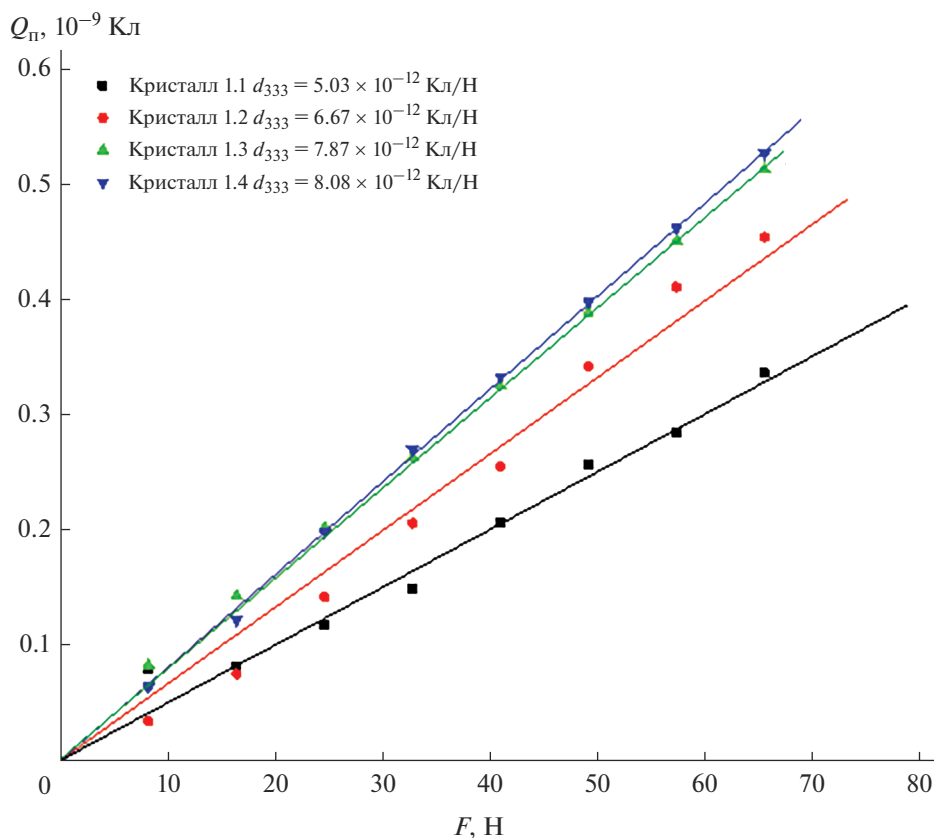


Рис. 5. Зависимости $Q_{\pi} = f(F)$ кристаллов серии 1 после повторной монодоменизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработана методика выращивания методом Чохральского монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ из расплава с содержанием 2.67–3.66 мол. % Mg и менее 2.07×10^{-4} мас. % V путем пошагового разбавления исходного расплава номинально чистой шихтой LiNbO_3 . Получена серия из пяти монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$.

Определены зависимости $C_{\text{кр}} = f(C_p)$ и $K_{\text{эф}} = f(C_p)$ и проведен сравнительный анализ экспериментальных данных относительно серии монокристаллов, выращенных из шихты, полученной методом гомогенного легирования на основе прекурсора $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{:V:Mg} + \text{Li}_2\text{CO}_3$.

Анализ влияния генезиса используемой для выращивания легированных монокристаллов шихты показал, что кристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$, выращенные из ТС- и ГЛ-шихт в исследуемом диапазоне концентрации магния в расплаве, обнаруживают высокую химическую однородность независимо от величины коэффициента распределения примеси.

Показано, что коэффициент распределения магния для ТС-кристаллов меньше единицы, не зависит от концентрации примеси в расплаве и является величиной постоянной. Однако выращи-

вание монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ из ГЛ-шихты позволяет получать кристаллы с более высокой степенью легирования, концентрация магния в них на ~25% выше, чем в кристаллах, выращенных из ТС-шихты, во всем исследуемом концентрационном диапазоне расплава.

На основании исследований оптических и пьезоакустических свойств монокристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:V:Mg}$ установлено, что независимо от способа введения легирующих примесей возможно получение монокристаллов оптического качества. Однако требуется индивидуальный подход в выборе температурного диапазона и технологических параметров прилагаемого электрического поля в процессе монодоменизации.

Таким образом, выращивание оптически однородных легированных монокристаллов ниобата лития методом Чохральского эффективно с использованием как ГЛ-, так и ТС-шихты. Окончательный выбор технологии возможен на основе детального экономического расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fontana M.D., Chah K., Aillie M., Mouras R., Bourson P. Optical Damage Resistance in Undoped LiNbO_3 crys-

- tals // Opt. Mater. 2001. V. 16. № 1–2. P. 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(00)00066-5)
2. Volk T.R., Rubinina N.M., Woehlecke M. Optical-Damage-Resistant Impurities in Lithium Niobate // J. Opt. Soc. Am. B. 1994. V. 11. P. 1681–1687.
 3. Bryan D.A., Gerson R., Tomaschke H.E. Increased Optical Damage Resistance in Lithium Niobate // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. P. 847–849. <https://doi.org/10.1063/1.94946>
 4. Abdi F., Fontana M.D., Aillerie M., Bourson P. Coexistence of Li and Nb Vacancies in the Defect Structure of Pure LiNbO₃ and its Relationship to Optical Properties // Appl. Phys. A. 2006. V. 83. № 3. P. 427–434.
 5. Volk T.R., Pryalkin V.I., Rubinina N.M. Optical-Damage-resistant LiNbO₃:Zn Crystal // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 996–998. <https://doi.org/10.1364/OL.15.000996>
 6. Qiao H, Xu J., Wu Q., Yu X., Sun Q., Zhang X., Zhang G., Volk T.R. An Increase of Photorefractive Sensitivity in In:LiNbO₃ Crystal // Opt. Mater. 2003. V. 23. P. 269–272. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(02\)00299-9](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(02)00299-9)
 7. Kong Y., Wen J., Wang H. New Doped Lithium Niobate Crystal with High Resistance to Photorefractive—LiNbO₃:In // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 280–281. <https://doi.org/10.1063/1.113517>
 8. Yamamoto J.K., Kitamura K., Iyi N., Kimura S. Sc₂O₃-doped LiNbO₃ Grown by the Float Zone Method // J. Cryst. Growth. 1992. V. 121. № 3. P. 522–526. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(92\)90165-F](https://doi.org/10.1016/0022-0248(92)90165-F)
 9. Li S., Liu S., Kong Y., Deng D., Gao G., Li Y., Gao H., Zhang L., Huang Z., Chen S., Xu J. The Optical Damage Resistance and Absorption Spectra of LiNbO₃:Hf Crystals // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. V. 18. P. 3527–3534.
 10. Сюй А.В. Нелинейно-оптические эффекты с широкополосным излучением в кристаллах ниобата лития: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Хабаровск: ДВГУПС, 2013. 39 с.
 11. Zhou L., Liu Y., Lou H., D Y., Xie G., Zhu Z., Deng Z., Luo D., Gu C., Chen H. Octave Mid-Infrared Optical Frequency Comb from Er: Fiber-Laser-Pumped Aperiodically Poled Mg:LiNbO₃ // Opt. Lett. 2020. V. 45. № 23. P. 6458–6461. <https://doi.org/10.1364/OL.410958>
 12. Palatnikov M.N., Sandler V.A., Sidorov N.V., Masloboeva S.M., Makarova O.V. Study of Electrical Characteristics of Crystals of Homogeneously Doped LiNbO₃:Zn, Mg in the Temperature Range of 450–900 K // Tech. Phys. 2020. V. 65. № 12. P. 1987–1993. <https://doi.org/10.1134/S1063784220120208>
 13. Ma C., Yu S., Lu F., Liu K., Xu Y., Ma C. Enhancement of Near-Infrared Photoluminescence in Mg:Er:LiNbO₃ Containing Au Nanoparticles Synthesized by Direct Ion Implantation // Nanotechnology. 2020. V. 31. № 33. 335206. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab8f4e>
 14. Long S., Yang M., Ma D., Zhu Y., Lin S., Wang B. Enhanced red emissions and Higher Quenching Temperature Based on the Intervalence Charge Transfer in Pr³⁺ Doped LiNbO₃ with Mg²⁺ Incorporation // Opt. Mater. Express. 2019. V. 9. № 3. P. 1062–1071. <https://doi.org/10.1364/OME.9.001062>
 15. Galutskii V.V., Stroganova E.V., Yakovenko N.A., Sudarikov K.V., Rasseikin D.A., Yurova N.A. Structure of the LiNbO₃:Mg,Cr Crystal and its Properties at Visible and Terahertz Wavelengths // J. Opt. Technol. 2018. V. 85. № 4. P. 250–254. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000250>
 16. Dai L., Liu C., Tan C., Yan Z., Xu Y. Optical Properties of Mg²⁺, Yb³⁺, and Ho³⁺ Tri-Doped LiNbO₃ Crystals // Chin. Phys. B. 2017. V. 26. № 4. 044207. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/4/044207>
 17. Fan M., Li T., Zhao S., Liu H., Sang Y., Li G., Li D., Yang K., Qiao W., Li S. Experimental and Theoretical Investigation on Passively Q-Switched Laser Action in c-Cut Nd:MgO:LiNbO₃ // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 31. P. 9354–9358. <https://doi.org/10.1364/AO.54.009354>
 18. Zhang T., Wang B., Ling F., Fang S.Q., Xu Y. Growth and Optical Property of Mg, Fe Co-Doped Near-Stoichiometric LiNbO₃ Crystal // Mater. Chem. Phys. 2004. V. 83. P. 350–353.
 19. Yang C., Tu X., Wang S., Xiong K., Chen Y., Zheng Y., Shi E. Growth and Properties of Pr³⁺ Doped LiNbO₃ Crystal with Mg²⁺ Incorporation: A Potential Material for Quasi-Parametric Chirped Pulse Amplification // Opt. Mater. 2020. V. 105. P. 109893. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109893>
 20. Маслбоева С.М., Бирюкова И.В., Палатников М.Н., Теплякова Н.А. Получение и исследование кристаллов ниобата лития, легированных магнием и цинком // ЖНХ. 2020. Т. 65. № 6. С. 856–864. <https://doi.org/10.31857/S0044457X20060100>
 21. Маслбоева С.М., Ефремов И.Н., Бирюкова И.В., Теплякова Н.А., Палатников М.Н. Получение и исследование монокристаллов ниобата лития, легированных цинком и эрбием // Неорган. материалы. 2021. Т. 57. № 7. С. 735–744. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21070113>
 22. Маслбоева С.М., Ефремов И.Н., Бирюкова И.В., Палатников М.Н. Получение и исследование монокристаллов ниобата лития, активированных магнием и бором // Неорган. материалы. 2021. Т. 57. № 12. С. 1344–1351. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21120101>
 23. Маслбоева С.М., Ефремов И.Н., Бирюкова И.В., Палатников М.Н. Получение и исследование монокристаллов ниобата лития, легированных бором // Неорган. материалы. 2020. Т. 56. № 11. С. 1208–1214. <https://doi.org/10.31857/S0002337X2011007X>
 24. Hsu R., Maslen E.N., Boulay D., Ishizawa N. Synchrotron X-ray Studies of LiNbO₃ and LiTaO₃ // Acta Crystallogr., Sect. B. 1997. V. 53. P. 420–428. <https://doi.org/10.1107/S010876819600777X>
 25. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В., Стрижевская Ф.Н., Чкалова В.В., Шаскольская М.П. Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. Шаскольской М.П. М.: Наука, 1982. 632 с.