

Оптическая накачка вращательных уровней основного состояния CaO^+ на переходе $2^2\Pi-X^2\Pi$ широкополосным лазером

С.О. Тучин², А.А. Першин^{1, 2}, И.О. Антонов¹

¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Обоснование. CaO^+ имеет интересную внутреннюю структуру для квантовоинформационных применений, которая позволяет «запутывать» внутренние состояния CaO^+ с определенным вращательным квантовым числом и фоновые моды ионов в квадрупольной ловушке через диполь-фононное взаимодействие [1]. Мы предлагаем охлаждать вращательные квантовые уровни CaO^+ при помощи оптической накачки на электронном переходе $2^2\Pi-X^2\Pi$. Состояния $X^2\Pi$ и $2^2\Pi$, переход между которыми планируется использовать для оптической накачки, имеют недиагональные коэффициенты Франка – Кондона. В то же время мы предполагаем, что наличие низколежащего состояния $A^2\Sigma^+$ может ускорить релаксацию возбужденных колебательных уровней $X^2\Pi$ при накачке на переходе $2^2\Pi-X^2\Pi$.

Цель — оптически охладить вращательные уровни основного состояния CaO^+ на переходе $2^2\Pi-X^2\Pi$.

Методы. Для оптической накачки молекулы на электронном переходе мы используем широкополосный фемтосекундный лазер, чтобы одновременно перекрыть множество спектральных линий вращательной тонкой структуры. Чтобы контролировать, какие именно линии лазер перекрывает, мы используем метод спектрального формирования импульса. Лазер с длительностью импульса 50 фс, имеющий спектральную ширину около 100 см^{-1} , проходит оптическую систему с дифракционной решеткой, которая разделяет его на отдельные частоты, после чего часть спектра обрезается с помощью маски.

На графиках (рис. 1) представлены кривые потенциальной энергии, построенные нами для состояний $X^2\Pi$, $2^2\Pi$ и $A^2\Sigma^+$ молекулы CaO^+ , рассчитанные на суперкомпьютере «Сергей Королев» с помощью метода MRCl.

Для оптической накачки мы используем спектральные переходы $X^2\Pi(v=0) - 2^2\Pi(v=8)$ (рис. 2) и $A^2\Sigma^+(v=0) - 2^2\Pi(v=8)$. Предполагается осуществлять накачку при помощи двух фемтосекундных титан-сапфировых лазеров, которые при помощи утроения частоты в нелинейном кристалле настраиваются на длину волны 300 и 306 нм. Лазер с длиной волны 300 нм подвергается спектральному формированию импульса для накачки перехода $2^2\Pi-X^2\Pi$. Лазер с длиной волны 306 нм настроен на переход $2^2\Pi-A^2\Sigma^+$ (для данного перехода лазер без маски).

$$dN / dt = MN. \quad (1)$$

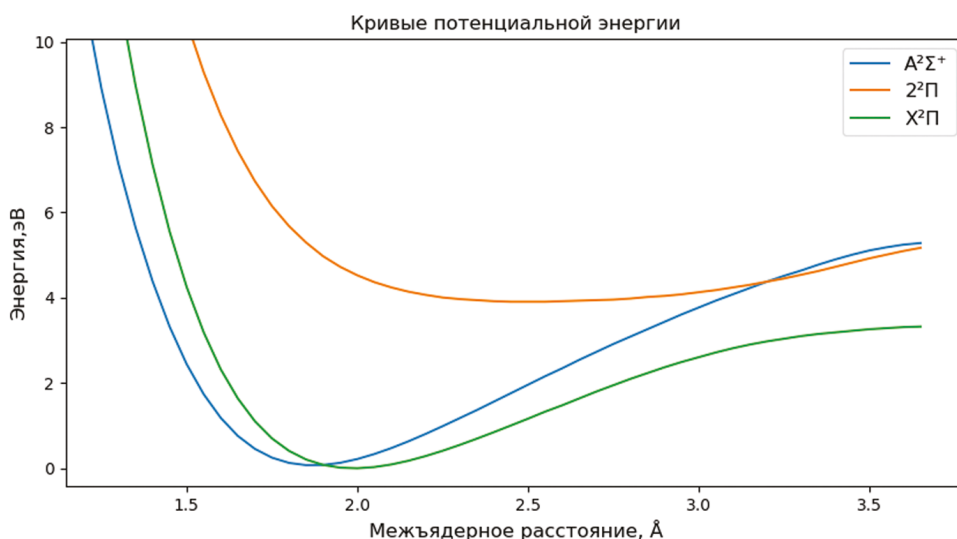


Рис. 1. Кривые потенциальной энергии

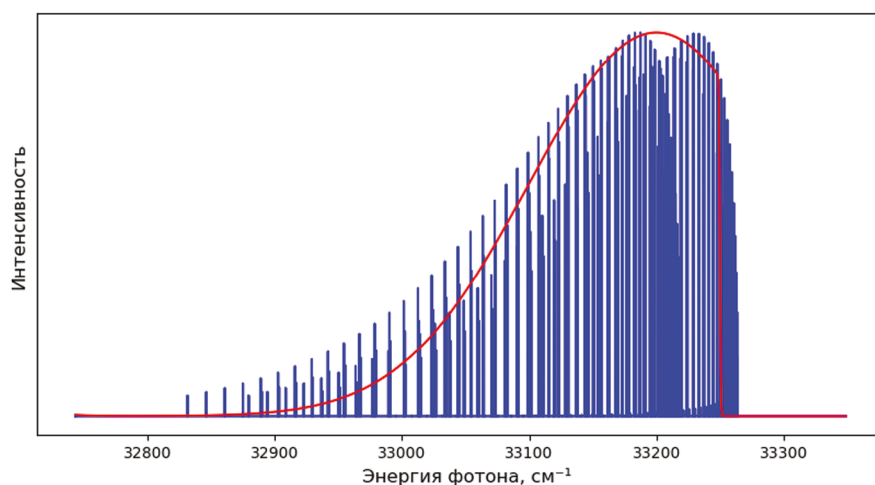


Рис. 2. Спектральная симуляция перехода $X^2\Pi(v=0)-2^2\Pi(v=8)$

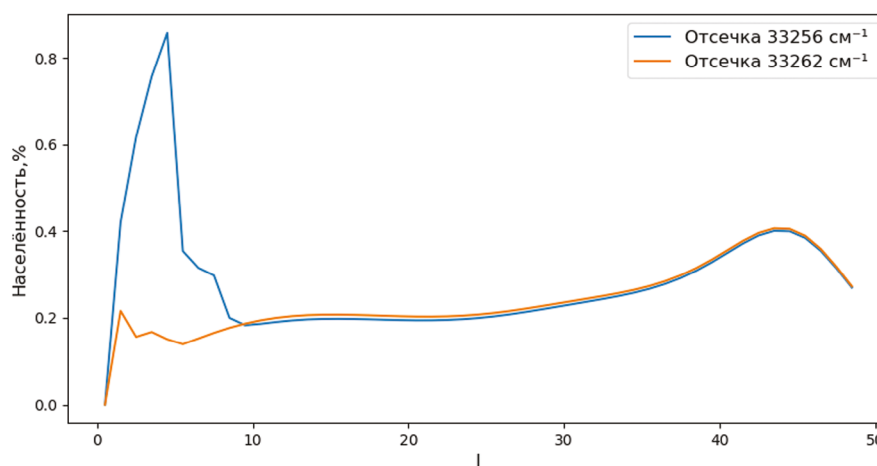


Рис. 3. Населённость состояния $\pi_{3/2}(v=0)$ для момента времени 100 секунд

Уравнение (1) определяет скорость изменения населенности всех квантовых уровней CaO^+ . N — это вектор элементы которого соответствуют населенности каждого квантового состояния CaO^+ . M — это матрица коэффициентов скоростей, состоящая из трех слагаемых: $M = A + B + L$, где A — матрица коэффициентов Эйнштейна A , B — это матрица коэффициентов Эйнштейна B для переходов в микроволновой и инфракрасной областях, умноженных на спектральную плотность теплового излучения, L — это матрица коэффициентов Эйнштейна для переходов $2^2\Pi-X^2\Pi$ в ультрафиолетовой области B , умноженных на спектральную плотность излучения лазеров. Для определения временно́зависимой населенности уравнение (1) численно интегрировалось в программе, написанной на языке Python, для начальной населенности N_0 , соответствующей равновесной, во временном интервале $10^{-5}-10^2$ секунд.

Результаты. Как видно из рис. 3, положение маски имеет драматический эффект на вращательную населенность состояния $X^2\Pi(v=0)$.

Выводы. Такой эффект в результатах связан с тем, что при отсечке $33\,256\text{ см}^{-1}$ несколько наиболее низколежащих вращательных уровней $X^2\Pi(v=0)$ не перекрываются лазером, образуют «темные» состояния. В них перекачивается населенность из более высоколежащих вращательных уровней CaO^+ , таким образом, вращательные уровни молекулы оптически охлаждаются. Пик населенности $X^2\Pi(v=0)$ 0,8 % достигается для $J = 4,5$. Общая населенность состояния $X^2\Pi(v=0)$ составляет 25 %, населенность состояния $A^2\Sigma^+(v=0)$ составляет 57 %. Работы по решению этой задачи в данный момент ведутся.

Ключевые слова: CaO^+ ; оптическая накачка; коэффициенты Франка – Кондона; широкополосный фемтосекундный лазер.

Список литературы

1. Campbell W.C., Hudson E.R. Dipole-Phonon Quantum Logic with Trapped Polar Molecular Ions // Physical review letters. 2020. No. 125. С. 120501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.120501

Сведения об авторах:

Сергей Олегович Тучин — студент, группа 4402-030302D, физический факультет; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: serezhenska.tuchin@mail.ru

Андрей Александрович Першин — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ЛФХК СФ ФИАН, ассистент кафедры физики Самарского университета, Самара, Россия. E-mail: andrepershin1993@yandex.ru

Иван Олегович Антонов — научный руководитель, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник; Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия. E-mail: pfizeke@gmail.com