

# Возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов в двуслойных углеродных нанотрубках с помощью электронных пучков

И.О. Золотовский<sup>1</sup>, А.С. Кадочкин<sup>1</sup>, С.Г. Моисеев<sup>1,2\*</sup>, А.С. Абрамов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия

\* E-mail: moiseev@ulsu.ru

DOI:10.31868/RFL.2022.134-135

В настоящей работе с помощью компьютерного моделирования исследованы моды поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в массиве двустенных углеродных нанотрубок (УНТ) и определены условия их возбуждения с помощью электронных пучков. Обнаружено, что в двустенных УНТ могут существовать ППП моды с большим (величиной свыше 100) эффективным показателем преломления при относительно небольшом коэффициенте экстинкции (длина пробега ППП порядка одного микрона) в терагерцевом диапазоне частот электромагнитного спектра. Столь высокое значение коэффициента замедления электромагнитных волн не наблюдается в одностенных УНТ и является свойством многостенных УНТ.

Моделируемая структура представлена на рис. 1. Упорядоченный массив двустенных УНТ, размещенный в воздухе (вакууме), облучается электронными пучками, ориентированными вдоль оси УНТ. УНТ рассматривается в качестве комплексного плазмонного волновода, образованного двумя коаксиальными цилиндрическими проводящими поверхностями. Моделирование плазмонных свойств УНТ проведено с использованием аналитических соотношений для проводимости графеновых монослоев [1].

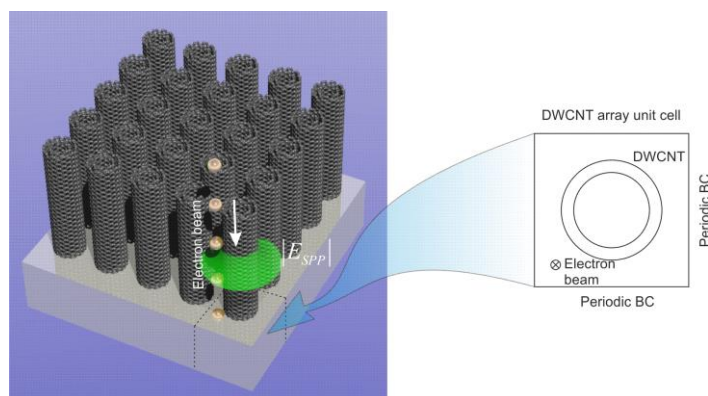


Рис. 1. Схема возбуждения ППП в массиве УНТ электронными пучками. Расположение электронного пучка относительно УНТ показано схематично на вставке. Параметры массива УНТ: внутренний диаметр 9.66 нм, внешний диаметр 10 нм, период структуры 30 нм. Массив УНТ размещен в воздухе (вакууме).

В двустенных УНТ реализуется 2 типа мод: локализованные преимущественно между стенками или вблизи (внутри и снаружи) УНТ. Первый тип мод в диапазоне частот до величины порядка 50 ТГц характеризуется низкой (с коэффициентом замедления  $10^2$ – $10^3$ ) фазовой скоростью поверхностной электромагнитной волны. Такие плазмонные моды слабо чувствуют наличие соседних УНТ (вследствие экранирования электрического поля проводящими стенками УНТ) и

имеют длину пробега порядка одного микрона. Это делает возможным создание замедляющих плазмонных систем на основе плотных массивов многостенных УНТ с высокой эффективностью конверсии энергии накачки в энергию поверхностных плазмонных волн [2].

Рассчитанные спектры ППП мод и потерь энергии электронных пучков в массиве УНТ представлены на рис. 2. Точки пересечения прямых 3 и 4, соответствующих двум различным скоростям электронного пучка, с дисперсионными кривыми ППП соответствуют выполнению условия фазового синхронизма между плазмонной волной и электронами пучков [3]. При выполнении данного условия в двустенной УНТ возбуждается поверхностный плазмон. Возбуждение ППП сопровождается возрастанием потерь энергии электронных пучков (максимумы на кривых 1 и 2).

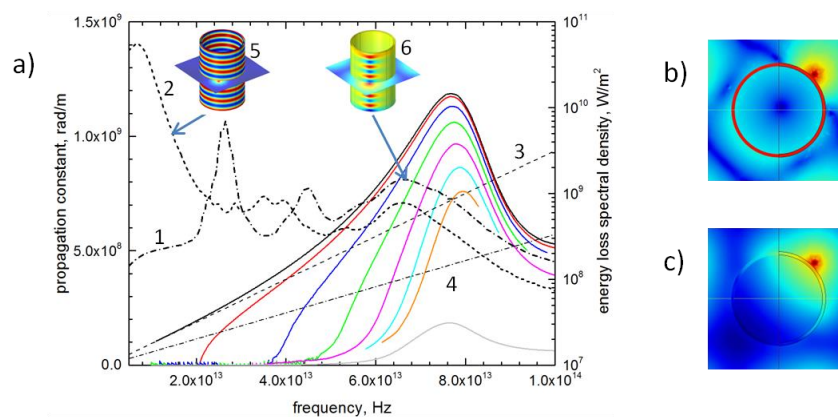


Рис. 2. (а) Спектры постоянной распространения ППП (цветные кривые) и потерь энергии электронных пучков (кривые 1 и 2). (б), (с) Распределение электрического поля ППП по поперечному сечению УНТ на частотах 15 ТГц и 65 ТГц соответственно. Линии 3 и 4 соответствуют электронам со скоростями  $0.67 \cdot 10^6$  м/с и  $10^6$  м/с. На вставках 5 и 6 показано распределение электрического поля ППП в УНТ на частотах 15 ТГц и 65 ТГц соответственно.

Возможность реализации фазового синхронизма одновременно в большом массиве многостенных УНТ позволяет создать генераторы ИК и ТГц излучения по типу ламп бегущей волны с прямой накачкой инжектируемыми или дрейфовыми токами. При этом возможно использование относительно «медленных» нерелятивистских электронных пучков (со скоростью электронов меньше  $10^6$  м/с). Исследованная структура может применяться в роли замедляющей системы, которая в отличие от дифракционных решеток не имеет размерных (в поперечном направлении) ограничений, поскольку взаимодействие происходит по всей площади массива УНТ. Это позволит масштабировать токи накачки и, как следствие, обеспечивать высокие интегральные мощности генерируемых излучений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (075-15-2021-581), Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-42-730010).

## Литература

- [1] P. Yu, V. I. Fesenko, V. R. Tuz, *Nanophotonics* **7**, 925–934 (2018)
- [2] A.S. Kadochkin, S. G. Moiseev, Y.S. Dadoenkova, et al, *Journal of Optics*, **22** (12), 125002 (2020)
- [3] A.S. Kadochkin, S.G. Moiseev, V.V. Svetukhin, et al, *Annalen der Physik*, **534** (4), 2100438 (2022)