

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СУБВОЛНОВЫХ И ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЕЙНЫХ РЕШЕТКАХ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ*

✉ О. Э. Камешков, В. В. Герасимов, Б. А. Князев

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия*

✉ o.kameshkov@g.nsu.ru

Быстрые и высокочувствительные сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) — это хорошо зарекомендовавшая себя технология измерения показателя преломления и спектров веществ в оптическом диапазоне. В ее основе лежит возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов в схеме Кретчмана на тонких металлических пленках, поверх которых нанесена некая биологическая субстанция. Поверхностный плазмон можно рассматривать как эванесцентную волну, распространяющуюся вдоль границы раздела металл-диэлектрик. Электрическое поле экспоненциально затухает перпендикулярно плоскости, обеспечивая высокую чувствительность метода к изменениям среды на поверхности. Малые пространственные размеры (меньше длины волны) поверхностных плазмонов позволяют характеризовать объекты субмикронного размера.

Терагерцовое (ТГц) излучение является неионизирующим и неразрушающим биологические объекты. Кроме того, прозрачность многих сухих диэлектриков для него, сильное поглощение водой и другими полярными растворами, а также относительно большой размер терагерцовых волн позволяет использовать их для изучения изменений в объектах сверхмикронного размера. Это делает терагерцовую спектроскопию перспективным инструментом для биологических исследований [1].

Для регистрации малых концентраций веществ и обнаружения небольших изменений в диэлектрической среде необходимы высокая концентрация электромагнитного поля и узкие пики в спектрах. Обнаружение молекул в ТГц диапазоне с использованием ППР на тонких металлических пленках ограничено из-за высоких значений оптических констант металлов. В ТГц диапазоне мнимая часть диэлектрической проницаемости большинства простых металлов больше действительной части (см., например [2]), в отличие от видимого спектрального диапазона, где она почти полностью реальная и отрицательная, однако использование резонанса поверхностных спуф-плазмонов на структурированных металлических поверхностях и ППР на металлических дифракционных решетках позволяют реализовать высокочувствительные сенсоры в случае металлов с высокой проводимостью в ТГц-диапазоне [3–6].

В данной работе проводилось сравнение сенсорных возможностей одномерных линейных металлических дифракционных и субволновых решеток методом численного моделирования. В программе Comsol Multiphysics рассчитывалось возникновение ППР на медных дифракционных решетках с прямоугольным профилем канавок при дифракции плоской ТМ-волны в терагерцовом диапазоне частот. Период решеток и угол падения пучка выбирался из условий

© О. Э. Камешков, В. В. Герасимов, Б. А. Князев, 2021

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-12-00103. Расчеты выполнялись с использованием оборудования ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН.

согласования волновых векторов и максимизации эффективности ППР, т. е. количество дифракционных мод не превышало трех. В результате расчетов были получены спектры отражения в зависимости от частоты для различных ширины и глубины канавок. Параметры решетки считались оптимальными, если глубина провала в спектре отражения была максимальной среди остальных спектров. Для того чтобы охарактеризовать сенсорные возможности решеток для оптимальных параметров, были рассчитаны спектры отражения в зависимости от частоты и угла при различных показателях преломления среды. По данным спектрам были определены чувствительность (S) и добротность (FOM).

Одномерные субволновые металлические решетки с прямоугольным профилем канавок исследовались в схеме нарушенного полного внутреннего отражения (конфигурация Отто), которая использовалась для удовлетворения условий фазового синхронизма спуф-плазмонов. Поиск оптимальных параметров проводился на основе аналитических и смоделированных дисперсионных кривых. По ним определялись для желаемой частоты резонансный угол и глубина канавок решетки. Период канавок определялся из условия существования лишь нулевого дифракционного порядка. Ширина канавки выбиралась равной половине периода. Затем мы моделировали угловые спектры отражения, варьируя зазор между призмой и решеткой для нахождения минимума отражения, который соответствует максимуму эффективности генерации спуф-плазмонов. Для оптимальных параметров данного сенсора точно так же, как и для дифракционных решеток, находились S и FOM .

Показано, что в некоторых случаях дифракционные решетки демонстрируют лучшие показатели чувствительности и добротности по сравнению с сенсорами на субволновых решетках.

Список литературы

1. Naftaly M., Vieweg N., Deninger A. Industrial applications of terahertz sensing: state of play // Sensors. 2019. Vol. 19.
2. Gerasimov V. V. et al. Surface plasmon polaritons launched using a terahertz free-electron laser: propagation along a gold–ZnS–air interface and decoupling to free waves at the surface edge // JOSA B. 2013. Vol. 30.
3. Sathukarn A., Boonruang S., Horprathum S. The Simulation of a Surface Plasmon Resonance Metallic Grating for Maximizing THz Sensitivity in Refractive Index Sensor Application // Int. j. opt. 2020.
4. Ng B. et al. Spoof plasmon surfaces: a novel platform for THz sensing // Adv. Opt. Mater. 2013. Vol. 1.
5. Gerasimov V. V. et al. THz Gas Sensing Based on Subwavelength Rectangular Metal Grating in Attenuated Total Reflection Configuration // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2299.
6. Kameshkov O. E., Gerasimov V. V., Knyazev B. A. Numerical simulation of interaction of terahertz waves with metal diffraction gratings // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2299.