

# Прямое многофотонное фемтосекундное ИК-лазерное возбуждение решетки алмаза в двухфононной области и модификация центров окраски

Н. А. Смирнов<sup>1)</sup>, Ю. С. Гулина, Н. И. Буслеев, П. П. Пахольчук, А. В. Горевой, В. Г. Винс, С. И. Кудряшов

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 января 2024 г.  
После переработки 9 февраля 2024 г.  
Принята к публикации 17 февраля 2024 г.

Экспериментально исследовано нелинейное поглощение ультракоротких лазерных импульсов с интенсивностями  $0.17\text{--}1.7\text{ ТВт/см}^2$  на длине волны собственного двухфононного поглощения (4673 нм) в алмазе типа Ib. Показано, что основным механизмом поглощения в исследуемом образце является двухфотонное поглощение с коэффициентом  $\beta_2 = 72 \pm 7\text{ см}^2/\text{ТВт}$ . При помощи микроспектроскопии пропускания и фотолюминесценции видимого диапазона, а также инфракрасной фурье-микроспектроскопии продемонстрирована возможность лазерно-индуцированной трансформации азотных примесных центров в искусственном алмазе типа Ib при более высоких интенсивностях излучения.

DOI: 10.31857/S1234567824060016, EDN: KCMSYL

1. С самого момента своего открытия [1], инфракрасное (ИК) излучение связывалось преимущественно с относительно низкоинтенсивным тепловым излучением твердых тел и линейным поглощением оптических фононных мод в прозрачных диэлектрических или полупроводниковых кристаллах [2]. В последние десятилетия появились мощные лазерные источники среднего ИК-диапазона (3–8 мкм,  $\approx 40\text{--}100\text{ ТГц}$ ) – перестраиваемые параметрические генераторы [3, 4] и лазерные генераторы с фиксированной длиной волны [5–7], что позволяет резонансно и многофотонным образом возбуждать колебательные системы молекул [8, 9], белков и даже бактерий [10, 11]. Между тем, в широкозонных диэлектрических и полупроводниковых кристаллах, которые являются перспективными средами для лазерной записи оптических элементов в их объеме через структурную модификацию решетки или примесных дефектов [12–15], даже мощные фемтосекундные лазерные импульсы среднего ИК-диапазона не имеют принципиальных преимуществ перед импульсами ближнего ИК-диапазона (0.8–1.4 мкм,  $\approx 200\text{--}400\text{ ТГц}$ ). Причиной является гигантский – на уровне трех порядков – разрыв между резонансами поглощения электронной подсистемы (ширина запрещенной зоны  $\sim 1\text{--}10\text{ эВ}$ ,  $\sim 1\text{ ПГц}$ ) и ионных колебаний (энергия оптических фононов кристаллической решетки или локальных колебаний примесных атомов –  $\sim 0.01\text{--}0.1\text{ эВ}$ ,

$\sim 10\text{ ТГц}$ ). В связи с этим существующие источники фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК-диапазона не затрагивают решеточное поглощение, а возбуждают электронную подсистему диэлектриков и полупроводников через механизм ионизации ловушек или прямой туннельной ионизации, сопровождающийся ударной ионизацией вплоть до оптического пробоя (формирования околоритической плазмы) [16, 17].

Алмаз является уникальным оптически- и ИК-прозрачным широкозонным центросимметричным полупроводником (диэлектриком) с самой жесткой кристаллической решеткой, оптические фононы в которой имеют частоту до 40 ТГц [18]. Соответственно, согласно правилам отбора по симметрии, появляется возможность собственного решеточного ИК-поглощения алмаза в двухфононной области (0.33 эВ, 4–5 мкм, 60–80 ТГц), с учетом условия сохранения квазиимпульса [19]. Помимо линейного двухфононного поглощения  $\sim 5\text{ см}^{-1}$  ( $\approx 4\text{ мкм}$ , оптический бифонон) и  $10\text{--}100\text{ см}^{-1}$  (другие парные комбинации оптических фононов с коротковолновыми акустическими фононами) в слабых световых полях, в сильных ИК-лазерных полях возможно многофотонное поглощение бифононных мод алмаза, закономерности которого, возможно, отчасти похожи на таковые для многотомных молекул [8], однако, до сих пор не исследовались.

В настоящей работе методом z-скана изучено нелинейное резонансное поглощение фемтосекунд-

<sup>1)</sup>e-mail: cna1992@mail.ru