

11;12  
©1995

## НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОТВОД В АЛМАЗЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Т.И.Галкина, А.Ю.Клоков, А.И.Шарков*

В последние годы алмаз и алмазоподобные пленки, а также алмазные подложки нашли применение в микроэлектронике и оптоэлектронике [1,2]. Заманчивым представляется, в частности, использование большой величины теплопроводности. В [3] приведены расчеты, на основе которых предлагается использование алмаза для отвода очень больших теплоточков.

Известно, что у наиболее чистых природных алмазов типа Па теплопроводность при комнатной температуре достигает величины, которая в 5 раз выше, чем у серебра и меди. В алмазах этого типа величина теплопроводности в значительной мере определяется изотопами  $C^{13}$  [4]. Выращивание алмазоподобных пленок, обедненных изотопами, тем не менее не дает увеличения теплопроводности, поскольку появляется сильное рассеяние фононов на точечных и протяженных дефектах, дислокациях, границах зерен, микротрещинах и т.д. [5].

Очевидно, что большая величина теплопроводности алмаза еще не дает непосредственного ответа на вопрос о скоростях отвода тепла при импульсном нагреве образца при низких температурах. При низких температурах  $T$ , когда длины пробега фононов с частотами  $\omega \simeq \omega_T$  становятся сравнимыми с геометрическими размерами исследуемого образца, вообще нельзя пользоваться локальным уравнением теплопроводности. Как правило, в этих условиях при импульсном возбуждении (например, при оптической накачке) фоновая система является неравновесной. При этом скорость отвода тепла определяется режимом распространения неравновесных фононов. Данные о режиме распространения можно получить с помощью техники тепловых импульсов, которая к образцам алмаза, по нашим сведениям, еще не применялась.

На одну сторону образца природного алмаза (толщина  $L = 0.4$  мм; ориентация (110); по своим характеристикам близок к Па, т.е. концентрация азота составляет  $10^{17} - 10^{18}$  см $^{-3}$ ) была напылена пленка золота толщиной  $\simeq 1500$  Å; с обратной стороны пластины напылялся сверхпроводниковый болометр на основе гранулированного алю-

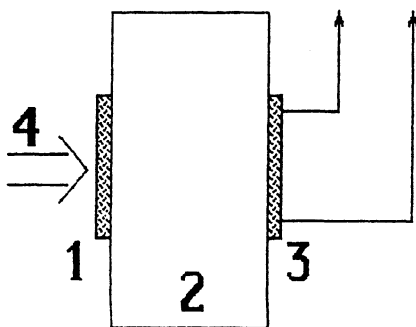


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — генератор фононов — пленка Au (толщина 150 нм); 2 — образец алмаза (толщина 0.4 мм); 3 — пленочный болометр из гранулированного алюминия (толщина 30 нм); 4 — лазерный импульс (длина волны 337 нм).

миния [6] (рис. 1). При температуре эксперимента  $T \approx 2$  К пленка золота нагревалась лучам импульсного ультрафиолетового лазера ЛГИ-21 (коэффициент отражения  $R = 0.37$  при  $\lambda = 337$  нм). Регистрирующая система была построена на основе стробоскопического преобразователя напряжения В9-5, которым управлял строб-интегратор PAR-160. Выходы PAR-160 оцифровывались АЦП-712 в стандарте КАМАК и вводились в компьютер IBM PC. Временное разрешение системы составляло 2 нс. Было разработано программное обеспечение, позволяющее путем накопления улучшать отношение сигнал/шум на 20 дБ, а также вычитать когерентную помеху, создаваемую блоком питания лазера ЛГИ-21.

На рис. 2 приведены разрешенные по времени отклики болометра на приходящую энергию. Отметим наличие резкого переднего фронта отклика и достаточно медленного спада. Таким образом, в приходящем на детектор пакете неравновесных фононов содержится значительная доля баллистической компоненты, но в основном распространение фононов идет в режиме квазидиффузии [7]. Отсутствие же сдвига максимума сигнала с уровнем накачки (наблюдаемого, например, в кремнии при больших плотностях оптического возбуждения [8]) свидетельствует о том, что практически все (за вычетом уходящих в гелий) генерируемые золотой пленкой фононы проходят до тыльной стороны образца без взаимодействий друг с другом. Следовательно, отсутствуют процессы слияния и не приходится говорить об установлении температуры в толще

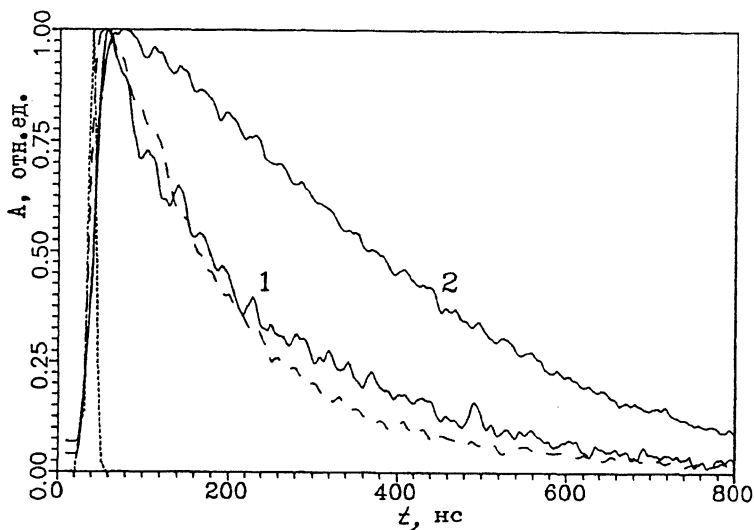


Рис. 2. Разрешенный по времени отклик болометра на приход неравновесных фононов в зависимости от плотности энергии возбуждения ( $0.87$  и  $1.96$  мкДж/мм<sup>2</sup> для кривых 1 и 2 соответственно) — сплошная линия. Расчетный отклик детектора при рассеянии фононов только на изотопах — пунктирная кривая. Расчетный отклик детектора на приход неравновесных фононов со временем свободного пробега  $4.8$  нс — штриховая кривая.

образца алмаза. Иными словами, при плотностях введенной энергии  $P \simeq 1$  мкДж/мм<sup>2</sup>, несмотря на то, что в нанесенной на переднюю сторону образца пленке золота почти мгновенно ( $0.5$ – $1$  пс) [9] устанавливается температура  $T^* = T_0 \cdot (4P/(\rho h c_0 T_0) + 1)^{1/4} \simeq 20$  К (где  $T_0 = 2$  К,  $P = 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\rho = 19.3$  г/см<sup>3</sup>,  $h = 1.5 \cdot 10^{-5}$  см,  $c_0 = 2.5 \times 10^{-5}$  Дж/(г·К)), тыльная поверхность образца “не греется”.

При увеличении плотности введенной энергии (кривая 2 на рис. 2) из-за увеличения температуры пленки возрастают и характерные частоты инжектируемых в алмаз фононов. Это приводит к резкому ( $\approx \omega^{-4}$ ) уменьшению длин свободного пробега фононов и переходу ко все более диффузионному характеру их распространения.

Сравнение экспериментальных откликов с рассчитанным методом Монте-Карло при учете рассеяния фононов только на изотопах (пунктирная кривая на рис. 2) позволяет сделать вывод о том, что в настоящем эксперименте упругое рассеяние фононов происходит гораздо более интенсивно,

т.е. идет преимущественно на других дефектах, например на примесях азота или других точечных дефектах (см., например, [5]).

При моделировании можно варьировать, например, время свободного пробега фононов. Подгоняя расчетный отклик к экспериментальному (штриховая кривая на рис. 2), можно оценить времена свободного пробега фононов в алмазе данного типа, неизвестные ранее. Мы получили, таким образом, значение среднего времени свободного пробега 4.8 нс, что в 600 раз меньше времени свободного пробега фононов частоты 2 ТГц в случае, если бы рассеяние фононов происходило только на изотопах.

В заключение измерены при 2 К тепловые импульсы в природном алмазе типа Па. Показано, что теплоперенос осуществляется в режиме квазидиффузии со значительной баллистической компонентой. Определены времена свободного пробега фононов относительно упругих соударений для данного типа алмаза (с учетом изотопического и примесного рассеяния).

Авторы благодарны В.С.Багаеву за интерес к работе, А.А.Гиппиусу за полезное обсуждение и В.Ф.Сергиенко за предоставленные образцы алмаза. Работа частично финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 95-02-04278а).

#### Список литературы

- [1] *Bharadwaj P.K., Code R.F., van Driel H.M., Walentinowich E.* // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 2. P. 207-209.
- [2] *Nishimura K., Kumagai K., Nakamura R., Kobashi K.* // Journ. of Appl. Phys. 1994. V. 76. N 12. P. 8142-8145.
- [3] *Карягин С.В.* // Пик ВИНТИ. № 2797-83ДЕП, ИХФ АН СССР. М., 1983.
- [4] *Berman R., Foster E.L., Ziman J.M.* // Proc. R. Soc. A. 1956. V. 237. P. 344-354.
- [5] *Graebner J.E., Reiss M.E., Seibles L. et al.* // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. N 6. P. 3702-3713.
- [6] *Блинов А.Ю., Бонч-Осмоловский М.М., Галкина Т.И. и др.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1989. В. 7. С. 31-33.
- [7] *Казаковцев Д.В., Левинсон И.Б.* // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 27. С. 194-196.
- [8] *Bonch-Osmolovskii M.M., Galkina T.I., Klokov A.Yu. et al.* // Sol. St. Comm. 1994. V. 92. N 3. P. 203-206.
- [9] *Brorson S.D., Fujimoto J.G., Ippen E.P.* // Ph. Rev. Lett. 1987. V. 59. N 17. P. 1962-1965.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева РАН  
Москва

Поступило в Редакцию  
1 июня 1995 г.