Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственный университет, 2021

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ

А.И. Иванова, К.А. Мариничева, С.А. Третьяков, А.М. Иванов, С.В. Молчанов,
И.А. Каплунов

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

Ivanova.AI@tversu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.177

Аннотация: Проведены исследования оптического пропускания в диапазоне длин волн 2–14 мкм монокристаллов германия, легированных донорными и акцепторными примесями (удельное сопротивление германия 1–3 Ом·см), в интервале температур от 86 К до 523 К. Рассчитаны значения коэффициентов ослабления α для исследуемых кристаллов; минимальные значения коэффициентов ослабления ($0,0015–0,0231\text{ см}^{-1}$) в интервале температур от 86 К до 323 К характерны для монокристаллов германия, легированных сурьмой, в диапазоне 2–11 мкм. Исследования показали, что низкие значения α и коэффициента пропускания τ на длине волны 3,39 мкм для кристаллов Ge:Sb и Ge:Bi позволяют применять эти низкоомные кристаллы германия для газовых гелий-неоновых лазеров при температурах от 86 К до 323 К. Исследованы температурные изменения геометрии поверхности кристалла на наноразмерном уровне. Показано, что нагрев кристаллического германия приводит к увеличению диффузного отражения излучения от поверхности. Сделан вывод о возможности использования низкоомных кристаллов германия, легированных сурьмой, в качестве элементов инфракрасной оптики в интервале температур 86–373 К.

Ключевые слова: монокристаллы германия, температурная стабильность, оптическое пропускание, коэффициент ослабления, нанорельеф поверхности, диффузное отражение.

1. Введение

Кристаллический германий активно используется как полупроводниковый материал в микроэлектронике и оптоэлектронике, лазерной технике, фотоэлектрических преобразователях, так и в оптике для производства оптических волокон, для изготовления оптических элементов устройств инфракрасной (ИК) техники, что обусловлено его высокой прозрачностью в спектральном диапазоне длин волн 2,5–14 мкм [1–5]. Анализ опубликованных экспериментальных и теоретических исследований оптических свойств кристаллического германия показывает, что оптимальным набором оптических характеристик в ИК диапазоне 2,3–14 мкм обладают монокристаллы Ge n -типа с удельным сопротивлением 2–20 Ом·см (значение концентрации донорной примеси $4 \cdot 10^{13}–10^{15}\text{ см}^{-3}$). Основным недостатком оптического германия является наличие резкой температурной зависимости оптического пропускания [5–7]. Для приборов и устройств, работающих при повышенных температурах, предпочтительно использование материала с более низким удельным

сопротивлением 1–5 Ом·см [7]. Повышению температурной стабильности оптического пропускания германия способствует отжиг в интервале температур 623–723 К, изменяющий концентрацию кислорода в германии [8]. В то же время термообработка кристаллов германия до 1173 К может приводить к значительному уменьшению величины оптического пропускания и изменению его спектрального контура [9]. Одновременное введение сурьмы, кремния и теллура в расплав германия позволяет повысить температурную стабильность оптических свойств выращенных кристаллов и обеспечить значение коэффициента поглощения инфракрасного излучения менее $0,06 \text{ см}^{-1}$ при 333 К [10-11].

Актуальность настоящей работы определяется востребованностью в ИК-оптике кристаллов германия, обладающих высокой температурной стабильностью. Исследование пропускания легированного различными примесями германия, при разных температурах позволяет определить оптимальные варианты легирования для термостабильных кристаллов, а также рабочие температурные диапазоны для устройств ИК оптики.

2. Объекты и методы исследования

Исследования проводились на монокристаллах германия *n*-типа проводимости, легированных висмутом, сурьмой, выращенных методом Чохральского в кристаллографическом направлении [111], также исследовали германий *p*-типа (примесь – галлий) (см. Таблицу 1). Средняя плотность дислокаций в образцах составляла $(1-3) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Таблица 1. Исследуемые образцы и легирующие примеси.

Образцы	Тип проводимости	ρ , Ом·см	Концентрация электрически активных примесей, см^{-3}
<i>Ge: Bi</i>	<i>n</i>	1,3	$2 \cdot 10^{15}$
<i>Ge: Sb₁</i>	<i>n</i>	3,0	$7 \cdot 10^{14}$
<i>Ge: Sb₂</i>	<i>n</i>	2,0	$9 \cdot 10^{14}$
<i>Ge: Ga</i>	<i>p</i>	5,0	$2 \cdot 10^{14}$

На оптическое качество кристаллов германия влияет не только легирующая примесь, малая плотность дефектов, но и качество обработки оптических поверхностей. Подготовка образцов для испытаний заключалась в шлифовке и полировке поверхности абразивными алмазными порошками различной крупности зерна от 40 до 0,5 мкм. Подготовленные образцы имели одинаковую толщину (10 мм) и форму плоскопараллельных пластин. Измерение шероховатости и неровностей полученных поверхностей проводилась на оптическом профилометре NanoMap 1000WLI. Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z составила 12–16 нм, что соответствует необходимому качеству оптической

поверхности. Исследования оптического пропускания полированных образцов кристаллического германия проводилось на Фурье-ИК спектрометре Tensor 27. Спектры оптического пропускания регистрировали в диапазоне длин волн от 1,54 до 14 мкм (волновые числа от 6500 до 714 см⁻¹) с точностью $\pm 0,1\%$. Для измерений при температурах от 86 до 523 К использовали приставку, обеспечивающую стабильное термостатирование, и изменение температуры образцов.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Область прозрачности монокристаллического германия приходится на диапазон 2–14 мкм. Коротковолновой край основной полосы поглощения – 1,85 мкм. На длинноволновой части спектра на 12–17 мкм проявляются полосы поглощения германия, обусловленные взаимодействием света с фононами, вблизи 20–27 мкм наблюдается полоса фундаментального решеточного поглощения в германии. В ходе эксперимента были определены коэффициенты пропускания образцов при комнатной температуре ($T = 297\text{ К}$) (см. Таблицу 2). Коэффициенты пропускания τ были измерены на длинах волн, соответствующих длинам работы лазеров в среднем ИК диапазоне, например, газовые гелий-неоновые лазеры имеют рабочую длину волны $\lambda = 3,39$ мкм, рабочая длина волны CO₂-лазера составляет 10,6 мкм.

Таблица 2. Коэффициенты пропускания (τ , %) образцов германия.

Образец	λ , мкм						
	2,1	3,39	5,5	8,0	10,6	11,0	14,0
<i>Ge: Bi</i>	43	45	45	45	44	44,5	38
<i>Ge: Sb₁</i>	44	46	47	47	46	46	40
<i>Ge: Sb₂</i>	47	47	47,5	47	47	47	42
<i>Ge: Ga</i>	44	44	45	42	41	41	36

Очевидно, что наименьшим пропусканием обладает германий *p*-типа, легированный галлием, что обусловлено высокой концентрацией дырок. В кристаллах германия в диапазоне прозрачности основное поглощение имеет место на свободных носителях заряда. Сечение поглощения дырок составляет $(2-5) \cdot 10^{-16}$ см², что практически на порядок больше сечения поглощения электронов – $(7-8) \cdot 10^{-17}$ см². Образцы, легированные висмутом и сурьмой имеют близкие значения τ . У двух образцов германия, легированных сурьмой незначительная разница в пропускании связана с различием качества (шероховатости) поверхности.

Температурные измерения оптического пропускания проводились при вакуумировании приставки с образцами до $7 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст (форвакуум).

Образцы устанавливались в держатель только на прямом тепловом контакте, без использования теплопроводящих паст, которые не обеспечивают работу в вакууме при экстремальных температурах.

На рис. 1 а представлены спектры оптического пропускания германия, легированного сурьмой, в диапазоне температур от 86 до 523 К. Появление дополнительных пиков на спектре пропускания при $T = 523$ К, можно объяснить тепловой активизацией фоновых примесей, таких как, кислород, углекислый газ или водяные пары.

Рис. 1 а. Спектры пропускания в кристалле германия, легированного сурьмой $T = 86 \div 523$ К. Рис. 1 б. Смещение коротковолновой границы пропускания.

При $T > 523$ К германий практически не пропускает. Пропускание при низких температурах максимально, видимое снижение пропускания начинается уже при температурах 318–323 К (см. Таблицу 3).

Таблица 3. Коэффициенты оптического пропускания (τ , %) кристалла германия, легированного сурьмой, в температурном интервале $T = 86 \div 523$ К.

λ , мкм	T , К						
	86	173	223	273	323	373	523
1,54	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2
1,8	44	38	37	28	0,8	2	0,1
2,1	48	48	47	47	46	43	1,0
3,39	49	48	48	47	46	45	4,0
5,5	49	49	49	49	46	45	1,0
8,0	49	49	48	48	46	45	0,01
10,6	49	48	48	48	46	44	0,02
11,0	49	48	48	48	45,5	44	0,05
14,0	47,7	46	45,5	45	41	39	0,05

Коротковолновая граница пропускания полупроводника зависит от

температуры. Рис. 1 б демонстрирует смещение границы пропускания с $\lambda = 1,85$ мкм (при $T = 298$ К) в коротковолновую область спектра до значений $\lambda = 1,62$ мкм при охлаждении кристалла германия, легированного сурьмой, до 86 К. При повышении температур до 323–523 К наблюдается смещение границы пропускания в длинноволновую часть спектра до $\lambda = 2,13$ мкм ($T = 523$ К), т.е. край основной полосы поглощения смещается в сторону более низких энергий, что хорошо согласуется с литературными данными [12].

В кристаллах германия, легированных висмутом, наблюдали схожую картину снижения оптического пропускания с ростом температуры и смещение края поглощения. Монокристалл p -типа, легированный галлием, демонстрировал по всей длине спектра «провалы» пропускания, в диапазонах 3–4 мкм, 8–10 мкм, имел низкое пропускание во всем диапазоне исследуемых температур.

По величине оптического пропускания был рассчитан коэффициент ослабления ИК-излучения в исследуемых кристаллах для температурного диапазона от 86 К до 523 К. В общем случае, коэффициент ослабления α (коэффициент экстинкции) учитывает рассеянную и поглощенную составляющие. Показатели ослабления рассчитывались по формуле, связывающей их коэффициентом пропускания [13-14]:

$$\tau = \frac{(1 - R^2)e^{\alpha h}}{e^{2\alpha h} - R^2}, \quad (1)$$

где $R = (n^2 - 1)/(n^2 + 1)$ – коэффициент отражения света при нормальном падении, n – показатель преломления, h – толщина образца.

Спектральный показатель преломления германия $n(\lambda)$ рассчитывали с использованием полинома наилучшего приближения (здесь λ указывается в мкм):

$$n(\lambda) = 3,99931 + \frac{0,391707}{\lambda^2 - 0,028} + \frac{0,163492}{(\lambda^2 - 0,028)^2} + 0,0000060\lambda^2 + 0,00000005\lambda^4. \quad (2)$$

В результате анализа полученных значений коэффициента ослабления установлено, что минимальными значениями $\alpha = 0,0015$ см⁻¹ обладают кристаллы, легированные сурьмой ($\rho = 2$ Ом·см), при $\lambda = 3,39$ мкм и $T = 86$ К. В диапазоне температур от $T = 86 \div 523$ К коэффициент α имеет низкие значения на длинах волн 2,1 мкм, 3,39 мкм, 5,5 мкм, 8 мкм, 10,6 мкм, 11 мкм. Для кристалла германия, легированного галлием, наблюдали самые высокие коэффициенты ослабления, что обусловлено большим количеством термически генерированных дырок. Так, минимум $\alpha = 0,0089$ см⁻¹ при $T = 86$ К приходится на длину волны 8 мкм, а максимальное значение $\alpha = 6,8792$ см⁻¹ при $T = 523$ К соответствует длине волны 2,1 мкм. Были определены и проанализированы значения α на длине

волны 10,6 мкм (рабочая длина волны CO_2 –лазера) для всех исследованных образцов (см. Таблицу 4).

Таблица 4. Значения коэффициента ослабления α для образцов на длине волны 10,6 мкм.

T, K	Образец			
	$Ge: Sb_1$	$Ge: Sb_2$	$Ge: Bi$	$Ge: Ga$
86	0,0060	0,0041	0,0145	0,0415
173	0,0067	0,0037	0,0120	0,0932
223	0,0073	0,0031	0,0196	0,1012
273	0,0110	0,0053	0,0329	0,1123
298	0,0160	0,0120	0,0351	0,1210
323	0,0333	0,0155	0,0509	0,2074
373	0,0475	0,0364	0,2614	0,4702
523	3,1033	2,3076	4,0548	5,3033

При взаимодействии оптического излучения с кристаллами германия часть излучения теряется при отражении света от поверхности образцов, и считается, что изменение коэффициента отражения незначительно. Однако, когда оптические элементы нагреваются, на поверхности происходят процессы массопереноса на наноразмерном уровне, приводящие к неравномерному расширению материала, что связано с неоднородностью поверхностного потенциала, обусловленной кристаллографией материала и наличием дефектов в приповерхностном слое. Атомы вещества мигрируют в более благоприятные с энергетической точки зрения области. В совокупности это приводит к изменению геометрии поверхности, она становится более периодичной, параметры шероховатости уменьшаются, изменяются углы между нормалью к поверхности и микроплощадками (см. рис. 3), что в результате приводит к увеличению диффузного отражения согласно известной формуле Френеля (3):

$$R = \left\{ \frac{\sin^2 \left[i - \arcsin(\sin i / n) \right]}{\sin^2 \left[i + \arcsin(\sin i / n) \right]} + \frac{\operatorname{tg}^2 \left[i - \arcsin(\sin i / n) \right]}{\operatorname{tg}^2 \left[i + \arcsin(\sin i / n) \right]} \right\}, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения, i – угол отражения.

На рис. 2 и 3 представлены 2D-профили поверхности кристалла германия n -типа, полученные при различных температурах на профилометре NanoMap 1000WLI. Проведенный нами анализ параметров шероховатости (на примере R_z) поверхности кристаллов германия показал, что с повышением температуры их значения уменьшаются. Так, например, $R_z(298K)=15$ нм и $R_z(335K)=9$ нм, рельеф поверхности становится периодическим, что может способствовать увеличению диффузного отражения излучения.

Рис. 2. 2D-профили поверхности кристалла германия ($T = 298$ К).

Рис. 3. 2D-профили поверхности кристалла германия ($T = 335$ К).

4. Заключение

Исследовано оптическое пропускание монокристаллов германия, легированных сурьмой, висмутом, галлием, на рабочих длинах волн лазеров инфракрасного диапазона. Получены температурные зависимости пропускания низкоомных кристаллов, легированных донорными и акцепторными примесями, в диапазоне от 86 К до 523 К.

Определены значения коэффициентов ослабления исследуемых кристаллов в интервале температур от 86 К до 523 К. Наименьшие значения коэффициентов ослабления имеют монокристаллы германия, легированные сурьмой в диапазоне длин волн 2,1–11 мкм от 86 К до 323 К. Обобщая полученные результаты, можно отметить, что самые низкие значения α соответствуют длине волн $\lambda = 3,39$ мкм для кристаллов $Ge:Bi$ и $Ge:Bi$ при 86 К. В связи с тем, что данная длина волны является рабочей для газовых гелий-неоновых лазеров, можно предположить, что для данного класса лазеров можно использовать оптику из низкоомных кристаллов германия, легированных сурьмой и висмутом. Определены значения длин волн, соответствующих краю основной полосы пропускания для заданного диапазона температур. Для кристаллов n -типа ($Ge:Bi$, $Ge:Sb$) при 86 К коротковолновая граница пропускания смещается до 1,62 мкм (для сравнения: 1,85 мкм при комнатной температуре). Для кристаллов p -типа ($Ge:Ga$) граница сдвига составляет 1,65 мкм. Полученные данные хорошо согласуются с температурными изменениями запрещенной зоны.

Оптические свойства кристаллов германия обусловлены как видом электроактивной примеси, наличием дефектов и фоновых примесей, так и параметрами поверхности. Представлены результаты изменений профиля поверхности кристаллов германия при температурных воздействиях. Установлено, что при нагреве монокристаллов до температур 325 К и выше

происходят изменения геометрии поверхности, сопровождающиеся уменьшением параметров шероховатости и образованием периодического рельефа, что приводит к увеличению диффузного отражения.

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007). Исследования проведены на оборудовании Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Bosi, M.** Germanium: Epitaxy and its application / M. Bosi, G. Attolini // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. – 2010. – V. 56. – I. 3-4. – P. 146-174. DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2010.09.002.
2. **Depuydt, B.** Germanium: from the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers / B. Depuydt, A. Theuwis, I. Romandic // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2006. – V. 9. – I. 4-5. – P. 437-443. DOI: 10.1016/j.mssp.2006.08.002.
3. **Claeys, L.** Germanium-based technologies: from materials to devices / L. Claeys, E. Simoen. – Oxford: Elsevier Science, 2007. – 449 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-044953-1.X5000-5.
4. **Sullivan, R.M.** A historical view of germanium as an infrared window material / R.M. Sullivan // *Window and Dome Technologies and Materials XI: proceedings of SPIE*. – V. 7302, 15-16 April 2009, Orlando, Florida, United States. – Washington: SPIE Publ., 2009. – P. 73020L-1-73020L-11. DOI: 10.1117/12.819812.
5. **Каплунов, И.А.** Оптические свойства и области применения германия в фотонике / И.А. Каплунов, В.Е. Рогалин // *Фотоника*. – 2019. – Т. 13. – № 1. – С. 88-106. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106.
6. **Potter, R.F.** Germanium (*Ge*) / R.F. Potter // *Handbook of Optical Constants of Solids*. – 1997. – V. 1. – P. 465-478. DOI: 10.1016/B978-012544415-6.50020-0.
7. **Kaplunov, I.A.** Optical transparency of crystalline germanium / I.A. Kaplunov, Yu.M. Smirnov, A.I. Kolesnikov // *Journal of Optical Technology*. – 2005. – V. 72. – I. 2. – P. 214-220. DOI: 10.1364/JOT.72.000214.
8. **Маколкина, Е.Н.** Влияние высокотемпературной термообработки на спектр поглощения кристаллов германия / Е.Н. Маколкина // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2005. – № 18. – С. 198-202.
9. **Podkopaev, O.I.** Study of the effect of doping on the temperature stability of the optical properties of germanium single crystals / O.I. Podkopaev, A.F. Shimanskiy, S.A. Kopytkova, R.A. Filatov, N.O. Golubovskaya // *Semiconductors*. 2016. – V. 50. – I. 10. – P. 1287-1290. DOI: 10.1134/S1063782616100213.
10. **Shimanskii, A.F.** Thermal stability of the properties of germanium crystals for IR optics / A.F. Shimanskii, A.N. Gorodishcheva, S.A. Kopytkova, T.V. Kulakovskaya // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1353. – Art. № 12062. – 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012062.
11. **Asta'ev, N.I.** Features of semiconductor materials as infrared optical media / N.I. Asta'ev, I.M. Nesmelova, E.A. Nesmelov // *Journal of Optical Technology*. – 2008. – V. 75. – I. 9. – P. 608-610 DOI: 10.1364/jot.75.000608.
12. **Голенищев-Кутузов, В.А.** Перспективные материалы и приемники излучения фотоэлектроники и фотоэнергетики: монография / В.А. Голенищев-Кутузов, А.В. Голенищев-Кутузов, И.М. Несмелова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 171 с.
13. **Kurik, M.V.** Accuracy of the determination of absorption and reflection coefficients in absorbing media / M.V. Kurik // *Journal of Applied Spectroscopy*. 1966. – V. 4. – I. 3. – P. 199-201. DOI: 10.1007/BF00612152.
14. **Kaplunov, I.A.** Measuring the light-attenuation coefficients of germanium and paratellurite crystals / I.A. Kaplunov, A.I. Kolesnikov, I.V. Talyzin, L.V. Sedova, S.L. Sha'ovich // *Journal of Optical Technology*. 2005. – V. 72. – I. 7. – P. 564-571. DOI: 10.1364/JOT.72.000564.

References:

1. Bosi M., Attolini G. Germanium: Epitaxy and its application, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2010, vol. 56, issue 3-4, pp. 146-174. DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2010.09.002.
2. Depuydt B., Theuwis A., Romandic I. Germanium: from the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2006, vol. 9, issue 4-5, pp. 437-443. DOI: 10.1016/j.mssp.2006.08.002.

3. Claeys L., Simoen E. Germanium-based technologies: from materials to devices. Oxford, Elsevier Science, 2007, 449 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-044953-1.X5000-5.
4. Sullivan R.M. A historical view of germanium as an infrared window material, *Window and Dome Technologies and Materials XI: proceedings of SPIE*, vol. 7302, 15-16 April 2009, Orlando, Florida, United States. Washington, SPIE Publ., 2009, pp. 73020L-1-73020L-11. DOI: 10.1117/12.819812.
5. Kaplunov I.A., Rogalin V.E. Opticheskie svoystva i oblasti primeneniya germaniya v fotonike [Optical properties and applications of germanium in photonics], *Fotonika [Photonics]*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 88-106. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106. (In Russian).
6. Potter R.F. Germanium (Ge), *Handbook of Optical Constants of Solids*, 1997, vol. 1, pp. 465-478. DOI: 10.1016/B978-012544415-6.50020-0.
7. Kaplunov I. A., Smirnov Yu.M., Kolesnikov A.I. Optical transparency of crystalline germanium, *Journal of Optical Technology*, 2005, vol. 72, issue 2, pp. 214-220. DOI: 10.1364/JOT.72.000214.
8. Makolkina E.N. Vliyaniye vysokotemperaturnoy termoobrabotki na spektr pogloshcheniya kristallov germaniya [Influence of high-temperature heat treatment on the absorption spectrum of germanium crystals], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics]*, 2005, no. 18, pp. 198-202. (In Russian).
9. Podkopaev O.I., Shimanskiy A.F., Kopytkova S.A., Filatov R.A., Golubovskaya N.O. Study of the effect of doping on the temperature stability of the optical properties of germanium single crystals, *Semiconductors*, 2016, vol. 50, issue 10, pp. 1287-1290. DOI: 10.1134/S1063782616100213.
10. Shimanskii A.F., Gorodishcheva A.N., Kopytkova S.A., Kulakovskaya T.V. Thermal stability of the properties of germanium crystals for IR optics, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol.1353, art. no. 12062, 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012062.
11. Astafev N.I. Nesmelova I.M., Nesmelov E.A. Features of semiconductor materials as infrared optical media, *Journal of Optical Technology*, 2008, vol.75, issue 9, pp. 608-610. DOI: 10.1364/jot.75.000608.
12. Golenishchev-Kutuzov V.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Nesmelova I.M. *Perspektivnye materialy i priemniki izlucheniya fotoelektroniki i fotoenergetiki: monografiya* [Advanced materials and radiation detectors for photoelectronics and photovoltaic power engineering: monograph]. Kazan: Kazan state power engineering university Publ., 2013, 171 p. (In Russian).
13. Kurik M.V. Accuracy of the determination of absorption and reflection coefficients in absorbing media // *Journal of Applied Spectroscopy*, 1966, vol. 4, issue 3, pp.199-201. DOI: 10.1007/BF00612152.
14. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Talyzin I.V., Sedova L.V., Shaïovich S.L. Measuring the light-attenuation coefficients of germanium and paratellurite crystals, *Journal of Optical Technology*, 2005, vol. 72, issue 7, pp. 564-571. DOI: 10.1364/JOT.72.000564.

Original paper

TEMPERATURE DEPENDENCE OF OPTICAL TRANSMISSION OF GERMANIUM SINGLE CRYSTALS

A.I. Ivanova, K.A. Marinicheva, S.A. Tret'yakov, A.M. Ivanov, S.V. Molchanov, I.A. Kaplunov
Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.177

Abstract: In this work, we investigated optical transmission in the wavelength range of 2–14 μm of low-resistance germanium crystals ($1-3 \Omega\cdot\text{cm}$) doped with donor and acceptor impurities in the temperature range from 86 K to 523 K. The values of the attenuation coefficients for investigated crystals are obtained. Minimum attenuation coefficients α of $0,0015-0,0231 \text{ cm}^{-1}$ in the temperature range from 86 K to 323 K are characteristic for germanium single crystals doped with antimony in the range 2,1–11 μm . Studies have shown that the low values of α and the transmittance τ at a wavelength of 3,39 μm for *Ge:Bi* and *Ge:Sb* crystals make it possible to use these low-resistance germanium crystals for gas helium-neon lasers at temperatures from 86 K to 323 K. The temperature changes in the geometry of the crystal surface are investigated at the nanoscale level. It is shown that heating crystalline germanium leads to an increase in the diffuse reflection of radiation from the surface. The possibility of using the low-resistance germanium crystals doped with antimony as elements of infrared optics in the temperature range 86–373 K has been demonstrated.

Keywords: *germanium single crystals, temperature stability, optical transmission, attenuation coefficient, surface nanorelief, diffuse reflection.*

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Мариничева Кристина Александровна – ведущий инженер кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Третьяков Сергей Андреевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Иванов Алексей Михайлович – ведущий программист кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Молчанов Сергей Вячеславович – аспирант третьего года обучения кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Каплунов Иван Александрович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Kristina A. Marinicheva – Lead Engineer, Applied Physics Department, Tver State University

Sergey A. Tret'yakov – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Aleksey M. Ivanov – Lead Programmer, Applied Physics Department, Tver State University

Sergey V. Molchanov – 3rd year postgraduate student, Applied Physics Department, Tver State University

Ivan A. Kaplunov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 25.09.2021; после рецензирования/revised: 24.10.2021; принята/accepted 29.10.2021.