

Волоконные плазмонные сенсоры для биомедицинских применений*Д.К. Тажетдинова¹, К.А. Томышев^{1,2}, О.В. Ботов¹*¹ Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Волоконная оптика открывает широкие возможности по созданию новых мобильных диагностических комплексов количественного иммунного экспресс-анализа. Для работы таких комплексов могут применяться волоконные сенсоры, работа которых основана на использовании вытекающих (эванесцентных) оптических мод волоконного световода. Особенно эффективной и наиболее перспективной разработкой в области биосенсоров данного типа являются датчики, основанные на эффекте поверхностного плазмонного резонанса.

В данной работе рассматривается волоконный плазмонный датчик на основе внутриволоконной брэгговской решетки с наклонными штрихами. Такая решетка обеспечивает эффективное возбуждение дискретного набора оболочечных мод. Вытекающая электромагнитная энергия оболочечных мод, в свою очередь, возбуждает плазмон-поляритон на поверхности световода, покрытого тонким (порядка 35-40 нм) слоем золота. Скорость распространения плазмона вдоль поверхности металла зависит от диэлектрической проницаемости окружающей среды. Очевидно, что эффективная перекачка энергии световой волны обеспечивается в случае, когда ее фазовая скорость совпадает с фазовой скоростью плазмона на внешней поверхности металла. Резонанс находит отражение на спектре пропускания брэгговского датчика в виде спектральной «перетяжки» (рис.1). Изменение внешних условий, таких как показатель преломления окружающей среды, наличие адсорбированных на поверхности сенсора частиц, приводит к изменению спектрального положения «перетяжки» плазмонного резонанса, которое может быть зафиксировано спектральной аппаратурой.

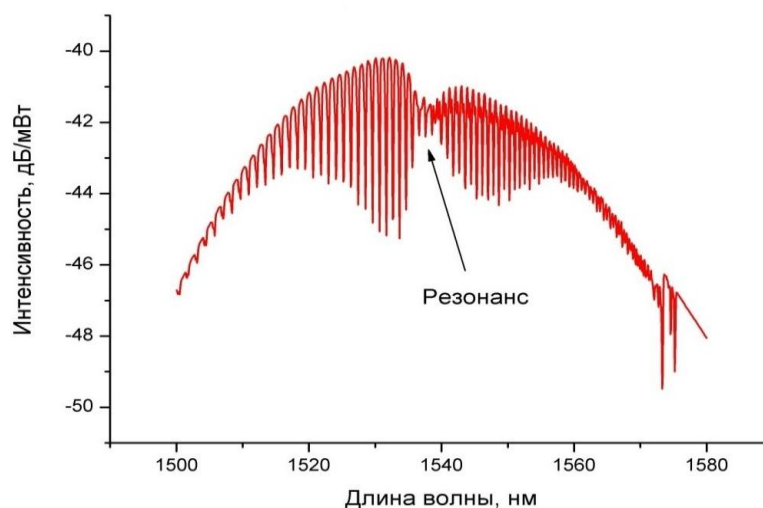


Рис. 1. Спектр пропускания волоконного плазмонного сенсора

При модификации сенсора под задачи иммунного анализа для обнаружения специфических белков-маркеров на поверхность металла наносят соответствующие маркерам антитела или аптамеры, обеспечивающие высокую селективность при захвате искомым частиц из раствора. При этом остальные белковые соединения практически не осаждаются на поверхность датчика, тем самым, не влияя на результат измерений. По скорости и величине изменения спектрального положения резонанса-«перетяжки» можно произвести количественную оценку содержания специфических белков в исследуемом растворе.

Нами были изготовлены макеты волоконных плазмонных сенсоров. Изготовление производилось в несколько этапов. На первом этапе производилась запись брэгговской решетки с наклонными штрихами (TFBG) в стандартном волоконном световоде (Corning SMF-28) с помощью излучения ArF-эксимерного лазера с длиной волны генерации 193 нм. Структура решетки обеспечивалась с помощью фазовой маски с собственным периодом 1088 нм. Длина решетки составила 1 см. Для повышения эффективности записи решетки волокно было предварительно насыщено молекулярным водородом при давлении в 8 МПа в течение 3 суток при температуре 90 градусов.

На втором этапе боковая поверхность световода с записанной решеткой покрывалась тонким слоем золота, толщиной 35 нм. Покрытие датчика слоем золота осуществлялось методом термического испарения металла в вакуумной камере. Равномерность нанесения металла обеспечивалась вращением световода вдоль своей оси над термическим испарителем.

Полученные макеты датчиков были протестированы в различных растворах на предмет чувствительности и стабильности измерений. Оценка чувствительности макетов датчика проводилась в водном растворе изопропанола. В 5 мл воды на каждом этапе эксперимента добавлялось по 5 мкл изопропилового спирта, что обеспечивало изменение показателя преломления раствора на уровне примерно $4.4 \cdot 10^{-5}$. Полученные спектры обрабатывались с помощью специально разработанного алгоритма, реализованного в программном обеспечении. Результат обработки представлен на рис.2 в виде зависимости спектрального положения плазмонного резонанса от показателя преломления раствора.

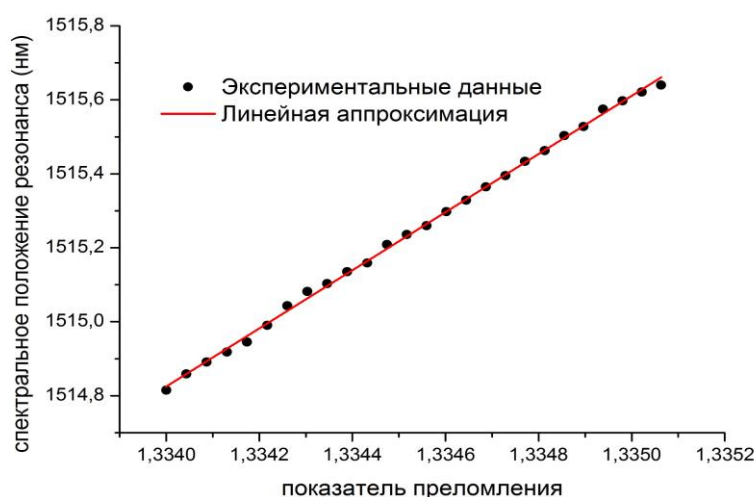


Рис. 2. Зависимость спектрального положения плазмонного резонанса от показателя преломления раствора

По результатам эксперимента было показано, что в стационарных лабораторных условиях датчик, изготовленный по подобной технологии при автоматической обработке данных обеспечивает чувствительность к изменению показателя преломления в водных растворах не хуже $3 \cdot 10^{-5}$. Однако, следует отметить, что данный параметр может быть существенно улучшен как благодаря улучшению алгоритма обработки полученных спектров, так и оптимизации технологии создания самого датчика.

Литература

1. Chen C., Caucheteur C., Voisin V., Albert J., Berini P. Long-range surface plasmons on gold-coated single-mode fibers // J. Opt. Soc. Am. B. 2014. V. 31, № 10. P. 2354-2362.
2. Hu H.-F., Deng Z.-Q., Zhao Y., Li J., Wang Q. Sensing properties of long period fiber grating coated by silver film // IEEE Photonics Technology Letters. 2015. V. 27, № 1. P. 46-49.
3. Caucheteur C., Guo T., Albert J. Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection // Analytical Bioanalytical Chemistry. 2015. № 407 (14). P. 3883-3897.
4. Albert J., Lepinay S., Caucheteur C., DeRosa M.C. High resolution grating-assisted surface plasmon resonance fiber optic aptasensor // Methods. 2013. № 63. P. 239-254.