

# ВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С НАКЛОННЫМИ ШТРИХАМИ

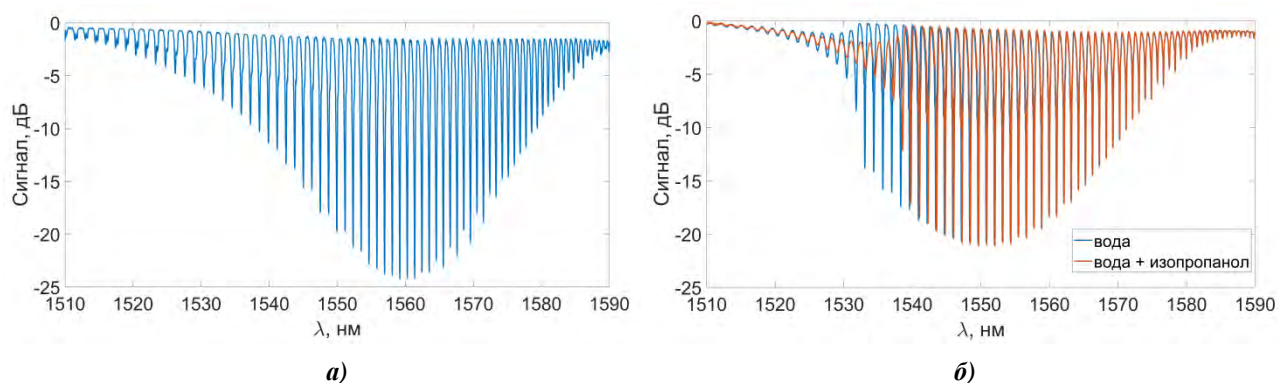
**Бутов О.В. \*, Томышев К.А.**

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва*

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

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16006

Волоконно-оптические датчики различных физических величин на основе брэгговских решеток в настоящее время уже получили широкое распространение и активно применяются в различных областях промышленности, для решения целого ряда инженерных задач. Общий принцип работы таких датчиков основан на изменении брэгговской длины волны под действием внешних воздействий. Однако спектр возможных конструкций сенсорных элементов не ограничивается классическими брэгговскими структурами. Особое место в линейке подобных устройств занимают брэгговские решетки с наклонными штрихами. Благодаря наклонным штрихам в световоде на такой решетке возбуждается дискретный набор оболочечных мод, который проявляется на спектре пропускания в виде череды спектральных провалов в широком диапазоне длин волн (рис.1а). Поскольку оболочечные моды излучения взаимодействуют с внешней поверхностью световода, данное свойство может быть использовано в сенсорных системах для измерения физических параметров внешней среды. Одним из возможных применений таких решеток в качестве сенсора является датчик показателя преломления, принцип действия которого основан на частичном вытекании некоторых оболочечных мод в зависимости от величины показателя преломления внешней среды, в которую погружен сенсор. Данный эффект находит отражения в спектре пропускания сенсора (рис.1б).



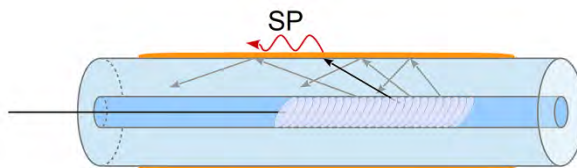
**Рис. 1. Спектр пропускания наклонной брэгговской решетки вне измеряемой среды (а), и погруженной в жидкости с различным показателем преломления (б)**

Отдельный интерес брэгговские решетки с наклонными штрихами представляют в качестве основы перспективных плазмонных сенсоров, т.е. сенсоров, работающих на эффекте поверхностного плазмонного резонанса [1]. Общий принцип работы таких систем основан на высокой степени зависимости дисперсионного соотношения поверхностных плазмонов от показателя преломления внешней среды, на границе с которой этот плазмон возбуждается. Любые изменения вблизи поверхности металла, будь то изменения в составе окружающей среды или модификация поверхности самого сенсора вследствие его взаимодействия с окружающей средой, немедленно найдут отражение в значении длины волны, на которой наблюдается плазмонный резонанс.

В классических, планарных схемах Кречмана [2] и Отто [3] поверхностные плазмоны возбуждаются оптическим излучением, падающим под некоторым углом к поверхности металла, при этом измеряется интенсивность отраженного сигнала в зависимости от угла падения. Минимум этой зависимости и определяет угол, соответствующий поверхностному плазмонному резонансу. При изменении показателя преломления внешней среды меняется и характерный угол, что позволяет с высокой точностью отслеживать изменения в ближайшем окружении плазмонного сенсора.

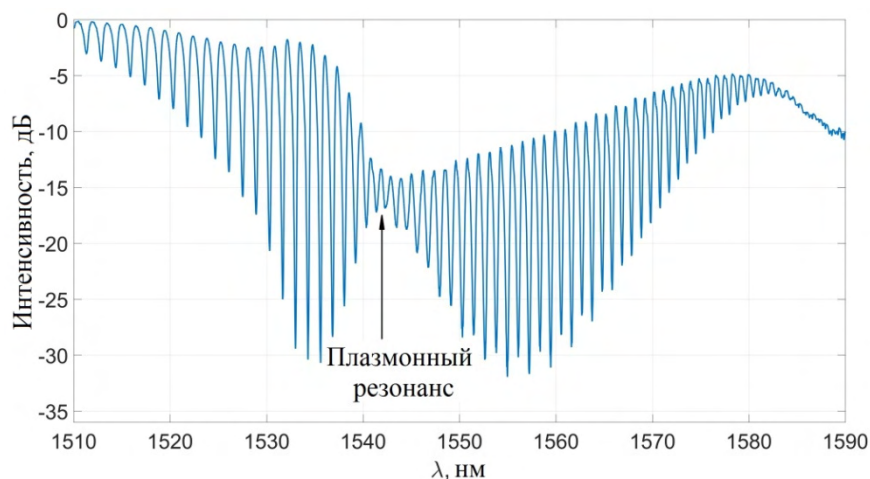
Волоконная оптика, по сравнению с планарными структурами, предоставляет целый ряд преимуществ, таких как мобильность, компактность, удобство работы с микрофлюидными системами, на их основе можно создавать перспективные высокочувствительные волоконные плазмонные сенсоры, в том числе и для биомедицинских применений. Для создания условий

генерации поверхностных плазмонов в световоде необходимо вывести часть оптического излучения к поверхности волокна, что и обеспечивает брэгговская решетка с наклонными штрихами [4-6]. При нанесении на цилиндрическую поверхность волокна слоя золота толщиной порядка 40 нм создаются условия для возникновения поверхностного плазмонного резонанса (рис.2).



**Рис. 2. Возбуждение плазмонного резонанса с помощью наклонной брэгговской решетки**

Как и в случае с классической схемой Кречманна, резонансное возбуждение происходит при совпадении проекции волнового вектора некоторых мод оболочки на боковую поверхность волокна с волновым вектором поверхностного плазмона. В таком случае энергия эффективно передается от мод оболочки поверхностному плазмону. На спектре пропускания наклонной решетки подобный процесс отражается в виде характерной “перетяжки” – сужения картины пиков и провалов (рис.3). При изменении показателя преломления внешней среды изменяется и положение “перетяжки” на спектре, что позволяет проводить измерения с помощью подобного сенсора.



**Рис. 3. Характерный спектр пропускания волоконного плазмонного сенсора на базе наклонной брэгговской решетки**

На физическом уровне такой сенсор реагирует именно на изменения в показателе преломления внешней среды в непосредственной близости от цилиндрической поверхности волокна (на расстоянии порядка нескольких микрон). Однако, на практике такой сенсор может использоваться для определения изменений в составе, например, биологических растворов, таких как кровь или плазма. Адгезия частиц к поверхности сенсора значительно изменяет показатель преломления ближайшего окружения, также приводя к изменению спектра пропускания датчика.

Особый интерес представляют сенсоры, позволяющие определить концентрацию одного конкретного белка в многосоставном биологическом растворе. Для этого металлическая поверхность может быть функционализирована антителами, обеспечивающими специфичность связывания для детектируемого белка. Развитие подобных сенсоров и систем на их основе является крайне актуальной задачей, особенно для биомедицинских применений. На основе волоконных плазмонных сенсоров, в рамках набирающей обороты концепции «лаборатория на чипе», могут быть созданы перспективные портативные комплексы для иммунного анализа [4-8].

## Литература

1. Homola J., Yee S. S., Gauglitz G., *Sens. Actuators, B* 54, 3-15 (1999)
2. Kretschmann E., Raether H., *Z. Naturforsch.* 23, 2135–2136 (1968)
3. Otto A., *Z. Phys.* 216, 398–410 (1968)
4. Caucheteur C., Guo T., Albert J., *Anal. Bioanal. Chem.* 407, 3883-3897 (2015)
5. Albert J., et al, *Methods* 63, 239–254 (2013)
6. Tomyshev K. A., et al, *J. Appl. Phys.* 124, 113106 (2018)
7. Yuan Y., et al, *Anal. Chem.* 88, 7609-7616 (2016)
8. Tomyshev K. A., et al, *Phys. Status Solidi A* 216, 1800541 (2019)