

Отражательные интерферометры с наклонным падением света для измерения показателя преломления

В.А. Симонов*, В.С. Терентьев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН

** E-mail: simonovva@iae.nsk.su*

DOI:10.31868/RFL.2024.87-89

Одним из важнейших параметров любой материальной среды является коэффициент преломления, который, в свою очередь, может зависеть от температуры, давления, влажности и присутствия примесей. Измерение коэффициента преломления, как абсолютное, так и относительное, может давать ценную информацию о состоянии среды, что активно используется в химии и биологии. На данный момент существует множество методов и оптических схем для определения коэффициента преломления. Среди них методы на основе эффекта нарушенного полного внутреннего отражения или, другими словами, на основе возбуждения поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в объемных оптических схемах типа Кречмана, Отто или на базе оптоволоконных технологий; волноводные на основе микрорезонаторов и дифракционные. Измерение показателя преломления на основе регистрации ППР в схеме Кречмана широко распространено как в исследовательских работах, так и в коммерческих устройствах. Также существует эффект инвертированного поверхностного плазмонного резонанса (ИППР), когда в отраженном свете наблюдается резонансный максимум. Структура металл-диэлектрического покрытия на грани призмы для наблюдения ИППР сенсора настроена так, что вне резонанса вся или большая часть падающей световой энергии поглощается или рассеивается, но в области резонанса потери резко уменьшаются и формируется максимум отражения. Такие свойства инвертированы относительно свойств ППР сенсоров, в котором структура настроена на отражение вне резонанса, а ППР-резонанс соответствует увеличению потерь. Сенсоры ИППР имеют те же характеристики, что и ППР сенсоры, и к ним применимы такие же критерии. При этом, ИППР сенсоры могут иметь существенное преимущество перед традиционными ППР-сенсорами из-за возможности использования их в лазерном резонаторе для создания положительной обратной связи, что может значительно повысить параметр качества. Для этого необходимая ширина ИППР-резонанса должна быть около 100 пм. Однако, в настоящее время представленные в литературе ИППР-сенсоры в схеме Кречмана имеют значительно большие ширины резонансов (более 10 нм), так как в них используются либо только один слой металла, либо к нему добавляется один или два диэлектрических слоя.

В данной работе предлагается использовать отражательный интерферометр (ОИ) для создания ИППР сенсора. Отражательный интерферометр – это двухзеркальный многолучевой интерферометр с резонатором типа интерферометра Фабри-Перо (ИФП), однако имеющий более сложную структуру зеркал. Переднее зеркало ОИ, на которое падает свет, имеет асимметрию коэффициентов отражения с разных сторон, обусловленную потерями в структуре, тогда как заднее зеркало является высокоотражающим. В случае наклонного падения (Рис. 1) заднее зеркало формируется за счет эффекта полного внутреннего отражения на границе раздела сред структура-аналит. Если асимметрия

коэффициентов отражения переднего зеркала очень велика, а коэффициент отражения заднего зеркала близок к единице, то возможно получить в отраженном свете так называемую «необращенную» аппаратную функцию, подобную аппаратной функции интерферометра Фабри-Перо в пропускании. Такую узкополосную селекцию излучения в отражении выгодно использовать в лазерных резонаторах для селекции излучения.

С помощью численного моделирования показана принципиальная возможность применения отражательного интерферометра при наклонном падении в конфигурации Кречмана для регистрации изменения показателя преломления внешней среды-аналита. Причем, возможно использование неблагородных металлов, например, никеля или титана. Продемонстрировано, что за счет вариации угла падения света в ОИ можно настраивать чувствительность и динамический диапазон сенсора в широких пределах в зависимости от задач. Предложена и описана технология изготовления асимметричного зеркала и наклонного ОИ с помощью техники вакуумного распыления.

Далее аналитически описаны спектральные и угловые характеристики, такие как разрешающая способность, чувствительность и контраст, а также параметр качества. Показано, что толщина и коэффициент преломления металлической пленки должны быть выбраны определенным образом, чтобы оптимизировать параметры сенсора с точки зрения максимизации контраста сигнального резонанса, при этом параметры пленки зависят от поляризации. С точки зрения параметра качества для того же количества слоев диэлектрического многослойного зеркала выгоднее использовать *S*-поляризацию при работе как в спектральной, так и в угловой областях. Показано, в предложенной конфигурации можно получать, вероятно, рекордные параметры качества – более 10^4 .

Наконец, экспериментальный образец отражательного интерферометра с наклонным падением света был применен для измерения коэффициента преломления остаточной атмосферы в вакуумной камере в процессе откачки вплоть до давления 10^{-3} бар. Спектральная чувствительность составила 1000 нанометров на единицу показателя преломления, а разрешающая способность оценивается как $6,5 \cdot 10^{-8}$. Продемонстрирован параметр качества 529.

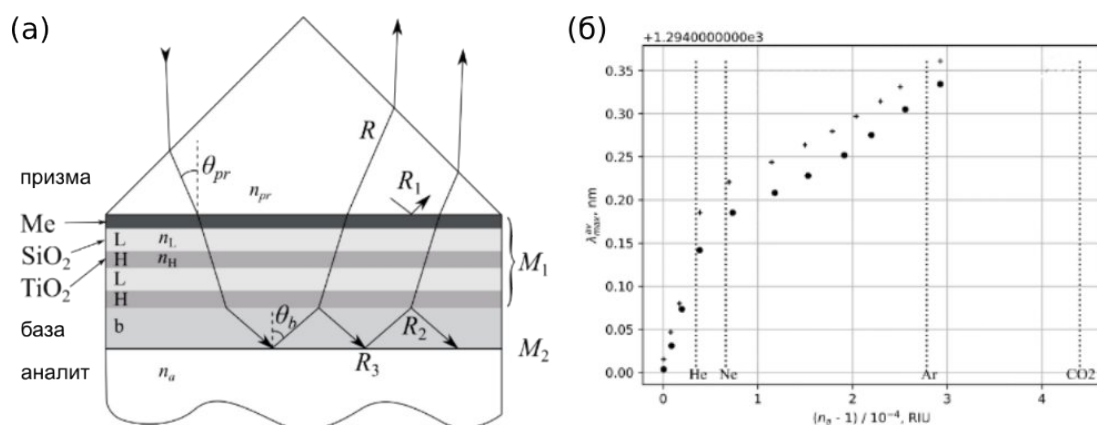


Рисунок 1. (а) – структура наклонного отражательного интерферометра, (б) – экспериментальная зависимость положения ИППР-резонанса от показателя преломления остаточной атмосферы в вакуумной камере.

К недостаткам использования наклонного ОИ в конфигурации Кречмана в качестве сенсора показателя преломления можно отнести вероятные затруднения при создании условий для высокодобротной многолучевой интерференции из-за паразитного рассеяния или поглощения в слоях, особенно в случаях пористых

материалов. Возможно проявления нелинейных эффектов в слое базы интерферометра при высоких значениях запасенной внутри энергии. Кроме того, при наклонном падении происходит снос пучка, который ограничивает реально достижимые добротность и параметр качества. Для уменьшения влияния данного эффекта необходимо увеличивать ширину пучка, показатель преломления призмы и слоя базы, а также уменьшать диэлектрического покрытия.

Работа выполнена в рамках госзадания Института автоматики и электрометрии СО РАН (124041700065-2).

Литература

- [1] Терентьев В.С., Симонов В.А. *Оптика и спектроскопия*, **129**, 238 (2021)
- [2] Терентьев В.С., Симонов В.А. *Оптика и спектроскопия*, **129**, 1089 (2021)
- [3] Терентьев В.С., Симонов В.А. *Оптика и спектроскопия*, **129**, 1325 (2021)
- [4] Терентьев В.С., Симонов В.А. *Оптика и спектроскопия*, **130**, 1904 (2022)