

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 535.317.2

ОБЪЕКТИВ С ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ 0.4 ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПИНЦЕТОВ АТОМОВ ИТТЕРБИЯ

©2025 г. А. А. Головизин^{a, b, *}, Н. Ю. Шлыков^{a, b, c}, М. О. Яушев^{a, c},
С. В. Климов^{a, b, c}, А. А. Двуреченский^{a, b, c}, Д. О. Трегубов^{a, b},
Н. Н. Колачевский^{a, b}

^a *Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук*

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^b *Московский физико-технический институт*

(национальный исследовательский университет)

Россия, 141701, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

^c *Международный центр квантовых технологий*

Россия, 121205, Москва, Сколково, Большой бульвар, 30, стр. 1

**e-mail: artem.golovizin@gmail.com*

Поступила в редакцию 14.04.2025 г.

После доработки 18.04.2025 г.

Принята к публикации 10.06.2025 г.

Приводится описание и характеристики разработанного широкоапертурного объектива для экспериментов с ультрахолодными атомами иттербия. Объектив состоит из стандартных моделей асферической линзы и ахроматического дублета, имеет числовую апертуру 0.4, рабочее расстояние 30–35 мм и скорректирован на вакуумное окно толщиной 5 мм. Экспериментально продемонстрировано формирование оптического пинцета на длине волны 759 нм с радиусом перетяжки 0.92 мкм и изображения плоскости оптических пинцетов на длине волны 556 нм с разрешением на уровне нескольких микрон. Разработанный объектив прост в изготовлении и подходит для применения в большом числе экспериментов (в том числе с атомами тулия), в которых геометрия вакуумной камеры требует использования объектива с большим рабочим расстоянием.

1. ВВЕДЕНИЕ

Широкоапертурные объективы, или объективы с высокой числовой апертурой NA , используются в различных областях науки и техники, в том числе и в атомной физике.

Дифракционный предел фокусировки излучения с длиной волны λ объективом с числовой апертурой NA определяется формулой Аббе

$$d = \frac{\lambda}{2NA},$$

соответственно большая числовая апертура объектива позволяет достичь меньшего размера моды излучения в фокусе (перетяжке). Одним из применений широкоапертурных объективов является создание оптических пинцетов – оптических дипольных ловушек с размером перетяжки менее 1 мкм, в которых возможен детерминистический захват одиночного атома [1–5]. Использование широкоапертурного объектива также необходимо для обеспечения высокой эффективности сбора фотонов люминесценции от атомов в оптических пинцетах для детектирования наличия атома в пинцете и/или его квантового состояния [3, 6–8]. Высокая эффективность сбора фотонов, испущенных атомом, также необходима для осуществления детектирования перепутывания атома и фотона, что актуально для создания квантовой памяти [9, 10] и устройств для соединения квантовым каналом двух квантовых систем (интерконнектов) [11–13].

В экспериментах с холодными атомами наличие вакуумной камеры накладывает дополнительные требования к широкоапертурному объективу: если объектив размещать вне вакуумной камеры, то необходимо обеспечить большое рабочее расстояние (от 10 мм в системах с оптическими ячейками [14] до примерно 50 мм в “классических” вакуумных камерах [15]) и коррекцию на вакуумное окно. Также возможно размещение объектива внутри вакуумной камеры [16], что позволяет уменьшить рабочее расстояние, однако такой подход сопряжен с рядом технических трудностей и обладает малой возможностью подстройки системы.

В настоящей работе мы представляем разработку и исследование объектива с числовой апертурой 0.4 с рабочим расстоянием 30–35 мм, предназначенного для создания оптических пинцетов на длине волны 759 нм и сбора люминесценции одиночных атомов иттербия на длине волны 556 нм (см. рис. 1а), захваченных в эти пинцеты. Объектив состоит из асферической линзы и ахроматического дублета диаметром 40 мм, обеспечивающих поперечное увеличение 4.4. Оптическая система регистрации люминесценции дополнительно включает в себя короткофокусную асферическую линзу и ахроматический дублет. Стоит отметить, что все используемые линзы доступны в каталогах для заказа, что устраняет необходимость их штучного изготовления и существенно снижает сроки и стоимость создания объектива [17, 18].

Рис. 1. а – Энергетическая структура атома иттербия. Излучение на длине волны 399 нм используется для первичного охлаждения атомов иттербия... **б, в** – принципиальные оптические схемы формирования оптического пинцета на длине волны 759 нм...

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТИВА

Требования к объективу определялись исходя из геометрии вакуумной системы, в которой происходит лазерное охлаждение атомов иттербия, а также задействованных длин волн. Они следующие:

- рабочее расстояние объектива должно быть не менее 30 мм, что соответствует расстоянию от центра вакуумной камеры до внешней поверхности вакуумного окна (система аналогична описанной в работе [19] для атомов тулия);
- объектив должен быть скорректирован на 5-миллиметровое вакуумное окно;
- диаметр объектива должен быть не более 50 мм (оптимально 40 мм) в связи с необходимостью обеспечения оптического доступа через вакуумное окно для других лазерных пучков (в том числе одного из пучков магнитооптической ловушки);
- объектив должен обеспечивать формирование оптического пинцета на длине волны 759 нм с минимально достижимой перетяжкой (т.е. с фокусировкой излучения внутрь вакуумной камеры);
- объектив должен обеспечивать формирование изображения атома, захваченного в оптическом пинцете, на длине волны 556 нм размером порядка 16 мкм (размер пикселя sCMOS-фотокамеры Tucsen Aries16, которая будет использоваться для детектирования люминесценции атома);
- должно быть выполнено ограничение засветки фотокамеры в области изображения атома до уровня, не превышающего ожидаемый сигнал от люминесценции атома; при использовании перехода на длине волны 556 нм с шириной линии перехода 180 кГц для детектирования атома этот сигнал составляет порядка 1000 фотонов/с.

Расчет параметров объектива и их оптимизация выполнялись с использованием специализированного программного обеспечения путем расчета хода лучей. На первом этапе расчета объектива оптимизировался только размер перетяжки оптического пинцета (длина волны 759 нм) в конфигурации с точечным источником излучения с числовой апертурой 0.1 (obj1, совпадает с параметрами излучения на выходе из одномодового оптоволокна), см. рис. 16. После перебора нескольких вариантов была найдена подходящая конфигурация из двух линз – ахроматического дублета (L2) и асферической линзы (L1). В ней длиннофокусный

ахроматический дублет с фокусным расстоянием $f_{L2}=160$ мм коллимирует пучок лазерного излучения, а асферическая линза с фокусным расстоянием $f_{L1}=40$ мм используется для его фокусировки в оптический пинцет внутри вакуумной камеры. В расчетах учитывались наличие вакуумного окна (W) толщиной 5 мм из плавленого кварца после асферической линзы и расстояние от центра вакуумной камеры до вакуумного окна, равное 25 мм. В табл. 1 представлены найденные оптимальные расстояния между оптическими элементами, при которых обеспечивается фокусировка излучения в перетяжку диаметром 0.92 мкм на полувысоте на дифракционном пределе с числом Штреля $S = 0.997$. Оптическая система считается дифракционно-ограниченной для $S \geq 0.8$.

Таблица 1. Оптимальные параметры объектива для формирования оптического пинцета на длине волны 759 нм

Элементы оптической системы	obj1–L2	L2–L1	L1–W
Расстояние, мм	171.204	82.052	1.838

В связи с тем, что детектирование люминесценции атома, захваченного в оптический пинцет, будет осуществляться с использованием этого же объектива, второй этап оптимизации объектива включал минимизацию размера изображения на длине волны 556 нм. Здесь дополнительно требовалось формирование промежуточного изображения (перетяжки) для установки диафрагмы для пространственной фильтрации. Расчет проводился для точечного источника с числовой апертурой 0.4 (obj2, см. рис. 1в). В итерационном процессе сперва был выполнен подбор дополнительной оптической системы, состоящей из асферической линзы (L3) с фокусным расстоянием $f_{L3}=7.5$ мм (Thorlabs A375TM-A) и ахроматического дублета (L4) с фокусным расстоянием $f_{L4}=15$ мм (Thorlabs AC064-015-A). В такой конфигурации с параметрами расположения первых двух линз объектива из табл. 1 удалось получить изображение точечного объекта радиусом 40 мкм при поперечном увеличении 8.

Следующим шагом являлась оптимизация объектива с учетом как характеристик оптического пинцета на длине волны 759 нм, так и размера изображения на фотокамере на длине волны 556 нм. Расстояния между линзами объектива представлены в табл. 2. В такой конфигурации удастся одновременно достичь близкой к дифракционному пределу ($S = 0.8$) фокусировки оптического пинцета с диаметром на полувысоте 0.95 мкм и при этом получить размер (радиус) изображения на фотокамере, равный 12 мкм, при увеличении 8.2, что уже сравнимо с размером одиночного пикселя камеры, равного 16 мкм.

Таблица 2. Оптимальные параметры объектива для формирования оптического пинцета на длине волны 759 нм и одновременно изображения атома на длине волны 556 нм

Элементы оптической системы	img2 – L4	L4 – L3	L3 – L2	obj1 – L2	L2–L1	L1–W
Расстояние, мм	18	24	190.905	194.97	130	0.5

Примечание. img2 – положение изображения на длине волны 556 нм (рис. 1в), obj1 – положение точечного источника излучения 759 нм с числовой апертурой 0.1 (рис. 1б).

Рис. 2. а – Расчетные профили интенсивности оптического пинцета; X и Y указывают на смещение положения пинцета... **б** – график рассчитанного значения числа Штреля в зависимости от смещения оптического пинцета...

Важной характеристикой широкоапертурного объектива, помимо числовой апертуры (и размера перетяжки), является размер рабочей области (FOV, field of view). В нашем случае размер рабочей области будет определять размер массива оптических пинцетов. Таким образом, можно сформировать массив с радиусом перетяжки, близким к минимальному значению на оси объектива, и получить разделяемые изображения одиночных атомов, захваченных в такой массив, на фотокамере. Рассчитанные профили интенсивности оптических пинцетов и изображений атомов в них на фотокамере для различных смещений оптического пинцета от оси объектива представлены на рис. 2а и 3. На рис. 2а видно, что размер центральной части оптического пинцета (радиусы w_x и w_y по уровню $1/e^2$) изменяется от 0.72 мкм в центре до 0.86 мкм при удалении на 100 мкм, и при этом доля мощности в центральной части снижается с 66% до 50%. На рис. 3 видно, что размер изображения на фотокамере изменяется незначительно, и при этом во всех случаях в область 2×2 пикселя попадает от 80% до 90% собираемого излучения (фотонов) от атома, что должно обеспечить высокую достоверность определения наличия/отсутствия атома в пинцете.

Рис. 3. Расчетные профили интенсивности изображения точечного источника (одиночного атома) для различных смещений X и Y от оптической оси в мкм.

В эксперименте минимальное расстояние между отдельными оптическими пинцетами будет ограничиваться перекрестными помехами как при формировании оптических пинцетов, так и на изображении при считывании. Из данных по распределению интенсивности оптических пинцетов (рис. 2а) можно заключить, что для пинцетов со смещением X и Y от оси объектива не более 50 мкм мощность излучения на расстоянии $a_1 = 4$ мкм и более от центра пинцета не превышает 1% мощности в центре, а на расстоянии $a_2 = 6$ мкм она имеет значение менее 0.1%. С учетом того, что изображение на фотокамере формируется с поперечным увеличением, равным 8.2, атомы в пинцетах будут отображаться

на расстоянии $b_1 = 32.8$ мкм (примерно 2 пикселя фотокамеры) и $b_2 = 49.2$ мкм (примерно 3 пикселя фотокамеры) при расстояниях между пинцетами a_1 и a_2 соответственно. Как видно на рис. 3, при расстоянии между центрами изображений $b_2 = 49.2$ мкм (примерно 3 пикселя фотокамеры) вклад сигнала от соседнего атома не должен превышать 1–2% от полезного уровня сигнала. Таким образом, для рабочей области 100×100 мкм² (± 50 мкм по каждой оси) и расстоянии между пинцетами 6 мкм возможно создание массива из $17 \times 17 = 289$ пинцетов.

3. СБОРКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТИВА

Опираясь на рассчитанные параметры, мы выполнили сборку объектива, подробная оптическая схема которого представлена на рис. 4а, а трехмерная модель — на рис. 4б. Каркас объектива был выполнен из элементов 60-миллиметровой каркасной системы с тубусами с внутренним диаметром 2 дюйма (стандартные компоненты Thorlabs). Асферическая линза L1 (Edmund Optics 66-314, фокусное расстояние $f_{L1}=40$ мм), диаметр которой равен 40 мм, установлена в самодельный адаптер с резьбой SM2. Ахроматический дублет (Edmund Optics 49-382, фокусное расстояние $f_{L2}=160$ мм) диаметром 40 мм установлен с использованием самодельного адаптера внутрь тубуса. Далее установлен поляризационный светоделитель (куб со стороной 12.5 мм) с рабочей длиной волны 759 нм. Он служит дихроичным элементом – отражает более 95% излучения оптического пинцета (для вертикальной поляризации) и пропускает 50% излучения на длине волны 556 нм. Излучение на длине волны 759 нм для создания оптического пинцета выводится из одномодового оптоволокна P3-830-FC-5 (коннектор FC/APC), которое при помощи адаптера SM1FCA и кинематического держателя KM100T установлено на трехкоординатный микрометрический стол NanoMax MAX313D/M (все компоненты изготовлены компанией Thorlabs). Последний используется для установки выхода оптоволокна на ось объектива (с учетом отражения от светоделительного куба). Люминесценция атома, захваченного в перетяжке оптического пинцета (обозначение А на рис. 4), на длине волны 556 нм собирается первыми двумя линзами объектива и проходит через светоделительный куб в направлении фотокамеры. Для устранения засветки от излучения на длине волны 759 нм, которая образуется вследствие отражения от различных элементов объектива и вакуумной камеры, установлено цветное оптическое стекло C3C21 толщиной 6 мм, которое ослабляет излучение на длине волны 759 нм более чем в 10^{10} раз, при этом пропускает 60% излучения на длине волны 556 нм. Это излучение фокусируется в точку на расстоянии 30 мм от светоделительного куба, где установлена диафрагма с изменяемым диаметром отверстия для

пространственной фильтрации излучения. Затем с помощью ахроматической линзы (L3) с фокусным расстоянием $f_{L3}=7.5$ мм (Thorlabs A375TM-A) и ахроматического дублета (L4) с фокусным расстоянием $f_{L4}=15$ мм (Thorlabs AC064-015-A) изображение фокусируется на sCMOS-фотокамеру Tucsен Aries16.

Рис. 4. а, б – Оптическая схема и трехмерная модель высокоапертурного объектива

После сборки объектива в соответствии с рассчитанными расстояниями между оптическими элементами была проведена его характеристика, состоящая из следующих шагов:

- 1) кварцевое окно, аналогичное установленному в вакуумной камере, располагалось в 0.5 мм от края объектива для корректного учета вносимых им аберраций;
- 2) с использованием 60-миллиметровой каркасной системы устанавливался выход вспомогательного одномодового оптического волокна (коннектор FC/PC) на расстоянии 25 мм от кварцевого окна; излучение, выходящее из этого волокна, таким образом имитирует перетяжку оптического пинцета и ожидаемую люминесценцию атома;
- 3) положение фотокамеры настраивалось таким образом, чтобы обеспечить фокусировку излучения на длине волны 556 нм, вышедшего из вспомогательного оптоволоконка; фиксировалась координата центра изображения на фотокамере;
- 4) положение и угол оптоволоконка (F), которое доставляет излучение для формирования оптического пинцета, настраивались так, чтобы обеспечить максимальную эффективность ввода его излучения во вспомогательное оптоволоконко;
- 5) после этого сборка вспомогательного оптоволоконка заменялась на миру (R1DS1N1), которая устанавливалась на трехкоординатный микрометрический стол и юстируемую оправку (аналогично используемой для вывода излучения (F) для оптического пинцета); ее положение настраивалось таким образом, чтобы получить максимально четкое изображение на фотокамере при подсветке излучением 556 нм; фотографии, полученные с использованием камер Tucsен Aries16 (размер пикселя 16 мкм) и Basler a2a-1920 (размер пикселя 3.45 мкм), показаны на рис. 4г, д; на фотографии рис. 4е, сделанной фотокамерой Basler a2a-1920, отчетливо различимы риски шириной 2 мкм, что говорит о хорошем качестве изображения, формируемого объективом; увеличение объектива равно 8.2;
- 6) следующим шагом вместо миры устанавливалось лезвие с фотодиодом, которое использовалось для измерения профиля распределения мощности в перетяжке

оптического пинцета на длине волны 759 нм, формируемого объективом; были измерены профили распределения мощности излучения в перетяжке для смещения оптоволокна (F) в диапазоне ± 0.5 мм от положения, выставленного в п. 4, и найдено оптимальное положение, обеспечивающее минимальный размер перетяжки; результаты этого измерения показаны на рис. 4в (зеленые точки); зеленая линия отображает аппроксимацию экспериментальных данных функцией Гаусса, из которой был определен размер перетяжки 0.92 мкм по уровню $1/e^2$; для сравнения на этом же графике приведен расчетный вид профиля излучения (синяя линия); видно, что экспериментальные данные хорошо совпадают с теоретической моделью.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы выполнили моделирование, сборку и исследование характеристик широкоапертурного объектива с числовой апертурой 0.4, который будет использоваться для формирования оптических пинцетов и захвата в них одиночных атомов иттербия для экспериментов в области квантовых симуляций и вычислений. Объектив состоит из коммерчески доступных линз, имеет большое рабочее расстояние (30.5 мм) и скорректирован на 5-миллиметровое окно вакуумной камеры. Объектив позволяет создавать оптический пинцет на длине волны 759 нм с размером перетяжки 0.95 мкм, что близко к дифракционному пределу (число Штреля 0.8), и одновременно собирать излучение от атома, удерживаемого в этом пинцете, на длине волны 556 нм и отображать это излучение на sCMOS-фотокамеру. Размер рабочей области объектива оценен по результатам моделирования, он составляет 100×100 мкм², что позволяет создать массив из более чем 200 оптических пинцетов. Этого более чем достаточно для первого поколения экспериментальной установки, в которой планируются исследование и отработка методов захвата одиночных атомов иттербия и манипулирования их квантовым состоянием.

Простота конструкции объектива открывает возможности его использования для других экспериментов с ультрахолодными атомами. В частности, аналогичная конструкция может быть применена для создания оптических пинцетов для атомов тулия, где дипольную ловушку можно формировать на длине волны 813 нм (магическая длина волны для часового перехода на длине волны 1.14 мкм), а регистрацию наличия атома в пинцете проводить по люминесценции на длине волны 530.7 нм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Настоящая работа была выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-72-10102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anderegg L., Cheuk L.W., Bao Y. et al.* // Science. 2019. V. 365. P. 1156.
<https://doi.org/10.1126/science.aax1265>
2. *Wilson J.T., Saskin S., Meng Y. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. P. 033201.
<https://doi.org/10.1103/physrevlett.128.033201>
3. *Manetsch H.J., Nomura G., Bataille E. et al.* arXiv:2403.12021. 2024.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.12021>
4. *Cooper A., Coveyl J.P., Madjarov I.S., Porsev S.G., Safronova M.S., Endres M.* // Phys. Rev. X. 2018. V. 8. P. 041055. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.041055>
5. *Kaufman A.M., Ni K.-K.* // Nat. Phys. 2021. V. 17. P. 1324. <http://dx.doi.org/10.1038/s41567-021-01357-2>
6. *Bloch D., Hofer B., Cohen S.R., Browaeys A., Ferrier-Barbut I.* // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131, P. 203401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.203401>
7. *Covey J.P., Madjarov I.S., Cooper A., Endres M.* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. P. 173201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.173201>
8. *Saskin S., Wilson J.T., Grinkemeyer B., Thompson J.D.* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. P. 143002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.143002>
9. *Drmota P., Main D., Nadlinger D.P. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 130. P. 090803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.090803>
10. *Specht H.P., Nölleke C., Reiserer A. et al.* // Nature 2011 473:7346. Nature Publishing Group, 2011. V. 473, № 7346. P. 190–193. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09997>
11. *Li Y., Thompson J.D.* // PRX Quantum. V. 5. P. 020363. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.5.020363>
12. *Covey J.P., Weinfurter H., Bernien H.* // npj Quantum Inf. 2023. V. 9. P. 90. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2304.02088>
13. *Daiss S., Langenfeld S., Welte S. et al.* // Science. 2021. V. 371. P. 614. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2103.13095>
14. *Jenkins A., Lis J., Senoo A., McGrew W., Kaufman A.* Ytterbium Nuclear-Spin Qubits in an Optical Tweezer Array // Phys. Rev. X. 2022. V. 12. P. 021027. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.12.021027>
15. *Бетеров И.И., Якишина Е.А. Третьяков Д.Б. и др.* // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 6. С. 543.

16. *Samoylenko S.R., Lisitsin A.V., Schepanovich D., Bobrov I.B., Straupe S.S., Kulik S.P.* // Laser Phys. Lett. 2020. V. 17. P. 025203. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab6729>
17. *Pritchard J.D., Isaacs J.A., Saffman M.* // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 73107. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4959775>
18. *Li Sh., Li G., Wu W. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. P. 043104. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0001637>
19. *Yaushev M., Mishin D., Tregubov D. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2024. V. 96. P. 33202. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0252998>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. **а** – Энергетическая структура атома иттербия. Излучение на длине волны 399 нм используется для первичного охлаждения атомов иттербия, излучение на длине волны 556 нм – для вторичного охлаждения, а также для детектирования наличия атома в оптическом пинцете; 578 нм – длина волны часового перехода, 759 нм – магическая длина волны оптической дипольной ловушки для часового перехода; **б, в** – принципиальные оптические схемы формирования оптического пинцета на длине волны 759 нм из точечного источника с числовой апертурой 0.1 (*obj1* соответствует одномодовому оптоволокну, *img1* – сформированному пинцету) и формирования изображения одиночного атома (*obj2* соответствует одиночному атому, *img2* – его изображению), *L1–L4* – линзы объектива, *W* – окно вакуумной камеры. На рис. 1б лучи идут слева направо, на рис. 1в – справа налево.

Рис. 2. **а** – Расчетные профили интенсивности оптического пинцета; *X* и *Y* указывают на смещение положения пинцета от оптической оси в мкм, *w_x*, *w_y* – радиус (в мкм) по уровню $1/e^2$ центрального пятна, η – доля мощности излучения в центральном пятне; **б** – график рассчитанного значения числа Штреля в зависимости от смещения оптического пинцета от оптической оси объектива.

Рис. 3. Расчетные профили интенсивности изображения точечного источника (одиночного атома) для различных смещений *X* и *Y* от оптической оси (в мкм). Пунктирные белые линии отображают границы пикселей фотокамеры (размер 16 мкм). Сплошные белые линии выделяют квадрат из 4 пикселей, по суммарному сигналу от которого будет определяться наличие/отсутствие атома в оптическом пинцете. Указанные числа соответствуют части ($1/1000$) мощности излучения (числа фотонов) внутри выделенной области в полной мощности (числе фотонов), попадающей на фотокамеру

Рис. 4. **а, б** – Соответственно оптическая схема и трехмерная модель высокоапертурного объектива: *A* – положение одиночного атома, *W* – окно вакуумной камеры, *L1–L4* – линзы объектива, *BS* – светоделительный куб, *F* – выход одномодового оптоволокну, *G* – сине-зеленое стекло (светофильтр), *S* – диафрагма, *CAM* – фотокамера. Объектив собран на алюминиевой плите размером 40×40 см² и толщиной 18 мм с отверстиями М6; **в** – экспериментально измеренный профиль оптического пинцета

(точки), его аппроксимация функцией Гаусса (зеленая сплошная линия) и рассчитанный профиль (синяя сплошная линия) для случая смещения от оптической оси на 20 мкм; г – фотографии миры R1DS1N1, расположенной в фокусе объектива; д – увеличенное изображение выделенной на рис. 4г области; е – фотография миры, сделанная на фотокамеру Basler a2a-1920 с размером пикселя 3.45 мкм.

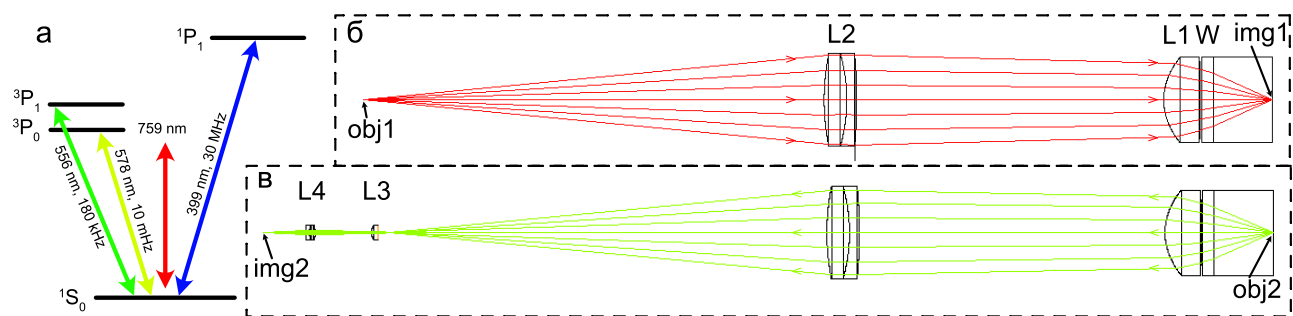


Рис.1.

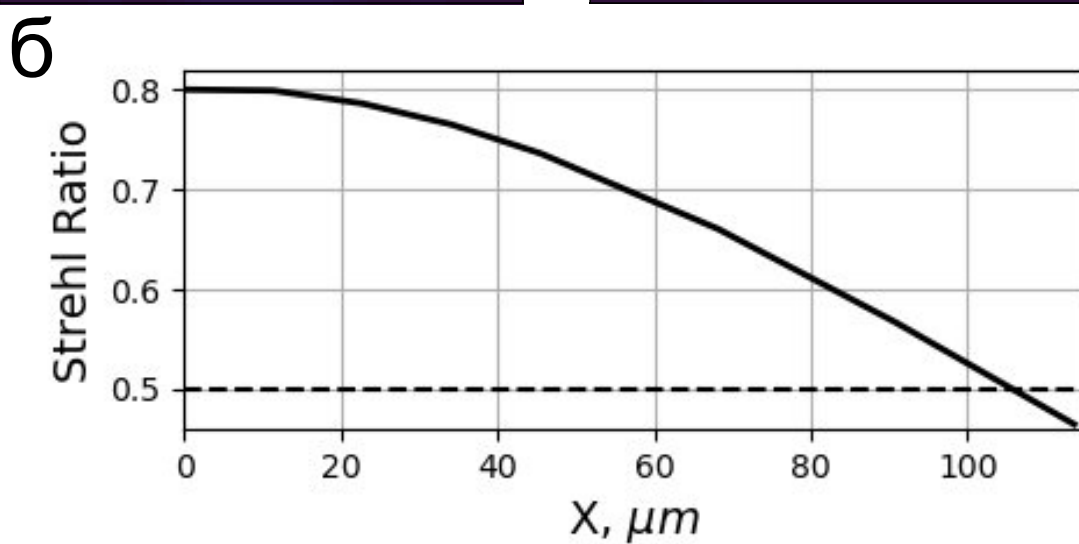
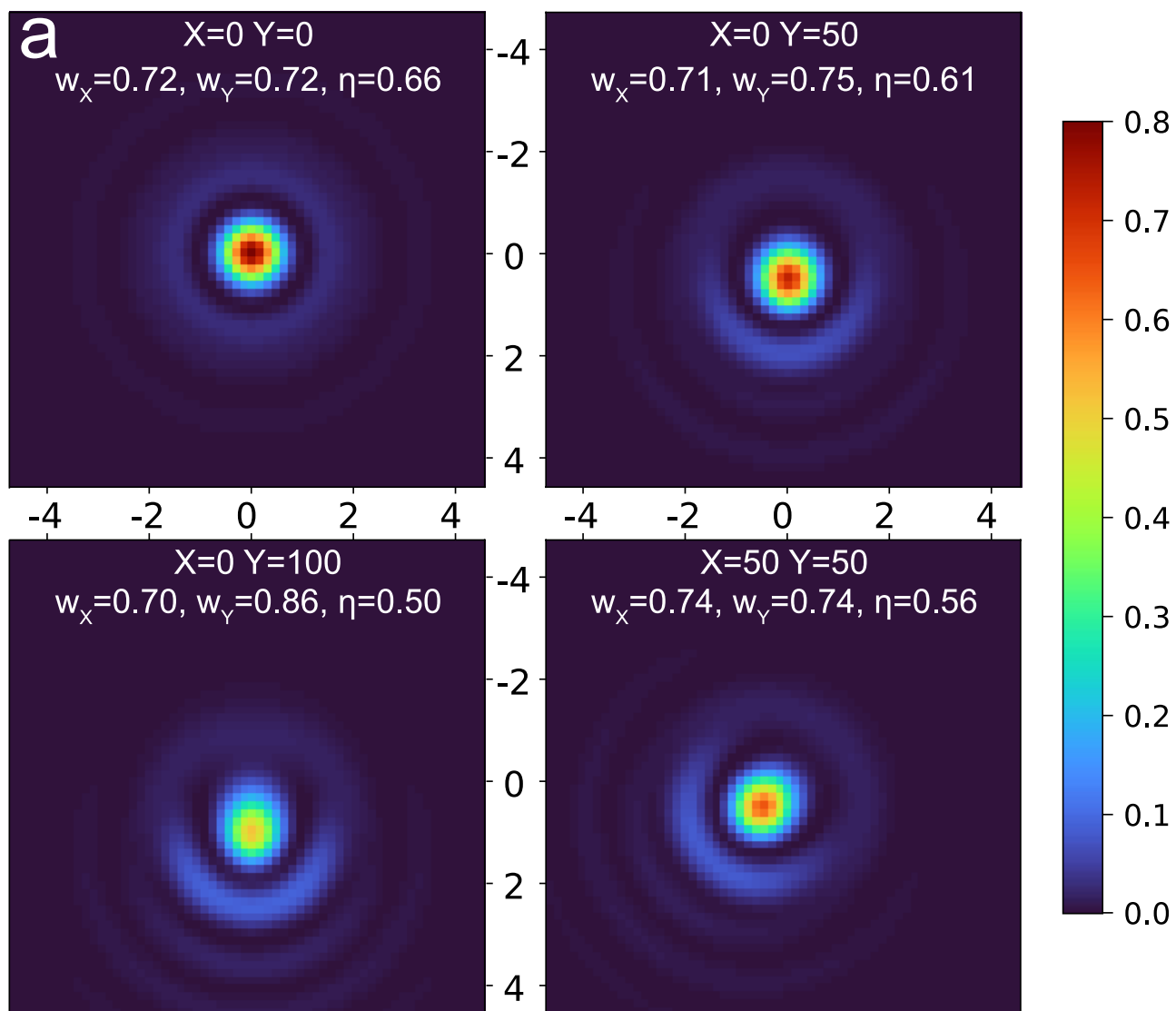


Рис. 2.

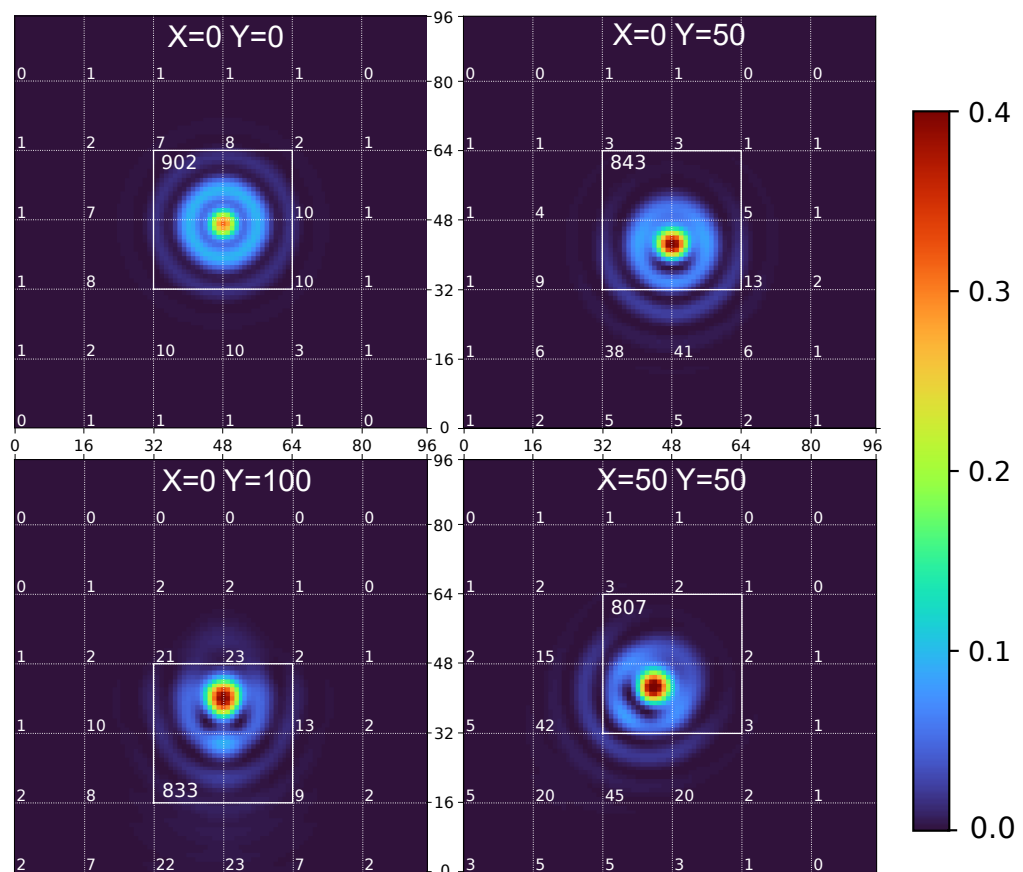


Рис. 3.

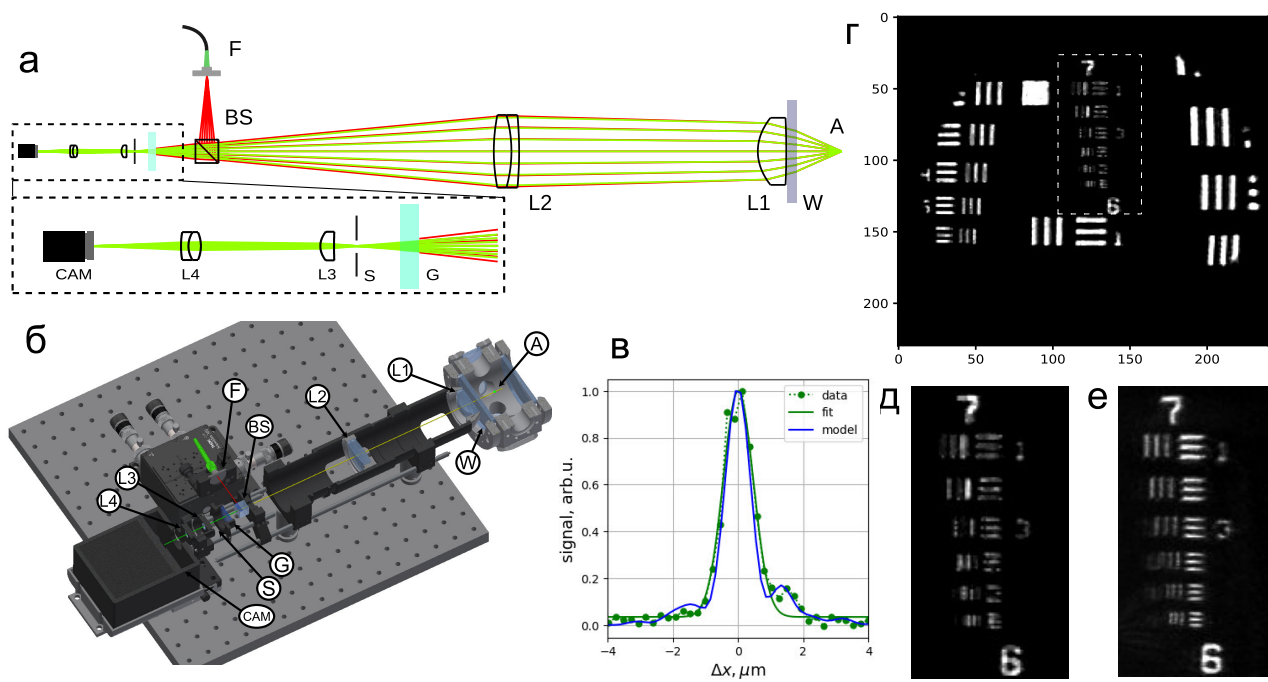


Рис. 4.