

Моделирование процесса преобразования излучения между ИК- и видимым диапазонами на конкурентных оптических переходах в парах марганца

А.Е. Кулагин, М.В. Тригуб

*Институт оптики атмосферы СО РАН
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зюева, 1, aek8@tpru.ru, trigub@iao.ru*

Работа посвящена результатам моделирования активной среды на парах марганца, учитывающей конкуренцию между оптическими переходами в инфракрасном и видимом диапазонах. Продемонстрирован процесс преобразования излучения между видимым и инфракрасным диапазонами за счет такой конкуренции. Обсуждаются качественные и количественные характеристики такого преобразования на разных частотах следования импульсов. В частности, показано, что преобразование из инфракрасного и видимый диапазон является более эффективным, чем обратное. На основе результатов моделирования предложены пути дальнейших исследований по экспериментальной реализации и измерению такого преобразования.

Ключевые слова: пары марганца, конкурентные оптические переходы, преобразование излучения, кинетическая модель; manganese vapors, competitive optical transitions, radiation conversion, kinetic model.

Введение

Визуально-оптическая диагностика, как один из методов исследования динамических явлений различной природы, является довольно распространенным. Благодаря разнообразным методикам, например, скоростная визуализация, спекл-интерферометрия, мультиспектральная визуализация и др., она применяется повсеместно. Интенсивное развитие и новые результаты в различных областях науки и техники открывают новые возможности для использования подходов на основе получения, регистрации и обработки изображений. В частности, в работах [1, 2], опираясь на результаты различных методов визуализации (термографирование, рентгеноскопия, скоростная лазерная визуализация), проведено комплексное исследование лазерной абляции материалов с целью получения наночастиц. Это позволило выявить особенности взаимодействия лазерного излучения с материалами и оптимизировать процесс получения частиц.

Отдельно стоит рассмотреть возможности скоростной визуализации, которая на сегодняшний день позволяет получать изображения динамических явлений с временным разрешением на уровне единиц наносекунд. Для таких задач применяются скоростные сенсоры на основе кремния, а регистрация осуществляется в видимом диапазоне спектра. Однако существует ряд задач, например, исследование непрозрачных в видимом диапазоне материалов, биологических объектов, где смещение в длинноволновую область спектра (ближний ИК-диапазон) является необходимым. В этом случае применяются регистраторы на основе InGaAs структур. Их особенностью в сравнении с кремниевыми сенсорами является низкое быстродействие и наличие шумов. Это ограничивает возможность применения SWIR камер для скоростной визуализации, а следовательно, для изучения быстропротекающих процессов.

Известны системы [3], в которых изображение, формируемой оптической схемой, преобразуется в среде с инверсной населенностью. Такие системы получили название лазерные проекционные микроскопы [4] или лазерные мониторы [5]. За счет использования усиливающей среды может достигаться повышение спектральной яркости изображения, следовательно, изменяться спектрально-энергетический состав изображения на выходе среды. Усилители, применяемые в таких системах, представляют собой среды на переходах атомов металлов. Среда на переходах атома марганца имеет оптические переходы в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, которые связаны общими нижними рабочими уровнями. Это открывает возможность реализации селективного усиления на одном из переходов и формирования негативного изображения на другом за счет использования инверсной населенности. В рамках данной работы ставилась задача модельного исследования такой возможности для системы с независимым источником подсветки [6] и усилителем на переходах атома марганца.

Математическая модель

В основе используемого подхода лежит кинетическая модель активной среды, описывающая изменение концентрации атомов в разном энергетическом состоянии во времени и пространстве. При этом используется приближение длинной газоразрядной трубки (ГРТ) и предположение аксиальной симметрии, т.е. учитывается только зависимость характеристик от расстояния до оси ГРТ. Кинетическая модель представляет собой систему нелинейных уравнений в частных производных (реакционно-диффузионных уравнений), учитывающих изменение энергетического состояния атомов, их ионизацию и тройная рекомбинация, а также

диффузию нейтральных атомов и амбиполярную диффузию в предположении квазинейтральности плазмы. Преимущественно учитываются процессы, сопровождающиеся изменением энергетического состояния нейтральных атомов, обусловленные упругими соударениями с электронами. Модель является адаптацией разработанной ранее модели для усилителя яркости на парах меди [7].

Система кинетических уравнений на концентрацию атомов марганца и буферного газа (неона) в различных энергетических состояниях, включая ионизированные, была связана с электрическими параметрами накачки через джоулев нагрев электронного газа в уравнении теплопроводности, описывающем пространственно-временное изменение температуры электронов. Обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие электрическую схему накачки и связанные с кинетическими уравнениями через активное сопротивление плазмы между электродами, определяли продольную напряженность электрического поля в плазме (скин-эффект в плазме не учитывался).

Кинетические уравнения на верхние и нижние лазерные уровни также включали в себя насыщение, описывающее вынужденное излучение, а также члены, отвечающие спонтанному излучению. Кроме того, в модель был добавлен внешний источник излучения, заводимого в ГРТ, по аналогии с [7]. Полагается, что заводимое излучение распространяется параллельно оси ГРТ.

Для атомов марганца учитывались основное состояние (a^6S), возбужденные состояния (a^6D , z^6P и y^6P с расщепление на тонкую структуру, а также обобщенный уровень, включающий в себя кластер высоколежащих уровней e^6D , f^6D и g^6D), а также однозарядные положительные ионы. Для атомов неона учитывались основное, первое и второе возбужденные состояния, а также положительные однозарядные ионы. Также учитывались возбужденное состояние молекулы Ne_2 , а также ее однозарядный положительный ион.

Учитывались следующие оптические переходы. В видимом диапазоне – 534,1 и 542 нм, в ИК-диапазоне – 1289, 1329, 1332 и 1362 нм. Данные линии показывают наибольшую мощность излучения в экспериментах [8]. Исключением является излучение с длиной волны 1329 нм, которое также учитывалось, так как потенциально может влиять на конкуренцию между изучательными переходами несмотря на малую интенсивность излучения на этой линии ввиду того, что переход 542 нм делит с ним общий нижний уровень.

Входное излучение задавалось равномерно распределенным вдоль оси ГРТ. Мгновенную мощность, непосредственно заводимую в каждую учитываемую спектральную линию соответствующего диапазоне излучения (ИК- или видимого), обозначим за P_{in} . Входное излучение было непрерывным, постоянным во времени и равномерно в поперечном сечении ГРТ.

В качестве схемы накачки рассматривалась стандартная схема с полным разрядом накопительного конденсатора. В данном исследовании расчеты проводились для ГРТ 2×50 см, как в эксперименте [8].

Результаты моделирования

Расчеты процесса преобразования ИК-излучения в видимое и наоборот проводились для частот следования импульсов (ЧСИ) равных 2, 5, 10, 14, 17 и 20 кГц. Заводимая мощность P_{in} в приведенных ниже расчетах была равна 0,1 Вт как для преобразования ИК-излучения в видимое, так и наоборот.

Сначала приведем излучательные характеристики активной среды в отсутствие входного ИК-излучения. Они изображены на рис. 1.

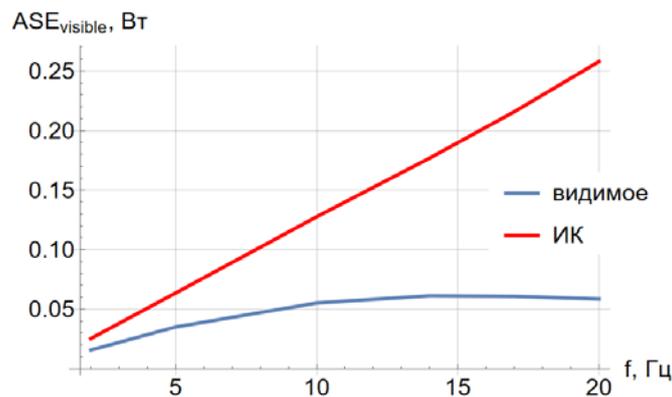


Рис. 1. Средняя мощность усиленного спонтанного излучения в видимом диапазоне при отсутствии входного сигнала

Теперь пусть $P_{in} \neq 0$. Коэффициент преобразования излучения k_{tr} для непрерывного режима входного излучения рассчитывался как отношение модуля изменения средней (по периоду следования импульсов) мощности выходного излучения в соответствующей области (видимой или ИК-) относительно мощности усиленного спонтанного излучения P_{ASE} в отсутствие входного сигнала к суммарной мгновенной мощности входного излучения, заведенного в соответствующие учитываемые линии. На рис. 2 изображена зависимость коэффициента преобразования излучения в непрерывном режиме от мощности входного сигнала и от ЧСИ, когда входной сигнал представлял собой ИК-излучение и фиксировалось изменение излучения в видимой области и наоборот.

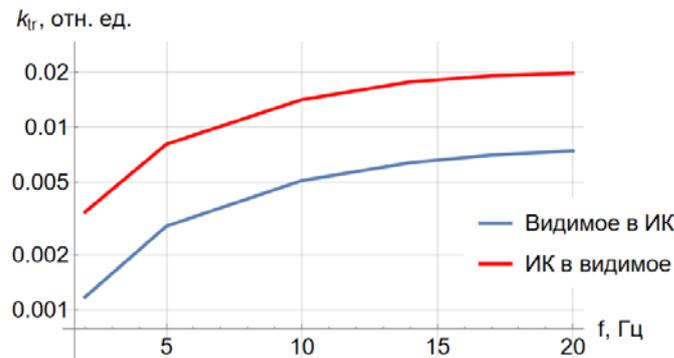


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования излучения в видимое в непрерывном режиме от ЧСИ

Обсуждение результатов

Из рис. 2 видно, что преобразование ИК-излучения в видимое намного более эффективно, чем видимого излучения в ИК. Отчасти это можно объяснить тем, что рассматривались условия накачки, при которых усиленное спонтанное излучение на ИК-линиях превышает усиленное спонтанное излучение в видимом диапазоне. Однако отличие энергий излучения на рис. 1 слабо коррелирует с отличием в коэффициентах преобразования на рис. 2. В частности, на малых частотах следования (2 кГц) энергии излучения в видимом и ИК-диапазоне на рис. 1 близки друг к другу (разница всего в полтора раза), в то время как коэффициент преобразования на этой частоте на рис. 2 отличается в 3 раза, причем такое отличие примерно сохраняется на всем диапазоне частот. Поэтому более эффективное преобразование ИК-излучения в видимое вероятно является фундаментальной характеристикой активных сред на парах марганца, не связанной со способом накачки.

Стоит отметить, что в непрерывном режиме подачи входного сигнала, коэффициент усиления довольно мал, так как учитывалось только заведенное в ширину соответствующих линий излучение. Соответственно, если входной сигнал будет широкополосным, то коэффициент преобразования будет еще меньше, чем и так невысокий коэффициент преобразования на рис. 2. Однако коэффициент преобразования можно повысить на несколько порядков, если входной сигнал будет импульсным с длительностью, сравнимой с временем существования инверсии населенности в активной среде на парах марганца. Также отметим, что изменение усиленного спонтанного излучения в видимой области при заданном уровне входного ИК-излучения достигало порядка 10%, что делает такое преобразование вполне измеримым на практике.

Заключение

Результаты данной работы показали, что конкуренция между оптическими переходами в парах марганца действительно позволяет осуществить преобразование излучения между ИК- и видимым диапазонам. Однако в непрерывном режиме работы коэффициент такого преобразования довольно мал, особенно при преобразовании из видимого диапазона в ИК. Поэтому для экспериментального подтверждения возможности такого преобразования предлагается использовать бистатистическую схему [6], где источник входного ИК-сигнала и сам преобразователь будут представлять собой активные среды на парах марганца или его галогенидов, работающие в синхронизированном режиме. В этом случае на частотах порядка 10 кГц такое преобразование должно, судя по модельным оценкам, быть вполне измеримым при уровне входного сигнала, заведенного непосредственно в ГРТ преобразователя, около 0,1 Вт по мгновенной мощности.

Финансирование. Работа была выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН (проект FWRU-2021-0006).

Список литературы

1. Kanitz A., Kalus M.R., Gurevich E.L., Ostendorf A., Barcikowski S., Amans D. Review on experimental and theoretical investigations of the early stage, femtoseconds to microseconds processes during laser ablation in liquid-phase for the synthesis of colloidal nanoparticles // *Plasma Sources Science and Technology*. 2019. V. 28, N 10. 103001. DOI: 10.1088/1361-6595/ab3dbe.
2. Dittrich S., Barcikowski S., Gökce B. Plasma and nanoparticle shielding during pulsed laser ablation in liquids cause ablation efficiency decrease // *Opto-Electronic Advances*. 2021. V. 4, N 1. 200072. DOI: 10.29026/oea.2021.200072.
3. *Оптические системы с усилителями яркости* / Под. ред. Г.Г. Петраша. М.: Наука, 1991. (Труды ФИАН, Т. 206). 152 с.
4. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп // *Квантовая электроника*. 1974. Т. 14, № 1. С. 14–15.
5. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // *Review of Scientific Instruments*. 2014. Т. 85, N 3. С. 1–5. DOI: 10.1063/1.4869155.

6. Васнев Н.А., Тригуб М.В., Ештушенко Г.С. Особенности работы усилителя яркости на парах бромиды меди в схеме бистатического лазерного монитора // Оптика Атмосферы и Океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 247–253. DOI: 10.15372/АОО20190310.
7. Kulagin A.E., Torgaev S.N., Evtushenko G.S. Kinetic modeling of amplifying characteristics of copper vapor active media for a wide range of input radiation power // Optics Communications. 2020. V. 460, 125136. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.125136.
8. Тригуб М.В., Гембух П.И., Васнев Н.А., Шиянов Д.В. Лазерный монитор для одновременной визуализации в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 3. С. 239–243. DOI: 10.15372/АОО20230310.

A.E. Kulagin, M.V. Trigub. Modeling of the radiation conversion between the IR and visible ranges on competitive optical transitions in manganese vapors

The work is devoted to the results of the modeling the manganese vapor active medium that takes into consideration the competition between the optical transitions in the IR and visible ranges. We model the radiation conversion between the visible and IR ranges due to such competition. The qualitative and quantitative features of such conversion on various pulse repetition rates are discussed. In particular, we show that the conversion from the IR range to the visible range is more effective than opposite one. Based on the modeling results, we suggest the way of further studies on the experimental realization and measuring of such conversion.