

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Кубанский государственный университет  
Научный совет РАН по физике конденсированного состояния  
Российский фонд фундаментальных исследований  
Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова

ОПТИКА  
И СПЕКТРОСКОПИЯ  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Материалы XXIV международной конференции

Краснодар  
2018

УДК 538.9  
ББК 22.34  
О-627

Организационный комитет:

В.А. Исаев (*председатель*), Mikhail G. Brik, Yu.V. Orlovskii, D. Richter,  
С.С. Ануфрик, Е.В. Жариков, В.Б. Кравченко, Г. П. Яблонский,  
М.Г. Барышев, Н.М. Богатов (*зам. председателя*), Е.П. Чукалина,  
А.В. Шестаков, Н.А. Яковенко, Е.Н. Тумаев, Б.В. Игнатъев, С.А. Аванесов,  
А.В. Лебедев

О-627      Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы  
XXIV Междунар. науч. конф. (под науч. ред. В.А. Исаева,  
А.В. Лебедева) – Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2018. – 372 с. –  
500 экз.  
ISBN 978-5-6041274-0-7

Настоящее издание содержит материалы XXIV Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», посвященные современным исследованиям в области физики конденсированного состояния. Рассматриваются вопросы, связанные с теоретическими и экспериментальными аспектами синтеза оптических материалов, их люминесцентных, генерационных, парамагнитных и нелинейных свойств.

Адресуются специалистам в области физики конденсированного состояния, преподавателям, магистрантам и аспирантам высших учебных заведений.

Конференция проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, ООО НПЦ «ЭЛС-94» (г. Москва), Промышленной группы "Тегас" г. Краснодар.

УДК 538.9  
ББК 22.34

ISBN 978-5-6041274-0-7

©Кубанский государственный  
университет, 2018

# ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕРМАНИЯ В ТГЦ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

**И.А. Каплунов<sup>1</sup>, Г.И. Кропотов<sup>2</sup>, В.Е. Рогалин<sup>1,3</sup>,  
В.Л. Евстигнеев<sup>3</sup>, А.И. Колесников<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Тверской государственной университет  
170100, ул. Желябова, 33, Тверь, РФ; Kaplunov.ia@tversu.ru,  
+74822322839*

<sup>2</sup>*ООО «Тидекс», 194292, Санкт-Петербург, ул. Домостроительная,  
д. 16, grigorykropotov@tydexru*

<sup>3</sup>*АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов  
«Астрофизика»  
125424, Волоколамское ш., 95, Москва, РФ; v-rogalin@mail.ru,  
+79166966282*

Длинноволновую часть электромагнитного спектра ( $\sim 3$  мм - 30 мкм,  $3 \text{ см}^{-1}$  -  $300 \text{ см}^{-1}$ ) принято называть - терагерцовое (ТГц) излучение [1]. В настоящее время активно ведутся работы по накачке ТГц сред мощным излучением  $\text{CO}_2$  лазера [2]. Сейчас в ТГц диапазоне используются кристаллический кварц, Si, сапфир, ряд полимеров, что недостаточно для развития этой области. В данной работе исследовались оптические свойства чистого и легированного Ge в ТГц диапазоне.

В ИК технике Ge применяется, в основном, для диапазона 8 – 14 мкм [3, 4]. В ТГц диапазоне интересны активные элементы акустооптических устройств из Ge [5]. Ge может быть использован для применения в многоспектральных тепловизионных приборах ИК + ТГц диапазонов, а также в лазерах ТГц диапазона, накачиваемых  $\text{CO}_2$  лазером.

Эксперименты проводились с помощью фурье-спектрометров в области 1.3 - 670 мкм Bruker Vertex 70 и Bruker IFS 66v/s. а в диапазоне  $100 \pm 1500$  мкм - Tera K8 Menlo Systems.

Ge выращивался методом Чохральского в направлении  $\langle 111 \rangle$ . Исследовали Ge, выращенный из нелегированного расплава, и Ge, легированный сурьмой (Sb) и галлием (Ga), для

изучения влияния проводимости на пропускание. Образцы диаметром 39 мм полировались с допусками  $N < 1$ ,  $\Delta N < 0,5$ .

Расчет коэффициента ослабления  $\alpha$  проводился с учетом многократных отражений по известной формуле [6]

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

где  $T$  и  $R$  - коэффициенты пропускания и отражения;  $h$  – толщина.

Спектральные зависимости  $\text{Ge}$  ( $\text{Sb}$ ) с разным удельным электросопротивлением  $\rho$  приведены на рис. 1. На рис. 2 приведены коэффициенты ослабления наиболее характерных образцов  $\text{Ge}$  в диапазоне  $\lambda = 60 - 1500$  мкм. Видно, что с ростом  $\lambda$  потери снижаются, достигая в максимуме, при  $\sim 220$  мкм, в собственном  $\text{Ge}$  величины  $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$ . Далее, наблюдается рост поглощения с увеличением  $\lambda$ . В ИК области  $\text{Ge}$   $n$ -типа проводимости имеет более высокое пропускание, что определяется малым сечением поглощения электронов по сравнению с дырками (соотношение по разным источникам составляет  $\sim 16 - 100$  раз [3]). Полученные результаты показали существенный рост поглощения легированного  $\text{Ge}$  в ТГц диапазоне, по сравнению с нелегированным (рис. 1, 2,  $\rho = 47 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Рост концентрации примеси, как электронной, так и дырочной, приводит к возрастанию поглощения. Если в области  $25 - 50$  мкм влияние  $\rho$  на пропускание  $\text{Ge}$  ( $\text{Sb}$ ), практически не заметно, то в области  $120 - 220$  мкм оно наблюдается воочию.

Сравнение пропускания  $\text{Si}$  и  $\text{Ge}$  в диапазоне  $\lambda \geq 25$  мкм, показывает большие значения для  $\text{Si}$  ( $\sim 55\%$ ) по сравнению с  $\text{Ge}$ . Это обусловлено различием в френелевском отражении (в ИК области показатель преломления  $\text{Ge} \sim 4.0$ , а для  $\text{Si} \sim 3.42$ ). Предполагается, что основное поглощение в рассматриваемом диапазоне происходит на свободных носителях заряда (собственных, и примесных). В чистом  $\text{Si}$  и  $\text{Ge}$  концентрации существенно различаются (собственный  $\text{Ge}$ :  $47 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;  $E = 0.67 \text{ эВ}$ ;  $n = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Собственный  $\text{Si}$ :  $2 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ ;  $E = 1.12 \text{ эВ}$ ;  $n = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ). Поэтому, поглощение в ТГц области в  $\text{Ge}$  должно быть заметно выше, чем в  $\text{Si}$ . Если сопоставить результаты по  $\text{Ge}$  (рис. 2, в области  $\lambda \sim 160 - 220$  мкм) и данные по  $\text{Si}$  [7], то они

свидетельствуют, что коэффициент ослабления примерно совпадает, и равен  $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$ .

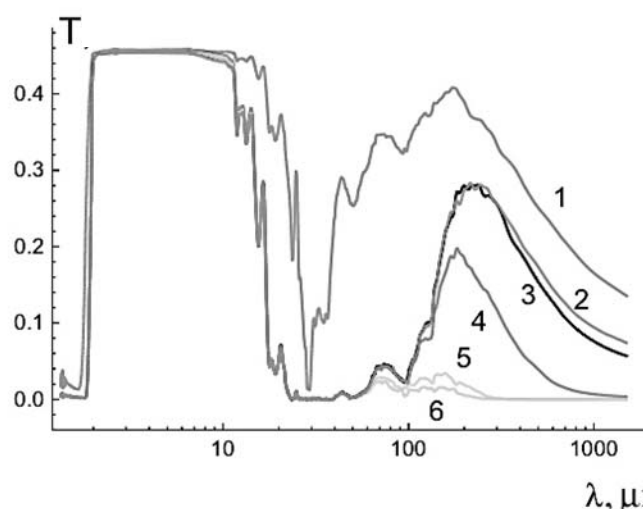


Рис. 1. Оптическое пропускание монокристаллического Ge, легированного сурьмой.

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  $h=10 \text{ мм}$ )

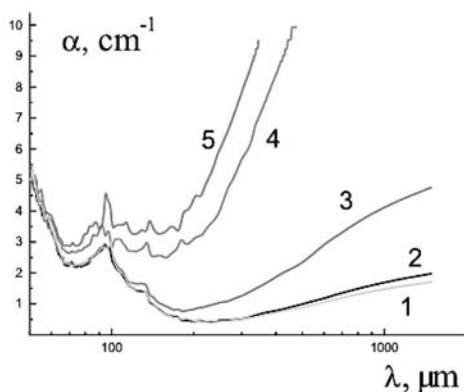


Рис. 2. Коэффициент ослабления Ge: 1 – нелегированный; легированный (Sb): 2 – 46 Ом·см; 3 – 20 Ом·см; 4 – 5 Ом·см; 5 – 2.7 Ом·см

Полученные результаты свидетельствуют, что сечение поглощения свободных носителей заряда в Si и Ge заметно различается, что может быть вызвано различием во взаимодействии носителей заряда с фононами. В отличие от ИК диапазона, в котором минимальное поглощение  $\sim 0.02 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$ ), наблюдается в кристаллах n типа проводимости

5 – 10 Ом·см, в ТГц области минимальные потери  $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$  наблюдаются в собственных кристаллах. В области 160 - 220 мкм коэффициент ослабления Ge  $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$ , что сопоставимо с Si. Френелевские потери на отражение могут быть, в значительной степени, скомпенсированы путём 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 использованы в ТГц диапазоне (в области  $\sim 120 - 300 \text{ мкм}$ ).

### Литература

1. Weber, Marvin J. Ph.D. "Gas Lasers" Handbook of Lasers Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
2. S. Ya. Tochitsky, J.E. Ralph, C. Sung, C. Joshi Generation of megawatt-power terahertz pulses by noncollinear difference-frequency mixing in GaAs // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 26101 (1-3).
3. Ровинский Р.Е., Рогалин В.Е., Шершель В.А. «Оптические свойства и области применения полупроводниковых монокристаллов германия» Изв. АН СССР (сер. Физ.). 1983. Т. 47. № 2. С. 406-409.
4. Claeys L., Simoen E. Germanium-based technologies: from materials to devices. Berlin: Elsevier. 2007. P. 449.
5. Kaplunov I.A., Nikitin P.A., Voloshinov V.B., Kolesnikov A.I., Knyazev B.A. Infrared and terahertz transmission properties of germanium single crystals // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 37. P. 012021.
6. Курик М.В. Точность определения коэффициентов поглощения и отражения веществ // ЖПС. 1966. Т. 4. № 3. С. 275 - 278.
7. **THz Materials** [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz\\_optics/thz\\_materials/](http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_materials/)

**Abstract.** The transmission of the intrinsic and doped with antimony and gallium germanium in the terahertz region is experimentally studied. It is shown that the intrinsic germanium in the 160 - 300  $\mu\text{m}$  region has losses at the level of  $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$ , which is comparable with silicon.