

Спазер на основе слоистой цилиндрической нанопроволоки*

Т.М. Чмерева¹, М.Г. Кучеренко¹, Ф.Ю. Мушин¹

¹ *Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия*

Теоретически исследован спазер с двухуровневой активной средой, который генерирует одномерные осесимметричные поверхностные плазмоны в цилиндрической нанопроволоке с диэлектрическим сердечником и плазмонной оболочкой. В рамках квантовой и «toy model» рассчитаны зависимости частот спазирования и порогового значения инверсии населенностей от волнового числа плазмона. Обе модели приводят к схожим результатам и демонстрируют, что наименьший порог генерации имеет место при совпадении частоты спазирования с частотой перехода в квантовом излучателе, причем в квантовой модели эти частоты совпадают и с частотой плазмона. Динамика спазера проанализирована в резонансных условиях и показано, что с ростом толщины плазмонной оболочки нанопроволоки время выхода в стационарный режим увеличивается, при этом инверсия населенностей увеличивается, а число генерируемых плазмонов уменьшается.

Ключевые слова: слоистая нанопроволока, одномерный плазмон, квантовый излучатель, спазер, двухуровневая система.

Введение

Развитие плазмоники открыло широкие перспективы разработки новых и усовершенствования уже созданных оптоэлектронных устройств. Большинство практических приложений плазмоники основано на взаимодействии квантовых излучателей, расположенных вблизи металлических поверхностей, с электромагнитным полем поверхностных или локализованных плазмонов. Например, в основе принципов работы различных сенсоров и датчиков лежит изменение интенсивности люминесценции квантовых излучателей в присутствии проводящих тел [1–3]. В последние годы объектом повышенного внимания исследователей стали одномерные плазмонные наноструктуры, так как их достаточно просто комбинировать с другими структурными элементами оптоэлектронных устройств без нарушения симметрии и искажения исходных оптических свойств этих устройств [4]. Плазмонные волноводы являются перспективными для передачи сигналов в плотно интегрированных оптических схемах. Однако омические потери в металле велики, поэтому поверхностные плазмоны имеют малую длину распространения, что ограничивает возможности получения волноводов с необходимыми характеристиками. Одним из способов компенсации омических потерь является внедрение квантовых излучателей в сердечник волновода, что превращает его в усиливающую среду [5]. О создании на основе бездефектной серебряной нанопроволоки оптической антенны, работающей во всем видимом диапазоне, которая будет востребована в наноптической спектроскопии, при построении изображений с высоким разрешением и в нелинейном преобразовании сигналов, сообщается в [6]. Также дистанционное возбуждение молекул можно производить посредством поверхностных плазмонов нанопроволоки, что позволит, например, осуществлять управление поверхностными каталитическими реакциями [7].

Характерной чертой современных технологий является миниатюризация функциональных устройств: сенсоров, источников света, фотоэлементов и т.п. К настоящему времени проведена большая исследовательская работа, направленная на создание сверхмалых лазеров. Одним из путей уменьшения размеров лазеров является использование плазмонных резонаторов вместо фотонных [8]. Плазмонными резонаторами могут служить проводящие объекты различной конфигурации: наночастицы, нанопроволоки, пленки нанометровой толщины, канавки на плоской поверхности металла, слои графена и др. [9–11]. Впервые об экспериментальной реализации плазмонного нанолазера сообщалось в работах [12, 13]. Как подчеркивается в [8], плазмонный нанолазер может работать в режиме «темных» мод, т.е. не излучать фотоны, а быть источником сильного ближнего электромагнитного поля, которое возникает, когда безызлучательная передача энергии электронного возбуждения от квантового излучателя усиливающей среды к плазмонному резонатору сопровождается рождением поверхностных плазмонов. Изначально для плазмонного нанолазера, резонатор которого является наноразмерным в трех измерениях, был предложен термин «спазер»

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта № 075-15-2024-550.