

# Генерация поверхностных плазмон-поляритонов в углеродной нанотрубке с токовой накачкой

**И.О. Золотовский<sup>1,2</sup>, С.Г. Моисеев<sup>1,2,3,\*</sup>, А.С. Кадочкин<sup>1,2</sup>,  
Ю.С. Дадоев<sup>1,3</sup>, Ф.Ф.Л. Бентивенья<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Ульяновск, Россия

<sup>4</sup>Lab-STICC, ENIB, Brest, France

\*E-mail: [moiseev@ulsu.ru](mailto:moiseev@ulsu.ru)

DOI: 10.31868/RFL2020.213-214

В настоящей работе предложена модель наноразмерного генератора поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) на основе одностенной углеродной нанотрубки (УНТ), в которой реализован механизм усиления посредством прямой передачи энергии от постоянного электрического тока накачки, протекающего по УНТ, к электромагнитной волне (волне ППП). Подобный принцип хорошо известен в СВЧ технике (лампа бегущей волны и др.) [1]. Эффективность взаимодействия тока и плазмонной волны высока при выполнении условия фазового синхронизма, то есть когда фазовая скорость ППП волны и дрейфовая скорость носителей заряда примерно одинаковы. Основные положения предлагаемой схемы усиления ППП в изолированной УНТ, находящейся в воздухе (вакууме) вдали от границ раздела сред, изложены в нашей работе [2]. В настоящей работе определены условия усиления в более реалистичных условиях – при наличии подстилающей среды. Обратная положительная связь в УНТ реализуется за счет рассеяния усиленной ППП волны на периодическом потенциале, связанным с пространственной модуляцией диэлектрической проницаемости подложки.

Наличие подложки оказывает существенное влияние на эффективный показатель преломления ППП в УНТ. На рис. 1(а) представлены дисперсионные зависимости ППП в одностенной УНТ для различных значений показателя преломления подстилающей среды (поглощением в подстилающей среде пренебрегается). Видно, что постоянная распространения и коэффициент поглощения возрастают с увеличением частоты ППП и показателя преломления подложки. На рис. 1(б) показано распределение поля вблизи УНТ на подложке при различных значениях показателя преломления последней. Можно видеть, что с увеличением показателя преломления степень локализации поля увеличивается со смещением максимума к поверхности подложки. Эти свойства ППП позволяют контролировать эффективный показатель преломления ППП в УНТ путем модулирования оптических свойств подложки.

Расчеты показывают, что согласование дрейфовой скорости носителей тока накачки (около  $10^6$  м/с [3]) и фазовой скорости ППП упрощается в структуре с подстилающей средой, имеющей более высокий показатель преломления. Для кремниевой подложки условие усиления ППП за счет энергии носителей тока накачки реализуется в полосе частот вблизи частоты  $2.4 \times 10^{14}$  с<sup>-1</sup>. На частоте  $3.5 \times 10^{14}$  с<sup>-1</sup> эффективный коэффициент усиления ППП (превышение усиления над материальными потерями) достигает значения  $2 \times 10^8$  м<sup>-1</sup>, что значительно превышает величину коэффициента потерь  $0.6 \times 10^8$  м<sup>-1</sup>.

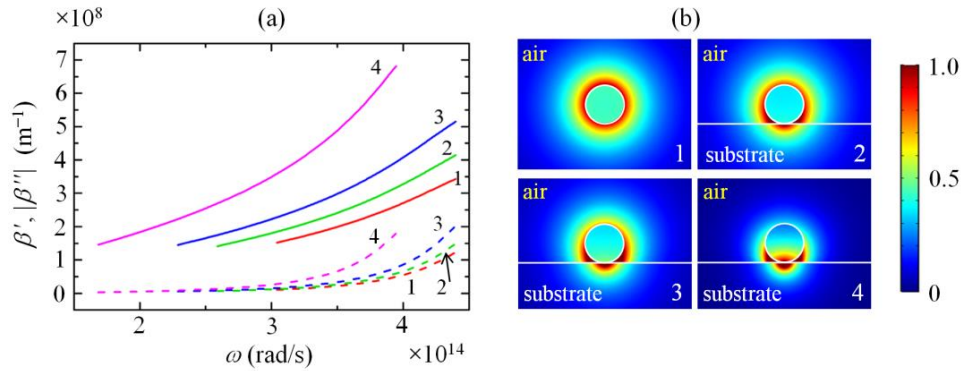


Рис. 1. (а) Частотная зависимость постоянной распространения  $\beta'$  (сплошные линии) и коэффициента материальных потерь  $|\beta''|$  (пунктирные линии) ППП в УНТ на подложке с показателем преломления: (1)  $n = 1$  (воздух), (2)  $n = 1.46$  ( $\text{SiO}_2$ ), (3)  $n = 1.99$  ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), (4)  $n = 3.4$  (Si). (б) Распределение модуля напряжённости электрического поля вблизи УНТ на частоте  $3.7 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$ . Параметры УНТ: диаметр 10 нм, концентрация свободных носителей заряда  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

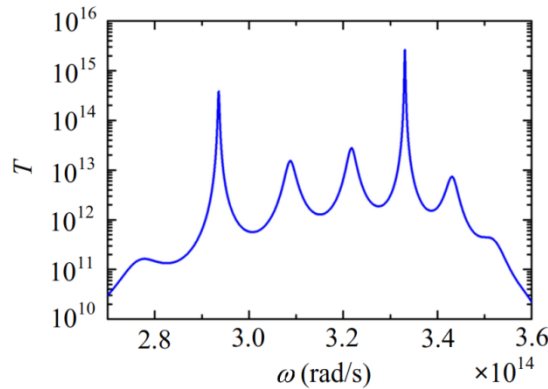


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента пропускания УНТ для периода модуляции показателя преломления подложки 10 нм на длине 100 нм.

В приближении неистоимой токовой накачки динамика распространения прямой и обратной ППП волн в УНТ с периодическим потенциалом описывается системой уравнений для лазеров с распределенной обратной связью [4], записанной с учетом усиления ППП в направлении дрейфа носителей тока накачки. Расчетные значения коэффициента пропускания УНТ представлены на рис. 2. Наиболее интенсивные плазмонные моды наблюдаются вблизи частот  $2.92 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$  и  $3.32 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ . Высокие значения коэффициента усиления ( $\sim 10^8 \text{ м}^{-1}$ ) обеспечивают резонансное усиление ППП даже при небольшой амплитуде модуляции показателя преломления подстилающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты 0004-2019-0002, 0830-2020-0009, 075-00629-19-00), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-29-19101, 19-42-730010).

## Литература

- [1] Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. *Лекции по СВЧ электронике для физиков. Том 1.* (М: Физматлит, 2003)
- [2] A.S. Kadochkin, S. G. Moiseev et al, *Optics Express* **25**, 27165-27171 (2017)
- [3] K. Liu, J. Deslippe et al, *Nat. Nanotechnol.* **7** 325–329 (2012)
- [4] A. Yariv, P. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (Wiley: New York, 1984)