

УДК 535.016

## РЕЗОНАНСНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ СВЕРХТОНКОГО СЛОЯ РАЗРЕЖЕННОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Ермолаев А.В. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Варганиян Т.А. (Университет ИТМО)

В работе представлено решение задачи о взаимодействии резонансного излучения со сверхтонким слоем разреженных атомарных паров с полным учётом влияния сильной пространственной дисперсии, обусловленной движением и столкновениями атомов со стенками. Полученные формулы воспроизводят сложную зависимость контура спектральной линии коэффициента отражения от толщины газового слоя и позволяют точно рассчитывать величину коротковолнового сдвига резонансной частоты. Результаты показывают, что зависящие от плотности атомарных паров сдвиги спектральных линий имеют тот же порядок величины, что и ширины спектральных линий.

**Введение.** Особое внимание к изучению взаимодействия резонансного излучения с тонким слоем разреженной газовой среды вызвано возможностью наблюдать узкие субдоплеровские резонансы в спектрах отражения. При достаточно малых концентрациях атомарных паров длина свободного пробега атома без сбоя поляризации может стать сравнима с длиной волны падающего излучения. В таком случае оптический отклик газовой среды на внешнее воздействие становится в значительной степени нелокальным. При этом сильная пространственная дисперсия, возникающая в такой системе, обуславливается не только движением атомов, но и их столкновениями со стенками газовой кюветы. Экспериментально и теоретически было продемонстрировано, что пространственное ограничение газа в слое с толщиной, сравнимой с длиной волны света, может существенно усилить нелокальные оптические свойства таких сред.

Существующее решение задачи о газовом слое, полученное в рамках теории возмущений по оптической плотности атомарных паров, не учитывает влияние эффектов поглощения света в газовой среде и сдвига резонансной частоты. Для точного расчёта структуры поля в газовом слое система уравнений для поля и поляризации в газовой среде должна быть решена самосогласованно. Целью работы является исследование линейных оптических свойств тонких слоёв атомарных паров вне рамок теории возмущений. Теоретические и экспериментальные работы в данной области позволяют изучить природу взаимодействия атомов с поверхностью диэлектрического материала, а также могут стать основой для создания миниатюрных атомных магнитометров и стандартов частоты.

**Основная часть.** В теоретической модели рассматривается взаимодействие плоской монохроматической электромагнитной волны с разреженной газовой средой, пространственно ограниченной в слое между двумя прозрачными диэлектрическими средами. Частота света меняется в спектральной окрестности резонансной частоты атомов газового слоя. В пределе малых интенсивностей света исходная задача сводится к решению системы уравнений для поля и недиагонального элемента матрицы плотности. При этом движение атомов учитывается путём усреднения недиагонального элемента матрицы плотности по скоростному распределению Максвелла.

В работе нами были найдены собственные моды тонкого газового слоя в приближении зеркальных граничных условий для атомов газа. Согласно данным граничным условиям при столкновении с поверхностью диэлектрического материала атом зеркально отражается от неё (меняет знак компоненты скорости, нормальной к рассматриваемой поверхности) и при этом сохраняет собственную поляризацию. В таком приближении исходная система уравнений была решена относительно поверхностного адмиттанса газового слоя, который определяется логарифмической производной поля на границе раздела газ-диэлектрик,

делённой на мнимую единицу и модуль волнового вектора. По аналогии с задачей об аномальном скин-эффекте коэффициент отражения света от рассматриваемой системы может быть рассчитан через формулы Френеля при замене показателя преломления среды на поверхностный адмиттанс газового слоя.

Полученные формулы позволяют численно рассчитывать спектральные контуры коэффициента отражения при различных значениях концентрации атомарных паров (температуры газа), толщины газового слоя и показателей преломления диэлектрических сред. Было установлено, что наряду с резонансами Фабри-Перо в системе возникает  $\lambda$ -периодическая зависимость коэффициента отражения от толщины газового слоя ( $\lambda$  – длина волны падающего излучения). В том случае, когда толщина газового слоя равна полуполому числу длин волн падающего излучения, в спектре отражения наблюдается узкий субдоплеровский спектральный контур, который имеет приблизительно чётный характер относительно резонансного перехода в газе. Примечательно, что в том случае, когда толщина газового слоя значительно превосходит длину волны падающего излучения, спектральный контур коэффициента отражения, полученный в результате численного расчёта, имеет логарифмическую особенность вблизи резонанса. Данный факт согласуется с экспериментальными и теоретическими результатами, полученными при исследовании селективного отражения света от толстого газового слоя. Важно также отметить, что коротковолновый сдвиг максимума свободного от доплеровского уширения спектрального контура достаточно хорошо описывается линейной зависимостью от концентрации атомарных паров и по порядку величины сопоставим с ширинами спектральных линий.

**Выводы.** Путём самосогласованного решения системы уравнений для поля и поляризации в газовой среде впервые выполнен точный численный расчёт спектров отражения света от сверхтонкого слоя разреженных атомарных паров. Такой подход позволил учесть эффекты сдвига резонансной частоты и поглощения света в газовой среде, что не удавалось сделать в рамках теории возмущений по оптической плотности атомарных паров.

На сегодняшний день большую практическую значимость имеет миниатюризация сверхточных стандартов частоты и времени для их применения в системах спутниковой связи и при проведении астрофизических исследований. С этой точки зрения большой интерес представляет построение теоретических моделей, позволяющих точно учитывать влияние эффектов пространственной дисперсии и давления газа на контуры спектральных линий в атомных метрологических приборах с размерами, соизмеримыми с длиной волны света.