

02

Изотопический сдвиг ИК полос поглощения монокристаллов германия

© Г.И. Кропотов¹, В.Е. Рогалин², И.А. Каплунов³, А.А. Шахмин¹, С.А. Филин⁴, А.Д. Буланов⁵

¹ ООО „Тидекс“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
191186 Санкт-Петербург, Россия

³ Тверской государственный университет,
170100 Тверь, Россия

⁴ Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
117997 Москва, Россия,

⁵ Институт химии высококичистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,
603951 Нижний Новгород, Россия

e-mail: grigorykropotov@tydex.ru; kaplunov.ia@tversu.ru; v-rogalin@mail.ru

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

В окончательной редакции 16.11.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2023 г.

Обнаружено четкое соответствие между положением пика в ИК спектре поглощения изотопически чистых монокристаллов германия и массовым числом изотопа. Полученная зависимость может быть использована для экспресс-анализа массового состава изотопически чистых монокристаллов германия.

Ключевые слова: монокристаллы германия, изотопы, спектр поглощения, полоса поглощения.

DOI: 10.21883/OS.2023.06.55926.4334-22

Введение

Монокристаллический германий (Ge) является первым и наиболее исследованным полупроводниковым материалом [1–3]. Кроме того, он крайне востребован в качестве основного оптического материала для окна прозрачности атмосферы 8–14 μm [4,5] и наряду с кремнием — для диапазона 3–5 μm [6]. Широко развитые в последнее время тепловизионные приборы активно используют оптику из монокристаллического германия [4,5].

В работах [7–12] показано, что изотопный состав германия и ряда других кристаллов существенным образом влияет на многие важные свойства материала, связанные с фоновой структурой материала. Это прежде всего теплопроводность и ряд оптических и электрофизических характеристик.

Кристаллическая решетка воспринимает другой изотоп как некий структурный дефект. Этот дефект, конечно, оказывает меньшее влияние на физические свойства кристалла, чем широко изученные дефекты структуры, такие как, например, дислокации. Тем не менее в более совершенных моноизотопных монокристаллах обнаруживаются новые, ранее неизвестные свойства. А создание экономически приемлемой технологии получения расширяет возможные области их применения. Этот процесс наглядно наблюдается на примере развития технологии получения монокристаллов германия.

Развитие технологии очистки кристалла от примесей и структурных дефектов постоянно расширяет обла-

сти его применения. Для использования Ge в качестве детекторов ионизирующих излучений, высокочувствительных низкофоновых приемников инфракрасного излучения (ИК) требуется обеспечить концентрацию электрически активных примесей в материале на уровне 10^9 – 10^{10} cm^{-3} . И эта крайне сложная технологическая проблема решена. Также реализована технология выращивания бездислокационных кристаллов [2,3].

Выявлено ранее недооцененное влияние электрически нейтральных примесей, например кислорода, на свойства Ge [1]. Дальнейшее развитие исследований германия показало, что открывается ряд новых возможностей использования этого материала, связанных с развитием технологии получения изотопически чистых монокристаллов [13–15]. Природный германий ($^{\text{nat}}\text{Ge}$, атомный номер 32, атомная масса 72.59) представляет собой смесь стабильных изотопов с массовыми числами 70, 72, 73, 74, 76 (^{70}Ge — 20.57%, ^{72}Ge — 27.45%, ^{73}Ge — 7.75%, ^{74}Ge — 36.50%, ^{76}Ge — 7.73%) [7].

Еще в 1942 г. И.Я. Померанчуком теоретически была предсказана [8] и впоследствии обнаружена значительная аномалия в температурных зависимостях теплопроводности для изотопически чистых и структурно совершенных монокристаллов германия, кремния и алмаза [9,15,18].

Измерения теплоемкости и теплопроводности кристаллов германия с различным изотопным составом проводились в работах [9,11,19] в диапазоне температур 2.8–100 К. Обнаружено, что по сравнению с

природным материалом моноизотопный Ge обладает в этом диапазоне значительно не только более высокой теплопроводностью, но и термоэдс [20,21]. Эти данные представляют практический интерес при использовании компонент из германия в космических исследованиях.

В работе [21] предсказан „гигантский“ вклад в коэффициент затухания гиперзвука от рассеяния звуковых волн на изотопическом беспорядке в монокристаллах ^{nat}Ge по сравнению с моноизотопными кристаллами. Это важно, поскольку эксперименты с помощью гиперзвуковых волн расширяют возможность получения новой информации о механизмах релаксации фононных мод. Данные о распространении гиперзвука в кристаллах при низких температурах позволяют создавать на его основе запоминающие устройства сигналов СВЧ с большим объемом динамической памяти.

Моноизотопный Ge перспективен для создания элементов спинтроники и квантовых компьютеров [22]. Активно развиваются исследования по возможности создания квантовых компьютеров на основе твердотельных устройств. Единицей квантовой информации (кубитом) в них является состояние ядерного спина атома [23,24]. Ансамбль кубитов создают за счет внедрения атомов элементов с ненулевым ядерным спином в матрицу из монокристалла кремния или германия. Для исключения неконтролируемого взаимодействия кубитов с ядерными спинами атомов матрицы требуется минимизировать содержание нечетных изотопов в матрице. В германии нечетным является изотоп ^{73}Ge [14].

Монокристаллы изотопа ^{76}Ge используются как материал детекторов для исследований процессов двойного бета-распада и других фундаментальных физических процессов [11,25,26]. Детекторы из Ge (Ga) используются в экспериментах по регистрации нейтрино и в других областях [27].

Дальнейшее развитие исследований моноизотопных кристаллов Ge безусловно предполагает ряд новых применений этого материала в микроэлектронике, ИК оптике, нанопотонике и других областях физики твердого тела. Поэтому существенной проблемой становится возможность сравнительно быстрого и несложного анализа изотопической чистоты моноизотопных кристаллов Ge. Так как физико-химические свойства различных изотопов одного материала крайне близки, требуется разработка методики объективной идентификации (экспресс-анализа) соответствующих изотопов Ge.

Обычно в случае германия для этого применяется способ определения разности масс изотопов методом „протяженной“ спектроскопии тонкой структуры рентгеновского поглощения (Extended X-ray Absorption Fine Structure — EXAFS). Измерения проводятся с фемтометровой точностью по амплитуде относительных атомных колебаний, по температурной зависимости разности факторов Дебая-Уоллера и по разнице средних межатомных расстояний между ближайшими соседями первой координационной сферы атомов в образцах изотопов [28,29]. Существуют возможности определения

изотопической чистоты методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ИСП-МС [14,30]. Однако эти методы весьма трудоемки и требуют использования сравнительно редкого и сложного оборудования.

Ранее в работах [31,32] при исследовании спектров ИК поглощения изотопически чистых монокристаллов ^{70}Ge и ^{74}Ge был обнаружен сдвиг полос фононного поглощения при изменении массового состава.

Обобщенно этот сдвиг был аппроксимирован выражением

$$\nu = 1.6\nu_0 e^{-kM}, \quad (1)$$

где ν_0 — частота максимума соответствующей полосы фононного поглощения природного германия, M — массовое число изотопа, k — степенной коэффициент, находящийся в диапазоне 0.0062–0.0072.

В настоящей работе это исследование было продолжено на образцах всех пяти стабильных изотопов германия, причем технология получения изотопов существенным образом отличалась от ранее использованной [3,31].

Методика эксперимента

Эксперименты проводили на образцах изотопически чистых монокристаллов германия ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{76}Ge . Высокочистый изотопно обогащенный германий получали гидридным методом в Институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН с последующей очисткой изотопно обогащенного поликристаллического германия методом зонной плавки [7,14,33].

Монокристаллы изотопов германия выращивали в лаборатории Института роста кристаллов (IKZ, Берлин) методом Чохральского из кварцевого тигля в среде высокочистого аргона. Монокристаллы выращивали в кристаллографическом направлении $\langle 100 \rangle$; диаметр кристаллов составлял 13–17 mm [14,34].

Изотопную чистоту полученных слитков германия на каждом этапе определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ИСП-МС [14,30].

Образцы для исследований вырезались из выращенных монокристаллов и затем полировались по специально разработанной технологии химико-механической оптической обработки. Рабочие поверхности пластин были отполированы по IV классу (ГОСТ 11141-76), шероховатость полированных поверхностей соответствовала Rz 0.05 μm (на базовой длине 0.08 mm по ГОСТ 2789-73).

Измерения спектров пропускания (в соответствии с требованиями ГОСТа [35]) проводили на фурье-спектрометре Bruker Vertex 70 в спектральном диапазоне 1.3–330 μm . Погрешность измерения величины составляла для волнового числа $\sim 1 \text{ cm}^{-1}$, а для коэффициента пропускания 0.5%.

В качестве образцов сравнения использованы оптически обработанные пластины из монокристаллов Ge природного изотопического состава (^{nat}Ge), выращенные в Тверском государственном университете и на Запорожском титаномагниеком комбинате из заведомо

разных партий исходного сырья и полученные разными методами: Чохральского и Степанова [36]. В качестве исходного сырья использовали зонноочищенный поликристаллический германий (марки ГПЗ) с удельным сопротивлением материала более $47 \Omega \cdot \text{cm}$ (при температуре 23°C).

Экспериментальные результаты и обсуждение

Хорошо известно, что поглощение ИК излучения в германии зависит от его удельного сопротивления [4,37]. В настоящей работе использовались чистые, нелегированные образцы с высоким удельным электросопротивлением.

На рис. 1 приведен спектр пропускания природного германия (Ge nat) и пяти моноизотопных образцов германия в диапазоне $10\text{--}40 \mu\text{m}$. Характер каждого спектра примерно одинаков, наблюдается незначительное различие в пропускании. Основное отличие заключается в соответствии полос поглощения соответствующей длине волны; наглядно видно, что изотопический состав кристаллов влияет на положение характерных полос поглощения Ge в рассматриваемом спектральном диапазоне. В спектральном диапазоне $11\text{--}40 \mu\text{m}$ нами выявлено 16 полос поглощения, что соответствует данным работ [38,39]; для изотопа ^{70}Ge положение характерных полос было выявлено впервые.

На рис. 2 более подробно показан участок частотной области спектра $407\text{--}438 \text{cm}^{-1}$ для восьмой полосы поглощения ($\nu_8 = 423.2 \text{cm}^{-1}$; диапазон соответствует длинам волн $23\text{--}24 \mu\text{m}$), не рассмотренный ранее в работах [31,32] вследствие большой толщины использованных образцов. В этих работах основное внимание уделялось исследованию пиков ($\nu_1 = 840.3 \text{cm}^{-1}$, $\nu_2 = 849.0 \text{cm}^{-1}$, $\nu_3 = 641.9 \text{cm}^{-1}$), для точного изучения которых необходима толщина образцов порядка 1cm . При этом высокий коэффициент поглощения не позволял надежно зафиксировать полученный эффект в области спектра $407\text{--}438 \text{cm}^{-1}$. При использовании

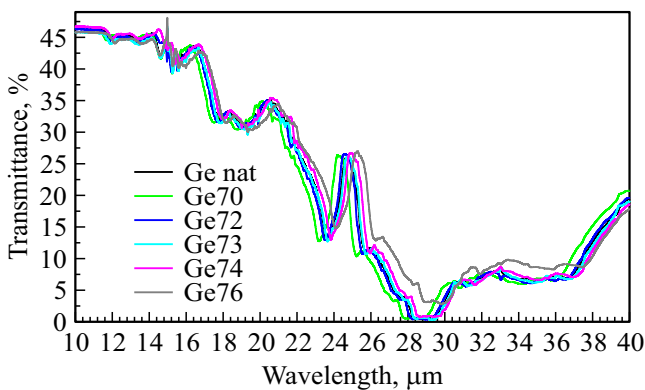


Рис. 1. Спектр пропускания моноизотопных образцов германия в диапазоне $10\text{--}40 \mu\text{m}$.

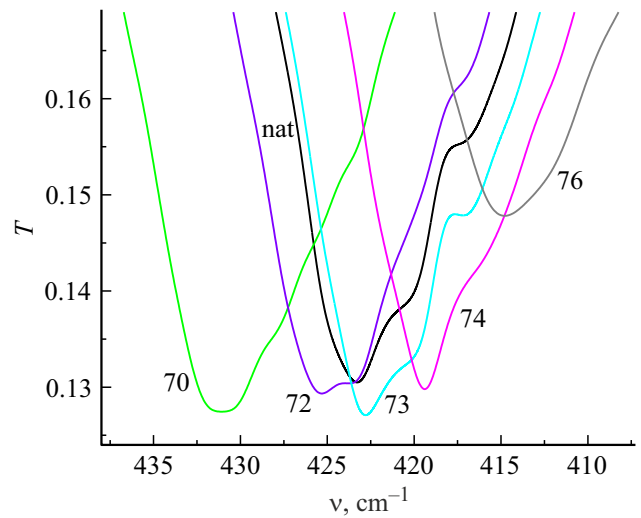


Рис. 2. Зависимость спектрального пропускания (T), демонстрирующая положение пиков поглощения в спектрах образцов природного (nat) и моноизотопных кристаллов германия (указаны массовые числа изотопов: ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{76}Ge) в частотной области спектра $407\text{--}438 \text{cm}^{-1}$ (соответствует длинам волн $23\text{--}24 \mu\text{m}$).

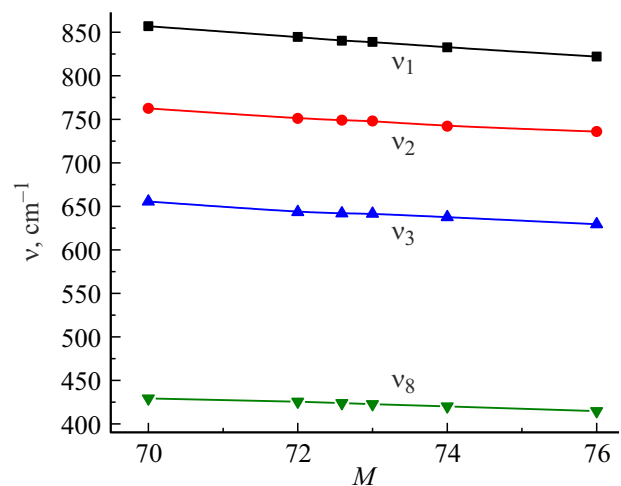


Рис. 3. Зависимости частот ν пиков фонованного поглощения изотопически чистых монокристаллов германия от M — массового числа изотопа для пиков таблицы.

тонких образцов, использованных в настоящей работе, наглядно видно различие в сдвигах полос поглощения спектров образцов природного ($^{\text{nat}}\text{Ge}$) и моноизотопных кристаллов германия (^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{76}Ge) в частотной области спектра $407\text{--}438 \text{cm}^{-1}$. Отчетливо проявился изотопический сдвиг данной полосы поглощения. На рис. 3 показаны зависимости частот ν пиков фонованного поглощения этих кристаллов от M — массового числа изотопа.

Результаты экспериментов показали (таблица), что решётчатые пики поглощения, наблюдаемые в монокристаллах германия природного изотопического состава

Положение максимумов фоновых полос поглощения в кристаллах Ge различного изотопного состава

Состав германия	Максимумы фоновых полос поглощения в германии							
	ν_1, cm^{-1}		ν_2, cm^{-1}		ν_3, cm^{-1}		ν_8, cm^{-1}	
	Экспериментальные данные	Получены по формуле (1), $k = 0.00645$	Экспериментальные данные	Получены по формуле (1), $k = 0.00645$	Экспериментальные данные	Получены по формуле (1), $k = 0.00645$	Экспериментальные данные	Получены по формуле (1), $k = 0.00645$
^{70}Ge	856.9	856.0	762.5	762.9	655.6	653.9	429.2	431.1
^{72}Ge	844.6	845.0	751.0	753.2	643.5	645.5	424.4	425.6
$^{72,59}\text{Ge}$ (природный)	840.3	841.8	749.0	750.3	643.1	423.2	423.9	
^{73}Ge	838.9	839.6	748.0	748.4	641.5	641.4	421.0	422.8
^{74}Ge	832.6	834.2	742.0	743.5	637.6	637.2	418.4	420.1
^{76}Ge	822.0	823.5	736.0	734.0	629.5	629.1	414.1	414.7

в образцах моноизотопных кристаллов германия (^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{76}Ge) сдвигаются в соответствии с зависимостью (1). Результат наглядно проиллюстрирован на рис. 3 на частотах для первых трех полос ($\nu_1 = 840.3 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_2 = 849.0 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_3 = 641.9 \text{ cm}^{-1}$) и восьмой полосы ($\nu_8 = 423.2 \text{ cm}^{-1}$).

Таким образом, зарегистрированы сдвиги максимумов фоновых полос поглощения при изменении массового состава изотопа германия (1) от массового числа 76 до 70 (в пределах $\sim 18 \text{ cm}^{-1}$ для первого пика, в пределах $\sim 13 \text{ cm}^{-1}$ для второго и третьего пика, в пределах $\sim 9 \text{ cm}^{-1}$ для восьмого пика). Они невелики, но точно определены и заметно превышают погрешность прибора.

Причем в монокристаллах ^{70}Ge и ^{72}Ge наблюдается рост частоты полосы поглощения (ν), а в монокристаллах ^{73}Ge , ^{74}Ge и ^{76}Ge частота уменьшается по сравнению с монокристаллами природного изотопического состава ($^{72,59}\text{Ge}$).

Ранее в работах [31,32] с использованием двулучевого ИК спектрофотометра „Hitachi-225“ исследовались спектры ИК поглощения изотопически чистых монокристаллов ^{70}Ge и ^{74}Ge . Изотопы получены центробежным методом разделения в Институте молекулярной физики РНЦ „Курчатовский институт“ с обогащением 99.99%. В Лаборатории им. Лоуренса в Беркли была проведена их тонкая химическая очистка методом многократной зонной плавки (33 прохода). Очищенные таким образом поликристаллические слитки ^{70}Ge и ^{74}Ge применялись в качестве исходного сырья для выращивания монокристаллов Ge *n*-типа методом Чохральского. Технология получения этих изотопов, а также роста кристаллов, описанная в работах [9,11,40], существенным образом отличалась от методов получения образцов, исследовавшихся в настоящей работе.

Однако полученные при этом значения изотопических сдвигов полос ИК поглощения полностью коррелировали между собой и соответствовали зависимости (1), экспериментально полученной при измерениях, проведенных на образцах изотопно обогащенного германия, полученного различными методами.

Заключение

Влияние изотопного состава на свойства кристаллов германия связано с тем, что изотопический беспорядок нарушает трансляционную инвариантность решетки. Это приводит к рассеянию фононов, отсюда и сдвиг максимумов фоновых полос поглощения при изменении массового состава изотопа германия.

Методом оптической спектроскопии впервые исследован изотопический сдвиг в диапазоне $11\text{--}40 \mu\text{m}$ одновременно для всех пяти стабильных изотопов германия. Причем для изотопа германия ^{70}Ge подобное исследование было выполнено впервые.

Обнаружено, что для всех изотопов наблюдается четкое соответствие между положением пика в ИК спектре фоновых полос поглощения и массовым числом изотопа Ge. Полученная экспериментальная зависимость может быть рекомендована для использования при экспресс-анализе массового состава изотопически чистых кристаллов германия.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 75-03-2022-056, № 0817-2023-0006 и № 122031000234-2 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета и ООО „Тидекс“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] О.И. Подкопаев, А.Ф. Шиманский. *Выращивание монокристаллов германия с низким содержанием дислокаций и примесей* (Сиб. федер. ун-т, Красноярск, 2013).
- [2] L. Claeys, E. Simoen. *Germanium-based technologies: from materials to devices* (Berlin: Elsevier, 2007). www.sciencedirect.com/science/book/9780080449531

- [3] M. Bosi, G. Atolini. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, **56**, 146–174 (2010). DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2010.09.002
- [4] И.А. Каплунов, В.Е. Рогалин. *Фотоника*, **13**(1), 88–106 (2019). DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106
- [5] В.В. Коротаев, Г.С. Мельников, С.В. Михеев, В.М. Самков, Ю.И. Солдатов. *Основы тепловидения* (ИТМО, СПб., 2012).
- [6] Е.Е. Алексеев, С.Ю. Казанцев, И.Г. Кононов, В.Е. Рогалин, К.Н. Фирсов. *Опт. и спектр.*, **124** (6), 790794 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.06.46082.180-17 [E.E. Alekseev, S.Yu. Kazantsev, I.G. Kononov, V.E. Rogalin, K.N. Firsov. *Opt. Spectrosc.*, **124** (6), 821–825 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18060036].
- [7] А.В. Гусев, А.М. Гибин, И.А. Андрищенко, В.А. Гавва, Е.А. Козырев. *ФТТ*, **57** (9), 1868–1870 (2015).
- [8] И.Я. Померанчук. *ЖЭТФ*, **2**, 245–254 (1942).
- [9] В.И. Ожогин, А.В. Инюшин, А.Н. Талденков, А.В. Тихомиров, Г.Э. Попов, Ю. Халлер, К. Ито. *Письма в ЖЭТФ*, **63** (6), 463–467 (1996).
- [10] И.Я. Померанчук. *ЖЭТФ*, **12**, 419 (1942).
- [11] K.M. Itoh, W.L. Hansen, E.E. Haller, J.W. Farmer, V.I. Ozhigin, A. Rudnev, A.V. Tikhomirov. *J. Mater. Research*, **8** (6), 1341–1347 (1993). DOI: 10.1557/JMR.1993.1341
- [12] M. Cardona, M.L.W. Thewalt. *Rew. Mod. Phys.* **77** (4), 1173–1224 (2005). DOI: 10.1103/RevModPhys.77.1173
- [13] *Высокоочищенные вещества*, под ред. М.Ф. Чурбанова, Ю.А. Карлова, П.В. Зломанова, В.А. Фёдорова (Научный мир, М., 2018).
- [14] В.А. Гавва, О.Ю. Трошин, С.А. Адамчик, А.Ю. Лашков, Н.В. Абросимов, А.М. Гибин, П.А. Отопкова, А.Ю. Солин, А.Д. Буланов. *Неорганические материалы*, **58** (3), 258–263 (2022). DOI: 10.31857/S0002337X22030058
- [15] *Изотопы: свойства, получение, применение*, под ред. В.Ю. Баранова (ИздАт, М., 2000).
- [16] M. Sanati, S.K. Estreicher, M. Cardona. *Solid State Commun.*, **131**, 229–233 (2004). DOI: 10.1016/j.ssc.2004.04.043
- [17] А.В. Инюшкин. *Неорганические материалы*, **38** (5), 527 (2002) [A.V. Inyushkin. *Inorganic Materials*, **38** (5), 427–433 (2002). DOI: 10.1002/pssc.200405341].
- [18] А.А. Каминский, В.Г. Ральченко, А.П. Большаков, А.В. Инюшкин. *ДАН*, **464** (6), 676–678 (2015). DOI: 10.7868/S086956521530009X
- [19] А.П. Жернов. *ФТТ*, **41** (7), 1185–1189 (1999).
- [20] A.V. Inyushkin, A.N. Taldenkov, V.I. Ozhigin, K.M. Itoh, E.E. Haller. *Phys. Rev. B*, **68**, 153203 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevB.68.153203
- [21] I.G. Kuleev, I.I. Kuleev, A.V. Inyushkin, V.I. Ozogin. *J. Exp. Theor. Phys.*, **101** (2), 322–330 (2005). DOI: 10.1134/1.204779
- [22] К.А. Валиев. *Успехи физ. наук*, **175** (1), 3–39 (2005) [K.A. Valiev. *Physics-Uspexhi*, **48** (1), 1–36 (2005). DOI: 10.1070/PU2005v048n01ABEH002024].
- [23] В.Е. Kane. *Nature*, **393**, 33–137 (1998). DOI: 10.1038/30156
- [24] R.M. Jock, A.M. Tyryshkin, J.W. Beeman, E.E. Haller, K.M. Itoh, S.A. Lyon. *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 247601 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.247601
- [25] S. Schoenert. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, **145** (1), 242–245 (2005). DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2005.04.014
- [26] C. Aalseth, D. Anderson, R. Arthur et. al. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, **138** (1), 217–220 (2005). DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2004.11.052
- [27] H. Simka, M. Hierlemann, M. Utz, K.F. Jensen. *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 2646–2654 (1996). DOI: 10.1149/1.1837063
- [28] М.Ф. Чурбанов, А.Д. Буланов, В.А. Гавва, Е.А. Козырев, И.А. Андрищенко, В.А. Липский, С.М. Зырянов. *Способ получения изотопных разновидностей элементарного германия с высокой изотопной и химической чистотой*. Патент RU 2641126 (2016).
- [29] Ю. Пуранс, В.И. Ожогин, С.И. Тютюнников. *Перспективные материалы*, **8**, 395–399 (2010).
- [30] А.М. Потапов, П.А. Отопкова, А.Д. Буланов. В сб.: *Тезисы докладов Третьего съезда аналитиков России* (ГЕОХИ РАН, Москва, 2017), с. 97.
- [31] В.Е. Рогалин, И.С. Ценина, И.А. Каплунов. *Научно-техн. ведомости СПб. Гос. политех. ун-та*, **4–1** (183), 353–358 (2013).
- [32] И.А. Каплунов, В.Е. Рогалин, М.Ю. Гаваян. *Опт. и спектр.*, **118** (2), 254–260 (2015). DOI: 10.7868/S0030403415020087 [I.A. Kaplunov, V.E. Rogalin, M.Yu. Gavalyan. *Opt. Spectrosc.*, **118** (2), 240–246 (2015). DOI: 10.1134/S0030400X15020083].
- [33] А.В. Гусев, А.Д. Буланов, С.В. Филимонов, С.М. Зырянов, Д.Г. Арефьев, М.Ф. Чурбанов, И.А. Андрищенко, А.М. Потапов, В.А. Гавва, С.А. Адамчик. *Перспективные материалы*, **10**, 17–20 (2011).
- [34] M.F. Churbanov, V.A. Gavva, A.D. Bulanov, N.V. Abrosimov, E.A. Kozurev, I.A. Andryushchenko, V.A. Lipskii, S.A. Adamchik, O.Yu. Troshin, A.Yu. Lashkov, A.V. Gusev. *Cryst. Res. Technol.*, **52** (4), 1700026(6) (2017). DOI: 10.1002/crat.201700026
- [35] ГОСТ 3520-92. *Материалы оптические. Методы определения показателей ослабления*. Введ. 1993-07-01 (Издание стандартов, М., 1992).
- [36] Ю.М. Смирнов, И.А. Каплунов. *Материаловедение*, **5**, 48–52 (2004).
- [37] Ю.И. Уханов. *Оптические свойства полупроводников* (Наука, М., 1977).
- [38] V.A. Lipskiy, V.O. Nazaryants, T.V. Kotereva, A.D. Bulanov, V.A. Gavva, V.V. Koltashev, M.F. Churbanov, V.G. Plotnichenko. *Appl. Opt.*, **58**, 7489–7496 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.007489
- [39] H.D. Fuchs, C.H. Grein, M. Bauer, M. Cardona. *Phys. Rev. B*, **45** (8), 4065 (1992). DOI: 10.1103/PhysRevB.45.4065
- [40] K.M. Iton, W.L. Hansen, E.E. Haller, J.W. Farmer, V.I. Ozhigin, A. Rudnev, A. Tikhomirov. *J. Mater. Res.*, **8**, 1341–1347 (1993). DOI: 10.1557/JMR.1993.1341