

УДК 543.42:54.16

## **ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ СУРЬМОЙ И ГАЛЛИЕМ НА ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ**

**Д. Ю. Воронович<sup>1</sup>, А. В. Шелопаев<sup>1</sup>, А. Б. Залетов<sup>2</sup>, И. А. Каплунов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Тверской государственный университет  
*кафедра прикладной физики*

<sup>2</sup>Тверская государственная медицинская академия  
*кафедра физики*

Экспериментально исследовано оптическое пропускание монокристаллов чистых (концентрация электрически активных примесей  $\sim (3...5) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) и легированных образцов германия с примесью галлия ( $\sim 2.5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) и сурьмы ( $\sim 1.2 \times 10^{14} \dots 1.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) в спектральном диапазоне длин волн 2.5...25 мкм. Измерения коэффициента пропускания проводились на инфракрасном спектрофотометре по двухлучевой схеме. Кроме того, дополнительно изучалось влияние качества обработки поверхности на коэффициент пропускания легированных образцов. Показано, что максимальным оптическим пропусканием обладают монокристаллы германия, легированные примесью *n*-типа проводимости (сурьмой).

**Ключевые слова:** коэффициент пропускания, коэффициент ослабления, германий, легирование сурьмой и галлием

## **EFFECT OF ANTIMONY AND GALLIUM DOPING ON OPTICAL TRANSMISSION OF GERMANIUM SINGLE CRYSTALS**

**D. Yu. Voronovich<sup>1</sup>, A. V. Shelopaev<sup>1</sup>, A. B. Zaletov<sup>2</sup>, I. A. Kaplunov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Tver State University  
*Chair of Applied physics*

<sup>2</sup>Tver State Medical Academy  
*Chair of Physics*

Optical transmission of pure (concentration of electrically active impurities  $\sim (3...5) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ) and doped germanium single crystals with antimony or gallium concentration  $\sim 1.2 \times 10^{14} \dots 1.5 \times 10^{15}$  and  $\sim 2.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , respectively, was studied experimentally in the spectral wavelength interval of 2.5...25  $\mu\text{m}$ . The transmission coefficient was measured with the aid of IR double-beam spectrophotometer. In addition, the effect of the surface processing quality on transmission of doped samples was examined. It is shown that germanium single crystals doped with *n*-type impurities (antimony) are characterized by maximal optical transmission.

**Keywords:** transmission coefficient, attenuation coefficient, germanium, antimony and gallium doping

**Введение.** Кристаллический германий широко используется в различных отраслях науки и техники, имеет как гражданское, так и военное применение. Одно из основных применений – изготовление оптических элементов инфракрасной техники. Благодаря механической прочности, устойчивости к атмосферным воздействиям, относительно высокой прозрачности, возможности получения крупногабаритных заготовок, германий эффективно применяется в спектральном диапазоне длин волн 2.5...14 мкм. Прочность и твердость кристаллов обеспечивают получение высококачественных оптических поверхностей (в том числе с использованием алмазного инструмента для обработки), стойких к механическим воздействиям при эксплуатации, особенно при использовании алмазоподобных просветляющих покрытий.

На основе германия изготавливают оптические элементы тепловизионных приборов наземного, воздушного, морского базирования, работающих в интервале длин волн 2.5...14 мкм. Обычно это либо изделия для «проходной» оптики – линзы и окна, либо изделия для акустооптики – модуляторы.

Оптическое пропускание германия исследовалось в ряде работ [1-5]. Было показано, что для германия коэффициент полного поглощения при произвольной длине волны ( $A(\lambda)$ ) может быть представлен в виде суммы отдельных слагаемых:

$$A(\lambda) = E(\lambda) + L(\lambda) + A_H(\lambda)P + A_E(\lambda)N + I(\lambda).$$

В этом выражении составляющие описывают процессы, характеризующие поглощение на коротковолновом краю и длинноволновой границе области оптической прозрачности ( $E(\lambda)$  и  $L(\lambda)$ ); примесное поглощение ( $I(\lambda)$ ); поглощение за счет свободных носителей ( $A_H(\lambda)P$  и  $A_E(\lambda)N$ ).

Поглощение, обусловленное свободными носителями, может иметь место по всей области прозрачности и проявляться в виде широкого, не имеющего резко выраженных особенностей спектра, описываемого выражением:

$$A_H(\lambda)P + A_E(\lambda)N \propto \lambda^x,$$

где  $x$  может изменяться от 1 до 4 в зависимости от материала.

В германии коэффициент поглощения, обусловленный свободными носителями, может быть изменен путем введения примесей с соответствующим типом проводимости (то есть, изменяя  $N$  или  $P$ ). Легирование примесью  $n$ -типа проводимости до определенного уровня позволяет оптимизировать оптическое пропускание германия.

Несмотря на большое число работ, посвященных оптическим свойствам германия, ряд вопросов требует более детального изучения. В частности, нет полных совпадающих данных по поглощению излучения в диапазоне 2.5...14 мкм и температурной зависимости поглощения, а также не определен вклад рассеяния в общие потери излучения.

В данной работе ставилась задача исследовать оптическое пропускание кристаллического германия (чистого и легированного примесями *n*- и *p*-типа проводимости) в спектральном диапазоне 2.3...25.0 мкм с целью определения параметров, обеспечивающих максимальное оптическое пропускание, а также определить влияние структуры оптической поверхности на пропускание и рассеяние излучения монокристаллического германия в том же спектральном диапазоне.

**Методика эксперимента.** Экспериментальная часть работы заключалась в исследовании оптического пропускания чистых и легированных монокристаллов германия, исследовании характеристических особенностей спектров пропускания и расчете коэффициентов ослабления.

Исследовались следующие образцы:

1) легированный сурьмой монокристалл (удельное электросопротивление 11 Ом·см; концентрация электрически активных примесей  $1.2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ );

2) легированный сурьмой монокристалл (удельное электросопротивление 1 Ом·см; концентрация электрически активных примесей  $1.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ );

3) чистый монокристалл (удельное электросопротивление 55...65 Ом·см; концентрация электрически активных примесей  $(3...5) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ );

4) легированный галлием монокристалл (удельное электросопротивление 16 Ом·см; концентрация электрически активных примесей  $2.5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ).

Исследование влияния совершенства оптической поверхности на пропускание и рассеяние излучения проводилось на полированных образцах разного оптического качества.

Образцы были вырезаны из монокристалла германия, легированного сурьмой с удельным электросопротивлением 11 Ом·см, выращенного из расплава способом Чохральского в форме цилиндрического слитка; диаметр кристалла составлял 38 мм.

Коэффициент пропускания определялся на инфракрасном спектрофотометре ИКС-29 и последующем расчете показателя ослабления  $\alpha(\lambda)$  по формуле

$$\alpha = \frac{1}{h} \ln \frac{\left[ 1 - \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]^2 + \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]^4 + 4T \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^4 \right\}^{1/2}}{2T},$$

где  $\alpha(\lambda)$  – показатель ослабления,  $\text{см}^{-1}$  для потока излучения с длиной волны  $\lambda$ ;  $T(\lambda)$  – коэффициент пропускания, измеренный на спектрофотометре в долях единицы;  $h$  – толщина образца, см;  $n(\lambda)$  – показатель преломления материала образца для длины волны  $\lambda$ .



Рис. 1. Полированный образец №1 с пробным стеклом после ручной полировка на алмазных пастах

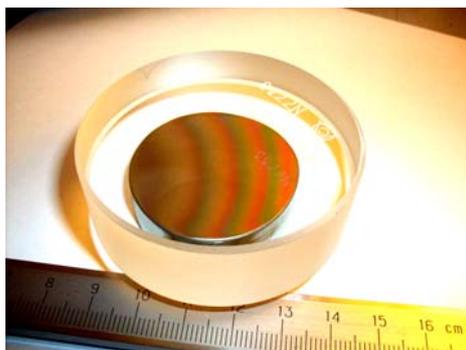


Рис. 2. Полированный образец №4 с пробным стеклом после полировки алмазным порошком АСМ 1/0

В спектрофотометрическом методе исследования рассеяния для кристаллов германия применялась представленная на рис. 3 принципиальная оптическая схема, которая может быть реализована с помощью спектрофотометра ИКС-29.

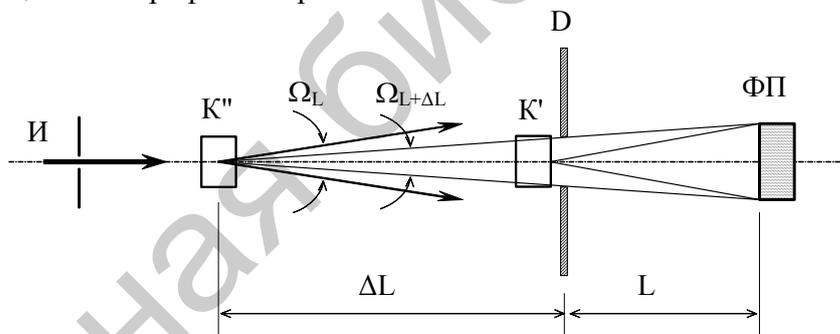


Рис. 3. Схема измерения коэффициентов пропускания при различных положениях кристалла относительно входной диафрагмы. И – источник излучения;  $K'$  – положение кристалла, придвинутого к входной диафрагме D;  $K''$  – положение кристалла, отодвинутого от диафрагмы на расстояние  $\Delta L$ ;  $L$  – расстояние между диафрагмой D и фотоприемником ФП;  $\Omega_L$  и  $\Omega_{L+\Delta L}$  – телесные углы из центра кристалла на фотоприемник в положениях  $K'$  и  $K''$

Качество поверхности (параметры шероховатости) образцов, подготовленных различными методами, оценивалось с помощью атомно-силового микроскопа.

**Полученные результаты.** Исследовалось оптическое пропускание в спектральном диапазоне 2.3...25.0 мкм. Спектральные зависимости в диапазоне 7...25 мкм приведены на рис. 4.

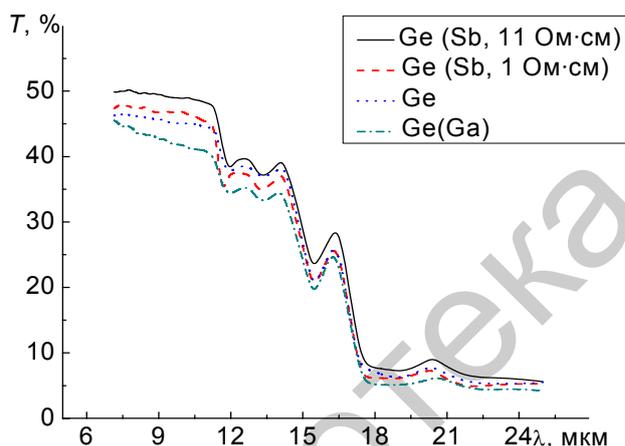


Рис. 4. Спектр пропускания исследуемых кристаллов германия

На рис. 5 представлена расчетная зависимость коэффициентов ослабления для исследуемых образцов в обычных координатах, а на рис. 6 зависимость коэффициентов ослабления от длины волны в логарифмических координатах (для участка диапазона прозрачности 7...10 мкм). На основании этой зависимости было получено значение показателя степени длины волны:

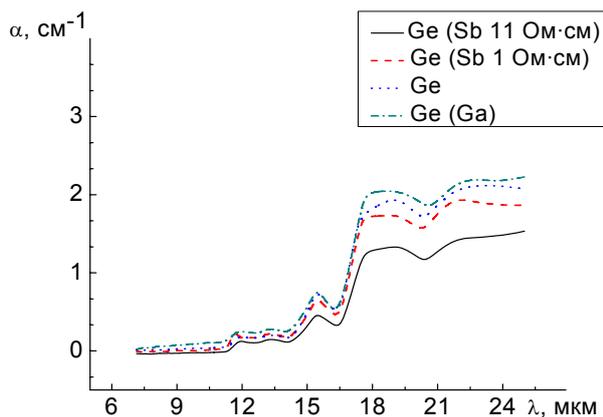
для германия, легированного сурьмой (уд. электросопротивление 11 Ом·см) – 1.08;

для германия, легированного сурьмой (уд. электросопротивление 1 Ом·см) – 2.96;

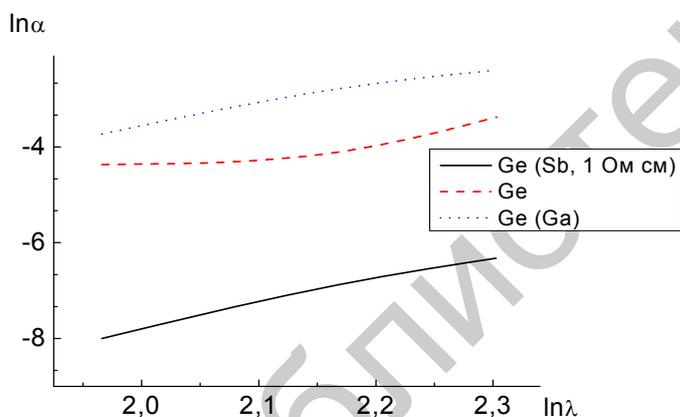
для чистого монокристалла германия – 2.01;

для германия, легированного галлием – 1.44.

Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с известными литературными данными и данными, полученными ранее в лаборатории кристаллизации ТвГУ.

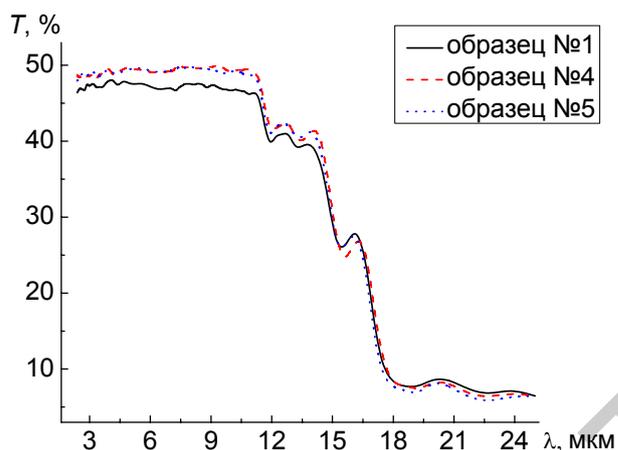


Р и с . 5 . Зависимость коэффициента ослабления кристаллов германия от длины волны

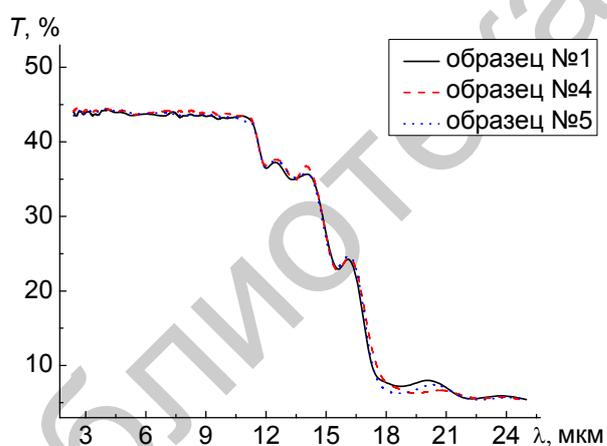


Р и с . 6 . Зависимость коэффициента ослабления кристаллов германия от длины волны в логарифмических координатах

На рис. 7 и рис. 8 представлены спектры пропускания исследуемых образцов, полученные с помощью спектрофотометра ИКС-29 по методике отодвигания образца от входного окна спектрофотометра. Из графиков можно сделать вывод, что при удалении фиксируемое пропускание образцов падает. Причем наиболее низкое пропускание и наиболее интенсивное снижение пропускания наблюдается для образца №1 поверхность которого была подготовлена наименее совершенным способом – ручной полировкой на алмазных пастах.



Р и с . 7 . Спектры пропускания исследуемых образцов при стандартном расположении в спектрофотометре



Р и с . 8 . Спектры пропускания исследуемых образцов при расстоянии до окна спектрофотометра 70 мм

**Анализ полученных результатов.** Характерной особенностью рис. 8 является то, что при отодвигании образцов на расстояние 70 мм рассеянная составляющая, обусловленная структурой поверхности полностью исчезает. Образцы имеют практически одинаковое пропускание при разном совершенстве поверхности.

В работе анализировалось влияние вида и концентрации примесей на длинноволновую (фононную) составляющую часть спектра. Спектры пропускания в диапазоне 10...23 мкм характеризуются наличием нескольких хорошо выраженных минимумов на длинах волн:

11.8 мкм (поглощение кислородом) (для германия n-типа, с повышенной концентрацией примеси минимум смещен на длину волны 11.6 мкм); 13.2; 15.5; 17.7; 19.1 и 22.7 мкм.

Анализ спектров показал, что для германия *n*-типа с повышенной концентрацией примеси (1 Ом·см; концентрация электрически активных примесей  $1.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) минимум смещен влево к длине волны 11.6 мкм. Также отмечено, что поглощение данного образца в фоновой части спектра более высокое, чем для легированного германия, хотя в диапазоне прозрачности наблюдалось обратное.

**Заключение.** Оптическое пропускание монокристаллов германия, легированных примесью *n*-типа проводимости (сурьмой) выше, чем у нелегированных монокристаллов и монокристаллов *p*-типа проводимости (с примесью – галлием). Коэффициент пропускания света кристаллами германия при прочих равных условиях чувствителен к качеству обработки оптических поверхностей. Изменение пропускания обусловлено рассеянием излучения на дефектах поверхности.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы.

### **Список литературы**

1. Young P. A. Thermal Runaway in Germanium Laser Windows // Applied Optics. 1971. V. 10. № 3. P. 638–643.
2. Capron E. D., Brill O.L. Absorption Coefficient as a Function of Resistance for Optical Germanium at 10,6  $\mu\text{m}$  // Applied Optics. 1973. V. 12. № 3. P. 566–572.
3. Hutchinson C. J., Lewis C., Savage J. A., Pitt A. Surface and Bulk Absorption in Germanium at 10,6  $\mu\text{m}$  // Applied Optics. 1982. V. 21. P. 1490–1495.
4. Валявко В. В., Осипов В. П., Гришин В. П. и др. Оптические свойства чистого германия в области 2,5-15 мкм // Журнал прикладной спектроскопии. 1979. Т. 30. Вып. 4. С. 729–731.
5. Астафьев Н. И., Несмелова И. М., Несмелов Е. А. Особенности полупроводниковых материалов как оптических сред для ИК области спектра // Оптич. журнал. 2008. Т. 75. С. 90–94.

*Об авторах:*

**ВОРОНОВИЧ Дмитрий Юрьевич** – магистрант кафедры прикладной физики ТвГУ, dimas14-19@mail.ru;

**ШЕЛОПАЕВ Александр Владимирович** – аспирант кафедры прикладной физики ТвГУ;

**ЗАЛЕТОВ Алексей Борисович** – доцент кафедры физики ТГМА;

**КАПЛУНОВ Иван Александрович** – доктор техн. наук, профессор кафедры прикладной физики ТвГУ, Ivan.Kaplunov@tversu.ru.