

Генерация поверхностных плазмон-поляритонных волн в углеродной нанотрубке

И.О. Золотовский¹, А.С. Кадочкин¹, Ю.С. Дадоев¹, С.Г. Моисеев^{1,2,*},
А.А. Фотиади^{1,3}

¹ Ульяновский государственный университет

² Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

³ Université de Mons, 20 Place du Parc, B7000 Mons, Belgium

*e-mail: serg-moiseev@yandex.ru

DOI:10.31868/RFL2018.40-41

В настоящей работе рассмотрена модель компактного генератора поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), использующего оригинальный механизм усиления посредством прямой передачи энергии от носителей постоянного электрического тока (волны дрейфового тока) к электромагнитной волне (ППП волне). Подобный принцип хорошо известен в СВЧ технике (лампа бегущей волны и др.). Необходимым условием взаимодействия указанных волн является выполнение фазового синхронизма, то есть равенство фазовой скорости ППП волны и дрейфовой скорости носителей заряда. Основные положения предлагаемого подхода изложены в наших работах [1,2], посвященных проблеме усиления ППП в полупроводниковой пленке с графеновым слоем. В настоящей работе данный подход применен к отдельному наноразмерному объекту цилиндрической симметрии – углеродной нанотрубке (УНТ) [3]. Обратная положительная связь в УНТ реализуется за счет рассеяния усиленной ППП волны на периодическом потенциале, созданным профилированной поверхностью подложки.

УНТ длиной L и радиусом a расположена в вакууме (воздухе), разность электрических потенциалов приложена к ее концам. Рассматривается неизлучающая ТМ-мода, электрическое поле которой имеет ненулевую компоненту E_z вдоль оси УНТ (оси координат z). Наличие радиальной составляющей поля необходимо для реализации взаимодействия электрического тока накачки и ППП волны. Распределение поля ППП волны и спектральные характеристики УНТ рассчитаны в рамках гидродинамической модели для электронного газа в УНТ с использованием уравнений Максвелла и стандартных граничных условий для электромагнитного поля [4].

Основное уравнение, описывающее взаимодействие поверхностной электромагнитной волны с дрейфовым током проводимости I_d , задаётся соотношением [5]

$$\frac{dE_z}{dz} + i \frac{\omega}{V_{ph}} E_z = -\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{V_{ph}} \right)^2 K I_d, \quad (1)$$

где $V_{ph} = \omega/\beta$, ω и β – фазовая скорость, частота и постоянная распространения ППП, K – параметр связи, определяющий эффективность взаимодействия тока и формирующейся поверхностной электромагнитной волны. Для описания взаимодействия токовой и ППП волн в условиях сильной связи, когда под влиянием поля электромагнитной волны амплитуда токовой волны становится модулированной по длине УНТ, уравнение (1) необходимо дополнить уравнением

$$\frac{d^2 \Delta I}{dz^2} + 2i \frac{\omega}{V_0} \frac{d \Delta I}{dz} - \frac{1}{V_0^2} (\omega^2 - \omega_q^2) \Delta I = i \frac{\omega}{V_0} \frac{I_{d0}}{2U_0} E_z, \quad (2)$$

где U_0 – приложенная разность потенциалов, вызывающая постоянный ток I_{d0} , V_0 – дрейфовая скорость носителей тока, ω_q – редуцированная плазменная частота, учитывающая влияние геометрических размеров волновода, $\Delta I(x)$ – малое возмущение тока. Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет определить коэффициент усиления ППП, распространяющегося в направлении дрейфа электронов тока накачки.

В приближении неистоимой токовой накачки динамика распространения прямой и обратной поверхностных волн в УНТ с периодическим потенциалом описывается системой уравнений для лазеров с распределенной обратной связью [6]. Для некоторых значений периода модуляции Λ периодического потенциала в УНТ реализуется режим генерации поверхностных волн. Советующее уравнение принимает вид

$$(\alpha/2 - ik_0 \Delta n_{eff}) \operatorname{sh}(SL) - S \operatorname{ch}(SL) = 0, \quad (3)$$

где α – коэффициент усиления ППП, $S^2 = |\kappa|^2 + (\alpha/2 - ik_0 \Delta n_{eff})^2$, $\kappa \approx \chi k_0 n_{eff} / 2$, $\chi \ll 1$ – глубина модуляции волнового числа ППП, $\Delta n_{eff} = n_{eff} - \pi m / \Lambda k_0$ (m – целое число) – отстройка эффективного показателя преломления ППП.

На рис. 1 показан результат расчета частотной зависимости пропускания УНТ радиуса $a = 5$ нм с дрейфовой скоростью электронов проводимости $5 \cdot 10^7$ см/с. Можно видеть, что вблизи частот $1.24 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ и $1.55 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ выполняется условие генерации ППП в УНТ.

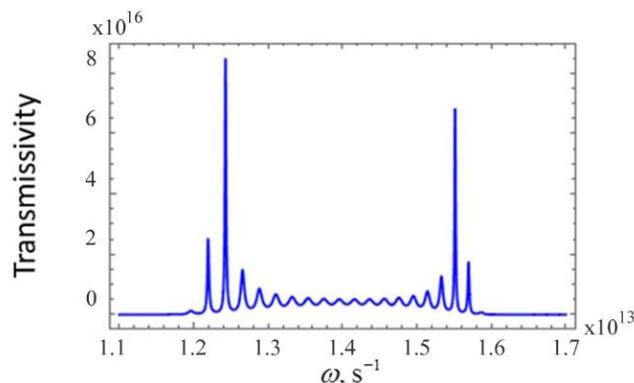


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента пропускания УНТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты 3.7614.2017/9.10, 3.5698.2017/9.10, 3.3889.2017/4.6), Российского научного фонда (проект 18-12-00457) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-02-01382).

Литература

1. Y. S. Dadoenkova, S. G. Moiseev, A. S. Abramov, A. S. Kadochkin, A. A. Fotiadi, I. O. Zolotovskii, *Annalen der Physik (Berlin)* **529**, 1700037 (2017)
2. I. O. Zolotovskii, Y. S. Dadoenkova, S. G. Moiseev, A. S. Kadochkin, V. V. Svetukhin, and A. A. Fotiadi, *Phys. Rev. A* **97**, 053828 (2018)
3. A. S. Kadochkin, S. G. Moiseev, Y. S. Dadoenkova, V. V. Svetukhin, I. O. Zolotovskii, *Optics Express* **25**, 27165-27171 (2017)
4. A. Moradi, *Physics of Plasmas* **21**, 032106 (2014)
5. Д. И. Трубецков, А.Е. Храмов. *Лекции по СВЧ электронике для физиков. Том I.* (М: Физматлит, 2003)
6. A. Yariv, P. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (Wiley: New York, 1984).