Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 11, с. 803 – 804

Комментарии к статье "Плазмоны в волноводных структурах из двух слоев графена" (Письма в ЖЭТФ 97(9), 619 (2013))

М. В. Давидович[1)]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

Поступила в редакцию 11 февраля 2019 г.
После переработки 11 февраля 2019 г.
Принята к публикации 10 апреля 2019 г.

DOI: 10.1134/S0370274X19110146

В работе [1] методом сшивания получено дисперсионное уравнение (ДУ) для поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в структуре из двух проводящих поверхностей на сторонах диэлектрической подложки, описываемых двумерной (поверхностной) проводимостью. Авторы рассмотрели скалярную (изотропную) проводимость взвешенного графенового листа, полученную в ряде работ в рамках подходов Кубо–Гринвуда и неравновесных функций Грина. Не касаясь того, что проводимость графена на подложке требует отдельного определения энергетической зонной структуры, проанализируем ряд утверждений из [1]. Будем под ППП понимать волны вдоль поверхности, тем самым включив в рассмотрение быстрые вытекающие ППП. Отметим, что поверхностная проводимость графена анизотропная тензорная, следовательно, авторы [1] используют еще одно приближение. Поскольку использованная в [1] формула для проводимости может менять знак ее мнимой части, авторы делают утверждение: *"Это означает, что при данных частотах в монослое графена могут распространяться TE-поляризованные поверхностные волны [7]. На остальных частотах в однослойном графене будут распространяться только TM-поляризованные поверхностные волны"*. Это утверждение не верное. Затем авторы делают такое утверждение: *"Видно, что мода TM_1 является антисимметричной, а TM_2 – симметричной. Кроме того, существует только одна антисимметричная мода TE_1 для TE-поляризации. Эта мода слабо локализована"*. Это утверждение также не верное: существуют все четыре моды как решения дисперсионных уравнений. Графен – диссипативная структура, поэтому проводимость комплексная: $\sigma = \sigma' - i\sigma''$ (в [1] зависимость $\exp(-i\omega t)$, у нас – $\exp(i\omega t)$). В диссипативных структурах комплексные моды делятся на втекающие и вытекающие [2–5]. В первом случае энергия втекает в структуру из вакуума, а во втором – вытекает из нее в вакуум. Нам удобнее направить ось z поперек структуры и рассматривать движение ППП вдоль x (для перехода к обозначениям [1] необходима замена $x \leftrightarrow z$). Приравнивая нормированную проводимость $\xi/2 = \sigma\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}/2$ слоя взвешенного графена нормированной проводимости E-моды $y_0^e = k_0/k_{0z}$ и H-моды $y_0^h = k_{0z}/k_0$ в вакууме, получаем ДУ ППП: $k_0/\sqrt{k_0 - k_x^2} = \xi/2$ – для E-ППП и $\sqrt{k_0^2 - k_x^2}/k_0 = \xi/2$ – для H-ППП. Здесь двойка соответствует тому, что лист графена относится к обоим полупространствам. Обозначим $n = n' - in'' = k_x/k_0$. Для медленных волн ($n' > 1$) с малой диссипацией $k_{0z} = \sqrt{k_0^2 - k_x^2} = -ik_0\sqrt{n^2 - 1} \approx -ik_0 n'$. Полученные ДУ примут вид: $n = \sqrt{1 - 4/\xi^2}$ – для E-ППП; $n = \sqrt{1 - \xi^2/4}$ – для H-ППП. E-ППП медленный, если $|\xi| \ll 1$ (что обычно имеет место для графена), а проводимость сильно реактивная ($\xi' \ll |\xi''|$). При этом от знака ξ'' существование E-ПП не зависит (вопреки утверждению из [1]). От этого знака зависит прямой ППП (проводимость индуктивная) или обратный (проводимость емкостная) [3–5]. В обратном ППП знаки k_x' и k_x'' разные. Для H-ППП в графене $n \approx 1 + (\xi''^2 - \xi'^2)/8 + i\xi'\xi''/4$, поэтому H-ППП обратный для индуктивной проводимости ($\xi'' > 0$) и прямой – для емкостной ($\xi'' < 0$). Получим теперь аналогичные ДУ для двух проводящих листов на подложке. В силу симметрии рассмотрим случаи электрической стенки и магнитной стенки в центре пластины при $z = 0$. Трансформируя проводимость от стенки к листу графена, имеем $y_{in}^{(e,h)} = y^{(e,h)}[i\tan(\theta)]^s$. Здесь $\theta = k_z d = k_0 d\sqrt{\varepsilon - n^2} = -ik_0 d\sqrt{n^2 - \varepsilon}$ (толщина пластины $2d$), $n = n' - in''$, для электрической стенки $s = -1$, для магнитной $s = 1$. Входная проводимость

[1)]e-mail: davidovichmv@info.sgu.ru

на границе графен-вакуум $y_0^{(e,h)} = y_{in}^{(e,h)} + \xi$, откуда имеет четыре ДУ: $y_0^{(e,h)} = y^{(e,h)}[i\tan(\theta)]^s + \xi$. Все они имеют решения в виде комплексных волн. В подложке $y^e = k_0\varepsilon/k_z$, $y^h = k_z/k_0$, $k_z = \sqrt{k_0^2\varepsilon - k_x^2}$. Аналитически удобно исследовать ППП в предположении, что они медленные $(n'^2 > \varepsilon)$ и недиссипативные. Тогда $\theta = -ik_0d\sqrt{n^2-\varepsilon} = -i\tilde{\theta}$, $\tan(\theta) = -i\tanh(\tilde{\theta})$, а ДУ при $\xi' \ll |\xi''|$ принимают вид $(\sqrt{n^2-1})^p = (\sqrt{n^2-\varepsilon})^p\varepsilon^{(1-p)/2}[\tanh(\tilde{\theta})]^s - (-1)^{(1+p)/2}\xi''$. Здесь $p = -1$ соответствует Е-ППП, $p = 1$ – Н-ППП. Электрическая стенка $s = -1$ соответствует четным по z поперечным (в отношении направления распространения x) компонентам E_z, H_y ($p = -1$, симметричная мода в обычной терминологии [5]) или нечетным H_z, E_y ($p = 1$, антисимметричная мода), а магнитная стенка $s = 1$ – нечетным E_z, H_y ($p = -1$, антисимметричная мода) и четным E_z, H_y ($p = 1$, симметричная мода). Нетрудно получить решения ДУ как при отсутствии диссипации ($\xi' = 0$), так и при ее наличии при малых ($\tanh(\tilde{\theta}) \approx k_0d\sqrt{n^2-\varepsilon}$) и при больших ($\tanh(\tilde{\theta}) \approx 1$) толщинах. Медленным втекающим ППП будет, если $n'^2 > \varepsilon$. В общем случае все ППП комплексные и существуют как решения ДУ всегда. Утверждение [1] *“Отметим, что в металлодиэлектрических структурах существуют поверхностные волны только ТМ-типа”* также не верно – в них существуют все моды [3–5]. В общем случае анизотропного графена все моды гибридные.

1. П. И. Буслаев, И. В. Иорш, И. В. Шадривов, П. А. Белов, Ю. С. Кившарь, Письма в ЖЭТФ **97**(9), 619 (2013).
2. Л. А. Вайнштейн, *Электромагнитные волны*, Радио и связь, М. (1988).
3. М. В. Давидович, Оптика и спектроскопия **126**(3), 360 (2019).
4. М. В. Давидович, Радиотехника и электроника **63**(6), 499 (2018).
5. М. В. Давидович, Квантовая электроника **47**(6), 567 (2017).