

**КОГЕРЕНТНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ
ГИГАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА
В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛМАЗЕ
С ЗАГЛУБЛЕННЫМ ГРАФИТИЗИРОВАННЫМ СЛОЕМ**

М. В. Тареева, В. А. Дравин, Р. А. Хмельницкий,
Н. В. Чернега, А. Д. Кудрявцева, М. А. Шевченко,
А. О. Литвинова

В работе представлены результаты экспериментального наблюдения вынужденного низкочастотного комбинационного рассеяния света (ВНКР) на собственных акустических колебаниях графитизированного слоя различной толщины в объеме монокристаллического алмаза, возбужденных с помощью наносекундного лазерного импульса.

Ключевые слова: тонкие алмазные пленки, вынужденное рассеяние, гигагерцовое излучение, нанослой.

Тонкие кристаллические пленки толщиной от нескольких нм до 1 мкм имеют множество различных применений в оптоэлектронике, энергетике, материаловедении. Низкочастотное комбинационное рассеяние (НКР), возникающее на акустических колебаниях в наноразмерных материалах, позволяет получать информацию об упругих свойствах таких объектов [1, 2]. При достижении определенного значения интенсивности возбуждающего излучения процесс рассеяния переходит в вынужденный режим с высоким коэффициентом преобразования – вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света (ВНКР) [3–5]. Собственные моды колебаний, удовлетворяющие правилам отбора, проявляются в спектре рассеяния в виде смещенной комбинационной компоненты, значение спектрального смещения при этом определяется морфологией системы. Существенное влияние на значение собственной акустической частоты оказывают граничные условия, а также зависимость констант связи акустической моды с электромагнитным излучением от частоты. Как правило, для тонких пленок, находящихся на

подложке с одной свободной поверхностью, частота акустических колебаний определяется выражением [6]

$$\nu = V/4d,$$

где V – скорость звука, d – толщина пленки.

Как показано в работах [7, 8], в которых исследовались акустические колебания тонких пленок на подложке, при определенных значениях толщины пленки наблюдается отклонение от линейной зависимости частоты ν от $1/d$, связанное с влиянием подложки.

Экспериментальные образцы, представляющие собой пластинки монокристаллического алмаза (концентрация азота менее чем $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), были вырезаны параллельно кристаллографической плоскости $\{110\}$, и в дальнейшем были подвергнуты ионной имплантации и отжигу при разных значениях параметров (тип и энергия ионов, доза имплантации) [9, 10], в результате чего были получены образцы с различными размерами нанослоёв алмазно-графитовой структуры. Увеличенное изображение одного из образцов приведено на рис. 1.

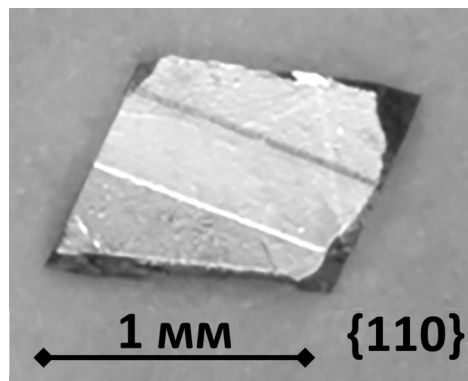


Рис. 1: Изображение монокристаллической алмазной пластинки с заглубленными графитизированными слоями (на изображении в верхней и нижней части образца), полученное с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss. Широкая полоса в центре образца соответствует неграфитизованной области.

ВНКР в плёнках возбуждалось импульсным излучением рубинового лазера (длина волны $\lambda = 694.3 \text{ нм}$; длительность импульса $\tau = 20 \text{ нс}$, спектральная ширина $\Delta\nu = 0.015 \text{ см}^{-1}$, расходимость пучка $3.5 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$, максимальная энергия в пучке $E_{\text{max}} = 0.3 \text{ Дж}$), работающего в режиме модуляции добротности.

Излучение фокусировалось на поверхность образца (плоскость $\{110\}$) под различными углами к поверхности ($30\text{--}60^\circ$). Спектральное смещение регистрировалось с по-

мощью интерферометра Фабри–Перо в направлении вперед в отраженном излучении и назад. При достижении порога возбуждения (0.01 ГВ/см^2) наблюдалось ВНКР, проявляющееся в виде дополнительной интенсивной линии в стоксовой области. Максимальный коэффициент преобразования падающей энергии в ВНКР достигал значения 40%. Вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна при этом не наблюдалось.

Величины частотного смещения линии ВНКР от линии лазера составили 0.31 см^{-1} (9.3 ГГц) для образца, полученного при имплантации ионов ${}^4\text{He}^+$, 50 кэВ, 0.30 см^{-1} (9 ГГц) для 350 кэВ ${}^{12}\text{C}^+$ и 0.28 см^{-1} (8.4 ГГц) для 350 кэВ D^+ .

На рис. 2 приведены частотные смещения ВНКР в исследованных образцах в зависимости от $1/d$.

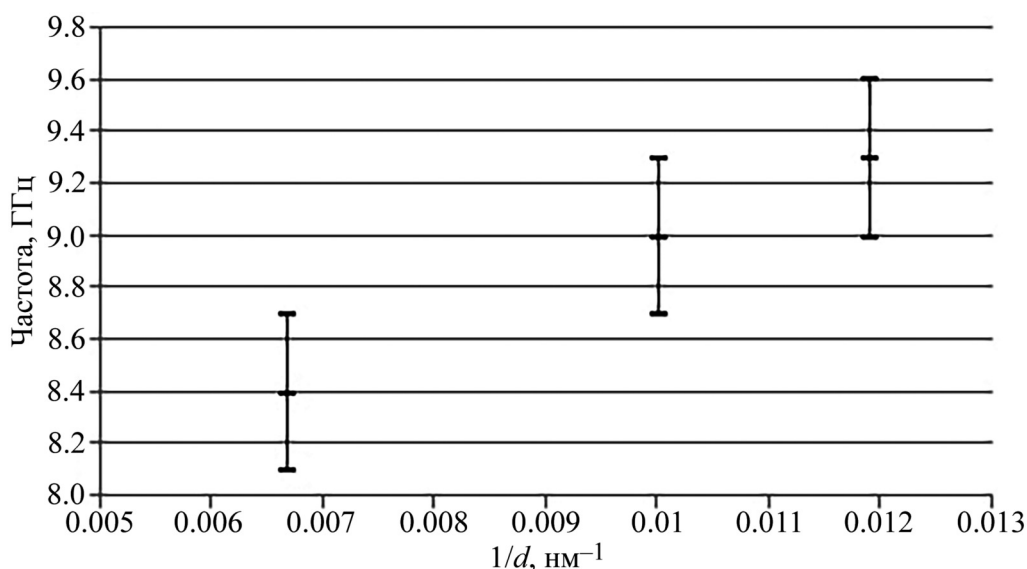


Рис. 2: Зависимость величины спектрального смещения ВНКР от $1/d$.

Полученные частоты по порядку величины соответствуют колебаниям графитизированного слоя. Полученная зависимость частотного смещения ВНКР от величины $1/d$ соответствует режиму, связанному с нелинейным влиянием окружающей алмазной матрицы на динамику колебаний графитизированного слоя.

Таким образом, впервые экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность нелинейного возбуждения наноразмерной алмазно-графитовой структуры, приводящая к вынужденному рассеянию в гигагерцовом диапазоне частот с высоким коэффициентом преобразования. Благодаря этому ВНКР может быть использовано в качестве источника бигармонической накачки со спектральным смещением,

определяемым характеристиками твердотельных слоистых структур, а также для создания когерентного источника гигагерцового излучения.

Зависимость частотного смещения от толщины пленки может быть использована для определения с помощью метода ВНКР морфологии подобных систем дистанционно и в реальном времени.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-32-60026 мол-а-дк).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] E. Duval, A. Boukenter, B. Champagnon, Phys. Rev. Lett. **56**, 2052 (1986).
- [2] M. Montagna, Phys. Rev. B **77**, 045418 (2008).
- [3] N. V. Tcherniega, M. I. Samoylovich, A. D. Kudryavtseva, et al., Opt. Lett. **35**(3), 300 (2010).
- [4] A. V. Safronikhin, H. V. Ehrlich, G. V. Lisichkin, et al., J. Russ. Laser Res. **39**(3), 294 (2018).
- [5] M. V. Tareeva, V. A. Dravin, R. A. Khmel'nitskiy, et al., J. Russ. Laser Res. **38**(6), 530 (2017).
- [6] C. Thomsen, J. Strait, Z. Vardeny, et al., Phys. Rev. Lett. **53**(10), 989 (1984).
- [7] Shaofeng Ge, Xuefeng Liu, Xiaofen Qiao, et al., Sci. Rep. **4**, 5722 (2014).
- [8] Y. D. Glinka, S. Babakiray, T. A. Johnson, et al., J. Appl. Phys. **117**, 165703 (2015).
- [9] E. K. Nshingabigwi, T. E. Derry, S. R. Naidoo, et al., Diam. Rel. Mat. **49**, 1 (2014).
- [10] A. V. Khomich, R. A. Khmel'nitskiy, V. A. Dravin, et al., Phys. Solid State **49**(9), 1661 (2007).

Поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.

После доработки 27 ноября 2018 г.

Принята к публикации 28 ноября 2018 г.