



C-WAVE ДЛЯ РАБОТЫ С ЗАХВАЧЕННЫМИ ИОНАМИ

Н.Ваасем, Hübner GmbH & Co. KG,
niklas.waasem@hubner-photonics.com.
У.Варринг, Фрайбургский университет,
ulrich.warring@physik.uni-freiburg.de, Германия

Источник излучения C-WAVE представляет собой универсальный и удобный инструмент для работы в области квантовой оптики. С помощью нового перестраиваемого непрерывного источника лазерного излучения были построены кулоновские кристаллы из ионов магния (изотопически чистого). Атомы магния были ионизированы методом изотопно-селективной резонансной двухфотонной ионизации на длине волны излучения 285,3 нм. УФ-излучение получено путем резонансной оптической генерации второй гармоники излучения непрерывного лазерного источника C-WAVE. Данный источник представляет собой оптический параметрический генератор, перестраиваемый в диапазоне от 450 до 650 нм, генерирующий одночастотное излучение мощностью 0.5 Вт. Полученные ионы магния захватываются ловушкой и затем охлаждаются. Это дает возможность создавать 2D-кулоновские кристаллы, которые используются в последующих измерениях.

Экспериментальная работа исследовательской группы строится на захваченных ионных системах и нацелена на (i) достижение более глубокого понимания сложной динамики, которая находится под влиянием или даже управлением квантовых эффектов и (ii) достижение контроля над отдельными атомами и молекулами на самом высоком уровне, чтобы построить систему (модель) многих тел. Кроме того, мы проводим исследования в области объединения оптических ловушек для ионов и нейтральных атомов [1]. Недавно нами был продемонстрирован метод лазерной спектроскопии высокого разрешения на основе квантовых эффектов [2].

Общей проблемой всех проектов нашей группы являются высокие требования к лазерным системам для контроля внутренних и внешних степеней свободы ионов. Таким образом наша работа сильно зависит от инновационных лазерных технологий, которые являются удобными для

C-WAVE AT WORK WITH TRAPPED IONS

Dr. U.Warring, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Physikalisches Institut, Freiburg,
ulrich.warring@physik.uni-freiburg.de,
Dr. N.Waasem, Hübner GmbH & Co. KG, Kassel,
niklas.waasem@hubner-photonics.com, Germany

Coulomb crystals consisting of isotopically pure Magnesium ions are build employing a new tunable continuous-wave (cw) laser light source: Mg atoms are isotope-selective ionized by resonant two-photon excitation at a wavelength of 285.3 nm. The UV laser light is generated via resonant second-harmonic generation of the output of a new cw laser C-WAVE that offers about 0.5 W singlefrequency output power that is tunable in the range 450 - 650 nm. The created Mg ions are trapped and cooled, building 2D Coulomb crystals which are used for further investigation.

The group's experimental work builds on trapped ion systems and aims (i) to gain deeper insight into complex dynamics that are influenced or even driven by quantum effects, and (ii) to control individual atoms and molecules at the highest level possible to set up manybody (model) systems. Additionally, we are exploring to combine optical traps for ions and neutral atoms [1]. Last year we demonstrated a sensitive high-resolution laser spectroscopy method building on quantum effects [2].

Common bottlenecks in all of our projects are the demanding requirements on laser systems for preparation and controlling internal and external degrees of freedom of ions. Thus our work greatly depends on innovative laser technologies that are user friendly and can be used as versatile tools to work with a variety of atomic species, isotopes, and their combination.

THE PROJECT

Topologically protected defects within Coulomb crystals can be suitable to simulate discrete solitons. During the process of crystallization, a system will seek for perfect order (minimal energy). By evolving the phase transition too fast for communication between different sections of the crystal, sub-ensembles find perfect crystalline order, while becoming incommensurate at their borders; these defects can oscillate as trapped quasi particles in their selfinduced confining potential within the crystal [3, 4].

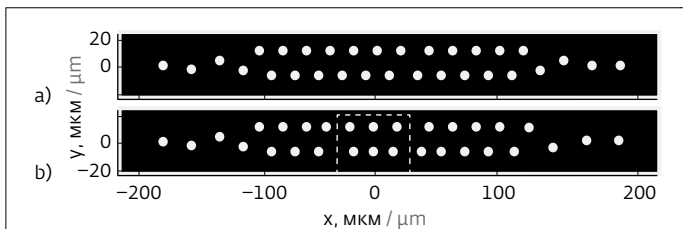


Рис.1. 1D-2D кулоновские кристаллы (31 ион): а) CCD-изображение зарегистрированного излучения флуоресценции ионов в зигзагообразной конфигурации; б) только ионы, находящиеся слева от центральной области (выделена пунктирной линией), образуют зигзагообразную структуру как на рис.1а, в то время как позиция ионов справа зеркально отражает относительно оси x позицию ионов слева

Fig. 1. 1D-2D Coulomb crystals (31 ions). а) CCD image of fluorescence light of ions in zigzag configuration. б) Only the ions to the left of the centre region (dashed box) form a zigzag structure as in 1a, whereas the positions on the right are mirrored along the x-axis

пользователя и могут использоваться как универсальный инструмент для работы с различными видами атомных частиц, изотопами и их комбинациями.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Топологически защищенные дефекты в кулоновских кристаллах могут быть пригодны для возбуждения дискретных солитонов. В процессе образования кристалла система будет стремиться к идеальному порядку структуры (минимуму энергии). Если фазовый переход протекает слишком быстро для взаимодействия разных частей кристалла, идеальную кристаллическую структуру образуют подсистемы частиц, становясь несоразмерными по краям. Эти дефекты могут осциллировать как захваченные квазичастицы в самоиндуцированном запирающем потенциале внутри кристалла [3,4].

Для изучения этих дефектов мы помещаем от 10 до 50 ионов в радиочастотную ловушку путем фотоионизации теплового пучка атомов магния в области захвата. В ловушку необходимо поместить изотопически чистый кристалл из печи, наполненной природным магнием, который богат изотопами (79% ^{24}Mg , 10% ^{25}Mg , и 11% ^{26}Mg).

Так как ионизация атомов происходит в результате двухфотонного процесса (рис.2), мы можем выборочно захватывать различные изотопы. На первом этапе ионизации резонансно возбуждается электрический дипольный переход в нейтральном атоме магния, на втором нерезонансном этапе атом ионизируется. Так как частотный

In order to study these defects we load ten to fifty ions into our conventional RF trap via photo ionizing a thermal beam of magnesium atoms within the trapping region. It is required to load an isotopically pure crystal from an oven that is filled with natural abundant magnesium isotopes (79% of ^{24}Mg , 10% of ^{25}Mg , and 11% of ^{26}Mg).

We can selectively load different isotopes as we ionize the atoms via a two photon process (Fig.2). The first step resonantly drives an electric dipole transition in the neutral magnesium, while the second non-resonant step ionizes the atoms. Due to the mass dependent frequency shift of this first transition at around 285.3 nm, we can individually address the three different isotopes [5]. By exciting the ions at around 279.6 nm we record the fluorescence light of the individual ions on a CCD camera (yielding images as shown in Fig. 1).

UTILIZING THE C-WAVE

In the present experiment the C-WAVE system is used for the photoionization step. Light at 570.6 nm is fibre coupled (coupling efficiency greater than 70 %) and sent to a homebuilt second-harmonic generation (SHG) external ring cavity using a BBO crystal to convert the VIS to the UV (285.3 nm), see Fig. 3. The UV output beam

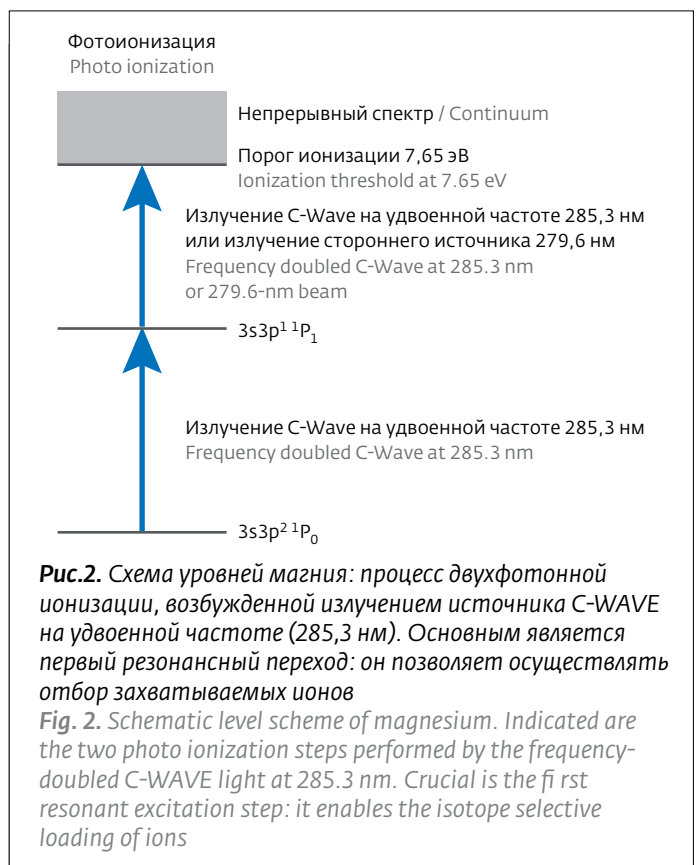


Рис.2. Схема уровней магния: процесс двухфотонной ионизации, возбужденной излучением источника C-WAVE на удвоенной частоте (285,3 нм). Основным является первый резонансный переход: он позволяет осуществлять отбор захватываемых ионов

Fig. 2. Schematic level scheme of magnesium. Indicated are the two photo ionization steps performed by the frequency-doubled C-WAVE light at 285.3 nm. Crucial is the first resonant excitation step: it enables the isotope selective loading of ions

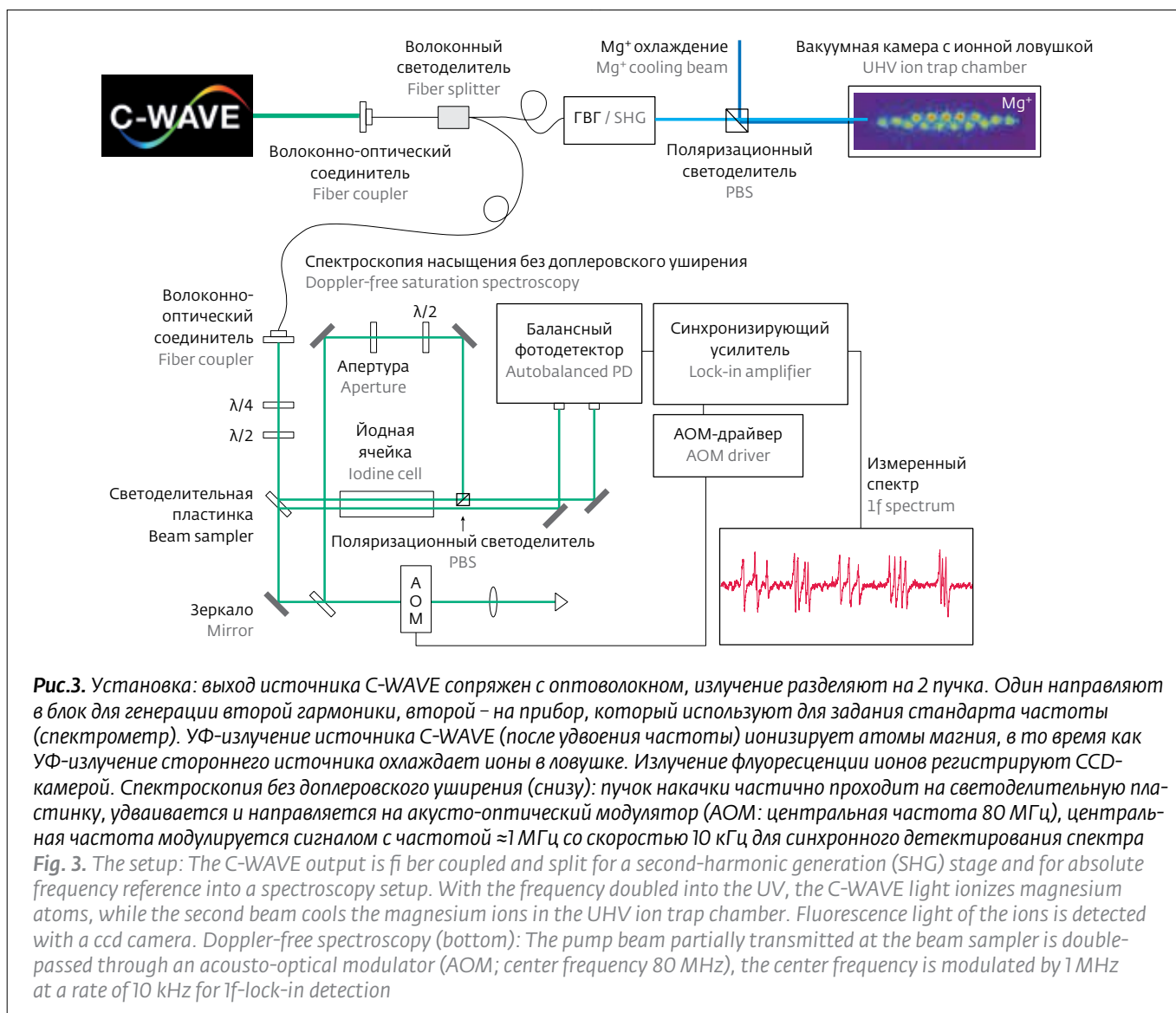


Рис.3. Установка: выход источника C-WAVE сопряжен с оптоволоком, излучение разделяют на 2 пучка. Один направляют в блок для генерации второй гармоники, второй – на прибор, который используют для задания стандарта частоты (спектрометр). УФ-излучение источника C-WAVE (после удвоения частоты) ионизирует атомы магния, в то время как УФ-излучение стороннего источника охлаждает ионы в ловушке. Излучение флуоресценции ионов регистрируют CCD-камерой. Спектроскопия без доплеровского уширения (снизу): пучок накачки частично проходит на светоделительную пластинку, удваивается и направляется на акусто-оптический модулятор (АОМ: центральная частота 80 МГц), центральная частота модулируется сигналом с частотой ≈ 1 МГц со скоростью 10 кГц для синхронного детектирования спектра Fig. 3. The setup: The C-WAVE output is fiber coupled and split for a second-harmonic generation (SHG) stage and for absolute frequency reference into a spectroscopy setup. With the frequency doubled into the UV, the C-WAVE light ionizes magnesium atoms, while the second beam cools the magnesium ions in the UHV ion trap chamber. Fluorescence light of the ions is detected with a ccd camera. Doppler-free spectroscopy (bottom): The pump beam partially transmitted at the beam sampler is double-passed through an acousto-optical modulator (AOM; center frequency 80 MHz), the center frequency is modulated by 1 MHz at a rate of 10 kHz for 1f-lock-in detection

сдвиг первого перехода ($\sim 285,3$ нм) зависит от массы изотопа, можно выбрать 3 конкретных изотопа [5]. Возбуждая ионы на длине волны $\sim 279,6$ нм, мы регистрируем флуоресцентное излучение отдельных ионов CCD камерой (полученное изображение представлено на рис.1)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ C-WAVE

Источник излучения C-WAVE в описанном эксперименте используется для фотоионизации. Излучение с длиной волны 570,6 нм по оптоволокну (эффективность сопряжения с оптоволоком $>70\%$) передается на кристалл ВВО, помещенный в самодельный внешний кольцевой резонатор, где происходит удвоение частоты: видимое излучение преобразуется в УФ (см. рис.3). Выходное УФ излу-

(a few mW) of the SHG stage is superimposed with a second UV beam at 279.6 nm (generated by a different laser system). Both are guided free-space to an ultra-high-vacuum chamber where the trap is mounted.

The beams are collimated with the central trapping region. Here the first beam ionizes the neutral magnesium atoms while the second Doppler cools the trapped ions into a crystalline structure. The ions are trapped in a combined rf and dc confinement potential. To ensure the isotopically enhanced ion loading, a fraction of the C-WAVE output light is sent to an Iodine Doppler-free saturation spectroscopy setup, see part of Fig. 3. This setup is used as an absolute frequency reference and enables accurate tuning of the C-WAVE.

A recorded 1f spectrum around 570.6 nm is shown in Fig. 4 and agrees within a few MHz with a simulated spectrum [6].

чение (мощностью несколько мВт), полученное в результате генерации второй гармоники, совмещают со вторым пучком УФ излучения на длине волны 279,6 нм (генерируется другой лазерной системой). Оба пучка без помощи оптоволокну направляют в сверхвысоковакуумную камеру, где установлена ловушка.

Пучки параллельны центральной области захвата. Первый пучок ионизирует нейтральные атомы магния, в то время как второй пучок охлаждает захваченные атомы (доплеровское охлаждение) до образования кристаллической структуры. Ионы захвачены запирающим потенциалом, образованным в результате объединения радиочастотного и электрического. Для обеспечения изотопно-обогащенного ионного захвата часть излучения источника C-WAVE направляют в прибор для спектроскопии насыщения без доплеровского уширения с йодной ячейкой (см. рис.3). Данный прибор используют для задания стандарта частоты и точной перестройки ОПГ C-WAVE.

На рис.4 представлен спектр, зарегистрированный в результате облучения йодной ячейки излучением с длиной волны 570,6 нм. Измеренный спектр в пределах нескольких МГц совпадает с расчетным спектром [6].

Система C-WAVE полностью интегрирована в наш эксперимент по захвату ионов. Благодаря ее широкому диапазону перестройки (от 450 до 650 нм), узкой ширине спектральной линии (<1 МГц) и мощности выходного излучения до 0,5 Вт, C-WAVE представляет собой непрерывный источник лазерного излучения, который отлично подходит для различных применений спектроскопии и квантово-оптических экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **T.Huber, A.Lambrecht, J.Schmidt, L.Karpa, T.Schaetz.** A far-off-resonance optical trap for a Ba⁺ ion. – Nat Comm. 5, (2014).
2. **G.Clos, M.Enderlein, U.Warring, T.Schaetz, D.Leibfried.** Decoherence-Assisted Spectroscopy of a Single Mg⁺ Ion. – Phys. Rev. Lett. 112, 113003 (2014).
3. **M.Mielenz, J.Brox, S.Kahra, G.Leschhorn, M.Albert, H.Landa, B.Reznik, T.Schaetz.** Trapping of Topological-Structural Defects in Coulomb Crystals. – Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 133004.
4. **H.Landa, J.Brox, M.Mielenz, B.Reznik, T.Schaetz.** Structure, Dynamics and Bifurcation of Discrete Solitons in Trapped Ion Crystals. – New J. Phys. 15 (2013) 093003.
5. **N.Kjaergaard, L.Hornekaer, A.Thommesen, Z.Videsen, M.Drewsen.** Isotope selective loading of an ion trap using resonance-enhanced two-photon ionization. – Applied Physics B: Lasers and Optics 71, 207 (2000).
6. **H.Knoeckel and E.Tiemann.** Computer code IodineSpec5, 2013.

The C-WAVE system is fully integrated into our experiment with trapped ions. Due to its wide tuning range from 450-650 nm, its demonstrated narrow linewidth < 1 MHz, and the high output in the 0.5 W range, C-WAVE is a flexible CW laser light source, well suited for various applications in spectroscopy and quantum optic experiments. confinement potential. To ensure the isotopically enhanced ion loading, a fraction of the C-WAVE output light is sent to an Iodine Doppler-free saturation spectroscopy setup, see part of Fig. 3. This setup is used as an absolute frequency reference and enables accurate tuning of the C-WAVE. A recorded 1f spectrum around 570.6 nm is shown in Fig. 4 and agrees within a few MHz with a simulated spectrum [6]. The C-WAVE system is fully integrated into our experiment with trapped ions. Due to its wide tuning range from 450-650 nm, its demonstrated narrow linewidth < 1 MHz, and the high output in the 0.5 W range, C-WAVE is a flexible CW laser light source, well suited for various applications in spectroscopy and quantum optic experiments.

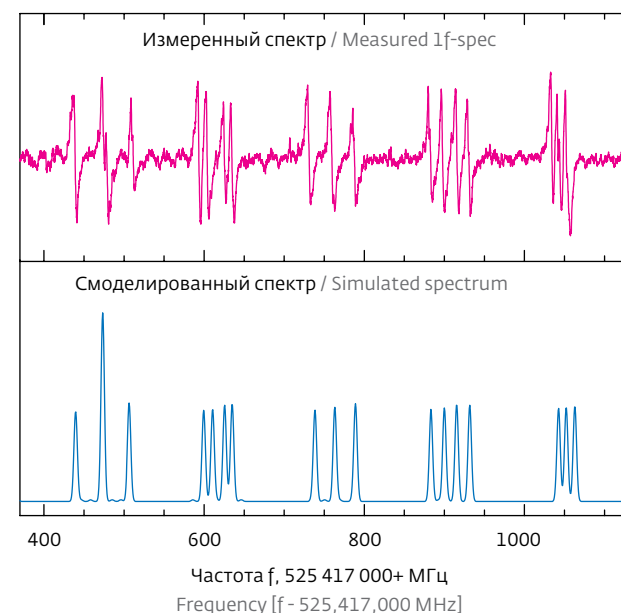


Рис.4. Спектр йода в частотном диапазоне от 525 417 400 МГц до 525 418 100 МГц. В прибор для спектроскопии насыщения без доплеровского уширения было направлено излучение с длиной волны 570,6 нм мощностью около 10 мВт. На графиках сравниваются измеренный и расчетный спектры

Fig. 4. Iodine spectrum in the frequency range 525,417,400 MHz to 525,418,100 MHz. About 10 mW of the 570.6 nm light is sent to the Doppler-free saturation spectroscopy setup. The figure compares the recorded 1f-spectrum with a calculated spectrum