

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕРМАНИЯ В ФОТОНИКЕ

И. А. Каплунов¹, В. Е. Рогалин^{1,2}

¹Тверской государственный университет, Тверь,
Россия

²АО "Национальный центр лазерных систем и комплексов "Астрофизика", Москва, Россия

Два окна прозрачности атмосферы в ИК-области, 3–5 мкм и 8–14 мкм, практически перекрываются областью максимального пропускания германия (Ge). Ge прозрачен в диапазоне 1,8–23 мкм (хотя в области 11–23 мкм присутствует ряд фононных полос поглощения), также имеется окно прозрачности в терагерцевом (ТГц) спектральном диапазоне (~100–300 мкм). Кристаллический германий, благодаря своим физико-химическим свойствам, является одним из системообразующих материалов ИК-фотоники, и его применение составляет до 25–30% от общей структуры потребления этого материала. В статье представлен обзор применений материала в фотонике в зависимости от возникающих при росте кристалла термоупругих напряжений, примесной неоднородности и структурных дефектов.

ВВЕДЕНИЕ

В ИК-области существуют два наиболее широко используемых окна прозрачности атмосферы: спектральные диапазоны 3–5 и 8–14 мкм, которые соответствуют области максимальной прозрачности германия (Ge). Для этих диапазонов разработано и используется большое количество оптических приборов. Если в области длин волн (λ) 3–5 мкм используют преимущественно оптику из кристаллов кремния (Si), который значительно более доступен, то в диапазоне 8–14 мкм (где Si обладает высоким поглощением) активно применяют элементы из Ge. Кристаллический германий (моно- и поликристаллы) является одним из классических материалов для среднего и дальнего ИК-диапазонов длин волн. Доля его применения в фотонике составляет около 25–30% от общего потребления этого материала [1]. Ge прозрачен в диапазоне 1,8–23 мкм, однако в области 11–23 мкм присутствует

OPTICAL PROPERTIES AND APPLICATIONS OF GERMANIUM IN PHOTONICS

I. A. Kaplunov¹, V. E. Rogalin^{1,2}

¹Tver State University, Tver, Russia

²JSC "National Center for Laser Systems and Complexes "Astrofizika", Moscow, Russia

Two windows of atmospheric transparency in the infrared (IR) region of 3–5 μm and 8–14 μm almost overlap with the region of maximum transmission of germanium (Ge). Ge is transparent in the 1.8–23 μm range (although a number of phonon absorption bands are present in the 11–23 μm region), there is also a transparency window in the terahertz (THz) spectral range (~100–300 μm). Due to its physicochemical properties, crystalline germanium is one of the backbone materials of IR photonics and its use amounts to 25–30% of the total consumption pattern of this material.

INTRODUCTION

There are two of the most widely used atmospheric transparency windows in the IR region: the spectral ranges 3–5 and 8–14 μm , which correspond to the region of maximum transparency of germanium (Ge). For these ranges, a large number of optical devices have been developed and used. If in the wavelength range (λ) of 3–5 μm , optics made of silicon (Si) crystals, which is much more accessible, is used predominantly, then in the range of 8–14 μm (where Si has a high absorption), Ge elements are actively used. Crystalline germanium (single and polycrystals) is one of the classical materials for the middle and far infrared wavelength ranges. The share of its use in photonics is about 25–30% of the total consumption of this material [1]. Ge is transparent in the range of 1.8–23 μm , however, in the region of 11–23 μm , a number of phonon absorption bands are present, which sharply limit the use of the material; there is also a transparency window in the THz range (~100–300 μm).

The optical elements made of germanium are convenient to manufacture and operate. They do not interact with atmospheric moisture, are not toxic, durable, and have good thermophysical properties. Ge has a high hardness, which allows you to form high-precision optical parts that are well cleared up even with single-layer ZnS or As₂S₃ coatings (up to 98% of radiation



ряд фононных полос поглощения, которые резко ограничивают применение материала; также имеется окно прозрачности в ТГц-диапазоне (~100–300 мкм).

Оптические элементы из германия удобны в изготовлении и эксплуатации. Они не взаимодействуют с атмосферной влагой, не токсичны, прочны, имеют хорошие теплофизические свойства. Ge имеет высокую твердость, что позволяет формировать высокоточные оптические детали, которые хорошо просветляются даже однослойными покрытиями ZnS или As_2S_3 (до 98% пропускания излучения). Из Ge изготавливают полупрозрачные зеркала, работающие как без интерференционных покрытий, так и с ними, высокоточные эталоны Фабри-Перо, акустооптические элементы и другие детали [2–19]. На подложках из Ge обычно изготавливают узкополосные интерференционные светофильтры. Наиболее важная область применения Ge – оптика тепловизионных камер диапазона длин волн 8–14 мкм, используемых в системах пассивного тепловидения, системах инфракрасного наведения, приборах ночного видения, противопожарных системах и др. [20, 21]. Например, оптико-электронная станция кругового обзора "Феникс" имеет входное окно из Ge диаметром 274 мм [22]. Ge также используется для изготовления оптических элементов для спектроскопии, работающих на эффекте многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) [23].

Примесные кристаллы Ge активно применяются для изготовления фотоприемников, регистрирующих ИК-излучение [24]. Их работа основана на возбуждении квантами излучения носителя на примесном уровне, переходящим в зону проводимости. Для разных ИК-диапазонов используется соответствующая примесь. Как правило, эти приемники работают при низких температурах.

transmission). Ge is used to make translucent mirrors that work with and without interference coatings, high-precision Fabry-Perot standards, acoustooptic elements, and other details [2–19]. Ge substrates are usually used to make narrow-band interference light filters. The most important application area of Ge is the optics of thermal imaging cameras of the 8–14 μ m wavelength range used in passive thermal imaging systems, infrared guidance systems, night vision devices, fire extinguishing systems, etc. [20, 21]. E.g., the opto-electronic circular station "Phoenix" has an input window of 274 mm in diameter made of Ge [22]. Ge is also used for the manufacture of optical elements for spectroscopy, working on the effect of multiple attenuated total reflectance (MATR) [23].

Ge impurity crystals are actively used for the manufacture of photodetectors that record infrared radiation [24]. Their work is based on the excitation by a quantum of carrier radiation at the impurity level, which passes into the conduction band. For different IR ranges, the appropriate impurity is used. As a rule, these receivers operate at low temperatures.

Among the operational features of Ge that must be taken into account in the process of application are the lack of transparency in the visible region and the presence of an exponential dependence of the absorption coefficient on temperature.

Optical Ge single crystals are usually grown from the melt by the methods of Czochralski, Stepanov, directional solidification, etc. [7, 25, 26]. In the case when the losses on absorption and scattering in the optical system can be neglected, use cheaper polycrystalline Ge.

Creating a modern elemental base of photonics is impossible without the use of single crystals with low and ultralow content of impurities, in particular, crystals for ionizing radiation detectors require a concentration of electroactive impurities of no more than 10^{10} cm^{-3} . In this case, germanium always contains background

К числу эксплуатационных особенностей Ge, которые необходимо учитывать в процессе применения, можно отнести отсутствие прозрачности в видимой области и наличие экспоненциальной зависимости коэффициента поглощения от температуры.

Оптические монокристаллы Ge обычно выращиваются из расплава методами Чохральского, Степанова, направленной кристаллизации и др. [7, 25, 26]. В случае, когда потерями на поглощение и рассеяние в оптической системе можно пренебречь, используют более дешевый поликристаллический Ge.

Создание современной элементной базы фотоники невозможно без использования монокристаллов с низким и сверхнизким содержанием посторонних примесей, в частности, кристаллы для детекторов ионизирующих излучений требуют концентрацию электроактивных примесей не более 10^{10} см^{-3} . При этом в германии всегда содержатся фоновые примеси, такие как кислород (концентрация которого может достигать 10^{17} см^{-3}), углерод, азот и др. Наличие кислорода приводит к образованию дислокаций, микродефектов, термодоноров, что, в свою очередь, влияет на время жизни неравновесных носителей заряда и вызывает рассеяние излучения.

Электрофизические и оптические параметры Ge взаимосвязаны. Значительный объем исследований Ge, в том числе и оптических свойств, проводится электрофизическими методами, достигшими значительного совершенства в применении в полупроводниковой электронике. Это позволяет проводить тестирование Ge для ИК-фотоники на основе измерений электрофизических параметров [27, 28].

Поглощение ИК-излучения в Ge изучалось многими авторами, например, [29, 30], однако исследования проводились в основном в области фундаментального поглощения либо на легированных образцах. Ряд исследований был проведен калориметрическим способом на $\lambda=10,6 \text{ мкм}$ [31-33]; представлены результаты исследования поглощения ИК-излучения в монокристаллах Ge n-типа в зависимости от величины удельного сопротивления ρ , температуры T и длины волны λ [34]. На рис. 1 приведены частотные зависимости коэффициента поглощения (β) в области максимальной прозрачности 2,5-11 мкм, зависимости $\beta=f(\lambda)$, а также влияние удельного сопротивления ρ на величину β .

В области максимальной прозрачности Ge оптимизацией удельного сопротивления удалось снизить значение $\beta_{10,6}$. Измеренное значение β , строго

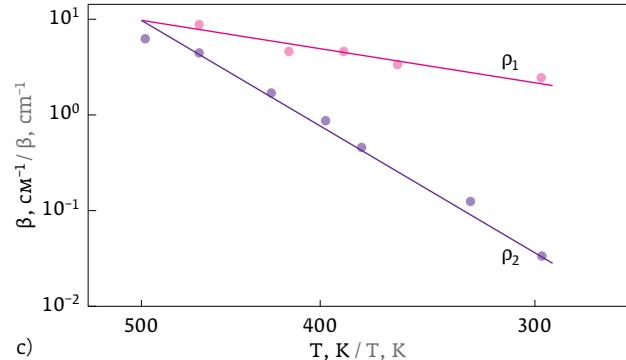
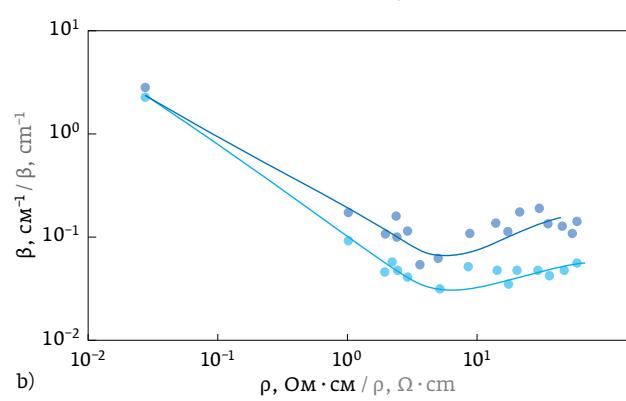
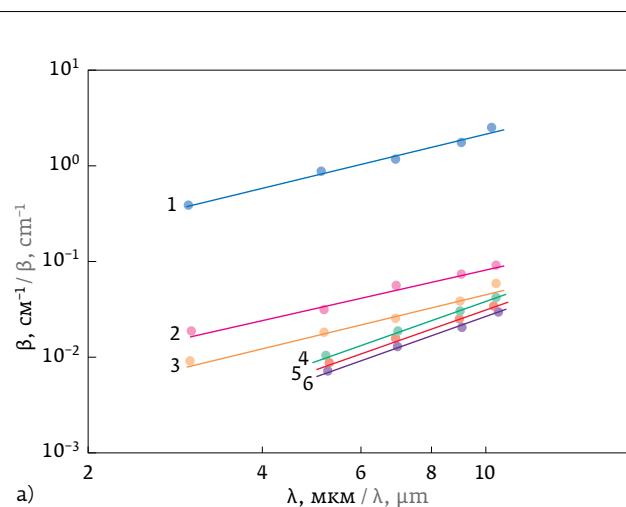


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения германия n-типа в области максимальной прозрачности:
a) от длины волны λ (мкм): 1. $\rho=0,03 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; 2. $\rho=1,0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$;
3. $\rho=2,0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; 4. $\rho=2,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; 5. $\rho=3,0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$;
6. $\rho=5,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; b) от удельного сопротивления, $\lambda=10,6 \text{ мкм}$,
 $T_1=297 \text{ К}$, $T_2=220 \text{ К}$; c) от температуры ($\lambda=10,6 \text{ мкм}$):
 $\rho_1=0,03 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $\rho_2=2,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [34]

Fig. 1. Dependence of the absorption coefficient of n-type germanium in the region of maximum transparency: a) on the wavelength λ (μm): 1. $\rho=0.03 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$; 2. $\rho=1.0 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$;
3. $\rho=2.0 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$; 4. $\rho=2.5 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$; 5. $\rho=3.0 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$;
6. $\rho=5.5 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$; b) on the resistivity, $\lambda=10.6 \mu\text{m}$,
 $T_1=297 \text{ K}$, $T_2=220 \text{ K}$; c) on the temperature ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$):
 $\rho_1=0.03 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$; $\rho_2=2.5 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ [34]



говоря, является величиной коэффициента ослабления в образцах. В настоящее время получены кристаллы с $\beta=0,015 \text{ см}^{-1}$ при решеточном поглощении $\beta_{\text{реш}}=0,01 \text{ см}^{-1}$. Поверхностное поглощение $2\beta_{\text{пов}}=0,0009 \text{ см}^{-1}$. Эти значения близки к технологическому пределу возможностей материала [31-34]. Зависимость $\beta=f(\lambda)$ подчиняется экспериментальному выражению $\beta \sim \lambda^{1.2}$. Величина β экспоненциально зависит от температуры, и основным механизмом объемных потерь является поглощение на свободных носителях заряда. Определенное возрастание β при росте величины ρ в области 5–50 Ом·см является следствием увеличивающегося вклада поглощения свободными дырками, чье сечение поглощения в области 10 мкм в ~16–100 раз больше, чем у электронов [31–33].

Исследования ИК-поглощения Ge в области прозрачности показали, что оптимизацией концентрации электроактивных примесей удается снизить величину коэффициента поглощения практически до фононного предела. Однако потери могут быть вызваны не только объемным поглощением, но и поверхностным поглощением и рассеянием излучения на структурных дефектах. Этим, видимо, можно объяснить некоторое превышение измеренного значения $\beta_{10,6}$ над данными

impurities, such as oxygen (the concentration of which can reach 10^{17} cm^{-3}), carbon, nitrogen, etc. The presence of oxygen leads to the formation of dislocations, microdefects, and thermal donors, which, in turn, affects the lifetime of non-equilibrium charge carriers and causes radiation scattering.

Electrophysical and optical parameters of Ge are interrelated. A significant amount of research on Ge, including optical properties, is carried out by electrophysical methods, which have achieved considerable perfection in semiconductor electronics. This allows testing of Ge for IR photonics based on measurements of electrophysical parameters [27, 28].

Absorption of IR radiation in Ge has been studied by many authors, e.g. [29, 30]; however, the studies were carried out mainly in the region of fundamental absorption, or on doped samples. A number of studies were carried out calorimetrically at $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ [31–33]; the results of the study of the absorption of infrared radiation in n-type Ge single crystals are presented, depending on the resistivity ρ , temperature T and wavelength λ [34]. Figure 1 shows the frequency dependences of the absorption coefficient (β) in the region of maximum transparency 2.5–11 μm , the dependence $\beta=f(\lambda)$, and the effect of resistivity ρ on β .

калориметрических измерений [31–33], где фиксировалось только объемное поглощение на $\lambda=10,6$ мкм. Эти же эффекты привели, вероятно, к уменьшению значения коэффициента γ в измеренной частотной зависимости $\beta \sim \lambda^\gamma$. [34]. Как показано в работе [29], в области малых значений β для Ge величина $\gamma \approx 2$.

С появлением технологии формирования оптических деталей путем высокотемпературной деформации была предпринята попытка провести этот процесс при изготовлении германиевой оптики. Обнаружено [35], что пластическая деформация вызывает увеличение коэффициента поглощения кристаллов германия, так как изменения спектра поглощения и проводимости указывают на то, что возникшие в результате этого дислокации при температуре 300 К обладают акцепторными свойствами.

При наличии рассеяния закон Бугера-Ламберта для ослабления света выполняется не строго, а известные формулы, связывающие коэффициенты пропускания и ослабления, в случае заметного рассеяния становятся некорректными. Различия тем выше, чем больше отношение вероятностей рассеяния фотона и поглощения в слое единичной длины, а также тем выше, чем больше отношение длины кристалла к его диаметру [25].

Для ряда применений, прежде всего в тепловидении (получение, обработка и передача изображений), рассеяние является причиной снижения контраста изображения и разрешающей способности [20]. В этом диапазоне имеет место малоугловое рассеяние Мie и доля рассеянного излучения может достигать 20% и более, в зависимости от характеристик германия. Поликристаллы Ge рассеивают свет в несколько раз интенсивнее монокристаллов. Соответствующие потерям коэффициенты рассеяния β_p Ge – $(10^{-3}–10^{-1} \text{ см}^{-1})$, входящие в коэффициенты ослабления (экстинкции) света, во многих образцах соизмеримы с самими коэффициентами экстинкции и зачастую превосходят β [9, 12, 13].

Рассеяние излучения в Ge связано с возникновением ростовых термоупругих напряжений, примесной неоднородностью и структурными дефектами. Максимум рассеяния наблюдается в легированных моно- и поликристаллах при большом количестве дефектов (малоугловые границы, включения, блочная структура) [5]. Высокотемпературный отжиг Ge приводит к снижению интенсивности рассеяния света в несколько раз, что свидетельствует об изменении размеров и формы рассеивающих неоднородностей и, возможно,

In the region of maximum transparency of Ge, the optimization of resistivity helped to reduce the value of $\beta_{10,6}$. The measured value of β , strictly speaking, is the value of the attenuation coefficient in the samples. At present, the crystals with $\beta=0.015 \text{ cm}^{-1}$ have been obtained, with grating absorption, $\beta_{\text{grat}}=0.01 \text{ cm}^{-1}$. The surface absorption is $2\beta_{\text{surf}}=0.0009 \text{ cm}^{-1}$. These values are close to the process limit of the material [31–34]. The dependence $\beta=f(\lambda)$ obeys the experimental expression $\beta \sim \lambda^{1.2}$. The value of β depends exponentially on temperature and the main mechanism of volume loss is absorption on free charge carriers. A certain increase in β with an increase in ρ in the region of $5–50 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ is a consequence of the increasing contribution of absorption by free holes, whose absorption cross-section in the region of $10 \mu\text{m}$ is $\sim 16–100$ times larger than that of electrons [31–33].

The studies of Ge IR absorption in the transparency region showed that by optimizing the concentration of electroactive impurities it is possible to reduce the absorption coefficient almost to the phonon limit. However, the losses can be caused not only by volume absorption, but also by surface absorption and scattering of radiation by structural defects. This, apparently, can explain a certain excess of the measured value of $\beta_{10,6}$ over the calorimetric measurements [31–33], where only the volume absorption was recorded at $\lambda=10,6 \mu\text{m}$. The same effects probably led to a decrease in the value of the coefficient γ in the measured frequency dependence $\beta \sim \lambda^\gamma$. [34]. As shown in [29], in the region of small β values for Ge, the value $\gamma \approx 2$.

With the advent of the technology of forming optical components by high-temperature deformation, an attempt was made to carry out this process in the manufacture of germanium optics. It was found [35] that plastic deformation causes an increase in the absorption coefficient of germanium crystals, since changes in the absorption spectrum and conductivity indicate that the dislocations resulting from this at a temperature of 300 K have acceptor properties.

In the presence of scattering, the Bouguer-Lambert law for weakening light is followed not strictly, and the known formulas relating transmittance and attenuation in the case of noticeable scattering become incorrect. The differences are the higher, the higher the ratio of the probabilities of photon scattering and absorption in a unit-length layer, and the higher the ratio of crystal length to its diameter [25].

For a number of applications, primarily in thermal imaging (receiving, processing and transmitting images), scattering causes a decrease in image contrast and resolution [20]. In this range, small-angle Mie scattering takes place and the fraction of



о частичном их распаде. Во время термообработки германия протекают два процесса – диссоциация комплексов кислорода с сурьмой при термообработке (с удалением сурьмы из примесного облака) и увеличение кислородных облаков из-за диффузии кислорода. Эти результаты указывают на возможные пути снижения световых потерь, связанных с рассеянием. Это – длительный высокотемпературный отжиг, применение сверхчистого исходного сырья, и, в первую очередь, совершенствование технологий выращивания Ge [4, 9].

Наличие резкой температурной зависимости β ограничивает применение Ge в непрерывных лазерах. Окна из Ge удовлетворительно работают при плотностях мощности 100–250 Вт/см², если обеспечивается их эффективное охлаждение [2]. Однако использование Ge в непрерывных лазерах ограничено из-за появления оптических элементов из поликристаллического селенида цинка, обладающего лучшей оптической прочностью.

Выявлена взаимосвязь строения и электропроводности (а следовательно, и поглощения) не только монокристаллов, но и оптических поликристаллов Ge (ГПО) и особо чистого германия (ОЧГ). Удельная электрическая проводимость ГПО снижается при уменьшении размера кристалли-

scattered radiation can reach 20% or more, depending on the characteristics of germanium. Ge polycrystals scatter light several times more intensely than single crystals. The corresponding loss coefficients β_p Ge – (10^{-3} – 10^{-1} cm⁻¹) are included in the light attenuation (extinction) coefficients, in many samples they are comparable with the extinction coefficients themselves and often exceed β [9, 12, 13].

The scattering of radiation in Ge is associated with the appearance of growth thermoelastic stresses, impurity inhomogeneity, and structural defects. The scattering maximum is observed in doped single and polycrystals with a large number of defects (low-angle boundaries, inclusions, block structure) [5]. High-temperature annealing of Ge leads to a decrease in the intensity of light scattering several times, which indicates a change in the size and shape of scattering inhomogeneities, and, possibly, their partial decay. During heat treatment of germanium, two processes take place: dissociation of oxygen complexes with antimony during heat treatment (with removal of antimony from an impurity cloud) and an increase in oxygen clouds due to oxygen diffusion. These results indicate possible ways to reduce the light loss associated with scattering. This is a long-term high-temperature annealing, the use of ultrapure raw materials, and,

тов, что связано с уменьшением подвижности носителей заряда, вызванным их рассеянием на границах кристаллитов. В ОЧГ электропроводность растет с уменьшением размера кристаллитов, а время жизни неравновесных носителей заряда в нем снижается, вследствие роста концентрации поверхностных электронных состояний [36, 37].

Бездислокационный и малодислокационный ОЧГ выращивают для производства радиационно-стойких фотоэлектрических детекторов ионизирующих излучений, где требуются кристаллы с содержанием линейных дефектов (порядка 100 cm^{-2}) и концентрацией электроактивных примесей на уровне $10^9\text{--}10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Одной из вредных примесей, оказывающих влияние на дефектную структуру и свойства кристаллов Ge, является кислород [O] [38–41]. Кислород в германии, как правило, является атомарной междуузельной, оптически активной примесью. Комплексы, образуемые [O] в германии, обусловлены наличием квазимолекул Ge-O-Ge, а также различных проприеватов GeO_x, размеры, концентрация, форма которых зависят от общей концентрации [O], условий выращивания, термообработки. Авторами работ [38–41] выявлена взаимосвязь концентрации [O] и плотности дислокаций, определено содержание оптически активного [O] в кристаллах Ge различных марок, установлено, что содержание [O] заметно влияет на структурное совершенство ОЧГ и параметры приборов, изготовленных на его основе, например детекторов.

Содержание оптически активного [O] в Ge различных марок определяют методом ИК-Фурье-спектроскопии по положению полос поглощения в фононной зоне (рис. 2). Регулирование содержания [O] в матрице Ge зачастую достигается легированием редкоземельными элементами [42]. Показано, что в Ge, легированном рядом лантаноидов, они активно связывают [O] в электрически нейтральные комплексы, формально снижая при этом концентрацию оптически активного [O] в матрице почти на порядок.

Современные технологии выращивания германия с низким содержанием кислорода в кристаллах должны обеспечивать концентрацию кислорода на уровне 10^{15} cm^{-3} , что предполагает выращивание в атмосфере, в которой парциальное давление [O] в газовой фазе не должно превышать $1,53 \cdot 10^{-23} \text{ atm}$ ($-1,50 \cdot 10^{-18} \text{ Pa}$) [26]. При росте Ge из расплава и наличии кислорода в газовой фазе протекает реакция окисления Ge с образованием в расплаве гетерогенных включений GeO₂, являю-

above all, the improvement of Ge growing technologies [4, 9].

The presence of a sharp temperature dependence β limits the use of Ge in continuous lasers. Ge windows perform satisfactorily at power densities of $100\text{--}250 \text{ W/cm}^2$ if their effective cooling is ensured [2]. However, the use of Ge in continuous lasers is limited because of the appearance of optical elements from polycrystalline zinc selenide, which has better optical strength.

The relationship between the structure and electrical conductivity (and, consequently, absorption) of not only single crystals, but also optical polycrystals of Ge (GPO) and highly pure germanium (HPG) has been revealed. The electrical conductivity of GPO decreases with a decrease in the size of crystallites, which is associated with a decrease in the mobility of charge carriers caused by their scattering at the boundaries of crystallites. In HPG, the electrical conductivity increases with decreasing crystallite size, and the lifetime of non-equilibrium charge carriers in it decreases due to an increase in the concentration of surface electronic states [36, 37].

Dislocation free and low dislocation HPG is grown for the production of radiation-resistant photoelectric detectors of ionizing radiation, where crystals with a content of linear defects (of the order of 100 cm^{-2}) and a concentration of electroactive impurities at the

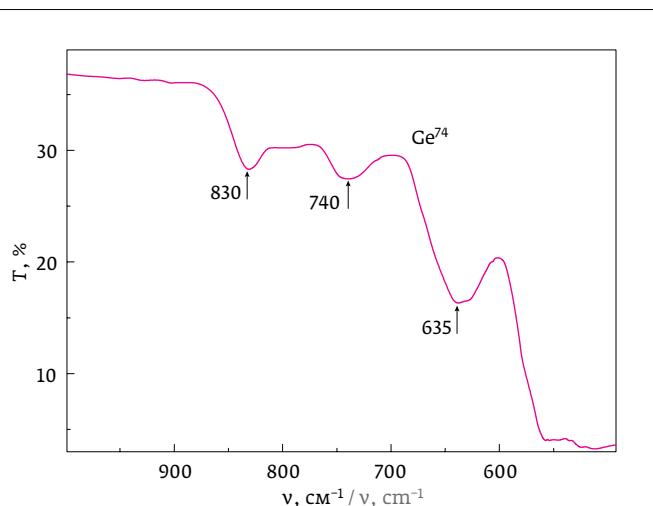


Рис. 2. Положение кислородных фононных полос поглощения для изотопа Ge $M=74$, $h=12 \text{ mm}$, (стрелками показаны максимумы фононных полос поглощения с указанием соответствующих волновых чисел) [45]

Fig. 2. Position of oxygen phonon absorption bands for the Ge isotope $M=74$, $h=12 \text{ mm}$, (the arrows indicate the maxima of the phonon absorption bands with an indication of the corresponding wave numbers) [45]



щихся источником не только образования дислокаций, но и роста потерь излучения.

Интерес к Ge усилился в связи с развитием глобальных спутниковых сетей, а также других телекоммуникационных проектов [1]. Для бортового питания спутников, являющихся основой подобных проектов, требуются радиационностойкие фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) с высоким к. п.д. Такие элементы заметно дороже широко используемых кремниевых, но в этом случае они используются благодаря большей эффективности. ФЭП с к.п.д. более 39% производят на основе эпитаксиальных AIII-BV GaInP/GaInAs/Ge на подложках Ge. Необходимые требования к Ge – это низкая плотность дислокаций (на уровне $\sim 200\text{--}250\text{ cm}^{-2}$), отсутствие дислокационных дефектов типа малоугловых границ, диаметр кристаллов 100 мм и выше [40, 41].

В настоящее время активно используются разнообразные устройства, использующие рентгеновское излучение. В качестве монохроматоров рентгеновского излучения используют высоко-качественные монокристаллы с относительно большой отражательной способностью. Их раскалывают таким образом, чтобы поверхность была параллельна дифракционным плоскостям. Моно-

level of $10^9\text{--}10^{10}\text{ cm}^{-3}$ are required. One of the harmful impurities that influence the defect structure and properties of Ge crystals is oxygen [O] [38–41]. Oxygen in germanium, as a rule, is an atomic interstitial, optically active impurity. The complexes formed by [O] in germanium are due to the presence of Ge-O-Ge quasimolecules, as well as various GeO_x precipitates, the sizes, concentrations, shape of which depend on the total concentration of [O], growing conditions, heat treatment. The authors of [38–41] identified a relationship between concentration [O] and dislocation density, determined the content of optically active [O] in Ge crystals of various grades, and found that the content of [O] has a noticeable effect on the structural perfection of HPG and the parameters of devices manufactured on based on, e.g., detectors.

The content of optically active [O] in Ge of various grades is determined by the method of IR-Fourier transform spectroscopy based on the position of the absorption bands in the phonon zone (Fig. 2). Regulation of the content of [O] in the Ge matrix is often achieved by doping with rare earth elements [42]. It was shown that in Ge doped with a series of lanthanides, they actively bind [O] into electrically neutral complexes, formally reducing the concentration of optically active [O] in the matrix by almost an order.

хроматическое излучение, получаемое таким образом, всегда в какой-то степени поляризовано. Степень поляризации излучения зависит от совершенства кристалла монохроматора. Нелегированный Ge для этих целей применяется благодаря достигнутому высокому уровню совершенства кристаллов [1].

Ge обладает высокой радиационной стойкостью [43]. Образцы Ge облучали γ -лучами ^{60}Co при $3800 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (доза 10^8 rad), быстрыми электронами с энергией 1 MeV , в ядерном реакторе потоком медленных и быстрых (до 30%) нейтронов при $T=200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Пропускание изменилось только после обработки в реакторе. При облучении тепловыми нейтронами в Ge образуются атомы Ga и As, являющиеся поглощающими электроактивными примесями.

Абсолютно большая часть данных о Ge получена на материале природного изотопического состава: Ge – атомный номер – 32, атомная масса – 72,59; состоит из смеси стабильных изотопов с массовыми числами 70, 72, 73, 74, 76. Разделение изотопов – технически сложный и дорогостоящий процесс, и поэтому мало данных о влиянии изотопического состава на физические свойства Ge. В работе [44] эффект исследован на изотопах ^{70}Ge и ^{74}Ge и показано, что изотопически чистый Ge при низких температурах имеет теплопроводность в 8,5 раза выше Ge природного состава.

Фононное поглощение заметно ограничивает применение Ge [20, 34]. Оно хорошо изучено, положение полос поглощения в спектрах Ge природного состава практически является константой материала. Однако на образцах ^{70}Ge и ^{74}Ge обнаружен изотопический сдвиг этих полос в области 12–14 мкм [45] (рис. 2) (эксперименты проведены на тех же образцах, что и в работе [44]). Влияние кристаллографической ориентации и технологии выращивания на положение максимумов фононных полос поглощения не выявлено. Решеточные пики поглощения на частотах $\nu = 850, 755, 650 \text{ cm}^{-1}$, наблюдаемые в Ge природного состава, в моноизотопных кристаллах сдвигаются. Причем в кристаллах ^{70}Ge наблюдается рост частоты полосы поглощения – ν , а в ^{74}Ge ν уменьшается по сравнению с кристаллами природного изотопического состава. Сдвиг превышает погрешность измерений и может быть использован для экспресс-оценки изотопического состава Ge.

Ge – классический полупроводник с шириной запрещенной зоны 0.67 eV [29]. Это способствует возникновению различных нелинейных эффек-

Modern technologies for growing germanium with low oxygen content in crystals should provide oxygen concentration at a level of 10^{15} cm^{-3} , which implies growing in the atmosphere with the partial pressure of [O] in the gas phase not exceeding $1.53 \cdot 10^{-23} \text{ atm}$ ($\sim 1.50 \cdot 10^{-18} \text{ Pa}$) [26]. With the growth of Ge from the melt and the presence of oxygen in the gas phase, Ge oxidation reaction occurs with the formation of heterogeneous GeO_2 inclusions in the melt, which are not only a source of dislocations, but also an increase in radiation losses.

Interest to Ge has increased due to the development of global satellite networks, as well as other telecommunication projects [1]. For the on-board power supply of satellites, which are the basis of such projects, radiation-resistant photoelectric converters (PEC) with high efficiency are required. Such elements are noticeably more expensive than widely used silicon, but, in this case, they are used due to greater efficiency. PEC with efficiency more than 39% are based on epitaxial AlIII – BV GaInP/GaInAs/Ge on Ge substrates. The necessary requirements for Ge are low dislocation density (at the level of $\sim 200\text{--}250 \text{ cm}^{-2}$), the absence of dislocation defects such as low-angle boundaries, and a crystal diameter of 100 mm and above [40, 41].

Currently, various devices using X-ray radiation are widely applied. High-quality single crystals with relatively high reflectivity are used as X-ray monochromators. They are split in such a way that the surface is parallel to the diffraction planes. The monochromatic radiation received in this way is always to a certain extent polarized. The degree of polarization of the radiation depends on the perfection of the monochromator crystal. Undoped Ge is used for these purposes due to the high level of perfection of the crystals achieved [1].

Ge has a high radiation resistance [43]. Ge samples were irradiated with γ rays of ^{60}Co at $3800 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (10^8 rad dose), fast electrons with an energy of 1 MeV , in a nuclear reactor with a stream of slow and fast (up to 30%) neutrons at $T=200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The transmittance changed only after treatment in the reactor. Irradiation with thermal neutrons in Ge gives rise to Ga and As atoms, which are absorbing electroactive impurities.

Most of the data on Ge is obtained on the material of natural isotopic composition: Ge's atomic number is 32, its atomic mass is 72.59; it consists of a mixture of stable isotopes with mass numbers of 70, 72, 73, 74, 76. Isotope separation is a technically complex and expensive process, and therefore there is little data on the effect of the isotopic composition on the physical properties of Ge. In [44], the effect was studied on ^{70}Ge and ^{74}Ge isotopes and it was shown that at low



тов при взаимодействии интенсивного излучения с Ge.

В диапазоне плотностей мощности $I=10^7\text{--}4\cdot10^8 \text{ Вт/см}^2$ исследована динамика прохождения импульса CO₂-лазера [46], определены нелинейные потери при прохождении пиковой части лазерного импульса. При $I=20\text{--}50 \text{ МВт/см}^2$ вблизи поверхности кристалла возникает оптический пробой воздуха. Воздействие переднего фронта импульса генерирует появление в кристалле горячих неравновесных носителей заряда, поглощающих излучение. Нелинейные потери излучения на них экспоненциально растут с уменьшением ширины запрещенной зоны кристалла. Экспериментальная зависимость преобразуется в выражение:

$$I_2 = \frac{(1-R)I_1}{\exp\left(1 - \frac{\Delta E_g}{2kT}\right)},$$

где $T \sim 2,5\cdot10^4 \text{ К}$; ΔE_g – ширина запрещенной зоны; R – коэффициент отражения; k – постоянная Больцмана; I_1 – пиковая плотность мощности лазерного импульса; I_2 – плотность мощности лазерного импульса, вышедшего из кристалла.

At temperatures the heat conduction of isotopically pure Ge is by 8.5 times higher than that of Ge of natural composition.

Phonon absorption significantly limits the use of Ge [20, 34]. It is well studied, the position of the absorption bands in the natural spectra of the Ge composition is practically the constant of the material. However, on the ⁷⁰Ge and ⁷⁴Ge samples, an isotopic shift of these bands was observed in the 12–14 μm region [45] (Fig. 2) (the experiments were performed on the same samples as in [44]). The influence of crystallographic orientation and growing technology on the position of the maxima of the phonon absorption bands was not revealed. Absorption grating peaks at frequencies $\nu = 850, 755, 650 \text{ cm}^{-1}$, observed in natural Ge composition, are shifted in monoisotopic crystals. Moreover, in the ⁷⁰Ge crystals, an increase in the frequency of the absorption band, ν , is observed, and in ⁷⁴Ge, ν decreases as compared to crystals of natural isotopic composition. The shift exceeds the measurement error and can be used for rapid assessment of the Ge isotopic composition.

Ge is a classical semiconductor with a band gap of 0.67 eV [29]. This contributes to various nonlinear effects in the interaction of intense radiation with Ge.

Интенсивность прошедшего через Ge сигнала снижается только вдвое после 5-10 импульсов, а повреждения локализованы исключительно в приповерхностном слое, то есть Ge как материал, способный без катастрофического разрушения выдерживать значительные лучевые перегрузки, представляет значительный интерес для оптики импульсных CO₂-лазеров.

Методами световой и электронной микроскопии и рентгеновской томографии исследована морфология повреждений Ge после воздействия излучения мощного импульсного CO₂-лазера [47]. Исследования проведены на серийно выпускаемом Ge марки ГМО, обработанного по оптической технологии, и на бездислокационных кристаллах, полированных химически, по технологии, используемой в микроэлектронике. Установлено, что в диапазоне амплитудных значений плотности мощности излучения 2·10⁶-4·10⁸ Вт/см² реализуются два основных типа повреждений. При $I < 4 \cdot 10^7$ Вт/см² наблюдаются очаги локальных микроразрушений приповерхностного слоя. Локальные микроразрушения, возникающие при $I < 4 \cdot 10^7$ Вт/см² вследствие пробоя либо на поглощающих микронеоднородностях кристалла, либо на дефектах оптической обработки, являются результатом микровзрывов, образующих кратеры. Воздействие излучения при $I \geq 4 \cdot 10^7$ Вт/см² приводит к оплавлению слоя глубиной 1-3 мкм, что объясняется лавинным пробоем неравновесных носителей заряда приповерхностного слоя Ge, что предохраняет объем кристалла от поражения излучением сверхпороговой интенсивности. Характер воздействия, приводящий к разрушению только приповерхностного слоя оптической детали, позволяет полностью восстанавливать детали из Ge переполировкой.

В диапазоне 2,6-5 мкм на процесс нелинейного поглощения накладываются эффекты двухфотонного [48, 49] и трехфотонного поглощения [49]. Нелинейное поглощение излучения мощного нецепного импульсного HF-лазера исследовалось на Ge различной толщины и удельного сопротивления [50]. В зависимости от состава смеси (SF₆:C₂H₆ или SF₆:C₆D₁₂), лазер генерировал излучение в диапазоне 2,7-3 мкм (HF-лазер), либо в 3,7-4,1 мкм (DF-лазер). Спектр генерации HF-лазера представлял собой набор из 18 различных линий в диапазоне $\lambda = 2,6-3$ мкм (средняя линия $\hbar\omega = 0,4397$ эВ, соответствует $\lambda = 2,82$ мкм). Длительность импульса по полувысоте ~150 нс; максимальная энергия $E \approx 5$ Дж; распределение энергии близко к равномерному.

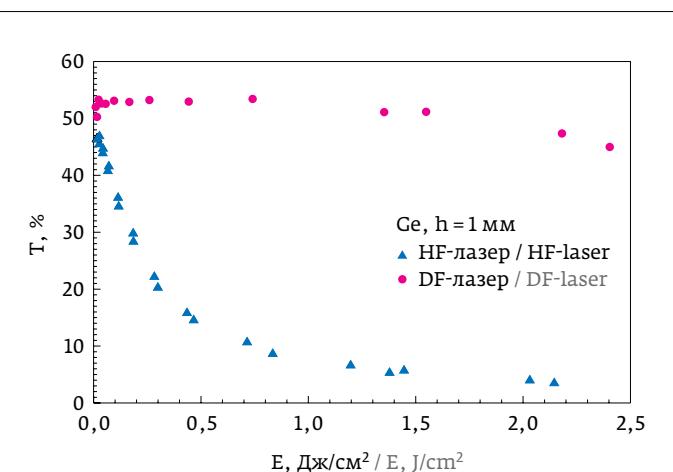


Рис. 3. Пропускание Ge ($\rho=20$ Ом·см) толщиной $h=1$ мм от плотности падающей энергии HF и DF лазеров [50]

Fig. 3. Transmittance of Ge ($\rho=20$ Ohm·cm) with a thickness $h=1$ mm from the density of the incident energy of HF and DF lasers [50]

In the power density range, $I=10^7-4 \cdot 10^8$ Вт/см², the pulse propagation dynamics of a CO₂ laser was studied [46], nonlinear losses were determined during the passage of the peak part of the laser pulse. At $I=20-50$ MW/см², optical breakdown of air occurs near the crystal surface. The action of the leading edge of a pulse generates the appearance of hot non-equilibrium charge carriers in the crystal that absorb radiation. Nonlinear radiation losses on them grow exponentially with decreasing width of the forbidden band of the crystal. Experimental dependence is transformed into the expression:

$$I_2 = \frac{(1-R)I_1}{\exp\left(1 - \frac{\Delta E_g}{2kT}\right)},$$

where $T \sim 2,5 \cdot 10^4$ K; ΔE_g is the width of the forbidden zone; R is the reflection coefficient; k is the Boltzmann constant; I_1 is the peak power density of the laser pulse; I_2 is the power density of a laser pulse emitted from a crystal.

The intensity of the signal passing through the Ge decreases only twice after 5-10 pulses, and the damage is localized exclusively in the surface layer, i. e., Ge, as a material capable of withstanding significant radiation overload without catastrophic destruction, represents considerable interest for the pulsed CO₂ laser optics.

The methods of light and electron microscopy and X-ray tomography investigated the morphology of Ge damage after exposure to radiation of the high-power pulsed CO₂ laser [47]. The studies were carried out on commercially available Ge of GMO brand, processed

При низких интенсивностях облучения HF-лазером ($I=0,3 \text{ МВт/см}^2$) в отсутствие повреждений образцов зафиксирован существенно нелинейный характер прохождения излучения через Ge. На рис. 3 показаны зависимости пропускания Ge ($h=1 \text{ мм}$) от плотности излучения HF- и DF-лазеров соответственно, а на рис. 4 – зависимость концентрации неравновесных свободных носителей, генерированных в процессе двухфотонного поглощения по глубине (расчет – в момент времени $t \approx 200 \text{ нс}$). Нелинейное поглощение излучения DF-лазера в Ge наблюдалось при существенно большей интенсивности излучения $I > 10 \text{ МВт/см}^2$.

Пропускание Ge в области нелинейности заметно падает при увеличении толщины образца и удельного сопротивления кристалла. Мощность прошедшего импульса заметно уменьшается, форма сильно деформируется, наблюдается заметное укорочение переднего фронта. Получен коэффициент двухфотонного поглощения Ge $K_2=55 \pm 10 \text{ см/ГВт}$. Проанализировано влияние параметров импульса на динамику прохождения импульса излучения HF-лазера через Ge толщиной $h=0,03-0,55 \text{ см}$.

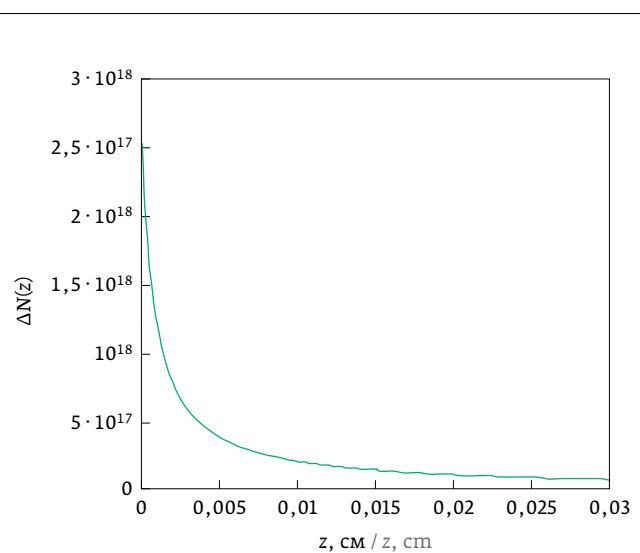


Рис. 4. Зависимость концентрации неравновесных свободных носителей, генерированных в процессе двухфотонного поглощения по глубине (расчет в момент времени $t \approx 200 \text{ нс}$) [50]

Fig. 4. Dependence of the concentration of nonequilibrium free carriers generated in the process of two-photon absorption over the depth (calculated at the time $t \approx 200 \text{ ns}$) [50]

Распределение интенсивности $I(z)$ по толщине Ge сильно меняется в течение длительности лазерного импульса. Сгенерированные носители сосредоточены в тонком слое вблизи входной поверхности кристалла (см. рис. 4.), т. е. основные процессы нелинейного поглощения происходят в слое толщиной менее 50 мкм. Возникший своеобразный нелинейный фильтр, как и на $\lambda=10,6$ мкм, препятствует разрушению объема материала даже при попытке жестко сфокусировать лазерную энергию в глубину кристалла. Данное обстоятельство свидетельствует о большой важности процессов нелинейного поглощения, идущих в приповерхностном слое, например, величина коэффициента рекомбинации свободных носителей на поверхности может на несколько порядков превышать объемную. Специальное легирование поверхностного слоя может заметно изменить величину нелинейного пропускания всего образца Ge.

В Ge наблюдаются и другие нелинейные эффекты [29]. Оптические константы материалов определяются уравнением:

$$P = \epsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E + \chi^{(3)} E + \dots),$$

где P – электрическая поляризация, индуцированная электромагнитной волной, E – напряженность поля, χ – тензор восприимчивости среды.

В линейной оптике учитывается только первый член уравнения, но при работе с мощным лазерным излучением уже нельзя пренебречь нелинейными эффектами, определяемыми другими членами уравнения. В кристаллах со структурой алмаза (в частности Ge) всегда $\chi^{(2)}=0$. Для Ge $\chi^{(3)}=1,5 \cdot 10^{-10}$ ед. CGSE. Это позволяет использовать Ge для эффективного обращения волнового фронта [51]. В пластине Ge, установленной в резонаторе CO₂-лазера, получено фазосопряженное отражение на 10,6 мкм от фазовых решеток, возникающих во встречно распространяющихся волнах. Коэффициент отражения достигал 20%. Луч, отраженный таким зеркалом, возвращается назад по тому же оптическому пути. Использование этого эффекта позволяет получать дифракционную расходимость излучения мощного лазера с неоднородностями в активной среде и в оптических элементах.

Эффект фотонного увлечения носителей тока в полупроводниках находит применение в фотоприемниках (ФП) для регистрации мощного лазерного импульсного излучения [54]. При поглощении мощного электромагнитного излучения свободному носителю передается не только энер-

according to optical technology, and on dislocation-free crystals, chemically polished, according to the technology used in microelectronics. It was established that in the range of amplitude values of the radiation power density of $2 \cdot 10^6$ – $4 \cdot 10^8$ W/cm² two main types of damage are realized. At $I < 4 \cdot 10^7$ W/cm², foci of local microfracture of the surface layer are observed. Local microfractures arising at $I < 4 \cdot 10^7$ W/cm² due to breakdown on either absorbing micro-inhomogeneities of a crystal or on defects in optical processing are the result of microexplosions forming craters. The effect of radiation at $I \geq 4 \cdot 10^7$ W/cm² leads to the melting of a layer with a depth of 1–3 μm, which is explained by the avalanche breakdown of non-equilibrium charge carriers of the near-surface Ge layer, which prevents the crystal volume from being affected by ultra-threshold intensity. The nature of the impact, leading to the destruction of only the surface layer of the optical element, allows you to completely restore the elements made of Ge by repolishing.

In the range of 2.6–5 μm, the effects of two-photon [48, 49] and three-photon absorption [49] are superimposed on the nonlinear absorption process. Nonlinear absorption of radiation from a high-power non-chain pulsed HF laser was studied on Ge of various thickness and specific resistance [50]. Depending on the composition of the mixture (SF₆:C₂H₆ or SF₆:C₆D₁₂), the laser generated radiation in the range of 2.7–3 μm (HF laser), or 3.7–4.1 μm (DF laser). The generation spectrum of the HF laser was a set of 18 different lines in the range of $\lambda=2.6$ –3 μm (average $\hbar\omega=0.4397$ eV, corresponding to $\lambda=2.82$ μm). Pulse width at half-height ~150 ns; maximum energy $E \approx 5$ J; the energy distribution is close to uniform.

In the case of low intensities of irradiation with a HF laser ($I=0.3$ MW/cm²), in the absence of damage to the samples, a substantially nonlinear character of the transmission of radiation through Ge is observed. Figure 3 shows the dependences of the transmission of Ge ($h=1$ mm) on the radiation density of HF and DF lasers, respectively, and Fig. 4. shows dependence of the concentration of nonequilibrium free carriers generated in the process of two-photon absorption over depth (calculated at time $t \approx 200$ ns). Nonlinear absorption of the DF laser radiation in Ge was observed at a significantly higher radiation intensity $I > 10$ MW/cm².

The transmittance of Ge in the nonlinearity region decreases noticeably with increasing sample thickness and crystal specific resistance. The power of the transmitted pulse noticeably decreases, the shape is strongly deformed, there is a noticeable shortening of the front edge. The two-photon absorption coefficient



гия, но и импульс фотона, перераспределение которого приводит к возникновению в кристалле направленного потока носителей зарядов. Такие приемники для $\lambda=10,6$ мкм обычно делают из Ge р-типа. Квант излучения CO₂-лазера $h\nu=0,117$ эВ поглощается в Ge главным образом за счет внутристронного перехода между подзонами дырок с тяжелой и легкой массами. При этом дырка воспринимает как энергию, так и импульс фотона. Условие выполнения законов сохранения энергии и импульса вызывает необходимость перемещения дырок относительно решетки в направлении распространения излучения, что способствует появлению между торцами кристаллического стержня разности потенциалов – ЭДС фотонного увлечения (V). Основные параметры ФП: временное разрешение до 10^{-10} с, большой динамический диапазон (10^{-10} Вт/см²), работа при комнатной температуре, чувствительность порядка 0,1-1 В/МВт. Временная постоянная (τ) описывается формулой

$$\tau = nc/L,$$

где: L – длина рабочего кристалла фотоприемника; n – показатель преломления; c – скорость света.

К достоинствам таких ФП относятся: высокая помехоустойчивость, стабильность параметров, возможность изготовления приемников с большой апертурой. Максимальное V обеспечивается оптимизацией кристалла по параметрам: ρ , S, L. При комнатной температуре, оптимальные значения $\rho \approx 1-10$ Ом·см, L=4-6 см, а площадь приемной площадки соответствует минимально возможному размеру сечения лазерного луча [54].

Акустооптический эффект [52] также является нелинейным эффектом, широко применяемым в фотонике. Устройства на этом эффекте используются для модуляции и сканирования света. Про-

of Ge $K_2=55 \pm 10$ см/GW was obtained. The effect of pulse parameters on the dynamics of the passage of a HF laser pulse through a Ge with a thickness of $h=0.03-0.55$ cm is analyzed.

The intensity distribution $I(z)$ over the thickness of Ge varies greatly within the duration of the laser pulse. The generated carriers are concentrated in a thin layer near the entrance surface of the crystal (see Fig. 4.), i.e. the main processes of nonlinear absorption occur in a layer with a thickness of less than 50 microns. The emerged peculiar nonlinear filter, as well as at $\lambda=10.6$ μm, prevents the destruction of the volume of the material even when trying to tightly focus the laser energy into the depth of the crystal. This circumstance testifies to the great importance of nonlinear absorption processes occurring in the surface layer, e.g., the value of the recombination coefficient of free carriers on the surface may exceed by several orders of magnitude. Special doping of the surface layer can noticeably change the magnitude of the nonlinear transmission of the entire Ge sample.

Other nonlinear effects are observed in Ge [29]. The optical constants of materials are determined by the equation

$$P = \epsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E + \chi^{(3)} E + \dots),$$

where P is the electric polarization induced by the electromagnetic wave, E is the field strength, χ is the susceptibility tensor of the medium.

In linear optics, only the first term of the equation is taken into account, but when working with high-power laser radiation, it is no longer possible to neglect non-linear effects determined by other members of the equation. In crystals with a diamond structure (in particular, Ge), $\chi^{(2)}=0$ at all times. For Ge, $\chi^{(3)}=1.5 \cdot 10^{-10}$ units CGSE. This allows the use of Ge for the effective reversal of the wave front [51]. In the Ge plate installed in the cavity of a CO₂ laser, a phase-conjugate reflection of 10.6 μm from

хождение акустической волны в фотоупругой среде индуцирует изменения мгновенного значения показателя преломления, что приводит к образованию фазовой решетки с периодом, равным длине акустической волны, и амплитудой, пропорциональной амплитуде акустической волны и фотоупругой константе кристалла. Ge является одним из основных материалов для использования в акустооптике среднего и дальнего ИК-диапазона, в частности, в CO₂-лазерах, благодаря хорошим физико-химическим свойствам и высоким значениям показателя преломления и фотоупругих констант [53]. Акустооптические модуляторы для CO₂-лазеров выпускаются серийно (см., например, [55]). Высокая теплопроводность Ge позволяет создавать термостабильные конструкции акустооптических приборов на основе кристалла Ge, потребляющих десятки ватт управляющей мощности с дифракционной эффективностью на длине волны 10,6 мкм более 90% [56]. Приборы обычно используют водяное охлаждение. В современной лазерной технике акустооптические модуляторы на основе Ge находят применение в лазерах на свободных электронах для импульсного управления излучением [57].

Новейшей тенденцией в современной фотонике является создание новых методов модуляции ИК-излучения устройствами на основе Ge: модуляция посредством введения умеренных уровней избыточных носителей в Ge путем возбуждения излучением диодного лазера [58]; модуляция в волноводных Ge-структурах на Si-подложках посредством управления поглощением свободных носителей [59, 60].

Последнее время рассматриваются возможности применения германия в терагерцевом (ТГц) диапазоне электромагнитного спектра (~3 мм – 30 мкм, 3 см⁻¹ – 300 см⁻¹) [61]. В работе [62] исследованы оптические свойства чистого и легированного Ge в ТГц-диапазоне. В ТГц-диапазоне интересны активные элементы акустооптических устройств из Ge [63]. Ge может быть использован для применения в многоспектральных тепловизионных приборах ИК- + ТГц-диапазонов, а также в лазерах ТГц-диапазона, накачиваемых CO₂-лазером.

Спектры пропускания Ge с разным ρ приведены на рис. 5. Результаты показали заметный рост поглощения легированного Ge в ТГц-диапазоне по сравнению с нелегированным ($\rho=47$ Ом·см). Рост концентрации примеси, как электронной, так и дырочной, приводит к возрастанию поглощения. Если в области 25–50 мкм влияние ρ на про-

phase gratings arising in counterpropagating waves was obtained. The reflection coefficient reached 20%. The beam reflected by such a mirror goes back along the same optical path. The use of this effect makes it possible to obtain diffraction divergence of the radiation of a high-power laser with inhomogeneities in the active medium and in optical elements.

The photon-drag effect of current carriers in semiconductors is used in photoreceivers (PR) for recording high-power pulsed laser radiation [54]. When high-power electromagnetic radiation is absorbed, not only energy is transmitted to the free carrier, but also a photon momentum, the redistribution of which leads to the formation of a directed flow of charge carriers in the crystal. Such receivers for $\lambda=10.6$ μm are usually made of p-type Ge. The quantum of CO₂ laser radiation $h\nu=0.117$ eV is absorbed in Ge mainly due to the intraband transition between the subbands of holes with heavy and light masses. In this case, the hole perceives both the energy and the momentum of the photon. The condition for fulfilling the laws of conservation of energy and momentum makes it necessary to move holes relative to the lattice in the direction of radiation propagation, which contributes to the appearance between the ends of the crystal rod potential difference, the photon drag EMF (V). The main parameters of the PR are: time resolution up to 10⁻¹⁰ s, large dynamic range (10–10⁷ W/cm²),

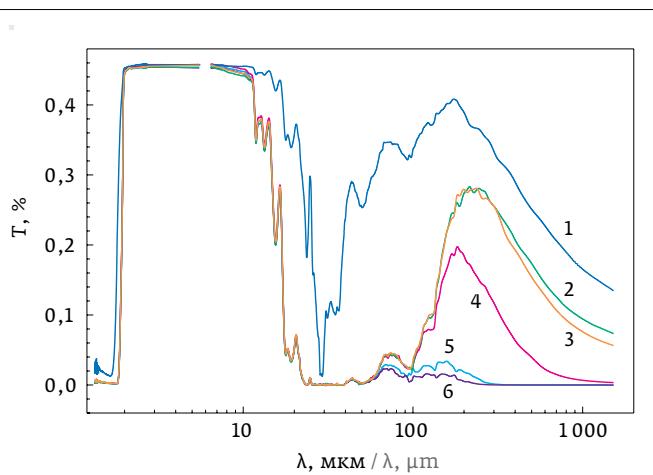


Рис. 5. Оптическое пропускание монокристаллического Ge, легированного сурьмой ρ: 1 – нелегированный Ge (толщина 1 мм); 2 – нелегированный Ge; 3 – 46 Ом·см; 4 – 20 Ом·см; 5 – 5 Ом·см; 6 – 2,7 Ом·см (спектры 2–6 получены на образцах $h=10$ мм) [62]

Fig. 5. Optical transmission of single-crystal Ge doped with antimony. ρ : 1 – undoped Ge (thickness 1 mm); 2 – undoped Ge; 3 – 46 Ohm·cm; 4 – 20 Ohm·cm; 5 – 5 Ohm·cm; 6 – 2.7 Ohm·cm (spectra 2–6 were obtained on samples with $h=10$ mm) [62]



пускание Ge (Sb) не заметно, то в области ≥ 220 мкм оно наблюдается воочию.

Основное поглощение в ТГц-области происходит на свободных носителях заряда (собственных и примесных). Если сопоставить результаты по Ge (область $\lambda \sim 160$ –220 мкм) и данные по Si [62], то они свидетельствуют, что коэффициент ослабления в области 160–220 мкм примерно совпадает и равен $\sim 0,5$ см $^{-1}$.

В отличие от ИК-диапазона, в ТГц-области минимальные потери $\sim 0,5$ см $^{-1}$ наблюдаются в собственных кристаллах. Френелевские потери на отражение могут быть в значительной степени скомпенсированы путем создания на поверхности периодических рельефных структур с высокой степенью регулярности и периодом меньше длины волны излучения. Следовательно, оптические изделия из собственного монокристаллического Ge могут быть эффективно использованы для управления излучением в ТГц-области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аношин К. Е., Гасанов А. А., Наумов А. В. Особенности современного рынка германия. *Цветная металлургия*. 2016; 2: 67–76.
Anoshin K. E., Gasanov A. A., Naumov A. V. Osobennosti sovremenennogo rynka germaniya. *Cvetnaya metallurgiya*. 2016; 2: 67–76.
2. Bendow B. Optical properties of infrared transmitting materials. *J. Electron. Mater.* 1974; 3(1): 101–135.

operation at room temperature, sensitivity of the order of 0.1–1 V/MW. The time constant (τ) is described by the formula

$$\tau = nc/L,$$

where: L is the length of the working crystal of the photodetector; n is the refractive index; c is the speed of light.

The advantages of such PRs include: high noise immunity, stability of parameters, the ability to produce receivers with large apertures. The maximum V is ensured by optimizing the crystal by the parameters: ρ , S , L . At room temperature, the optimal values are $\rho \approx 1$ –10 Ohm·cm, $L = 4$ –6 cm, and the area of the receiving platform corresponds to the minimum possible cross-section of the laser beam [54].

The acoustooptic effect [52] is also a nonlinear effect widely used in photonics. The devices based on this effect are used to modulate and scan light. The passage of an acoustic wave in a photoelastic medium induces changes in the instantaneous value of the refractive index, which leads to the formation of a phase grating with a period equal to the acoustic wavelength and amplitude proportional to the amplitude of the acoustic wave and the photoelastic constant of the crystal. Ge is



3. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В., Стрижевская Ф.Н., Чкалова В.В., Шаскольская М.П. Акустические кристаллы. М.: Наука, 1982.
Blistanov A.A., Bondarenko V.S., Perelomova N.V., Strizhevskaya F.N., Chkalova V.V., Shaskol'skaya M.P. Akusticheskie kristally. M.: Nauka, 1982.
4. Смирнов Ю.М., Каплунов И.А., Колесников А.И., Родионова Г.Е. Выращивание высокочистых крупногабаритных монокристаллов. Высокочистые вещества. 1990; 6: 213–216.
Smirnov Yu.M., Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Rodionova G.E. Vyrashchivanie vysokochistykh krupnogabaritnyh monokristallov. Vysokochistye veshchestva. 1990; 6: 213–216.
5. Каплунов И.А., Колесников А.И. Влияние характеристик германия на рассеяние ИК-излучения. Поверхность. 2002; 2: 14–19.
Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I. Vliyanie harakteristik germaniya na rasseyanie IK-izlucheniya. Poverhnost'. 2002; 2: 14–19.
6. Каплунов И.А., Смирнов Ю.М., Долматов А.Б., Колесников А.И. Монокристаллы германия для инфракрасной техники: выращивание, дефекты структуры и оптические характеристики. Перспективные материалы. 2003; 10(4): 35–41.
Kaplunov I.A., Smirnov Yu.M., Dolmatov A.B., Kolesnikov A.I. Monokristally germaniya dlya infrakrasnoj tekhniki: vyrashchivanie, defekty strukturny i opticheskie harakteristiki. Perspektivnye materialy. 2003; 10(4): 35–41.
7. Смирнов Ю.М., Каплунов И.А. Монокристаллы германия для инфракрасной техники. Материаловедение. 2004; 5: 48–52.
Smirnov Yu.M., Kaplunov I.A. Monokristally germaniya dlya infrakrasnoj tekhniki. Materialovedenie. 2004; 5: 48–52.
8. Каплунов И.А., Смирнов Ю.М., Колесников А.И. Оптическая прозрачность кристаллического германия. Оптический журнал. 2005; 72(2): 61–68.
Kaplunov I.A., Smirnov Yu.M., Kolesnikov A.I. Opticheskaya prozrachnost' kristallicheskogo germaniya. Opticheskij zhurnal. 2005; 72(2): 61–68.
9. Каплунов И.А., Колесников А.И., Шайович С.Л., Талызин И.В. Рассеяние света монокристаллами германия и парателлурита. Оптический журнал. 2005; 72(3): 51–56.
Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Shajovich S.L., Talyzin I.V. Rasseyanie sveta monokristallami germaniya i paratellurita. Opticheskij zhurnal. 2005; 72(3): 51–56.
10. Каплунов И.А., Колесников А.И., Талызин И.В., Седова Л.В., Шайович С.Л. Измерения коэффициентов ослабления света монокристаллами германия и парателлурита. Оптический журнал. 2005; 72(7): 76–84.
Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Talyzin I.V., Sedova L.V., Shajovich S.L. Izmereniya koefhicientov oslableniya sveta monokristallami germaniya i paratellurita. Opticheskij zhurnal. 2005; 72(7): 76–84.
11. Каплунов И.А., Колесников А.И., Скоков К.П., Гречишкян Р.М., Седова Л.В., Третьяков С.А. Связь между механическими напряжениями и оптическими аномалиями в германии и парателлурите. Оптический журнал. 2005; 72(7): 85–89.
Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Skokov K.P., Grechishkin R.M., Sedova L.V., Tret'yakov S.A. Svyaz' mezhdu mekhanicheskimi napryazheniyami i opticheskimi anomaliyami v germanii i paratellurite. Opticheskij zhurnal. 2005; 72(7): 85–89.
12. Шайович С.Л., Каплунов И.А., Колесников А.И. Контроль рассеяния инфракрасного излучения в германии методом фотометрического шара. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005; 71(9): 47–50.
Shajovich S.L., Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I. Kontrol' rasseyaniya infrakrasnogo izlucheniya v germanii metodom fotometricheskogo shara. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2005; 71(9): 47–50.
13. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Shaiovich S.L. Methods for Measuring Light Scattering in Germanium and Paratellurite Crystals. Crystallography Reports. 2005; 50-Suppl. 1: 546–552.
14. Каплунов И.А. Зависимости коэффициентов пропускания света кристаллами от их толщины. Оптический журнал. 2005; 72(12): 59–65.
Kaplunov I.A. Zavisimosti koefhicientov propuskanija sveta kristallami ot ih tolschiny. Opticheskij zhurnal. 2005; 72(12): 59–65.
15. Каплунов И.А. Внутренние напряжения и дислокационная структура крупногабаритных монокристаллов германия для инфракрасной оптики. Оптический журнал 2006; 73(2): 85–91.
Kaplunov I.A. Vnutrennie napryazheniya i dislokacionnaya struktura krupnogabaritnyh monokristallov germaniya dlya infrakrasnoj optiki. Opticheskij zhurnal. 2006; 73(2): 85–91.
16. Каплунов И.А., Колесников А.И., Шайович С.Л., Талызин И.В., Смирнов Ю.М. Измерение показателей ослабления света методом направленного

one of the main materials for use in acoustooptics of the middle and far infrared range, in particular, in CO_2 lasers, due to the good physicochemical properties and high values of the refractive index and photoelastic constants [53]. Acoustooptic modulators for CO_2 lasers are commercially available (see, e.g., [55]). The high thermal conductivity of Ge makes it possible to create thermostable constructions of acousto-optic devices based on Ge crystal, which consume tens of watts of control power with a diffraction efficiency at a wavelength of 10.6 μm more than 90% [56]. These devices are usually water-cooled. In modern techniques, the laser Ge-based acoustooptic modulators are used in free-electron lasers for pulsed radiation control [57].

The most recent trend in modern photonics is the creation of Ge-based devices for modulating infrared radiation: modulation by introducing moderate levels of excess carriers into Ge by exciting diode laser radiation [58]; modulation in waveguide Ge structures on Si substrates by controlling the absorption of free carriers [59, 60].

Recently, the possibility of using germanium in the terahertz (THz) range of the electromagnetic spectrum (~ 3 mm – 30 μm , 3 cm^{-1} – 300 cm^{-1}) [61] is being considered. The optical properties of pure and doped Ge in the THz range were studied in [62]. In the THz range, active elements of acoustooptic devices made of Ge are of interest [63]. Ge can be used for use in multispectral infrared imaging devices of the IR + THz range, as well as in THz range lasers pumped by a CO_2 laser.

Ge transmittance spectra with different ρ are shown in Fig. 5. The results showed a noticeable increase in the absorption of doped Ge in the THz range, compared with the undoped ($\rho = 47 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$). An increase in the impurity concentration, both electron and hole, leads to an increase in absorption. If in the region of 25–50 μm , the effect of ρ on the transmittance of Ge (Sb) is not noticeable, then in the region of $\geq 220 \mu\text{m}$ it is observed firsthand.

The main absorption in the THz region occurs on free charge carriers (self and impurity). If we compare the results for Ge (the region $\lambda \sim 160$ –220 μm) and the data for Si [62], then they show that the attenuation coefficient in the region of 160–220 μm approximately coincides, and is $\sim 0.5 \text{ cm}^{-1}$.

By contrast to the IR range, minimal losses of $\sim 0.5 \text{ cm}^{-1}$ in the THz region are observed in intrinsic crystals. Fresnel reflection losses can be largely compensated by creating periodic relief structures on the surface with a high degree of regularity and a period less than the radiation wavelength. Therefore, optical products from undoped single-crystal Ge can be effectively used to control the radiation in the THz region.



- пропускания. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2006; 72(4): 24–30.
- Kaplunov I. A., Kolesnikov A. I., Shajovich S. L., Talyzin I. V., Smirnov Yu. M.** Izmerenie pokazatelej oslableniya sveta metodom napravленного пропускания. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov.* 2006; 72(4): 24–30.
17. **Колесников А. И., Шелопаев А. В., Каплунов И. А., Талызин И. В., Горшков В. Н.** Распространение света в кристаллах при наличии рассеяния. *Прикладная физика.* 2009; 1: 31–35.
- Kolesnikov A. I., Shelopaev A.V., Kaplunov I. A., Talyzin I. V., Gorshkov V. N.** Rasprostranenie sveta v kristallakh pri nalichii rasseyaniya. *Prikladnaya fizika.* 2009; 1: 31–35.
18. **Каплунов И. А., Шелопаев А. В., Колесников А. И.** Структурные дефекты в монокристаллах германия. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2010; 12: 22–25.
- Kaplunov I. A., Shelopaev A.V., Kolesnikov A. I.** Strukturnye defekty v monokristallakh germaniya. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya.* 2010; 12: 22–25.
19. **Колесников А. И., Залетов А. Б., Каплунов И. А.** Влияние примесей на рассеяние излучения в кристаллическом германии. *Перспективы науки.* 2011; 3(18): 86–89.
- Kolesnikov A. I., Zaletov A. B., Kaplunov I. A.** Vliyanie primej na rasseyanie izlucheniya v kristallicheskem germanii. *Perspektivy nauki.* 2011; 3(18): 86–89.
20. **Коротаев В. В., Мельников Г. С., Михеев С. В., Самков В. М., Солдатов Ю. И.** Основы тепловидения. СПб.: ИТМО, 2012.
- Korotaev V. V., Mel'nikov G.S., Miheev S. V., Samkov V. M., Soldatov Yu.I.** Osnovy teplovideniya. SPB.: ITMO, 2012.
21. URL [<http://uomz.ru/ru/production/optical-observation-system/son-530>].
22. Оптико-электронная станция кругового обзора "Феникс". *Военный парад.* 2003. 3 (57).
- Optiko-ehlektronnaya stanciya krugovogo obzora "Feniks". *Voennyj parad.* 2003. 3 (57).
23. URL [http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/ATR_Elements_ru.pdf].
24. **Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б.** Полупроводниковая оптоэлектроника. М.: Мир, 1976.
- Moss T., Barrel G., Ellis B.** Poluprovodnikovaya optoelektronika. M.: Mir, 1976.
25. **Claeys L., Simoen E.** Germanium-based technologies: from materials to devices. Berlin: Elsevier, 2007.
26. **Подкопаев О. И., Шиманский А. Ф., Павлюк Т. О.** Выращивание монокристаллов германия с контролируемой структурой, содержанием примесей и оптическими свойствами. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017.
- Podkopaev O. I., Shimanskij A.F., Pavlyuk T.O.** Vyrashchivanie monokristallov germaniya s kontroliruemoj strukturoj, soderzhaniem primej i opticheskimi svojstvam. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2017.
27. ТУ 48-4-522-89. Кристаллы германия оптические. Технические условия. TU48-4-522-89. Kristally germaniya opticheskie. Tekhnicheskie usloviya.
28. ТУ 48-4-330-75. Германний монокристаллический для оптоэлектроники. Технические условия. TU48-4-330-75. Germanij monokristallicheskij dlya optoelektroniki. Tekhnicheskie usloviya.
29. **Панков Ж.** Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973.
- Pankov Zh.** Opticheskie processy v poluprovodnikakh. M.: Mir, 1973.
30. **Несмелова И. М., Астафьев Н. И., Несмелов Е. А.** Зависимость коэффициента поглощения кристаллического германия в ИК-области спектра от удельного сопротивления. *Оптический журнал.* 2007; 74(1): 88–92.
- Nesmelenova I. M., Astaf'ev N.I., Nesmelenov E. A.** Zavisimost' koehfficiente pogloschcheniya kristallicheskogo germaniya v IK-oblasti spektra ot udel'nogo soprotivleniya. *Opticheskiy zhurnal.* 2007; 74(1): 88–92.
31. **Сисакян Е. В., Гинзбург М. И., Гришин В. П., Миленин Э. С.** Поглощение излучения 10,6 мкм высокочистым германием. ОМП. 1980; 7: 29–31.
- Sisakyan E. V., Ginzburg M. I., Grishin V. P., Milenin Eh. S.** Pogloschchenie izlucheniya 10,6 mkm vysokochistym germaniem. OMP. 1980; 7: 29–31.
32. **Bishop P. J., Gibson A. F.** Absorption coefficient of Ge at 10,6 μm. *Appl. Opt.* 1973;12(11): 2549–2550.
- Copron E. D., Brill O. L.** Absorption coefficient as a function of resistance for optical germanium at 10,6 μm. *Appl. Opt.* 1973;12(3): 569–572.
34. **Левинзон Д. И., Ровинский Р. Е., Рогалин В. Е., Рыкун Е. П., Ценина И. С., Шершель В. А.** Поглощение ИК – излучения в германии. Материалы IX сов. по получению профилированных кристаллов и изделий способом



- Степанова и их применение в народном хозяйстве. Ленинград. 1982; 123–126.
- Levinzon D.I., Rovinskij R.E., Rogalin V.E., Rykun E.P., Cenina I.S., Shershel' V.A. Pogloshchenie IK – izlucheniya v germanii. *Proc. Materialy IH sov. po polucheniyu profilirovannykh kristallov i izdelij sposobom Stepanova i ih primenie v narodnom hozystvye*. Leningrad. 1982; 123–126.
35. **Маколкина Е. Н., Пржевуский А. К.** Влияние пластической деформации на спектр кристаллов германия. *Оптический журнал* 2007; 74(2): 74–77.
- Makolkina E.N., Przhevuskiy A.K.** Vliyanie plasticheskoy deformacii na spektr kristallov germaniya. *Opticheskiy zhurnal*. 2007; 74(2): 74–77.
36. **Шиманский А. Ф., Подкопаев О. И., Вахрин В. В.** Влияние строения на электропроводность кристаллов полупроводникового германия. *J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2011;4(5): 542–546.
- Shimanskij A.F., Podkopaev O.I., Vahrin V.V.** Vliyanie stroeniya na ehlektroprovodnost' kristallov poluprovodnikovogo germaniya. *J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2011;4(5): 542–546.
37. **Подкопаев О. И., Шиманский А. Ф., Молотковская Н. О., Кулаковская Т. В.** Влияние микроструктуры на электрические свойства особо чистого германия. *ФТТ*. 2013; 55(5): 872–874.
- Podkopaev O.I., Shimanskij A.F., Molotkovskaya N.O., Kulakovskaya T.V.** Vliyanie mikrostruktury na ehlektricheskie svojstva osobo chistogo germaniya. *FTT*. 2013; 55(5): 872–874.
38. **Подкопаев О. И., Шиманский А. Ф., Бычков П. С., Вахрин В. В.** Влияние содержания оптически активного кислорода на дефектную структуру монокристаллического германия. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М. Ф. Решетнева*. 2012. В. 1(41): 129–132.
- Podkopaev O.I., Shimanskij A.F., Bychkov P.S., Vahrin V.V.** Vliyanie soderzhanija opticheskij aktivnogo kisloroda na defektную strukturu monokristallicheskogo germaniya. *Vestnik Sibirsckogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta imeni akad. M. F. Reshetneva*. 2012. В. 1(41): 129–132.
39. **Подкопаев О. И., Кулаковская Т. В., Шиманский А. Ф., Погодаев А. М., Васильева М. Н.** Растворение кислорода в германии в процессе выращивания монокристаллов. *J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2012; 5(6): 631–637.
- Podkopaev O.I., Kulakovskaya T.V., Shimanskij A.F., Pogodaev A.M., Vasil'eva M. N.** Rastvorenje kisloroda v germanii v processe vyrazhivaniya monokristallov. *J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2012; 5(6): 631–637.
40. **Rakwal D., Bamberg E.** Slicing, cleaning and kerf analysis of germanium wafers machined by wire electrical discharge machining. *J. materials processing technology*. 2009; 3740–3751.
41. **Dimroth F., Kurtz S.** High efficiency multijunction solar cells. *MRS Bull.* 2007; 32(3): 230–235.
42. **Кирьянова Т. В., Рябец А. Н., Левинзон Д. И.** Свойства кислородсодержащего германия, легированного редкоземельными элементами. *Складн i sistemi i procesi*. 2003; 2: 12–17.
- Kir'yanova T.V., Ryabec A.N., Levinzon D.I.** Svojstva kislorodsoderzhashchego germaniya, legirovannogo redkozemel'nymi ehlementami. *Skladn i sistemi i procesi*. 2003; 2: 12–17.
43. **Спицын В. И., Рябов А. И., Стельмах Н. С., Пирогова Г. Н.** Влияние радиации на оптические свойства высокоменных монокристаллов Ge, GaAs и ZnSe. *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. 1977; 13(1): 27–33.
- Spicyn V.I., Ryabov A.I., Stel'mah N.S., Pirogova G. N.** Vliyanie radiacii na opticheskie svojstva vysokoomnyh monokristallov Ge, GaAs i ZnSe. *Izvestiya AN USSR. Neorganicheskie materialy*. 1977; 13(1): 27–33.
44. **Ожогин В. И., Инюшин А. В., Талденков А. Н., Тихомиров А. В., Попов Г. Э., Халлер Ю., Ито К.** Изотопический эффект в теплопроводности монокристаллов германия. *Письма в ЖЭТФ*. 1996; 63 В(6): 463–467.
- Ozhogin V.I., Inyushin A.V., Taldenkov A.N., Tihomirov A.V., Popov G.Eh., Haller Yu., Ito K.** Izotopicheskij ehffekt v teploprovodnosti monokristallov germaniya. *Pis'ma v ZHETF*. 1996; 63 (6): 463–467.
45. **Рогалин В. Е., Ценина И. С., Каплунов И. А.** Исследование влияния изотопической чистоты на оптические свойства германия. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2013; 4–1(183): 352–358.
- Rogalin V.E., Cenina I.S., Kaplunov I.A.** Issledovanie vliyanija izotopicheskoy chistoty na opticheskie svojstva germaniya. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013; 4–1(183): 352–358.
46. **Рогалин В. Е.** Прозрачные материалы для мощных импульсных CO2 – лазеров. *Изв. Вузов. Mater. elektron. tekhniki*. 2013; 2: 11–18.
- Rogalin V.E.** Prozrachnye materialy dlya moshchnykh impul'snyh SO2 – lazerov. *Izv. Vuzov. Mater. elektron. tekhniki*. 2013; 2: 11–18.
47. **Левинзон Д. И., Ровинский Р. Е., Рогалин В. Е., Рыкун Е. П., Трайнин А. Л., Ценина И. С., Шейхет Э. Г.** Исследование монокристаллов профильного германия, облучённых импульсным CO2 – лазером. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1979; 43(9): 2001–2005.
- Levinzon D.I., Rovinskij R.E., Rogalin V.E., Rykun E.P., Trajinin A.L., Cenina I.S., Shejhet EH.G.** Issledovanie monokristallov profil'nogo germaniya, obluchyonnyh impul'snym CO2 – lazerom. *Izv. AN USSR. Ser. fiz.* 1979; 43(9): 2001–2005.
48. **Зубов Б. В., Мурина Т. М., Оловягин Б. Р., Прохоров А. М.** Исследование нелинейного поглощения в германии. *Физика и техника полупроводников*. 1971; 5(4): 636–640.
- Zubov B.V., Murina T.M., Olov'yagin B.R., Prohorov A.M.** Issledovanie nelinjennogo pogloscheniya v germanii. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 1971; 5(4): 636–640.
49. **Seo D., Gregory J. M., Feldman L. C., Tolk N. H. and Cohen P. I.** Multiphoton absorption in germanium using pulsed infrared free-electron laser radiation. *Phys. Rev.* 2011; B83: 195203.
50. **Alekseev E. E., Firsov K. N., Kazantsev S. Yu., Kononov I. G., Rogalin V. E.** Nonlinear Absorption of Non-Chain HF Laser Radiation in Germanium. *Phys. Wave Phenom.* 2017; 25(4): 243–248.
51. **Басов Н. Г., Зельдович Б. Я., Ковалев В. И., Файзуллов Ф. С., Федоров В. Б.** Отражение многочастотного сигнала при четырехвольновом взаимодействии в германии на 10,6 мкм. *Квантовая электроника*. 1981; 8(4): 860–864.
- Basov N.G., Zel'dovich B.Ya., Kovalev V.I., Fajzullov F.S., Fedorov V.B.** Otrazhenie mnogochastotnogo signala pri chetyrekhvолнovom vzaimodejstvii v germanii na 10,6 mkm. *Kvantovaya ehlektronika*. 1981; 8(4): 860–864.
52. **Молчанов В. Я., Китаев Ю. И., Колесников А. И., Нарвер В. Н., Розенштейн А. З., Соловьевников Н. П., Шаповаленко К. Г.** Теория и практика современной акустооптики. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015.
- Molchanov V.Ya., Kitaev Yu.I., Kolesnikov A.I., Narver V.N., Rozenshtejn A.Z., Solodovnikov N.P., Shapovalenko K.G.** Teoriya i praktika sovremennoj akustooptiki. M.: Izd. Dom MISiS, 2015.
53. **Fox A.** Acoustooptic Figure of Merit for Single Crystal Germanium at 10,6 mm Wavelength. *Applied Optics*. 1985; 24(14): 2040–2041.
54. **Агафонов В. Г., Валов П. М., Рывкин Б. С., Ярошевский И. Д.** Фотоприемники на основе эффекта увлечения светом носителей тока в полупроводниках. *ФТП*. 1973; 7 (12): 2316–2325.
- Agafonov V.G., Valov P.M., Ryvkin B.S., Yaroshevskij I.D.** Fotopriyomniki na osnove ehffekta uylecheniya svetom nositelej toka v poluprovodnikah. *FTP*. 1973; 7(12): 2316–2325.
55. URL [\[www.goochandhousego.com\]](http://www.goochandhousego.com).
56. **Alan J. Fox.** Thermal design for germanium acoustooptic modulators. *Applied Optics*. 1987; 26(5): 872–884.
57. **Taizou Kanai, Sachiko Yoshihashi-Suzuki, Kunio Awazu**, Osaka University. Free electron laser pulse control by acousto-optic modulators. *Proceedings of the 27th International Free Electron Laser Conference*. 21–26 August 2005, Stanford, California, USA.
58. **P. D. Fairley and H. N. Rutt.** Novel germanium infrared modulator. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000; 33: 2837–2852.
59. **Li Shen, Noel Healy, Colin J. Mitchell, Jordi Soler Penades, Milos Nedeljkovic, Goran Z. Mashanovich, and Anna C. Peacock.** Mid-infrared all-optical modulation in low-loss germanium-on-silicon waveguides. *Optics Letters*. 2015; 40 (2): 268–271.
60. **Richard Soref, Joshua R. Hendrickson, and Julian Sweet.** Simulation of germanium nanobeam electro-optical 2×2 switches and 1×1 modulators for the 2 to 5 μm infrared region. *Optics Express*. 2016; 24(9): 9369–9382.
61. **Marvin J. Weber.** *Handbook of lasers*. Boca Raton: CRC Press. 2001; 1198.
62. **Каплунов И. А., Колесников А. И., Кропотов Г. И., Рогалин В. Е.** Оптические свойства монокристаллического германия в терагерцовом диапазоне спектра. *Оптика и спектроскопия конденсированных сред*. 2019; 126(3): 271–274.
- Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Kropotov G.I., Rogalin V.E.** Opticheskie svojstva monokristallicheskogo germaniya v teragercovoi oblasti spektra. *Optika i spektroskopiya*. 2019; 126(3): 271–274.
63. **Волошинов В. Б., Никитин П. А., Герасимов В. В., Князев Б. А., Чопорова Ю. Ю.** Отклонение пучка монохроматического терагерцевого излучения методами акустооптики. *Квантовая электроника*. 2013; 43: 1139–1142.
- Voloshinov V.B., Nikitin P.A., Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Choporova Yu.Yu.** Otklonenie puchka monohromaticheskogo teragercevogo izlucheniya metodami akustooptiki. *Kvantovaya ehlektronika*. 2013; 43: 1139–1142.