

Длина пробега плазмонов в двухслойных графеновых структурах

А.Н. Былинкин¹, Д.А. Свинцов¹

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

Отсутствие запрещенной зоны и высокая подвижность носителей заряда делают графен привлекательным материалом для новых приборов оптоэлектроники и плазмоники. Недавно были предложены и разработаны фотодетекторы и оптоэлектронные модуляторы на основе двухслойных графеновых структур, в том числе использующие явление плазмонного резонанса [1-3]. Возможность возбуждения плазмонов в данных структурах и добротность плазмонного резонанса критическим образом зависят от длины пробега плазмонов. Для расчета последней зачастую используется локальная формула Друде для проводимости с завышенным значением времени релаксации; пространственной дисперсией проводимости при этом обычно пренебрегают [3, 4]. В данной работе мы показываем, что учет пространственной дисперсии существенно влияет на спектр и длину пробега плазмонов в структурах на основе двух слоев графена, разделенных диэлектриком толщиной d . Это в особенности важно для акустической плазмонной моды, закон дисперсии которой является линейным, а скорость лишь немного превышает фермиевскую скорость электронов v_0 (Рис. 1а).

Вычисление длины пробега плазмонов проводилось в два этапа. Из совместного решения уравнения Пуассона и закона сохранения электрического заряда были получены две ветви закона дисперсии, зависящие от проводимости графена $\sigma(\omega, q)$, являющейся функцией частоты плазмона ω и его волнового вектора q . Проводимость графена обусловлена внутризонными и межзонными электронными переходами. Выражение для внутризонной части проводимости было получено из кинетического уравнения Больцмана с модельным интегралом столкновений Батнагара – Гросса – Крука, обеспечивающим сохранение числа частиц при столкновениях в неоднородном поле. Время релаксации импульса электрона τ было рассчитано в предположении упругих столкновений с акустическими фононами и примесями (к примеру, при температуре $T = 300$ К и энергии Ферми $E_F = 75$ мэВ $\tau = 9.6 \times 10^{-13}$ с). Выражение для межзонной части проводимости было получено с помощью формулы Кубо [5].

Стоит отметить, что проводимость графена $\sigma(\omega, q)$ имеет корневую особенность при $\omega \rightarrow qv_0$. Для акустической моды, скорость которой при $T = 300$ К, $E_F = 75$ мэВ, $d = 2.5$ нм составляет $1.08v_0$, отказ от пространственной дисперсии приводит к ошибке в вычислении проводимости в 5 раз.

Учет пространственной дисперсии может приводить как к уменьшению, так и к увеличению оценки длины пробега плазмонов (Рис. 1б). В широком диапазоне температур и при энергиях $\hbar\omega < E_F$ акустическая мода имеет меньшую длину пробега по сравнению с оптической. Это можно объяснить тем, что ее закон дисперсии $q = \omega/s$ проходит вблизи области $q > \omega/v_0$, где возможно затухание Ландау. При $T = 77$ К, $E_F = 150$ мэВ, $d = 2.5$ нм длины пробега l_{fp} составляют 1.1 мкм и 5.5 мкм для акустической и оптической моды соответственно.

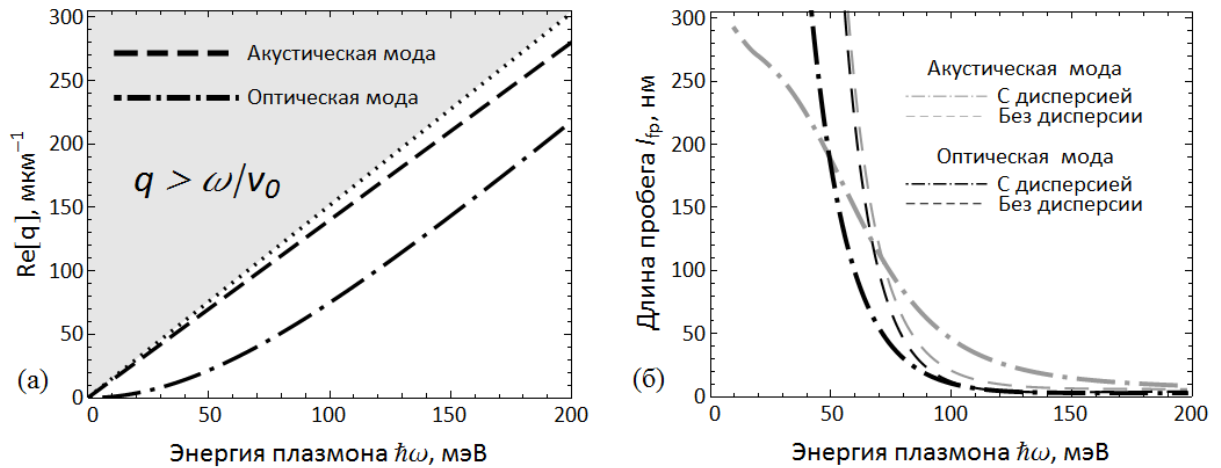


Рис. 1. Закон дисперсии для акустической и оптической моды в двухслойной графеновой структуре (а), зависимость длины свободного пробега l_{fp} от энергии плазмона (б) при температуре $T = 300$ К, энергии Ферми $E_F = 75$ мэВ и толщиной диэлектрика $d = 2.5$ нм

Литература

1. M. Liu, X. Yin, X. Zhang Double-Layer Graphene Optical Modulator. – Nano Lett. – 2012. – 12 (3). – pp 1482–1485
2. C. Liu, Y. Chang, T. B. Norris, Z. Zhong Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature. – Nature Nanotechnology. – 2014. – 9. – pp 273–278
3. V. Ryzhii, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. G. Leiman, S. O. Yurchenko, V. Mitin, M. S. Shur Effect of plasma resonances on dynamic characteristics of double graphene-layer optical modulator. – J. Appl. Phys. – 2012. – 112. – pp 104507
4. H. Iizuka, S. Fan Deep subwavelength plasmonic waveguide switch in double graphene layer structure. – Appl. Phys. Lett. – 2013. – 103. – pp 233107
5. L. A. Falkovsky, A. A. Varlamov Space-time dispersion of graphene conductivity. – Eur. Phys. J. B. – 2007. – 5 (4). – pp 281-284
6. D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii, T. Otsuji Voltage-controlled surface plasmon-polaritons in double graphene layer structures. – J. Appl. Phys. – 2013. – 113. – pp 053701