

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С НАКЛОННЫМИ ШТРИХАМИ

Томышев К.А.^{*}, Мануйлович Е.С., Бутов О.В.

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

^{}E-mail: scatterdice@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16007

Поверхностный плазмонный резонанс является актуальным предметом современных научных исследований. На его основе разрабатываются датчики и измерительные комплексы, которые находят применения в целом спектре различных научных и инженерных задач [1]. Особый интерес представляют волоконные плазмонные датчики как перспективное направление мобильных биосенсорных систем. Среди них большое внимание уделяется датчикам на основе брэгговских решеток с наклонными штрихами [2 – 4]. Эффект поверхностного плазмонного резонанса в таких датчиках наблюдается на спектре их пропускания в виде характерной «перетяжки», спектральное положение которой является основной характеристикой данного типа сенсоров (рис.1). Следует отметить, что такие параметры, как точность и разрешение сенсора, напрямую зависят от точности определения длины волны плазмонного резонанса по экспериментально измеренному спектру пропускания сенсора.

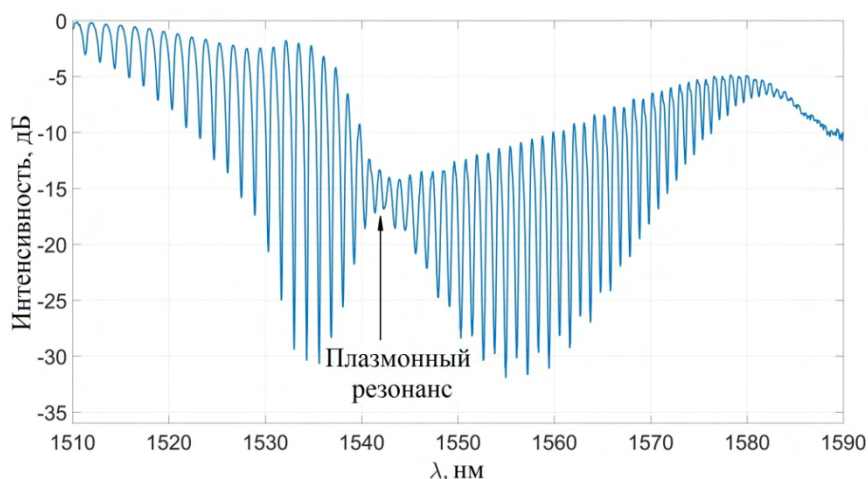


Рис. 1. Характерный спектр пропускания волоконного плазмонного сенсора на базе наклонной брэгговской решетки

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных данным сенсорам, до сих пор не был найден более-менее универсальный способ отслеживания изменения длины волны плазмонного резонанса с высокой точностью. В литературе описываются методы, основанные на измерении интенсивности отдельных спектральных пиков вблизи длины волны резонанса [5 – 8]. Однако, применение таких методов может приводить к значительным ошибкам в измерениях. Кроме того, методы определения интенсивности отдельных спектральных пиков могут показывать ограниченную точность и воспроизводимость еще и вследствие спектральных шумов как источника, так и приемника зондирующего излучения.

В нашей работе предлагается принципиально новый, универсальный подход, основанный на математической идее, заключающейся в анализе положений множества точек спектра датчика.

После ряда предварительных шагов, представленных выравниванием и частотной фильтрацией спектра с целью минимизации влияния шумов источника и приемника, вычисляются положения нижних и верхних экстремумов для построения огибающих. На этом этапе спектр представляет собой гладкую кривую, поэтому экстремумы могут определяться как нули производной (рис.2).

Нижняя и верхняя группа экстремумов аппроксимируются двумя соответствующими 6-ти параметрическими независимыми кривыми.

$$f^{top} = \frac{\beta_{11}}{1 + \exp(\beta_{21}(x - \beta_{31}))} + \frac{\beta_{41}}{1 + \exp(-\beta_{51}(x - \beta_{61}))}$$

$$f^{bot} = \frac{-\beta_{21}}{1 + \exp(\beta_{22}(x - \beta_{32}))} + \frac{-\beta_{42}}{1 + \exp(-\beta_{52}(x - \beta_{62}))}$$
(1)

Здесь f^{top} и f^{bot} — кривые, аппроксимирующие верхнюю и нижнюю группы экстремумов соответственно, а β_{ij} — параметры, определяемые по методу Нелдера — Мида [9], при минимизации среднеквадратичного отклонения от экспериментальных точек. Внешний вид 6-и параметрической аппроксимационной кривой для верхней группы экстремумов представлен на рис.3.

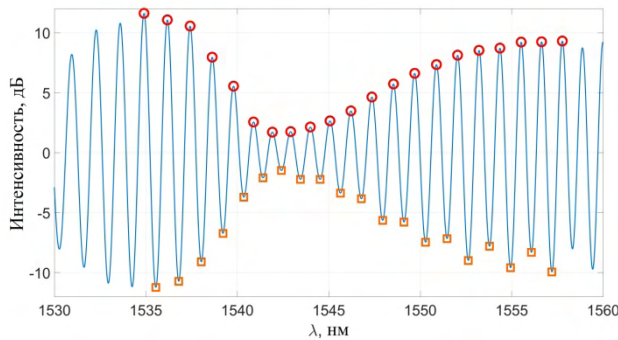


Рис. 2. Нижняя (квадраты) и верхняя (круги) группы экстремумов спектральной характеристики, прошедшей стадию предобработки

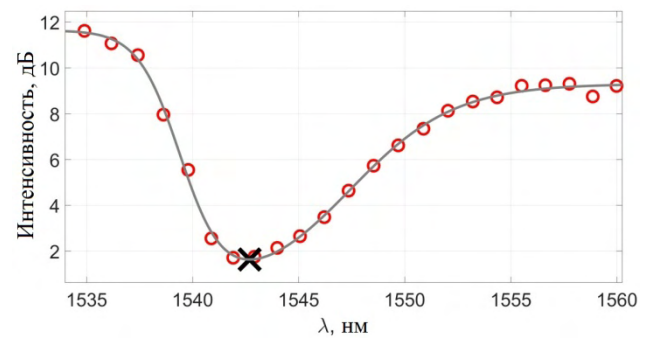


Рис. 3. Аппроксимационная кривая для верхней группы экстремумов и ее минимум (крест)

Положение резонанса на спектре определяется как точка пересечения прямой, проведенной через минимум верхней аппроксимационной кривой и максимум нижней с прямой $Y = 0$.

$$\lambda^{top} = \arg(f^{top} = \min(f^{top}))$$

$$\lambda^{bot} = \arg(f^{bot} = \max(f^{bot}))$$

$$\lambda^{SPR} = f^{top}(\lambda^{top}) \frac{\lambda^{top} - \lambda^{bot}}{f^{bot}(\lambda^{bot}) - f^{top}(\lambda^{top})} + \lambda^{top}$$
(2)

Здесь λ^{top} и λ^{bot} — минимум и максимум нижней и верхней аппроксимационной кривой соответственно, а λ^{SPR} — итоговое положение резонанса.

Для проверки эффективности работы алгоритма был использован массив экспериментальных данных, соответствующий изменению показателя преломления ближайшего окружения сенсора на величину порядка 10^{-4} единиц показателя преломления. Оценка разрешения сенсора при использовании разработанного алгоритма составила величину $2,8 \times 10^{-6}$ единиц показателя преломления, что превосходит известные результаты, использующие “классический” алгоритм, по крайней мере, на порядок. Кроме того, разработанный алгоритм отлично зарекомендовал себя при работе в большом диапазоне экспериментальных данных, вплоть до 0,04 единиц показателя преломления, тогда как “классический” метод применим только в узком диапазоне порядка 5×10^{-4} .

Таким образом, нами был разработан универсальный алгоритм, демонстрирующий высокое разрешение в большом рабочем диапазоне показателей преломления. Достигнутые параметры открывают широкие перспективы для задач, требующих особой точности измерений. В частности, такие датчики могут эффективно использоваться в биосенсорике для проведения иммунного анализа.

Литература

1. Homola J., Yee S. S., Gauglitz G., *Sens. Actuators, B* 54, 3-15 (1999)
2. Caucheteur C., Guo T., Albert J., *Anal. Bioanal. Chem.* 407, 3883-3897 (2015)
3. Tomyshev K. A., et al, *J. Appl. Phys.* 124, 113106 (2018)
4. Tomyshev K. A., et al, *Phys. Status Solidi A* 216, 1800541 (2019)
5. Yuan Y., et al, *Anal. Chem.* 88, 7609-7616 (2016)
6. Ribaut C., et al, *Biosens. Bioelectron.* 92, 449-456 (2017)
7. Albert J., et al, *Methods* 63, 239-254 (2013)
8. Han L., et al, *J. Lightwave Technol.* 35, 3360-3365 (2017)
9. Nelder J. A., Mead R., *Computer J.* 7, 308-313 (1965)