

Оценка нелинейно-оптического коэффициента кристаллов GaSe:S по данным электрооптических измерений

О.Н. Шевченко^{1,2*}, В.Д. Анцыгин¹, Н.А. Николаев^{1,2}

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН

² Новосибирский государственный университет

* E-mail: shevchenkoon@iae.nsk.su

DOI:10.31868/RFL.2024.211-213

В данной работе предлагается исследование нелинейного коэффициента нелегированных и легированных серой кристаллов GaSe при взаимодействии телекоммуникационной длины волны $\lambda = 1,55$ мкм и терагерцового излучения. Согласно результатам нашего поиска, было обнаружено всего несколько работ, посвященных исследованию нелинейности кристаллов GaSe при взаимодействии лазерного и терагерцового излучения [1-5], причем значения d_{22} имеют большой разброс. Кроме того, часть работ [6-9] оценивают эффективность оптико-терагерцового взаимодействия с использованием значения d_{22} , указанного в работе [10], что является некорректным. Мы приходим к выводу, что определение его коэффициента $d_{22}(\omega_1, \omega_2, \Omega)$, где $\omega_1/2\pi \approx \omega_2/2\pi > 179$ ТГц, что соответствует диапазону $\lambda < 1675$ нм, и $\Omega/2\pi < 1$ ТГц, является актуальным в связи с перспективностью использования структур на основе GaSe и его легированных модификаций в устройствах связи. Мы предполагаем, что $d_{22}(\omega_1, \omega_2, \Omega) \approx d_{22}(\omega_1, \omega_1, 0)$, и его значение может быть получено путем измерения линейного электрооптического коэффициента r_{22} [11]. В этом исследовании обсуждаются результаты вышеупомянутых оценок, которые были основаны на предыдущих проведенных нами исследованиях, их сравнение с данными, предоставленными другими авторами, и систематизация результатов.

Оценка коэффициента нелинейности была проведена тремя методами. Первый метод основан на оценке значений d_{22} по данным электрооптических измерений, проведенных нами ранее, в соответствии с:

$$d_{22} = -\frac{n_i^2 n_j^2 r_{22}}{4}, \quad (1)$$

где n_i, n_j - коэффициенты преломления на длине волны лазерного излучения, которые в нашем случае равны $n_i = n_j = n_o$. В упомянутой выше статье мы также измерили обычный показатель преломления при $\lambda = 1,55$ мкм. На основании (1) рассчитаны значения d_{22} для этой длины волны.

Второй метод основан на правиле Миллера и, принимая во внимание соотношения диэлектрической проницаемости и при отсутствии поглощения взаимодействующих длин волн, правило было приведено к следующему виду:

$$d_{22} = \frac{1}{2}(n_o^2 - 1)^2 \cdot (n_\Omega^2 - 1)^2 \cdot \Delta_{222}, \quad (2)$$

где Δ_{222} - постоянная Миллера, равная 0,073 пм/В для GaSe, n_o - обыкновенный показатель преломления, рассчитанный для диапазона 0,63–1,55 мкм, n_Ω - обыкновенный показатель преломления для $\Omega/2\pi = 300$ ГГц, измеренный ранее [12].

В третьем подходе мы использовали уравнения (1) и (2) для определения коэффициента нелинейности d_{22} для диапазона длин волн от 0,63 до 0,95 мкм на

основе данных, извлеченных из статьи [1], для экспериментально полученного значения $|2n_o^3 r_{22}|$ в постоянном диэлектрическом поле.

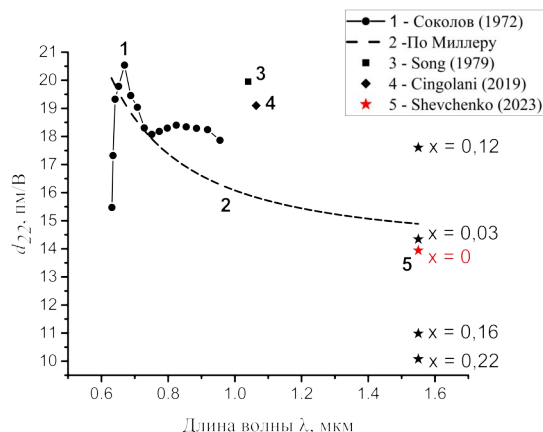


Рис. 1. Рисунок 1. Зависимость нелинейного коэффициента d_{22} от длины волны излучения: 1 – Соколов и др.28; 2 – оценка по правилу Миллера; 3 – Song и др.29 при $\lambda = 1,04$ мкм; 4 – Cingolani и др.30 при $\lambda = 1,064$ мкм; 5 – наши измерения на длине волны 1,55 мкм.17

Результаты оценок представлены на рис. 1. Из представленных данных видно, что в диапазоне 0,63 - 1,55 мкм наблюдается уменьшение значения d_{22} по мере увеличения длины волны. Значения d_{22} , рассчитанные по методу Миллера, находятся в пределах 10% и хорошо согласуются с экспериментальными данными, погрешность составляет приблизительно 1,5 пм/В. Значение d_{22} , полученное в нашей работе, довольно точно согласуется с экспериментальными значениями, представленными в работе Соколова [1]. Нелинейность изменения значения d_{22} при увеличении доли компонентов серы в кристаллическом составе GaSe в настоящее время все еще не очевидна.

Таким образом, в данном исследовании нелинейно-оптический коэффициент впервые был оценен для легированных кристаллов GaSe:S с использованием измерения электрооптического коэффициента в ТГц-диапазоне частот при длине волны лазерной накачки 1,55 мкм. Представленные в данной работе оценки позволяют заложить основы для создания устройств интегрированной фотоники, работающих на принципах нелинейной оптики, а также модуляторов телекоммуникационных длин волн в диапазоне около 1,5 мкм.

Исследование было выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта государственного задания Новосибирского государственного университета № FSUS-2024-0020 и Института автоматики и электрометрии СО РАН № FWNG-2024-0025. Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» Института автоматики и электрометрии СО РАН и ЦКП «ВТАН» физического факультета Новосибирского государственного университета.

Литература

- [1] V.I. Sokolov, V.K. Subashiev, *Solid State Physics* **14**(1), 222–228 (1972)
- [2] Q. Song, L. Chai et al, *Infrared Phys Technol* **97**, 54–57 (2019)
- [3] A. Cingolani, M. Ferrara et al, *Solid State Commun* **29**(9), 677–679 (1979)
- [4] J.L. Oudar, Ph. J. Kupecek et al, *Opt Commun* **29**(1), 119–122 (1979)
- [5] N.B. Singh, G. Kanner et al, *Emerging Materials Research* **1**(4), 185–200 (2012)
- [6] K.L. Vodopyanov, L.A. Kulevskii, (1995)
- [7] J.F. Molloy, M. Naftaly et al, *Opt Mater Express* **4**(11), 2451 (2014)
- [8] L. Karvonen, A. Säynätjoki et al, *Sci Rep* **5**(1), 10334 (2015)

- [9] A.O. Okorogu, S.B. Mirov et al, *Opt Commun* **155**(4–6), 307–312 (1998)
- [10] L. Kador, M. Braun, *Opt Commun* **143**(1–3), 62–66 (1997)
- [11] R.L. Sutherland, D.G. McLean, Sean Kirkpatrick, *Marcel Dekker* (2003)
- [12] O.N. Shevchenko, S.L. Mikerin et al, *Applied Sciences* **13**(4), 2045 (2023)