

# МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКЕ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

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

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

<sup>2</sup>УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Ульяновск, Россия

\*E-mail: serg-moiseev@yandex.ru

Высокая степень локализации поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) позволяет использовать потенциал современной фотоники для ее интеграции с электронными компонентами на субмикронных масштабах. Это в свою очередь открывает путь к созданию сверхбыстрых и энергоэффективных устройств обработки информации [1]. Переход от оптических систем к плазмонным позволит значительно повысить частоты перспективных задающих генераторов на основе интегральных микро(нано)схем. В настоящей работе предложена модель плазмонной структуры, способной выступить в роли генератора ультракоротких импульсов с тактовой частотой свыше 1 ТГц и послужить основой для разработки вычислительных систем нового поколения. Принцип работы предлагаемого высокочастотного плазмонного генератора основан на модуляционной неустойчивости (МН) - фундаментальном эффекте, приводящем к росту в нелинейной физической системе малых возмущений [2].

Генератор представляет собой слоистую структуру, включающую тонкую серебряную пленку переменной толщины, разделяющую две полубесконечные среды ( $\text{SiO}_2$ ). Диэлектрическая проницаемость пленки  $\varepsilon_3$  характеризуется отрицательными значениями действительной части, в то время как диэлектрические проницаемости  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  покровной и подстилающей сред принимают положительные действительные значения. Такая структура поддерживает локализованную на пленке ППП, дисперсионные характеристики которой определяются как характеристиками материальных сред, так и локальной толщиной пленки. Рассматриваемая задача аналогична изучению МН излучения, распространяющегося в световоде с изменяющимися по длине параметрами.

Моделирование процесса распространения модулированной ППП волны в пленке с линейно увеличивающейся толщиной  $h$  проведено при помощи обобщенного нелинейного уравнения Шредингера

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i\gamma \left( |A|^2 - \tau_R \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right) A = - \left( \frac{1}{2L_{spp}} + \frac{1}{2S_m} \frac{\partial S_m}{\partial x} \right) A \quad (1)$$

и дисперсионного соотношения [3]

$$\exp(-2q_3 h) = \frac{q_3 \varepsilon_1 + q_1 \varepsilon_3}{q_3 \varepsilon_1 - q_1 \varepsilon_3} \frac{q_3 \varepsilon_2 + q_2 \varepsilon_3}{q_3 \varepsilon_2 - q_2 \varepsilon_3}. \quad (2)$$

В этих соотношениях  $|A|^2 = I$  – интенсивность волны,  $\beta_k = \partial^k \beta / \partial \omega^k$  – дисперсионный параметр  $k$ -го порядка,  $\gamma$  – параметр кубической (керровской) нелинейности,  $S_m$  – площадь моды плазмонного волновода,  $L_{spp}$  – длина пробега поверхностного плазмон-поляритона,  $q_k = \sqrt{\beta^2 - (\omega/c)^2 \varepsilon_k}$  – коэффициент затухания ППП в поперечном направлении, параметр  $\tau_R$  характеризует интенсивность вынужденного комбинационного рассеяния, выражающийся в том, что для ультракоротких импульсов со спектральной шириной в несколько терагерц возникает перекачка энергии от высокочастотных спектральных компонент к низкочастотным.

В качестве начальных условий рассмотрена модулированная ППП волна вида  $A(t, 0) = \sqrt{I_0} (0.99 + 0.01 \cdot \cos(2\pi\nu_m t))$ , где  $I_0 = 10^{-2}$  Вт·мкм<sup>-2</sup> – интенсивность в начальный момент времени,  $\nu_m = (\omega_0 - \omega_s)/2\pi$  – частота модуляции, а  $\omega_s$  – частота модулирующей компоненты. Модуляция частот может быть получена искусственно при использовании двух источников с близкими длинами волн (индуцированная МН), либо присутствовать в виде начальной шумовой компоненты (спонтанная МН).

Зависимость коэффициента модуляционного усиления плазмонной волны от частоты модуляции для различных значений толщины серебряной пленки представлена на рис. 1. Величина модуляционного усиления достаточно велика, чтобы обеспечить распад модулированной волны на отдельные импульсы на длине распространения порядка 100 нанометров. Для пленок толщиной 9 нм максимальное значение модуляционного усиления на два порядка выше, чем при толщине 20 нм. С увеличением толщины пленки частотный диапазон МН уширяется.

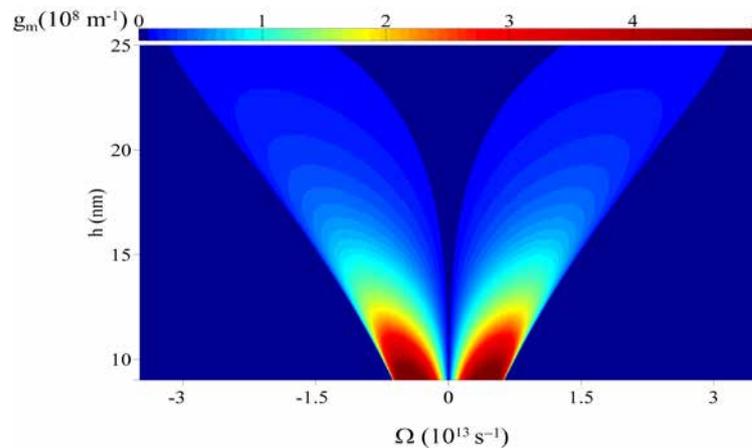


Рис. 1. Зависимость модуляционного усиления ППП от толщины пленки

На рис. 2 представлена рассчитанная с помощью уравнений (1) и (2) эволюция интенсивности ППП с несущей частотой  $\omega_0 = 5.8891 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$  и частотой модуляции  $\nu_m = 0.44 \text{ ТГц}$  в серебряной пленке линейно возрастающей толщины с перепадом 6 нм на 100 нм длины. Как можно видеть из представленных зависимостей, интенсивность ППП волны в такой пленке испытывает модуляцию в пространстве и времени с формированием фемтосекундных импульсов с терагерцевой частотой следования, при этом пиковые значения интенсивности могут превышать интенсивность первоначальной волны в десятки раз. Трансформация ППП развивается на относительно коротких расстояниях, поэтому затухание ППП не оказывает существенного влияния на эффект МН.

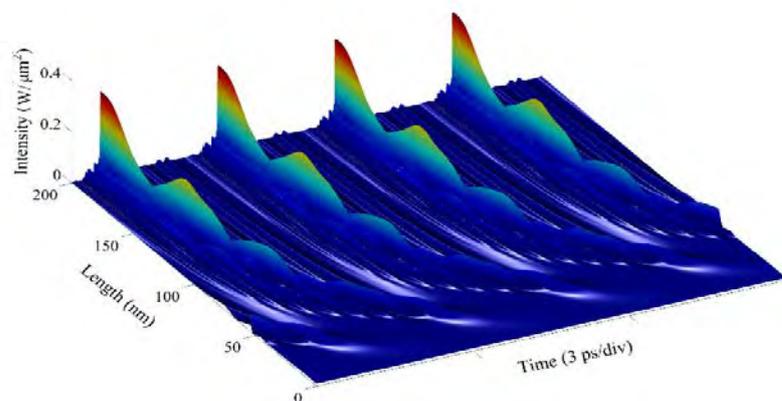


Рис. 2. Эволюция интенсивности ППП в пленке с линейно возрастающей толщиной

Предложенная концепция генерации плазмон-поляритонных импульсов является перспективной для разработки миниатюрных генераторов высокочастотных ( $\sim 1 \text{ ТГц}$ ) последовательностей ультракоротких ( $\sim 100 \text{ фс}$ ) импульсов и может найти применение в большом числе задач современной оптоэлектроники и наноплазмоники, среди которых разработка задающих тактовых генераторов, генераторов гребенчатого спектра и др.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект 075-15-2021-581) и Российским Фондом Фундаментальных Исследований (проекты № 18-29-19101, № 19-42-730010).

## Литература

1. Zia R. et al, *Materials Today* **9**, 20-27 (2006)
2. Scott A.C., *The Nonlinear Universe: Chaos, Emergence, Life*, Springer Science & Business Media (2007), 364 p.
3. Economou E.N., *Physical review*, **182**, 539 (1969)