

КОГЕРЕНТНОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ПРИСУТСТВИИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МОЛЕКУЛЯРНОМ ВОДОРОДЕ

Д.А.Акимов*, А.М.Желтиков*, Н.И.Коротеев*, А.Н.Наумов*, В.Н.Очкин,
А.Ю.Сердюченко*, Д.А.Сидоров-Бирюков*, С.Н.Цхай, А.Б.Федотов*

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
117924 Москва, Россия

*Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 8 августа 1999 г.

Исследуются поляризационные свойства света при когерентном комбинационном рассеянии в молекулярном водороде в присутствии постоянного электрического поля. Предложена и реализована поляризационная нелинейно-оптическая методика определения абсолютной величины и ориентации постоянного электрического поля.

PACS: 42.62.Fi, 42.65.-k, 51.70.+f, 52.25.-b

Когерентная четырехфотонная спектроскопия является эффективным методом диагностики возбужденных газов и плазмы. В частности, когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС) [1, 2] в настоящее время широко применяется для измерения температуры и концентрации в возбужденных газовых средах [3]. Как показывают экспериментальные исследования, спектроскопия когерентного четырехволнового взаимодействия с комбинационными и гиперкомбинационными резонансами позволяет получать важную информацию относительно релаксации населенностей возбужденных состояний атомов и ионов, а также исследовать пространственные распределения резонансных частиц в лазерной плазме и плазме газового разряда [4]. Однако получение информации о целом ряде существенных свойств плазмы затруднено из-за отсутствия адекватных методов дистанционного бесконтактного измерения локальных электрических полей в плазме. Представляется, что богатый арсенал средств, накопленный к настоящему времени когерентной четырехфотонной спектроскопией, дает возможность решить некоторые из задач, связанных с измерением плазменных полей. Возможность использования метода четырехфотонной спектроскопии для измерения напряженности электрических полей была предложена в работе [5] и экспериментально продемонстрирована для постоянного однородного электрического поля известной ориентации в плазме коронного разряда авторами [6]. В работе [7] была предложена и теоретически обоснована методика измерения однородного постоянного электрического поля в изотропной однородной плазме методом когерентного четырехфотонного рассеяния и исследовано влияние плазменных микрополей на интенсивность и поляризацию сигнала четырехфотонного рассеяния. Таким образом, когерентная четырехфотонная спектроскопия представляется перспективной техникой для локальных измерений электрических полей в возбужденных газовых средах и плазме.

В данной работе используется поляризационная техника когерентного комбинационного рассеяния (ККР) для локального бесконтактного измерения как абсолютной величины, так и ориентации постоянного электрического поля в молекулярных

газах, а также для получения информации о виде тензора нелинейно-оптической восприимчивости и инвариантах тензора комбинационного рассеяния комбинационно-активных переходов молекул и атомов.

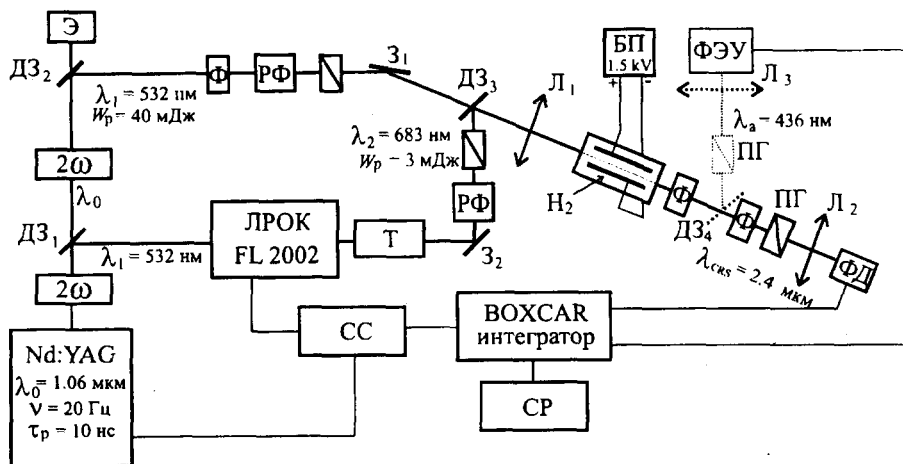


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов ККР в молекулярном газе в присутствии постоянного электрического поля: Nd:YAG – задающий Nd:YAG-лазер; 2ω – кристаллы для удвоения частоты; ЛРОК – лазер на красителе; СС – система синхронизации; СР – система регистрации; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; ФД – ИК-приемник; Т – телескоп; Z_1, Z_2 – поворотные зеркала; ДЗ₁ – ДЗ₄ – дихроичные зеркала; ПГ – призма Глана; Ф – светофильтры, РФ – ромбы Френеля; Э – экран; БП – высоковольтный источник напряжения

Экспериментальная установка, созданная для исследования процессов ККР в молекулярном газе в присутствии постоянного электрического поля, состояла (рис.1) из задающего генератора, кристаллов для преобразования частоты, лазера на красителе (ЛК), кюветы с газом и системы регистрации. В качестве задающего генератора использовался лазер на кристалле Nd: YAG с длиной волны излучения 1.06 мкм, частотой повторения импульсов 20 Гц и длительностью импульсов 10 нс. Для преобразования излучения во вторую гармонику (волна ω_1) использовался кристалл DKDP с эффективностью 30%. Излучение второй гармоники (длина волны – 532 нм) использовалось для накачки лазера на красителе (смесь красителей пиридин-1 и DCM, растворенных в диметилсульфоксиде). Лазер на красителе обеспечивал генерацию излучения с длиной волны 683 нм (частота ω_2) и энергией в импульсе 3 мДж. Ширина линии генерации лазера на красителе составляла 0.2 см^{-1} , диаметр пучка – 2.5 мм (расходимость – 0.5 мрад), служило в качестве одной из волн бигармонической накачки (волна ω_1). Спектральная ширина линии излучения второй гармоники составляла 0.2 см^{-1} , диаметр пучка – 7 мм, расходимость – 0.6 мрад, энергия в импульсе достигала 40 мДж.

Непреобразованное нелинейным кристаллом излучение основной частоты отделялось дихроичным зеркалом ДЗ₁, обеспечивающим коэффициент пропускания около 80% на длине волны 532 нм и коэффициент отражения свыше 99% для излучения с длиной волны 1.06 мкм, и преобразовывалось во вторую гармонику в кристалле DKDP. Полученная таким образом вторая гармоника использовалась в качестве одной из волн бигармонической накачки в схеме ККР (волна с частотой ω_1).

После прохождения через телескоп (T) излучение с частотой ω_2 совмещалось с пучком ω_1 при помощи дихроичного зеркала ДЗ. Увеличение телескопа выбиралось таким образом, чтобы обеспечить оптимальное соотношение между диаметрами пучков ω_1 и ω_2 , а настройка телескопа производилась так, чтобы компенсировать расходимость излучения лазера на красителе.

Совмещенные пучки второй гармоники и излучения лазера на красителе фокусировались линзой L_1 в кювету, заполненную водородом при давлении около 1.2 атм. Для создания электрического поля в кювете располагались металлические электроды, на которые подавалось напряжение 1 – 1.5 кВ.

Генерируемое в области взаимодействия пучков когерентное ИК излучение сигнала ККР и калибровочный сигнал КАРС (процедура калибровки описана в [6]) с помощью системы фильтров отделялись от излучения накачки. Сигнал ККР, генерируемый в результате процесса четырехфотонного рассеяния в присутствии постоянного электрического поля, регистрировался охлаждаемым ИК приемником, охлаждаемым жидким азотом. Данные, поступающие с ИК приемника, накапливались и обрабатывались при помощи интегратора ВОХСАР и персонального компьютера. Для регистрации сигнала КАРС использовался фотозлектронный умножитель.

Для измерения электрического поля и для исследования параметров молекулярных переходов в наших экспериментах использовался четырехфотонный процесс ККР, происходящий в присутствии постоянного электрического поля E_{const} по схеме $\omega_{CRS} = \omega_0 + \omega_1 - \omega_2$, где $\omega_0 = 0$, ω_1 и ω_2 – частоты волн накачки, настроенные в резонанс комбинационного типа с частотой $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ исследуемого молекулярного перехода ($\lambda_{CRS} = 2.4$ мкм, переход $\nu = 0, J = 1 \rightarrow \nu = 1, J = 1$ $H_2(X^1\Sigma_g^+)$). Вектор поляризации в изотропной среде определяется через компоненты тензора нелинейно-оптической кубической восприимчивости $\chi_{ijkl}^{(3)} = \chi_{ijkl}^{(3)}(\omega_{CRS}; 0, \omega_1, -\omega_2)$ и электрические векторы волн накачки следующим выражением [1], в котором у компонент тензора нелинейной восприимчивости опущены частотные аргументы:

$$P^{(3)} = 3\{\chi_{1122}^{(3)}E(e_1e_2^*) + \chi_{1212}^{(3)}e_1(Ee_2^*) + \chi_{1122}^{(3)}e_2^*(Ee_1)\}E_{const}E_1E_2, \quad (1)$$

где E_1, E_2 – амплитуды волн накачки с частотами ω_1 и ω_2 ; e_1, e_2 – единичные векторы поляризаций соответствующих волн; E_{const} и E – напряженность и единичный вектор, задающий направление постоянного электрического поля.

На рис.2 представлены зависимости интенсивности сигнала ККР от угла β между вектором поляризации e_1 волны накачки с частотой ω_1 и направлением постоянного поля E , коллинеарного вектору поляризации e_2 волны накачки с частотой ω_2 . Так как для полносимметричных колебаний $\chi_{1212}^{(3)} = \chi_{1221}^{(3)}$, измерения в максимуме и минимуме представленных зависимостей позволяют определить соотношение компонент тензора нелинейной восприимчивости: $\chi_{1122}^{(3)}/\chi_{1212}^{(3)} = 17.3 \pm 2.1$. Этот результат хорошо согласуется со значениями инвариантов тензора комбинационного рассеяния – средней поляризуемостью $a = 1.04 \cdot 10^{-25}$ и анизотропией $g = 0.79 \cdot 10^{-25}$, измеренными по поглощению излучения на том же переходе H_2 в присутствии внешнего электрического поля [8].

С учетом поляризационных свойств сигнала ККР для определения ориентации постоянного электрического поля в общем случае может быть использована процедура, основанная на измерении угла ψ между коллинеарными друг другу векторами поляризации бигармонической накачки (световых волн с частотами ω_1 и ω_2)

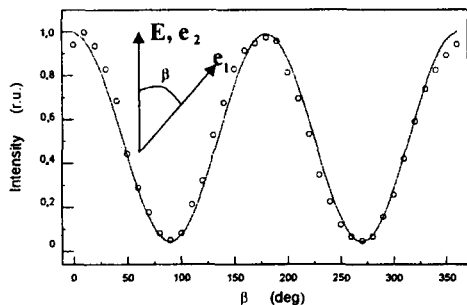


Рис.2. Зависимость интенсивности сигнала ККР от угла β между вектором поляризации волны накачки e_1 и направлением постоянного поля E , коллинеарного вектору e_2 . Точки – экспериментальные данные. Сплошная кривая – расчет по формуле (1)

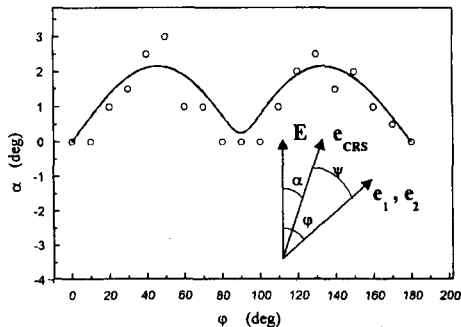


Рис.3. Зависимость модуля угла α между вектором поляризации сигнала ККР e_{CRS} и направлением постоянного электрического поля E от угла φ между направлением постоянного поля и коллинеарными друг другу векторами бигармонической накачки e_1 и e_2 . Точки – экспериментальные данные. Сплошная кривая – расчет по формуле (1)

поляризации сигнала ККР e_{CRS} (вставка на рис.3). При вращении пары коллинеарных друг другу векторов e_1 и e_2 в некоторой плоскости значение угла $\psi = 0$ достигается тогда, когда векторы постоянного электрического поля на данную плоскость. При этом точное направление постоянного поля может быть восстановлено путем поиска максимума сигнала ККР. Для исследуемого перехода молекулы водорода описанная выше общая процедура определения направления постоянного электрического поля может быть упрощена с учетом полученного соотношения между компонентами тензора нелинейной оптической восприимчивости, определяющего поляризационные свойства сигнала ККР для данного перехода. В этом случае при коллинеарных друг другу векторах e_1 и e_2 направление вектора поляризации сигнала ККР, согласно (1), слабо отличается от направления перпендикулярной волновым векторам волн накачки составляющей постоянного поля при любом угле φ . Зависимость модуля угла α между вектором поляризации сигнала ККР и направлением постоянного электрического поля от угла φ между направлением постоянного поля и коллинеарными друг другу векторами бигармонической накачки e_1 и e_2 показана на рис.3. Точки – экспериментальные данные. Сплошная кривая – расчет по формуле (1).

Таким образом, исследование поляризационных свойств сигнала ККР света в присутствии постоянного электрического поля в молекулярном водороде позволило определить соотношения между компонентами тензора кубической нелинейно-оптической восприимчивости и инвариантами тензора комбинационного рассеяния перехода $Q(1)$ молекулы водорода ($\nu = 0, J = 1 \rightarrow \nu = 1, J = 1$) в основном электронном состоянии $X^1\Sigma_g^+$. Поляризационная техника ККР позволяет реализовать удобную схему локального бесконтактного измерения постоянных электрических полей в молекулярных газах, перспективную для решения задач диагностики плазмы газового разряда, включая измерения плазменных полей и связанных с ними параметров.

Работа выполнена в соответствии с программой "Интеграция" в рамках Учебно-научного центра "Фундаментальная оптика и спектроскопия", частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 99-02-16339, программой МНРФ "Фундаментальная спектроскопия". Участие в работе Д.А.Акимова частично поддержано грантом Соросовской образовательной программой в области точных наук.

-
1. С.А.Ахманов, Н.И.Коротеев, *Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света*, М.: Наука, 1981.
 2. S.A.J.Druet and J.-P.E.Taran, *Progress Quantum Electron.* **7**, 1 (1981).
 3. A.C.Eckbreth, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Cambridge: Abacus, 1988.
 4. А.М.Желтиков, Н.И.Коротеев, УФН **169**, 385 (1999).
 5. В.П.Гавриленко, Е.В.Куприянова, Д.П.Околокулак и др., Письма в ЖЭТФ **56**, 3 (1992).
 6. О.А.Евсин, Е.В.Куприянова, В.Н.Очкин и др., Квантовая электроника **23**, 295 (1995).
 7. А.М.Желтиков, Н.И.Коротеев, А.Н.Наумов и др., Квантовая электроника **26**, 73 (1999).
 8. J.V.Foltz, D.H.Rank, and T.A.Wiggins, *J. Mol. Spectr.* **21**, 203 (1966).