

УДК 538.945

АКУСТИЧЕСКИЕ ФОНОНЫ В СТРУКТУРЕ СВЕРХПРОВОДНИК – ДВУХЛИСТНЫЙ ГРАФЕН

Кушнир В.Н.^{1,2}, Прищепа С.Л.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь, vnkushnir@gmail.com

² Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: В данной работе оценивается влияние «дыхательных» мод спектра колебаний графена на фононный спектр ниобия в структуре ниобий – графен. Учитывается влияние диэлектрической прослойки, образованной оксидами ниобия. Обоснован эффект смягчения фононного спектра, имеющий следствием увеличение критической температуры пленки ниобия.

Ключевые слова: сверхпроводящая пленка, фононный спектр.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема разработки методов модификации фононного спектра сверхпроводящей пленки с целью увеличения и, в большей степени, контроля ее критической температуры, сформулированная в 1960-х годах, актуализируется, во-первых, по причине усовершенствования технологии изготовления тонких сверхпроводящих пленок и, во-вторых, ввиду увеличения быстродействия компьютерной техники [1]. Принцип решения данной проблемы достаточно понятен для сверхпроводящих материалов, характеризуемых структурной функцией Элиашберга $\alpha^2 F(\omega)$, пропорциональной, в широкой области частот, спектральной функции фононной подсистемы, $F(\omega)$. В таком случае критическая температура пленки возрастает при «смягчении» фононного спектра, то есть, при увеличении спектральной плотности в области низких частот [2]. Способ реализации данного принципа, эффективный и контролируемый, был предложен в [3]. Суть способа состоит в формировании на поверхности пленки сверхпроводника (ниобия) кристаллической структуры, состоящей из двулистного графена (G). Nb удовлетворяет оговоренному условию $\alpha^2 F(\omega) \sim F(\omega)$; существенно, что фононный спектр графена известен (ссылки см. в обзоре [1]). Известно также, что критическая температура пленки Nb резко падает с уменьшением ее толщины, начиная с некоторого значения (подробности приведены в монографии [4]). Полученный эффект – стабилизация критической температуры пленки [3].

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [3] предложена простая численная модель эффекта. Здесь мы показываем, что в рамках данной модели эффект смягчения фононного спектра имеет разумное объяснение. В первую очередь, обращаем внимание на то, что из всех ветвей фононного спектра 2-листного графена наиболее существенное влияние на динамику кристаллической решетки Nb оказывает акустическая ветвь колебаний в направлении ортогональном плоскостям графена – диапазон частот этой ветви сильно перекрывается с частотным спектром акустических волн в ниобии. Оптические фононы демпфируются при распространении в Nb, благодаря наличию диэлектрической прослойки (I) между Nb и G из оксидов Nb, представляющей собой хаотическую среду. Между тем, длинные волны менее чувствительны к данной среде. В результате, структура Nb/G может моделироваться структурой Nb/I/Gr (Gr – графен с редуцированным фононным спектром) со слабой связью α между слоями. Далее, сопоставляя модельной структуре динамическую матрицу с формулировкой задачи о ее спектре, мы видим, что результирующие нормальные колебания происходят на всей совокупности частот, однако априори нельзя дать какого-либо заключения о вектор-функциях состояний. Здесь следует привлечь еще два важных обстоятельства: во-первых, оба листа графена оказываются слабо связанными [5]; во-вторых, основной вклад во взаимодействие с кристаллической решеткой ниобия дают т.н. «breathing modes» («дыхательные моды»), или (более точный термин) – трансляционные моды. Слабое взаимодействие между двумя плоскостями графена приводит к перенормировке их положений равновесия. Появление трансляционных мод, из которых существенна та, которая направлена ортогонально плоскостям, обусловлено очевидным нарушением трансляционной инвариантности в этом направлении. В результате в динамике полной структуры фигурирует взаимодействие центров масс двух плоскостей графена и центра масс ниобия. Сразу же становится понятным, с этой позиции, исчезновение эффекта смягчения фононного спектра при увеличении толщины пленки Nb (отношение масс плоскости G и Nb стремится к нулю). Подчеркнем также, что малая масса плоскостей графена по сравнению с Nb обеспечивает «устойчивость» эффекта – амплитуда колебаний атомов углерода соотносится с таковой для Nb как $(M_{\text{Nb}}/M_{\text{C}})^{1/2}$.

Приведенные соображения позволяют полагать, что приведенная на рисунке 1 дисперсионная характеристика модели (смещение собственных частот решетки Nb вдоль направления 001) отражает суть исследуемого эффекта.

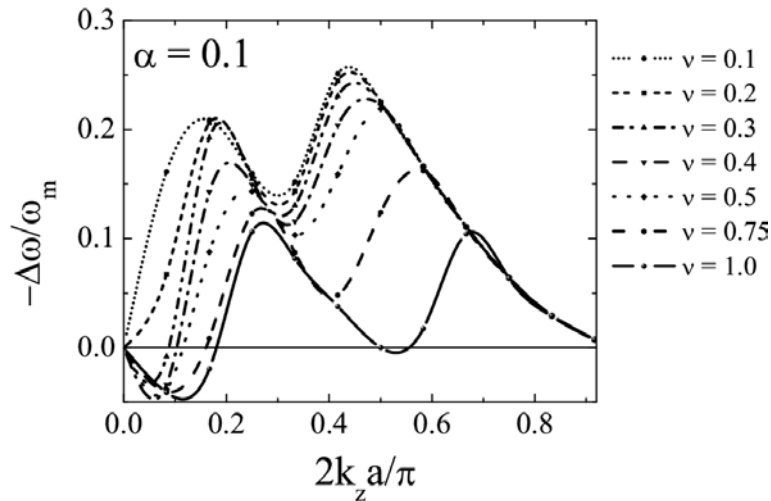


Рисунок 1. Отклонения собственных частот упругой цепочки «тяжелых» атомов с присоединенными легкими атомами, моделирующие взаимодействие «трансляционных» мод G и решетки Nb

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, существуют достаточные основания считать, что эффект смягчения фоннного спектра ниобия в структуре Nb – двулистный графен обусловлен колебаниями плоскостей графена («дыхательными», или «трансляционными», модами).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнялась при финансовой поддержке по проекту ГПНИ «Конвергенция-2025» (2021–2025).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Prischepa, S. L. Phonon softening in nanostructured phonon-mediated superconductors (review) / S. L. Prischepa, V. N. Kushnir // J. Phys.: Condens. Matter. 2023. Vol. 35 P. 313003-1–54.
- [2] McMillan, W. L. Transition temperature of strong-coupled superconductors / W. L. McMillan // Phys. Rev. 1968. Vol. 167, No. 2. P. 331 – 344.
- [3] Superconducting critical temperature and softening of the phonon spectrum in ultrathin Nb and NbN/graphene hybrids / S. L. Prischepa [et al.] // Supercond. Sci. Technol. 2021. Vol. 34. P. 115021-1–15.
- [4] Кушнир, В. Н. Сверхпроводимость слоистых структур / В.Н. Кушнир // БНТУ – Минск, 2010.
- [5] Cocemasov, A. I. Phonons in twisted bilayer graphene / A. I. Cocemasov [et al.] // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88. P. 035428-1–12.

ACOUSTIC PHONONS IN THE SUPERCONDUCTOR – TWO-SHEET GRAPHENE STRUCTURE

V. N. Kushnir^{1,2}, S. L. Prischepa¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
vnkushnir@gmail.com

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: In this paper, the influence of "breathing" modes of the graphene vibration spectrum on the phonon spectrum of niobium in the niobium-graphene structure is estimated. The influence of the dielectric layer formed by niobium oxides is taken into account. The effect of softening the phonon spectrum, which results in an increase in the critical temperature of the niobium film, is substantiated.

Keywords: superconducting film, phonon spectrum.