

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМОВ РУБИДИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ САПФИРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ НАНОЯЧЕЙКИ

А. Саргсян

УДК 543.42; 620.3:546.35

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения;
e-mail: sarmeno@mail.ru

(Поступила 28 октября 2022)

Экспериментально исследовано влияние диэлектрической поверхности на атомы Rb (D_2 -линии) при нанометровых расстояниях. Использование наноячейки, заполненной атомарным рубидием с клиновидным зазором, позволило исследовать влияние расстояния атомов в интервале 45—150 нм от поверхности окна, изготовленного из технического сапфира. При расстояниях от сапфировой поверхности <130 нм вследствие ван-дер-ваальсова взаимодействия происходит сильное уширение атомных переходов ^{85}Rb и ^{87}Rb , а их частотные сдвиги осуществляются в низкочастотную область спектра. Применение метода второй производной спектров поглощения наноячейки позволило измерить коэффициент ван-дер-ваальсова взаимодействия $C_3 = 1.8 \pm 0.3 \text{ кГц} \cdot \text{мкм}^3$ для D_2 -линии Rb. Показано, что при толщине наноячейки $65 \pm 5 \text{ нм}$ с увеличением плотности атомов происходит дополнительный красный сдвиг, обусловленный диполь-дипольным взаимодействием атомов Rb. Результаты могут быть использованы при разработке миниатюрных субмикронных устройств.

Ключевые слова: наноячейка, ван-дер-ваальсово взаимодействие, атомы Rb.

The influence of the dielectric surface on Rb atoms of D_2 -line at nanometer distances has been experimentally studied. The use of a nanocell filled with atomic rubidium with a wedge-shaped gap, has made it possible to study the influence of the distance of atoms in the range of 45–150 nm from the surface of a window made of commercial sapphire. At distances from the sapphire surface of less than 130 nm, due to the van der Waals interaction, ^{85}Rb and ^{87}Rb atomic transitions are strongly broadened, and their frequency shifts are carried out to the low-frequency spectrum region. The use of the method of the second derivative of the nanocell absorption spectra has made it possible to measure the van der Waals interaction coefficient $C_3 = 1.8 \pm 0.3 \text{ kHz} \cdot \mu\text{m}^3$ for Rb D_2 -line. It is shown that at a nanocell thickness of $65 \pm 5 \text{ nm}$, an additional red shift occurs with atoms density increase, due to the dipole-dipole interaction of Rb atoms. The results can be used in the development of miniature submicron devices.

Keywords: nanocell, van der Waals interaction, Rb atoms.

Введение. Известно, что в ряде практических применений размеры спектроскопических ячеек, содержащих атомы щелочных металлов, целесообразно уменьшать. Описаны различные устройства успешного применения спектроскопических ячеек микронной толщины, содержащих пары атомов щелочных металлов [1]. В частности, в субмикронных ячейках снижается нежелательное влияние оптической накачки на эффективность оптических переходов [2], которое объясняется частыми столкновениями атомов с поверхностью ячеек, ведущими к релаксации атомов на нижний исходный уровень, в то время как с уменьшением размеров ячейки среднее расстояние между атомами и окнами ячейки также уменьшается. В связи с этим необходимо исследовать влияние близко расположенной диэлектрической поверхности на спектроскопические характеристики атомов. Работы [3—5] основаны на анализе формы линии селективного отражения (СО) лазерного излучения от границы внутрен-

STUDY OF THE INTERACTION OF RUBIDIUM ATOMS WITH SAPPHIRE SURFACE USING SPECTROSCOPIC NANOCELLS

A. Sargsyan (Institute for Physical Research, National Academy of Sciences of Armenia, Ashtarak, Armenia; e-mail: sarmeno@mail.ru)

няя поверхность окна спектроскопической ячейки—атомарные пары металла. В данном случае определяющий вклад в форму линии СО вносят атомы, находящиеся от окна ячейки на расстояниях $L \sim \lambda/2\pi$, где λ — длина волны резонансного перехода в атоме, который находится в ближнем ИК-диапазоне (0.7—0.9 мкм). При этом $L \sim 120$ нм, однако такая относительно большая величина L из-за малости ван-дер-ваальсова (ВдВ) взаимодействия атомов с поверхностью окна приводит к малым красным сдвигам частоты перехода в несколько мегагерц, которые трудно измерить в зашумленном спектре СО. При $L > \lambda/2\pi$ взаимодействие атома со стенкой описывается взаимодействием Казимира—Полдера [6].

Разработанные оптические наноячейки (НЯ), заполненные парами щелочных металлов, удобны для исследования ВдВ-взаимодействия атомов с поверхностью, поскольку в этом случае L может быть значительно меньше, вплоть до десятков нанометров. Исследуя резонансное поглощение лазерного излучения в парах атомов [7—10], СО лазерного излучения [11—13] и резонансную флуоресценцию паров атомов [14, 15], можно определить коэффициент ВдВ-взаимодействия C_3 для атомов щелочных металлов.

В настоящей работе исследованы ВдВ-взаимодействия атомов Rb с диэлектрической поверхностью для D_2 -линии. Использование высокотемпературной отпаянной НЯ с клиновидным зазором между внутренними поверхностями окон позволяет исследовать энергетическую структуру атомов Rb на расстояниях 40—1500 нм от внутренних поверхностей сапфировых окон НЯ.

Эксперимент. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Для изучения процесса резонансного поглощения в НЯ, заполненной Rb, использовано излучение диодного лазера с внешним резонатором (ECDL, VitaWave [16]) с $\lambda = 780$ нм, шириной линии 1 МГц. Ячейка заполнена природным рубидием (72 % ^{85}Rb и 28 % ^{87}Rb). Расстояние между внутренними поверхностями НЯ (толщина зазора) $L = 40$ —1500 нм (изменяется по вертикали). НЯ помещена внутрь двухсекционного нагревателя, обеспечивающего независимый нагрев окон и отростка, в котором находится металлический Rb. Плотность атомов Rb определяется температурой (T) отростка. При вертикальном перемещении НЯ лазерное излучение проходит через разную толщину зазора с парами атомов Rb, следовательно, изменяется расстояние L атомов Rb до окон НЯ. Толщина зазора определена по методике [2]. Детали конструкции НЯ приведены в [7]. Излучение лазера направлено перпендикулярно окнам НЯ, измерено поглощение паров атомов при сканировании частоты лазера вблизи D_2 -линии. Диаметр пучка 0.7 мм, мощность излучения 15 мВт. Оптическое излучение зарегистрировано фотодиодами ФД-24К, сигналы с которых усиливались и подавались на четырехканальный осциллограф Tektronix TDS 2024C. Часть лазерного излучения направлена на узел 9 для формирования реперного спектра с использованием дополнительной НЯ [10].

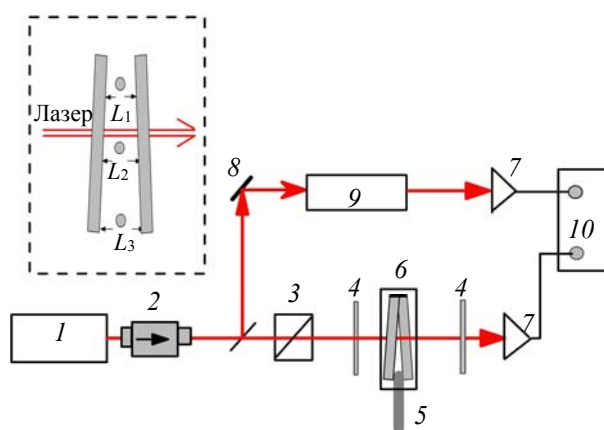


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — диодный лазер на длине волны 780 нм (ECDL), 2 — фарадеевский изолятор, 3 — поляризационная призма, 4 — фильтры, 5 — основная НЯ с Rb, окна изготовлены из технического сапфира с размером 20×30 мм², 6 — нагреватель, 7 — фотоприемники, 8 — зеркало, 9 — узел для формирования реперного спектра на основе НЯ, 10 — цифровой осциллограф; на вставке — НЯ с клиновидным зазором, $L_1 < L_2 < L_3$

Результаты и их обсуждение. Зависимость частотных сдвигов переходов от толщины. На рис. 2 представлены спектр поглощения $A(\nu)$ НЯ при $L = 45 \pm 5$ нм для изотопов ^{87}Rb и ^{85}Rb и его вторая производная (ВП) $A''(\nu)$. Вследствие влияния ВдВ-взаимодействия на атомные переходы Rb последние сильно уширены (дополнительно к доплеровскому уширению и столкновительному уширению атомов с окнами НЯ [12]) и частично частотно перекрыты. Применение метода ВП $A''(\nu)$ [10, 17, 18] к спектрам поглощения атомарных паров позволяет спектрально разделить атомные переходы, при этом правильно передаются как частотные интервалы между переходами, так и их относительные вероятности. Здесь и далее спектр $A''(\nu)$ для удобства инвертирован. Для измерения частотных сдвигов переходов на кривой 3 приведен частотный репер, который является ВП спектра поглощения от НЯ при толщине 390 нм, когда влиянием ВдВ-эффекта можно пренебречь [10]. Показаны частотные сдвиги переходов в результате влияния эффекта ВдВ. Красное смещение частоты переходов относительно их начальных положений составляет $\Delta\nu_{\text{ВдВ}} \sim -270$ МГц. Отметим, что величина красного сдвига -270 МГц одинакова для обоих изотопов ^{85}Rb и ^{87}Rb . В работе [19] поясняется физический механизм ВдВ-взаимодействия: атом схематически изображен в виде диполя и показано индуцированное им зеркальное отображение в диэлектрическом окне НЯ. Таким образом, атомы находятся в электрическом поле индуцированных диполей и вследствие эффекта Штарка происходит красный частотный сдвиг. В [19] также показано, что спектральная плотность всегда максимальна для атомов вокруг центра НЯ $z = L/2$ (z — расстояние атома от стенки). Из формулы (2) [19] следует, что для центра НЯ $z = L/2$ полный красный частотный сдвиг, обусловленный влиянием обоих окон НЯ:

$$\Delta\nu_{\text{ВдВ}} = -16C_3/L^3, \quad (1)$$

где коэффициент C_3 определяет ВдВ-взаимодействие атома Rb с поверхностью (сапфировым окном НЯ), $T = 160$ °С, плотность атомов $N = 1.6 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$. В этом случае $N/k^3 \approx 0.3 < 1$ (k — волновое число) означает, что диполь-дипольное взаимодействие атомов Rb не приводит к дополнительному частотному смещению [20]. Это важно для правильного определения $\Delta\nu_{\text{ВдВ}}$ и, следовательно, коэффициента C_3 .

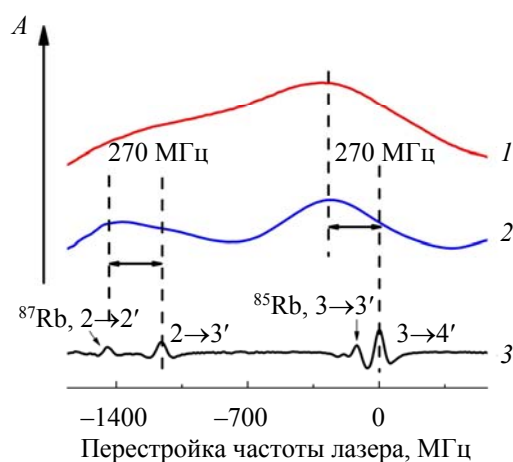


Рис. 2. Спектр поглощения НЯ при толщине атомарных паров $L = 45 \pm 5$ нм (1) и его ВП (2); красное смещение частоты переходов относительно их начальных положений $\Delta\nu_{\text{ВдВ}} \sim -270$ МГц; 3 — реперный спектр ВП спектра поглощения от НЯ с $L = 390$ нм; мощность лазера 15 мкВт, ячейка нагрета до $T = 160$ °С; отмечена группа переходов ^{87}Rb , $2 \rightarrow F_g = 2', 3'$ и ^{85}Rb , $3 \rightarrow F_g = 3', 4'$ (штрихами отмечены верхние уровни)

На рис. 3 приведены ВП спектров поглощения при изменении толщины НЯ от 130 ± 5 до 75 ± 5 нм. Отчетливо видно частотное красное смещение с уменьшением L . Погрешность определения толщины $L = \pm 5$ нм [2] приводит к погрешности определения коэффициента $C_3 = 1.8 \pm 0.3$ кГц · мкм 3 (рис. 4). Отметим, что такие измерения наиболее удобно проводить с помощью НЯ. Величина C_3 , измеренная нами, близка к экспериментально полученной в [15] $C_3 = 1.4 \pm 0.1$ кГц · мкм 3 , однако ближе к теоретически предсказанной в той же работе $C_3 = 2.1 \pm 0.1$ кГц · мкм 3 .

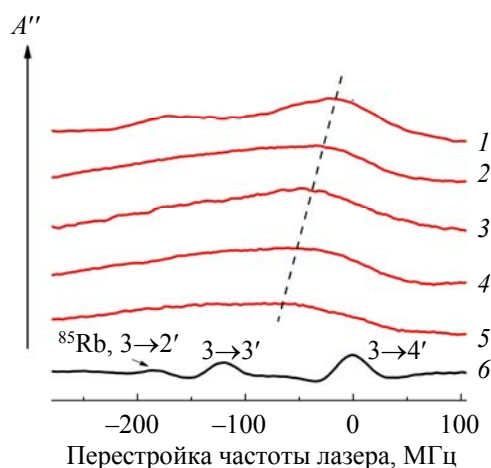


Рис. 3. Спектры ФП экспериментальных спектров поглощения от НЯ при изменении L : 130 ± 5 (1), 100 ± 5 (2), 90 ± 5 (3), 85 ± 5 (4), 75 ± 5 нм (5), 6 — реперный спектр ФП поглощения НЯ с $L = 390$ нм; отмечена группа переходов ^{85}Rb , $3 \rightarrow F_g = 2', 3', 4'$

Зависимость частотных сдвигов переходов от плотности паров атомов. Как показано [20, 21], НЯ играет роль низкодобротного эталона Фабри—Перо по следующей причине. Внутренние поверхности сапфировых окон НЯ (с отражением 8 %) можно считать практически параллельными (клин очень слабый), поскольку максимальное расстояние между внутренними поверхностями в нижней части НЯ 2—3 мкм, в то время как высота окна 30 мм, следовательно, угол между внутренними поверхностями ~ 0.1 мрад. В [20] выражение (1) определяет частотный сдвиг атомного перехода в НЯ в зависимости от безразмерного параметра L/λ . Отсюда следует, что при $L/\lambda \ll 1$ сдвиг остается красным (лоренц-лоренцевым) $\Delta\nu_{\text{ЛЛ}} = -\pi N/k^3 \Gamma^{-1}$, обусловленным диполь-дипольным взаимодействием Rb–Rb, где Γ — радиационная ширина соответствующего атомного перехода; для Rb D_2 -линии $\Gamma/2\pi = 6$ МГц. Как показано [2, 20, 22], для атомов Cs, Rb и К при толщинах НЯ $L < 80$ нм с увеличением плотности N атомов при $N/k^3 \geq 1$ регистрируется красный частотный сдвиг $\Delta\nu_{\text{ЛЛ}}$, а суммарный частотный сдвиг состоит из двух слагаемых: $\Delta\nu_{\text{ВдВ}} + \Delta\nu_{\text{ЛЛ}}$.

На рис. 5 приведены спектры поглощения НЯ при увеличении температуры отростка НЯ от 175 до 311 °С (при повышении температуры плотность атомов Rb возрастает), а также зависимость суммарного красного частотного сдвига ($\Delta\nu_{\text{ВдВ}} + \Delta\nu_{\text{ЛЛ}}$). Для НЯ с $L = 65 \pm 5$ нм величина $\Delta\nu_{\text{ВдВ}} = -85$ МГц фиксирована, поскольку определяется толщиной L при $N/k^3 \ll 1$.

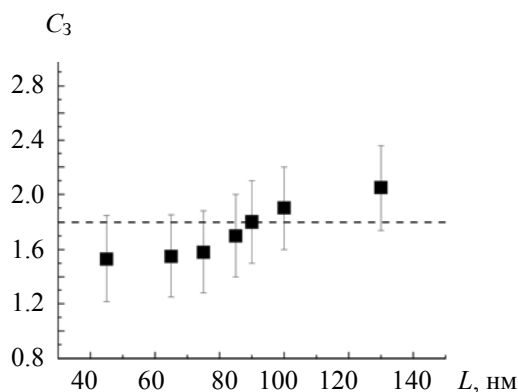


Рис. 4. Зависимость коэффициента $C_3 = 1.8 \pm 0.3$ кГц \cdot мкм³ ВдВ-взаимодействия атома Rb, D_2 -линии от L ; погрешность определения толщины $\Delta L = \pm 5$ нм

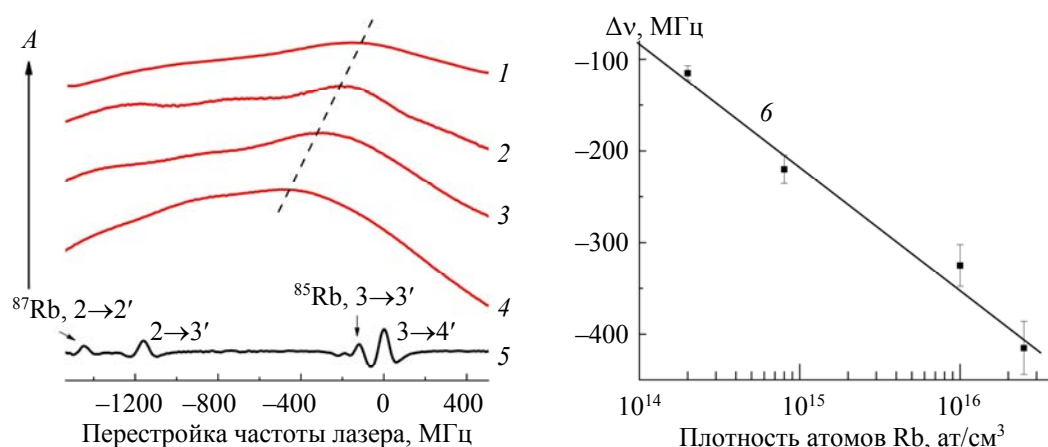


Рис. 5. Спектры поглощения при увеличении температуры отростка НЯ с $L = 65 \pm 5$ нм: 75 (1), 212 (2), 275 (3) и 311 °C (4); 5 — реперный спектр ВП НЯ с $L = 390$ нм; 6 — зависимость суммарного красного частотного сдвига $\Delta\nu_{\text{вдв}} + \Delta\nu_{\text{лл}}$ для НЯ с $L = 65$ нм ($\Delta\nu_{\text{вдв}} = -85$ МГц) от плотности паров атомов рубидия; погрешность 7 %

Закключение. Экспериментально исследовано влияние взаимодействия атомов рубидия с окнами наноячейки, изготовленными из технического сапфира, на частотное положение атомных переходов D_2 -линии при нанометровых расстояниях между атомами Rb и поверхностью сапфира. Использование высокотемпературной наноячейки с клиновидным зазором позволило исследовать зависимость сдвигов сверхтонких переходов атомов ^{85}Rb и ^{87}Rb от расстояния L между атомами и поверхностью сапфира в интервале 40—150 нм. При $L < 130$ нм вследствие ван-дер-ваальсова взаимодействия происходят сильное уширение атомных переходов и их сдвиг в низкочастотную область спектра (красный сдвиг). Применение метода второй производной спектра поглощения паров в наноячейке позволило измерить частотные красные сдвиги и определить коэффициент ван-дер-ваальсова взаимодействия $C_3 = 1.8 \pm 0.3$ кГц · мкм³. При толщине наноячейки $L < 65$ нм с увеличением плотности атомов Rb (при $N/k^3 \geq 1$) дополнительно к частотному сдвигу $\Delta\nu_{\text{вдв}}$ регистрируется красный частотный сдвиг $\Delta\nu_{\text{лл}}$, обусловленный диполь-дипольным взаимодействием Rb–Rb. Для регистрации сдвига $\Delta\nu_{\text{лл}}$ необходимы температуры > 200 °C. Интерес к использованию наноячейки в спектроскопии возрастает, однако недавно разработанные стеклянные наноячейки [23, 24] не могут быть использованы при высоких температурах, поскольку при $T > 170$ — 180 °C происходит сильное взаимодействие горячих паров Rb со стеклом, приводящее к его почернению, в то время как взаимодействие паров Rb с сапфиром отсутствует до $T \sim 500$ °C. Полученные результаты важны как для фундаментальных исследований атом—диэлектрическая поверхность, так и при разработке миниатюрных субмикронных устройств.

Автор выражает благодарность Д. Саркисяну за полезные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке комитета по науке Министерства образования, науки, культуры и спорта Республики Армения в рамках научного проекта № 21T-1C005.

- [1] J. Kitching. Appl. Phys. Lett., **5** (2018) 031302
- [2] J. Keaveney. Collective Atom Light Interactions in Dense Atomic Vapours, Springer (2014)
- [3] M. Chevrollier, M. Fichet, M. Oria, G. Rahmat, D. Bloch, M. Ducloy. J. Phys. II (France), **2** (1992) 631
- [4] H. Failache, S. Saltiel, M. Fichet, D. Bloch, M. Ducloy. Phys. Rev. Lett., **83** (1999) 5467
- [5] D. Bloch, M. Ducloy. Adv. At. Mol. Opt. Phys., **50** (2005) 91
- [6] A. Laliotis, T. Passerat de Silans, I. Maurin, M. Ducloy, D. Bloch. Nat. Commun., **5** (2014) 4364
- [7] T. Peyrot, N. Šibalić, Y. R. P. Sortais, A. Browaeys, A. Sargsyan, D. Sarkisyan, I. G. Hughes, C. S. Adams. Phys. Rev. A, **100** (2019) 022503
- [8] А. Саргсян, Т. А. Вартамян, Д. Саркисян. Опт и спектр., **128** (2020) 589
- [9] A. V. Ermolaev, T. A. Vartanyan. Phys. Rev. A, **105** (2022) 013518

-
- [10] A. Sargsyan, A. Amiryan, Y. Pashayan-Leroy, C. Leroy, A. Papoyan, D. Sarkisyan. *Opt. Lett.*, **44** (2019) 5533
- [11] M. Fichet, G. Dutier, A. Yarovsky, P. Todorov, I. Hamdi, I. Maurin, S. Saltiel, D. Sarkisyan, M. P. Gorza, D. Bloch, M. Ducloy. *Europhys. Lett.*, **77** (2007) 54001
- [12] A. Sargsyan, A. Papoyan, I. G. Hughes, Ch. S. Adams, D. Sarkisyan. *Opt. Lett.*, **42** (2017) 1476
- [13] A. Laliotis, B.-S. Lu, M. Ducloy, D. Wilkowski. *AVS Quantum Sci.*, **3** (2021) 043501
- [14] K. A. Whittaker, J. Keaveney, I. G. Hughes, A. Sargsyan, D. Sarkisyan, C. S. Adams. *Phys. Rev. Lett.*, **112** (2014) 253201
- [15] K. A. Whittaker, J. Keaveney, I. G. Hughes, A. Sargsyan, D. Sarkisyan, C. S. Adams. *Phys. Rev. A*, **92** (2015) 052706
- [16] V. V. Vassiliev, A. S. Zibrov, V. L. Velichansky. *Rev. Sci. Instrum.*, **77** (2006) 013102
- [17] A. Саргсян. *Журн. прикл. спектр.*, **89** (2022) 17—23 [A. Sargsyan. *J. Appl. Spectr.*, **89** (2022) 17—23]
- [18] M. Auzinsh, A. Sargsyan, A. Tonoyan, C. Leroy, R. Momier, D. Sarkisyan, A. Papoyan. *Appl. Opt.*, **61** (2022) 5749—5754
- [19] A. Sargsyan, E. Klinger, C. Leroy, I. G. Hughes, D. Sarkisyan, C. S. Adams. *J. Phys. B*, **52** (2019) 195001
- [20] T. Peyrot, Y. R. P. Sortais, A. Browaeys, A. Sargsyan, D. Sarkisyan, J. Keaveney, I. G. Hughes, C. S. Adams. *Phys. Rev. Lett.*, **120** (2018) 243401
- [21] G. Dutier, S. Saltiel, D. Bloch, M. Ducloy. *J. Opt. Soc. Am. B*, **20** (2003) 793
- [22] A. Саргсян, А. Тоноян, Д. Саркисян. *Письма в ЖЭТФ*, **115** (2022) 346—352
- [23] T. Peyrot, Ch. Beurthe, S. Coumar, M. Roullay, K. Perronet, P. Bonnay, C. S. Adams, A. Browaeys, Y. R. P. Sortais. *Opt. Lett.*, **44** (2019) 1940
- [24] T. F. Cutler, W. J. Hamlyn, J. Renger, K. A. Whittaker, D. Pizzey, I. G. Hughes, V. Sandoghdar, C. S. Adams. *Phys. Rev. Appl.*, **14** (2020) 034054