

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Іван ПРОЦЕНКО
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 171 Електроніка

освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **Радіочастотні та електрооптичні іонні пастки в мас-спектрометричних вимірюваннях і квантових обчисленнях**

Захист – англійською мовою: **Radio-frequency and electro-optical ion traps in mass spectrometric measurements and quantum computing**

Здобувача групи ЕП-91

Назаренка Даніїла Сергійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Даніїл НАЗАРЕНКО

Керівник професор кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики, д-р ф.-м.н., професор

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

Консультант ст.викладач кафедри іноземних мов та Лігводидактики, канд.філос.н.

Ніна МАЛЬОВАНА

Суми – 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ
І.Ю. Проценко

«16» травня 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Назаренка Данііла Сергійовича

Тема роботи **РАДІОЧАСТОТНІ ТА ЕЛЕКТРООПТИЧНІ ІОННІ ПАСТКИ
В МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАННЯХ І КВАНТОВИХ
ОБЧИСЛЕННЯХ**

затверджена наказом по університету від «15» травня 2023 р., № 0499-VI _____

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 12 червня 2023 року _____

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Актуальність тематики обумовлена широким використанням іонних пасток як базових компонентів сучасних контрольно-вимірювальних пристроїв високої точності. Іонні пастки застосовуються в квантовій криптографії, атомних годинниках, мас-спектрометрії, квантових комп'ютерах, експериментальних установках для вивчення атомно-іонної взаємодії. Мета кваліфікаційної роботи полягає в аналізі фізичних принципів функціонування, класифікації та конструктивно-технологічних особливостей радіочастотних та електрооптичних іонних пасток; проведенні теоретичних розрахунків і аналізі результатів експерименту з захоплення іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у лінійній іонній пастці Пауля.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. У літературному огляді представити результати стосовно питання фізичних принципів функціонування радіочастотних та електрооптичних пасток та їх застосування. .

2. Описати методику захоплення іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у лінійній іонній пастці.

3. На основі експериментальних даних і результатів розрахунків устаовити можливість проведення подальших досліджень на квантовому і атомному рівні та використання в квантових комп'ютерах.

4. Навести результати експериментальних досліджень і розрахунків, їх обробки та висновки.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайд № 1. Актуальність і мета роботи, методи досліджень.

Слайди № 2-3. Загальна інформація про іонні пастки.

Слайди 4-6. Принципи функціонування іонних пасток різних типів.

Слайди 7-10. Методика і техніка експериментальних досліджень, прилади та устаткування.

Слайд №11- 14. Експериментальні і розрахункові результати.

Слайд №15. Висновки.

Слайд №16. Список публікацій.

6. Дата видачі завдання 16.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 21.05.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 04.06.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 11.06.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	12.06.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	21.06.2023 р., 10-00 – 13-00 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Назаренко Д.С.

Науковий керівник

Однодворець Л.В.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 45 сторінках, зокрема, містить 27 рисунків, 1 таблицю, список використаних джерел із 31 найменувань.

Актуальність тематики обумовлена широким використанням іонних пасток як базових компонентів сучасних контрольно-вимірювальних пристроїв високої точності. Іонні пастки застосовуються в квантовій криптографії, атомних годинниках, мас-спектрометрії, квантових комп'ютерах, експериментальних установках для вивчення атомно-іонної взаємодії [1-2].

Мета кваліфікаційної роботи полягала в аналізі фізичних принципів функціонування, класифікації та конструктивно-технологічних особливостей радіочастотних та електрооптичних іонних пасток; проведенні теоретичних розрахунків і аналізу результатів експерименту з захоплення іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у лінійній іонній пастці Пауля.

Методи і методики: методика захоплення іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у лінійній іонній пастці.

Отримані результати:

1. Проведено аналіз фізичних принципів функціонування, класифікації та конструктивно-технологічних особливостей радіочастотних та електрооптичних оптичних іонних пасток, які знайшли застосування в мас-спектрометрії, атомній фізиці, точних квантових годинниках та квантових комп'ютерах.

2. Установлено, що основним принципом дії електрооптичної іонної пастки при захваті і утриманні іонів є електрооптичний потенціал, який виникає внаслідок взаємодії суперпозиції одновимірної оптичної решітки з електричним квадрупольним потенціалом.

3. Отримані захоплені одиночні іони, система з двох іонів та Кулонівський кристал з іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у ЛПП. Розраховані ідеальні відстані між двома іонами за напругою на торцевих електродах, величина якої складала 21; 43 і 129 В.

4. Установлено, що радіус зображення іонів $^{40}\text{Ca}^+$ становить 0.65 мкм, геометричні розміри і об'єм Кулонівського кристалу мають величини $a = 27.95$ мкм і $b = c = 13$ мкм та $V = 1,98 \cdot 10^{-14}$ м³ відповідно.

Рекомендації щодо використання: використання іонних пасток є актуальним через можливість проведення подальших досліджень на квантовому і атомному рівні та їх використанні у квантових комп'ютерах

Результати роботи були представлені та обговорені на Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2023» (м. Суми).

Ключові слова: радіочастотна іонна пастка, іонна пастка Пауля, лінійна іонна пастка, електрооптична іонна пастка, захоплення іонів, кулонівський кристал.

ABSTRACT

The structure and scope of the qualification work for obtaining a bachelor's degree: Diploma for the bachelor's degree consists of 45 pages, 27 Figures, 1 Table, references, which contain 31 names.

The purpose of the qualification work is to analyze the physical principles of work, classification, and construction properties of radio-frequency (RF) and electro-optical ion traps. Another goal is to calculate and analyze the results of the experiment on trapping $^{40}\text{Ca}^+$ ions in a linear Paul ion trap.

Actuality: a wide range of application of ion traps, as the main component of many modern high accuracy control and measuring devices. Using ion traps finds wide application in quantum cryptography, atomic clocks, mass spectrometry, quantum computers, experimental setups for researching atomic-ion interaction. Studying the properties of individual atoms and ions allows to understand their behavior at the quantum level and opens new horizons in the understanding of microscopic processes and interactions between atoms. In conclusion, more research's results today are related to the study of the microworld or its components.

The objectives of the research:

- to describe principles of work and structural properties of radio-frequency and electro-optical ion traps;
- to establish physical principles of trapping ions;
- to compare advantages and disadvantages of radio-frequency and electro-optical methods for trapping ions;
- to determine an ideal distance between two $^{40}\text{Ca}^+$ ions;
- to calculate the size of the image of single $^{40}\text{Ca}^+$ ion;
- to compute geometrical parameters of a trapped Coulomb crystal.

Methods: the method of trapping ions in a linear ion Paul trap. Literature review of methods for electro-optical trapping ions.

As the result of researching of theme was figured out, that application of ion traps is still actual, due to the possibility of further research at the quantum and atomic

level, using in quantum computers. The results of the experimental part are single and two $^{40}\text{Ca}^+$ trapped ions. Also, the ideal interionic distance and the ion image size on the camera are calculated. In addition, Coulomb crystal have been trapped, and its size, volume were theoretically calculated.

The results of the research were presented and discussed at the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Physics, Electronics, Electrical Engineering, FEE-2023" (Sumy) in the publication theses «Ion Paul trap: physical principle of work and their application» in the section 4 "Electronic information systems" on the page 49.

The first chapter describes a general review of the theme and actuality of the application of radio-frequency (RF) ion traps and electro-optical (EO) ion traps. Literature review of scientific publications is related to the research with both types of ion traps. In today's world, RF ion traps are widely used in the research, which is related, to non-classical and coherent emission from large ionic Coulomb crystals, atom-ion interaction, the use in quantum cryptography and quantum computers. It is essential to admit, that among RF traps, the design of a linear ion trap is more often used for research due to more stable trapping and holding of ions.

The necessity of application of EO traps is related with the presence of several limitations for conducting in RF ion traps. The major disadvantage of RF ion trap is the relatively high energy of the atom-ion interaction. Another problem is micromotion, which leads to the heating mechanism. A significant property of EO is the possibility of non-contact manipulation of neutral particles. As a result, EO ion traps are used in the study of biological objects, where it is critical not to damage or contaminate the samples. It is also possible to study saline solutions and colloidal nanomaterials.

The second chapter demonstrates physical principles of the work and construction properties of RF and EO ion traps. Trapping and holding in RF ion traps, in a quasi-equilibrium position is carried out by electromagnetic field. The principle of work is based on the producing of a saddle potential by the electrodes, which prevents the release of a particle in one dimension, but the possibility remains for another.

Further holding of the particle in space is provided by a rotating electromagnetic field due to the frequency of the alternating current. The electric field strength at the center of the trap is zero, and at all other points the Lorentz force directed towards the center, which prevents releasing of particles and keeps them in a quasi-equilibrium position in space. Therefore, the charged particle is held in the saddle point formed by the pseudopotential, which is formed as the result of the rotation of the electromagnetic field by π .

RF traps are divided into one-dimensional and two-dimensional. The basis of the three-dimensional traps are two hyperbolic electrodes directed towards each other and a toroidal ring between them. Two-dimensional or linear ion traps consist of four hyperboloidal or cylindrical parallel rods and two end electrodes. Due to this, the rods limit the radial release of particles, and the end electrodes – axial by using a static field. As the result, linear ion traps have the advantages described in the first chapter. It should be noted that linear ion trap was used in the setup for the experimental part of the work.

The key principle of optical trapping and holding is the property of light to have impulse and create pressure on the object. The particle scatters light beam and moves in the direction of the concentration of the beam. One of the methods of trapping particles in EO ion trap is realized by the electro-optical potential which is created by interaction of the superposition of a one-dimensional optical lattice with the electric quadrupole potential. The optical potential is formed by the interference of two crossed laser beams tuned to the wavelength closest to the atomic transition of ions.

Another type is dipole EO ion traps, where two lasers directed to each other in such a way that the focus of the circular Gaussian beams coincides at one point with their wave vector aligned to the ions located in the center of the narrowing of the beams. In both EO ion trap methods, RF trap is used for holding ions in the radial plane and the optical potential holds the ions along the axial plane. The crucial requirement for the technical setup of the EO traps is optical access to the place of trapping, which must be sufficient to provide access for multiplexed laser beams for particle manipulation.

The third chapter stresses out the experimental part with images of trapped $^{40}\text{Ca}^+$ ions in the linear ion trap. The main purpose of the experimental part is to determine the distance between ions and the size of its images on the camera. A high vacuum was previously gotten in the vacuum chamber, using the parameters in the vacuum. Parameters of linear ion trap for trapping $^{40}\text{Ca}^+$ ions were $\omega_{RF} \approx 30.2$ MHz, and the power on the Helmholtz coils was 1-4 W. For observation, the ions were cooled by the Doppler cooling method with two lasers with a wavelength of 397 nm and 866 nm. For calculations and a larger sample for the experiment, the voltage on the end electrodes was gradually increased from 0 V to 800 V. Single and two $^{40}\text{Ca}^+$ ions were trapped. It is valuable to admit that the images also contain camera's artifacts because of digital zoom. These artifacts are easily distinguished from ions by the fact that they do not change their position during increasing the value of the voltage. First, the size of one pixel was determined from the ideal distance between two ions. Distance was calculated based on parameters of ion trap and voltage. The pixel size corresponds to the calculated distance divided by the number of pixels. The average value of three measurements was chosen for calculating the size of one pixel. The size of the image of the trapped ion is $r_{^{40}\text{Ca}^+} = 0.65 \mu\text{m}$ and $D_{^{40}\text{Ca}^+} = 1.3 \mu\text{m}$. The micro motion of the particle and the resolution of the camera affected the results.

Coulomb crystal, which consists of $^{40}\text{Ca}^+$ ions was trapped in another part of the experimental work. Coulomb crystals are a spatially ordered structure of microparticles. Elements of Coulomb crystals are formed and arranged only by the laws of the classical electromagnetic interaction of charged particles. Linear ion trap was used for trapping, with the parameters of the radial frequency of the RF field $\omega_{RF} \approx 188.4$ MHz and voltage on the end electrodes $U_{DC} = 800$ V and cooled by Doppler cooling with lasers with wavelengths of 397 nm and 866 nm. Coulomb crystal has axial symmetry and a spheroidal shape due to the use of a linear ion trap. Geometric parameters of Coulomb crystal are: $a = 27.95 \mu\text{m}$, $b = c = 13 \mu\text{m}$, $V = 1.98 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3$.

CONCLUSION

5. During the project, an analysis of the physical principles of work, classification and structural and technological properties of radio-frequency and electro-optical optical ion traps were carried out. Ion traps are widely used in mass spectrometry, atomic physics, precise quantum clocks and quantum computers.

6. It is shown that radio-frequency ion trap (quadrupole, Paul traps) is a type of ion trap which uses an alternating electromagnetic field for trapping charged particles. The simplest geometry of the electric field in such a trap is a quadrupole, but more complex geometries can be used in specialized setups. Traps can be divided into two classes, depending on how the field oscillations provide trapping: in three or two dimensions. In the two-dimensional ion trap (linear radio-frequency trap), the restriction of the particle's movement in the third direction is provided by a static electric field.

7. Based on literary data analysis, it was established that the main principle of trapping and holding ions in the electro-optical ion trap is the electro-optical potential, which is produced by interaction of the superposition of a one-dimensional optical lattice with an electric quadrupole potential.

8. Single, System of two $^{40}\text{Ca}^+$ ions and Coulomb crystal, which consist of $^{40}\text{Ca}^+$ ions were trapped in the linear ion trap. The ideal distances between two ions were calculated according to the voltage on the end electrodes, the value of which was 21; 43 and 129 V.

9. It was determined that the radius of the image of $^{40}\text{Ca}^+$ ion is $0.65\ \mu\text{m}$, the geometric size and the volume of the Coulomb crystal are $a = 27.95\ \mu\text{m}$ and $b = c = 13\ \mu\text{m}$ and $V = 1.98 * 10^{-14}\ \text{m}^3$.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ІОННІ ПАСТКИ ЯК БАЗОВІ ЕЛЕМЕНТИ СУЧАСНИХ ПРИБАДІВ ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ.....	12
1.1. Радіочастотні пастки Пауля	12
1.2. Електрооптичні пастки.....	15
РОЗДІЛ 2 ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ІОННИХ ПАСТОК	17
2.1. Фізичні принципи дії РЧ іонних пасток	17
2.2. Конструкції та схеми установок із РЧ пастками	22
2.3. Принцип дії електрооптичних пасток.....	26
2.4. Конструкція електрооптичних пасток	31
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗАХОПЛЕНИХ ІОНІВ.....	33
3.1. Проведення експерименту	33
3.2. Розрахунок відстані між двома іонами і розмірів зображень двох іонів $^{40}\text{Ca}^+$	35
3.3. Розрахунок параметрів Кулонівського кристалу, що складається з іонів $^{40}\text{Ca}^+$	40
ВИСНОВКИ	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	43

РОЗДІЛ 1

ІОННІ ПАСТКИ ЯК БАЗОВІ ЕЛЕМЕНТИ СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ

1.1. Радіочастотна пастка Пауля

До середини ХХ століття була необхідність у створенні методу захвату іонів для мас-спектрометрії та досліджень в області квантової фізики. Тоді використовувалися магнітні мас-аналізатори, що мали великі габарити, через складну конструкцію та необхідність великої кількості кольорових металів мали велику ціну та споживали багато електроенергії. Одним із завдань тодішньої фізики і фізичної хімії було отримання одиничного захопленого ізольованого атому у чистому середовищі, для дослідження явищ квантової механіки та руху іонів, електронів під впливом зовнішніх полів. Рішенням цих і інших проблем став винахід німецького фізика В.Е.Пауля у 1954 році – квадрупольна іонна радіочастотна пастка (іонна пастка Пауля) [3-4].

Такі фізики як М.Бірчук, Б.Міхалча, М.Кнуп у своїх наукових працях погоджуються з твердженням, що іонна пастка стала ключовим інструментом мас-спектроскопії та експериментах з атомами та молекулами і їх взаємодією. Саме тому за методику захоплення іонів у 1989 р. було присуджено В.Е.Паулю Нобелівську премію [5]. За допомогою іонної пастки Пауля були досліджені та продовжують досліджуватись такі фізичні питання:

1. Контроль над рухом заряджених частинок, таких як іонів та електронів, в електричних та магнітних полях. РЧ пастка дозволила утримувати ці частинки у стабільному положенні, досліджувати їх рух та взаємодію з іншими частинками.

2. Детальніше вивчено структуру атомів та молекул, зокрема розташування електронів та їх взаємодію з ядром. Це відкрило нові можливості для розвитку квантової механіки та квантової електродинаміки.

3. Дослідження хімічних реакцій у газовій фазі: іонна пастка Пауля дозволила вивчати хімічні реакції у газовій фазі з високою точністю, досліджувати реакційні процеси, їх продукти та реакційні швидкості. Це дало нові можливості в розвитку хімії та каталізу [3, 6-7].

Позиція вчених сходиться до того, що використання іонної пастки Пауля залишається актуальним, через можливість подальших досліджень, таких як аналіз великих бікрystalічних структур опосередковано охолоджених лазером, що було нещодавно вперше продемонстровано С. Міяо. Важливістю опосередкованого охолодження є можливість зниження температури частинок, які на пряму неможливо охолодити лазером через їх довжину хвилі циклічного переходу. Також автор стверджує, що отримана стабільна охолоджена бікрystalічна структура може бути основою для подальшого дослідження фазових переходів і розробки квантових комп'ютерів [8]. Системи захоплених іонів залишаються однією з найперспективніших галузей для створення квантових комп'ютерів, як це було продемонстровано Д.Юмом [9].

Лінійна іонна пастка (ЛІП) може бути використана разом із мас-спектрометром для клінічного аналізу біомаркерів, що було зроблено в дослідженні Фанг К. Встановлено, що ЛІП має ряд переваг у такому використанні, серед яких більш стабільний захват і утримання необхідних частинок на довший період часу, що покращує якість аналізу мас-спектрометрії. ЛІП запобігає потраплянню непотрібних частинок і зменшує ефект просторового заряду. Зауваженням до публікації є те, що похибка контрольних вимірювань не стабільна і максимально досягає значення у 7% [10].

У 2021 році П. Обціл описав методологію та визначав неklasичне і когерентне випромінювання із захоплених великих іонних кристалів, що відкриває нові перспективи для подальших досліджень цієї тематики. Також науковець зробив висновок, що не має фундаментального ліміту на збільшення кількості іонів у таких системах [4]. За можливість маніпулювання квантовими системами у 2012 році Нобелівська премія була присуджена Д.Дж.Уінленду, що вказує на важливість використання іонних пасток у сучасній науці.

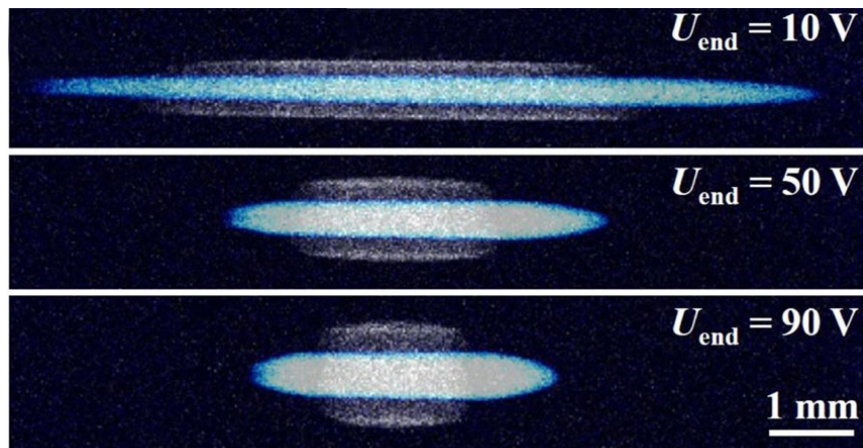


Рисунок 1.1 – Фото експериментально отриманої стабільної великої бікристалічної структури $^{40}\text{Ca}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$. Адаптовано з праці [8]

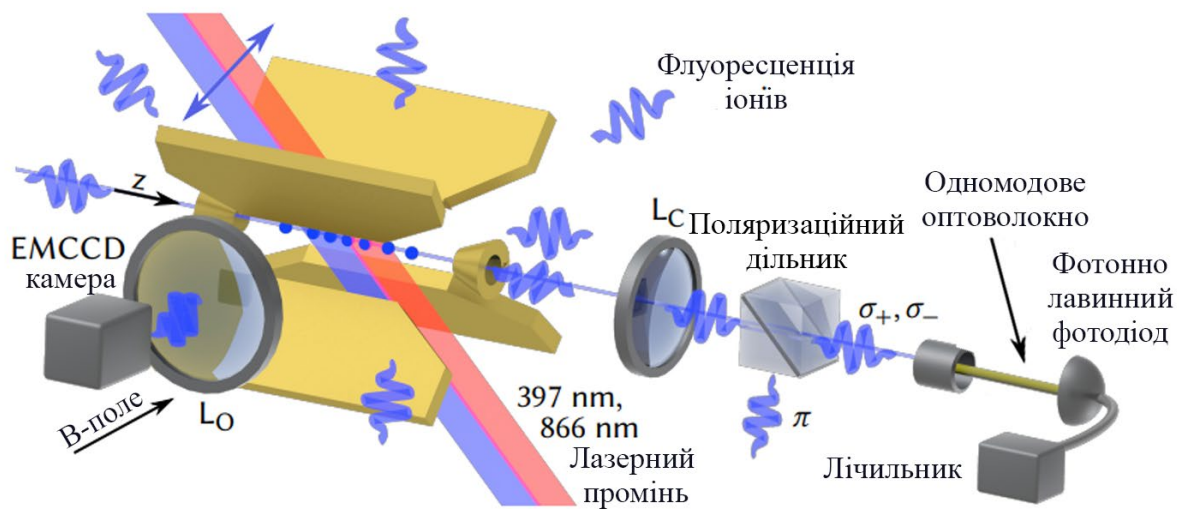


Рисунок 1.2 – Схема установки для дослідження некласичного випромінювання із захоплених іонів. Адаптовано з праці [4]

1.2. Електрооптичні пастки

Радіочастотні (РЧ) пастки створили великий прорив одразу у декількох наукових сферах, але проблема захоплення нейтральних мікрочастинок залишалась не вирішеною. Альтернативою РЧ пасткам став винахід американського фізика А.Ешкіна у 1986 році. Він вперше описав техніку захоплення діелектричних мікрочастинок за допомогою сфокусованого лазерного променя. Зараз ці пристрої здобули назву оптичних пасток, або оптичних пінцетів [11].

Необхідність розвитку оптичних пасток описана у працях Е.Перега, Г.Лешхорн та К.Зіпкенс. РЧ пастки, внаслідок свого принципу дії, створюють ряд побічних обмежень для проведення експериментів. Основним недоліком є виникнення відносно великої енергії атомно-іонній взаємодії. Також, проблемою є наявність мікро рухів, що призводить до механізму нагрівання [12-14]. Це також підтверджує дослідження Ю.Шмідт, в його роботі над захопленням Кулонівських кристалів. Навіть при використанні всіх доступних методів мінімізації руху іонів у РЧ пастках майже до нуля та припустити ідеальну компенсацію блукаючих електричних полів, рух іонів не зникне, через власне витиснення з центру пастки, або внаслідок взаємодії з нейтральними атомами [15]. Оптимальним рішенням у таких випадках є використання електрооптичних дипольних пасток. Але головним недоліком є неможливість на даний момент захоплення великої кількості іонів одночасно, через особливості захоплення кількість одночасно утриманих іонів у ЕОП обмежується десятками іонів, що не дозволяє досліджувати великі Кулонівські кристали.

Г. Ксяо описав методологію внесення зразків у двоволоконну оптичну пастку за допомогою тонкого кварцового скла, яке коливаннями вносить частинки у поле захоплення [16]. А.Шеперс у своїй науковій праці висуває твердження, що оптичні пінцети дозволяють безконтактну маніпуляцію об'єктами, що дуже важливо в біологічних дослідженнях, де може бути важко забезпечити контактні маніпуляції, щоб уникнути можливих пошкоджень або забруднення досліджуваних зразків [17].



Рисунок 1.3 – Схема захоплення іонів Ba^+ оптичною пасткою у радіальній площині і РЧ пасткою у осьових площинах. Адаптовано з праці [15]

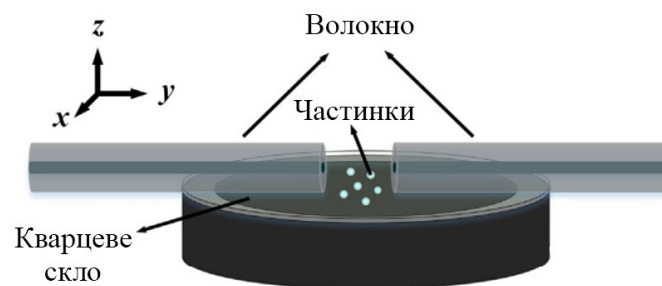


Рисунок 1.4 – Установка для внесення частинок у оптичну пастку. Адаптовано з праці [16]

Оптичні пінцети дозволяють захоплювати та переміщувати об'єкти без прямого контакту з ними, що дозволяє дослідникам детально вивчати їх властивості. Прикладом цього є робота зі створення нової методології осадження ДНК у дослідженнях Б. Кім з великою просторовою вибірковістю, завдяки захоплення капель розчину з ДНК. Також можливе дослідження сольових розчинів і колоїдних наноматеріалів [18].

Завдяки своєму безконтактному принципу дії, оптичні пастки вже зробили значний внесок в галузях дослідження і контролю мікро- та нанорозмірних матеріалів. А використання оптичного пінцету для розділення сумішей різних частинок стало аналогом термодифузійного методу. До таких висновків прийшли вчені К.Сетура та Т.Цудзі [19].

РОЗДІЛ 2

ФІЗИЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ІОННИХ ПАСТОК

2.1. Фізичні принципи дії РЧ іонних пасток

Іонна пастка Пауля, або квадрупольна пастка – це установка для захоплення і подальшого утримання іонів у квазірівноважному положенні в просторі електромагнітним полем. Для проведення наукової роботи у квантовій фізиці важливою вимогою є ізоляція окремих частинок від впливу навколишнього середовища, що вирішується утриманням іонів у вакуумі [4].

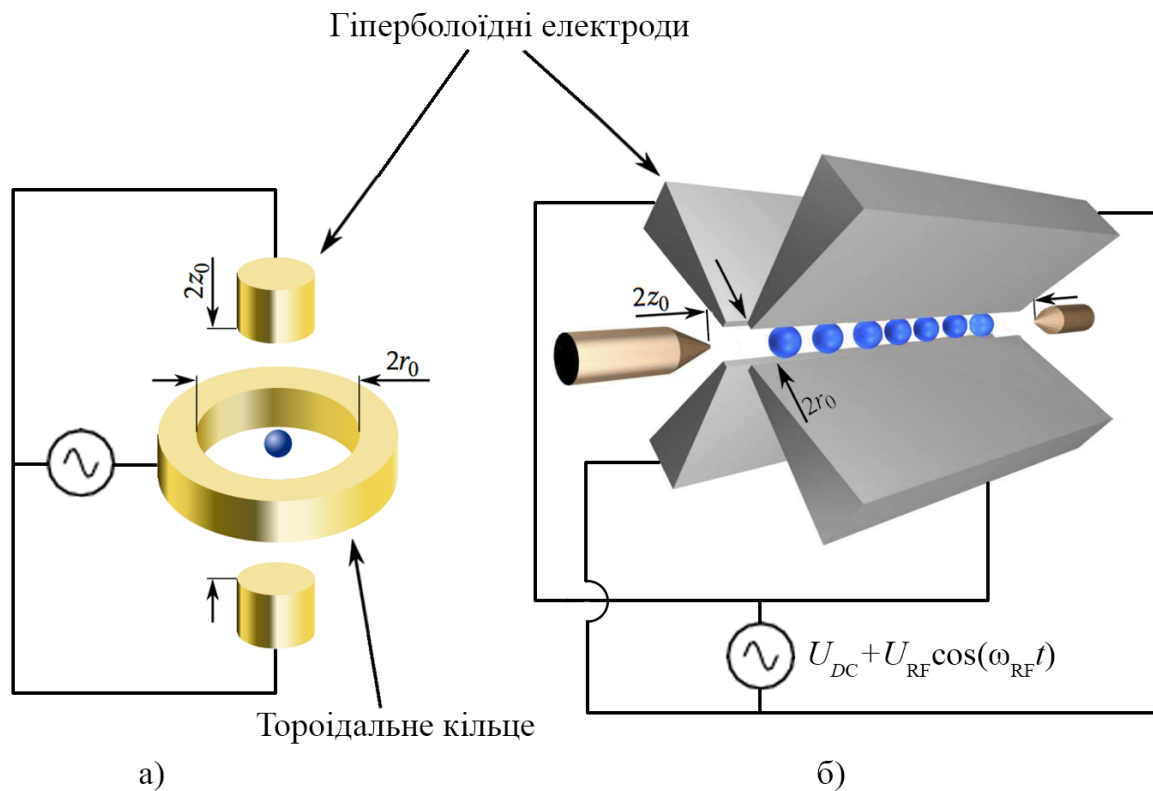


Рисунок 2.1 – Схематична конструкція іонних пасток: тривимірної кільцевої пастки (а) та двовимірної лінійної пастки (б). $2r_0$ – діаметр радіальної відстані, $2z_0$ – осьова відстань. Адаптовано з робіт [4, 20]

За конструкцією та ступенем вільності коливання частинок, іонні пастки поділяються на тривимірні та двовимірні. Основою трьох вимірних пасток є два гіперболічні електроди, направленні один до одного та тороїдального кільця між ними (рис. 2.1, а). За такої конструкції, один з полюсів генератора змінного струму підключається до електродів, а протилежний полюс до кільця. При такому підключенні електроди завжди мають однаковий потенціал, а кільце протилежний, через що утворюється квадрупольне електричне поле [5,21]. Іншим видом є двовимірні, або лінійні іонні пастки, що складаються з чотирьох гіперболоїдних або циліндричних паралельних стрижнів та двох торцевих електродів (рис. 2.1, б). Стрижні попарно підключенні до генератора змінного струму, а торцеві електроди до постійного струму. Завдяки цьому стрижні обмежують просторове вивільнення частинок, а торцеві електроди – осьове, за допомогою статичного поля. При таких конфігураціях напруженість поля в центрі дорівнює нулю, а у всіх інших точках виникає сила Лоренца направлена до центру, що запобігає вивільненню частинок і утримує їх у квазірівноважному положенні простору. Найефективнішим способом захоплення іонів було б створення статичної тривимірної потенційної ями, але це неможливо внаслідок теореми Ірншоу. Тому принцип дії РЧ іонних пасток базується на створенні сідлового потенціалу під дією електромагнітного поля [7].

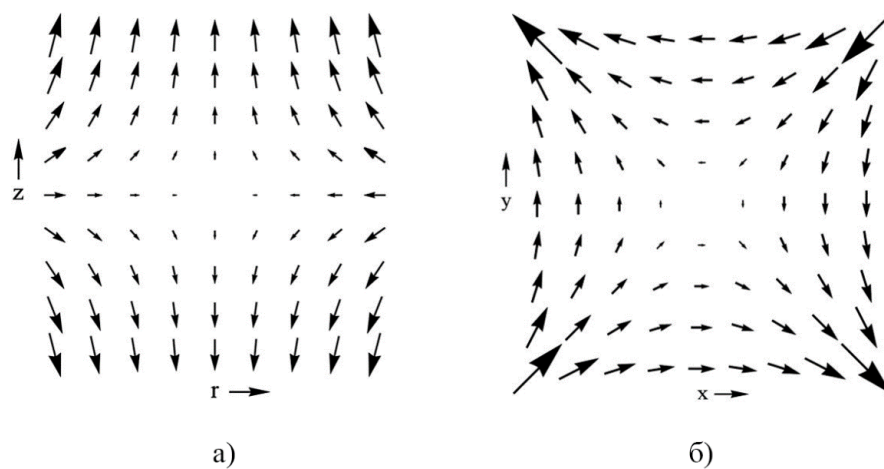


Рисунок 2.2 – Напрямки силових ліній у моменті часу t квадрупольних електричних полів: а) тривимірного; б) двовимірного [22]

Сідлова форма запобігає вивільненню частинки у одному вимірі, але залишається можливість для іншого. Тобто рух відсутній у осьовій площині, але можливий у радіальній. Для подальшого утримання частинки у просторі відбувається повертання електромагнітного поля внаслідок частоти змінного струму. Таким чином заряджена частинка утримується в сідловій точці, утвореній псевдопотенціалом, який формується внаслідок обертання електромагнітного поля на π [4].



Рисунок 2.3 – Візуалізація сідлоподібного потенціалу і псевдопотенціалу утворених електромагнітним полем. Адаптовано з праці [4]

Захоплення і утримання іонів в гармонічному потенціалі потребує створення електричного потенціалу $\vec{F} = -q\vec{E}$, що лінійно збільшується з відстанню від центра пастки $\vec{F} \propto -\vec{r}$, для впливу на іони, що вивільняються з центру пастки для їх повернення. Тоді сили захвату, що діють на іон будуть набувати такого виду:

$$\Phi = \frac{\Phi_0(\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2)}{2r_0^2}, \quad (2.1)$$

де $\Phi_0 = U_{DC} + U_{RF} \cos(\omega_{RF} t)$

Коефіцієнти α , β , γ описують форму електричного потенціалу, що є рішеннями рівняння Лапласа $\Delta\Phi = 0$ для тривимірного електричного поля, в якому $\alpha = \beta = -2\gamma$. При розгляді ситуації використання ЛІП коефіцієнти будуть розглядатися в двовимірній системі, тоді $\alpha = -\beta$, $\gamma = 0$ [3].

Коливальний потенціал описується рівнянням Матьє, рішенням якого є параметри стабільності a і q , які залежать від напруги і частоти коливання для стабільного положення в сідловій точці в осьовому і радіальному напрямках. Тому псевдопотенціал має тривимірний квадратичний мінімум у центрі пастки і створює гармонічні коливання у осьовій і радіальних площинах для тривимірної пастки. Оскільки тривимірна пастка циліндрично симетрична відносно осі z , то її параметри стабільності набувають такого вигляду:

$$a_z = -2a_r = \frac{-8qU_{DC}}{m\omega_{RF}^2 d^2}, \quad q_z = 2q_r = \frac{-4qU_{RF}}{m\omega_{RF}^2 d^2}, \quad (2.2)$$

де $d^2 = r_0^2 + 2z_0^2$; q – заряд іона; m – маса іона; ω_{RF} – частота коливання;

Графік перетинання даних рівнянь відповідає допустимим параметрам для захоплення і утримання іонів.

Для випадку з ЛПП відсутня необхідність у осьовому параметрі стабільності, тому рівняння набуває вигляду [3, 7, 23]:

$$q_x = -q_y = \frac{4qU_{RF}}{m\omega_{RF}^2 r_0^2}, \quad q_z = 0. \quad (2.3)$$

Таким чином, перевагою ЛПП є утворення псевдопотенціалу лише в x та y площинах. Статичне поле утворене торцевими електродами не спричиняє мікрорухів у площині z і надає можливості змінювати його незалежно від радіального напрямку [10].

Важливо зазначити, що при захопленні декількох іонів і більше виникає просторовий заряд, який спричинений зарядом іонів. Це явище впливає на графіки області стабільності через потенціал просторового заряду, що залежить від кількості захоплених іонів [24]:

$$\Phi_s = -kp(x^2 + y^2), \quad (2.4)$$

де p – кількість іонів в системі.

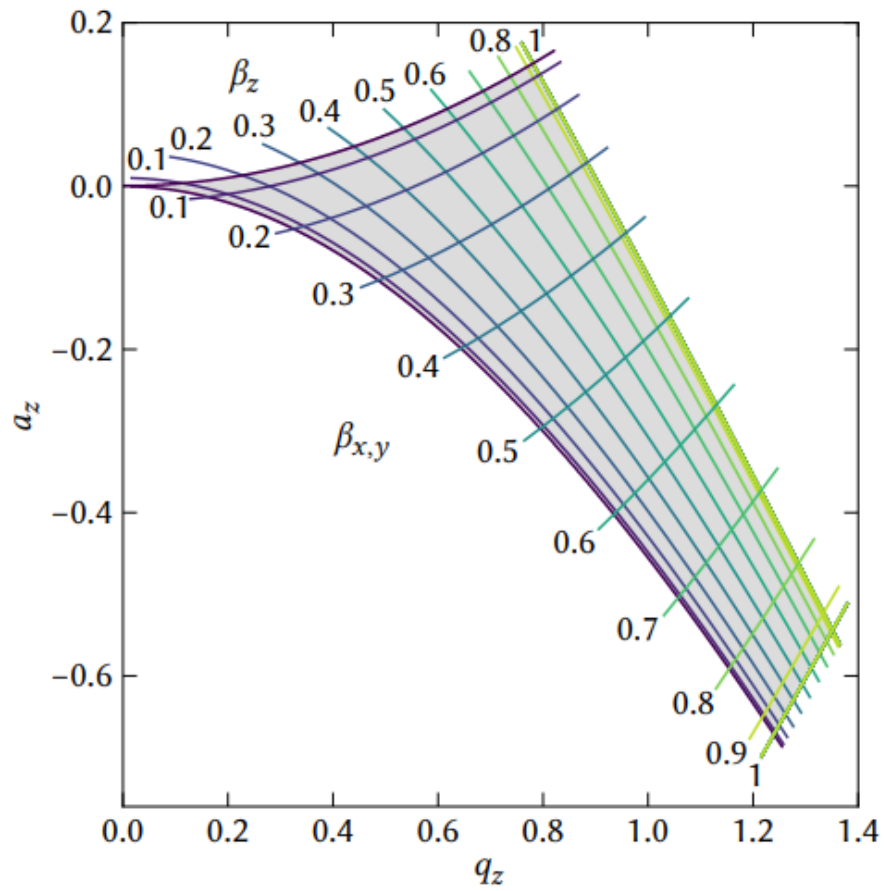


Рисунок 2.4 – Графік області параметрів стабільності для тривимірної РЧ іонної пастки [4]

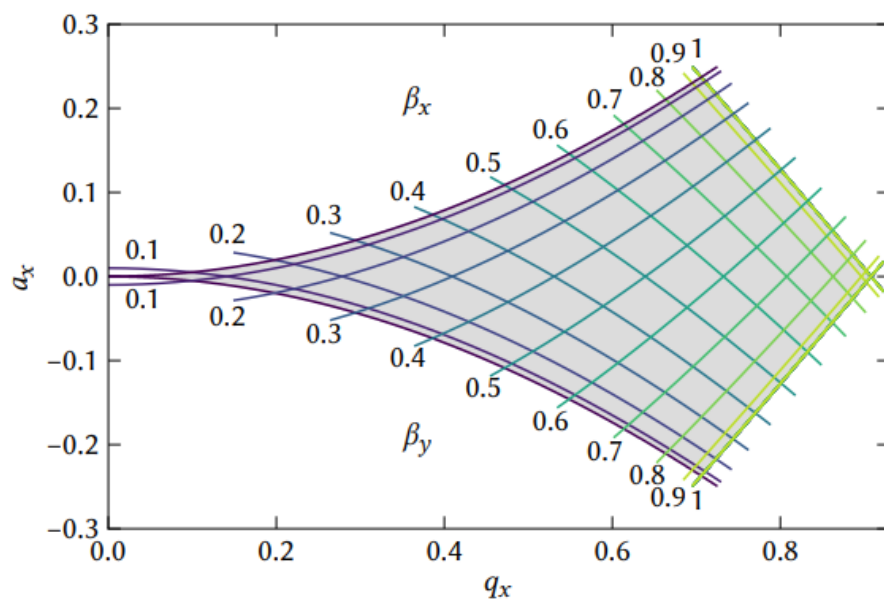


Рисунок 2.5 – Графік області мінімальних параметрів стабільності для двовимірної ЛПТ [4]

2.2. Конструкції та схеми установок із РЧ пастками

Однією з головних умов для проведення досліджень захоплених іонів є створення ультрависокого вакууму у камері. У вакуумній камері знижується тиск, що дозволяє зменшити взаємодію іонів з оточуючим середовищем, що відбувається при атмосферному тиску. Це необхідно для збереження іонів у пастці на тривалий період часу та забезпечення їхньої стабільності.

В іонній пастці зазвичай використовують комбінацію іонних та Non-Evaporable Getter (NEG) вакуумних насосів для забезпечення високого рівня вакууму. Принцип дії іонних насосів базується на видаленні газів з вакуумної камери шляхом іонізації газів, що присутні в камері, та відведення їх з вакуумної камери за допомогою електричного поля. У іонних насосах зазвичай використовують розряди з низькою енергією, такі як розряди Катода-Стріма або розряди Пеннінга, для іонізації газів. Після іонізації газів вони притягуються до електродів з протилежним знаком заряду, що знаходяться в електричному полі, створеному в насосі. Гази при зіткненні з електродами втрачають енергію і конденсуються на поверхні електродів.

NEG вакуумні насоси у своїй конструкції мають спеціальний пористий матеріал, який здатний поглинати, або зв'язуватись з молекулами газів з вакуумної камери. Цей матеріал зазвичай наноситься на поверхню пластин, які розміщуються в вакуумній камері. При зіткненні з поверхнею пластин гази конденсуються і поглинаються матеріалом. NEG вакуумні насоси мають досить велику поверхню поглинання, завдяки цьому вони здатні досягти дуже низького рівня тиску у вакуумній камері.

Іонні насоси використовуються для відкачування газів з вакуумної камери шляхом іонізації газів, що присутні в камері, та відведення їх з вакуумної камери за допомогою електричного поля. У іонних насосах зазвичай використовують розряди з низькою енергією для іонізації газів. Після іонізації газів вони притягуються до електродів з протилежним знаком заряду, що знаходяться в

електричному полі, створеному в насосі. Зіткненням з електродами, гази втрачають енергію і конденсуються на поверхні електродів [24].

Іонні насоси використовуються для видалення більш легких газів, таких як водень, гелій, які не можуть бути ефективно видалені NEG вакуумними насосами. NEG вакуумні насоси, з іншого боку, ефективні при створенні високого рівня вакууму для більш важких газів, таких як аргон, кисень і водяна пара. Комбінація іонних та NEG вакуумних насосів забезпечує ефективне видалення всіх видів газів з вакуумної камери і підтримує високий рівень вакууму протягом тривалого періоду часу [24]. Для усунення вироджених атомних рівнів, необхідно створити навколо установки рівномірне статичне магнітне поле, що можливо реалізувати котушками Гельмгольца, що розміщені у трьох площинах навколо вакуумної камери (рис. 2.6, 2.7).

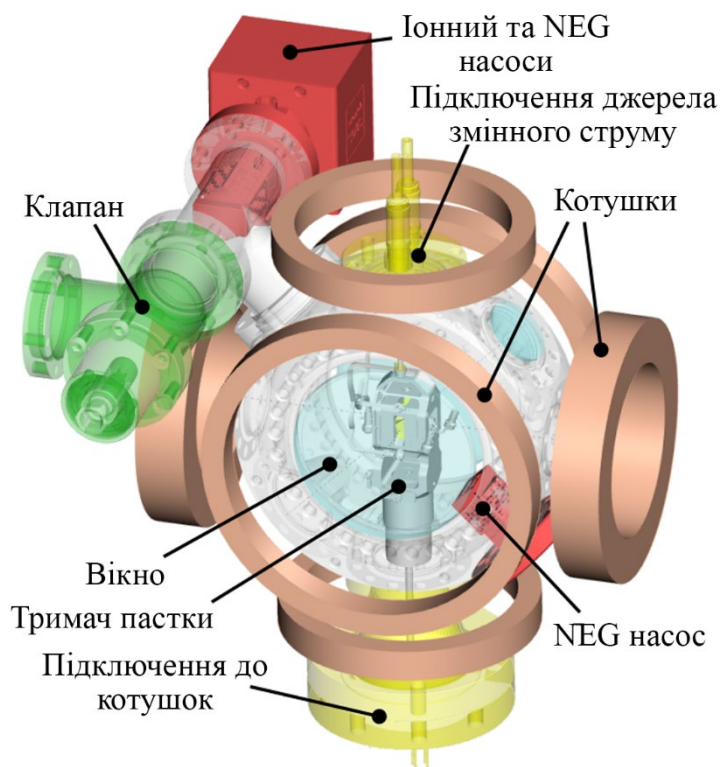


Рисунок 2.6 – Конструкція установки з ЛПП. Адаптовано з роботи [4]

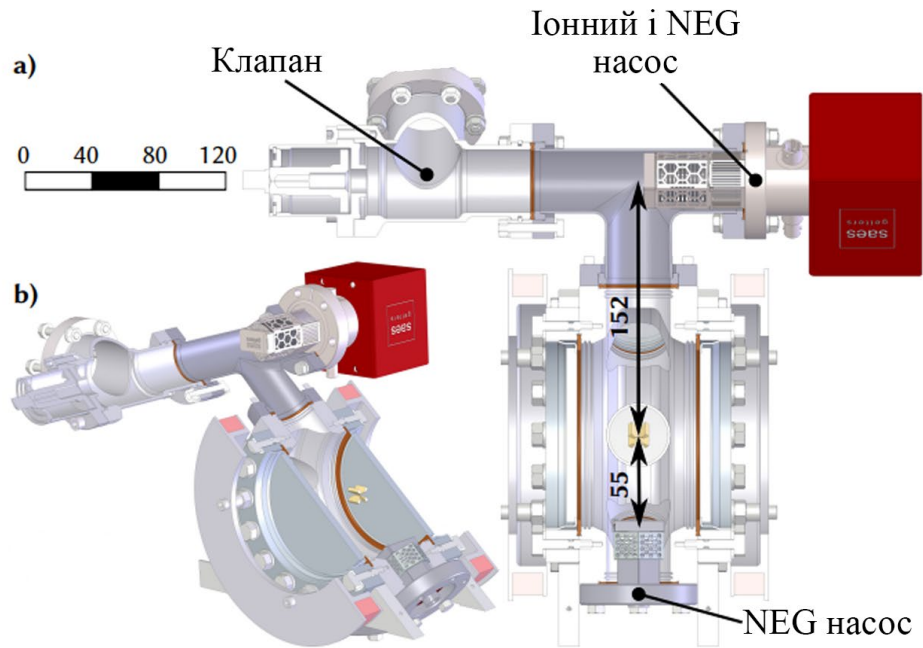


Рисунок 2.7 – Ділянка установки з вакуумною камерою з ЛПП та вакуумними насосами. Адаптовано з праці [4]

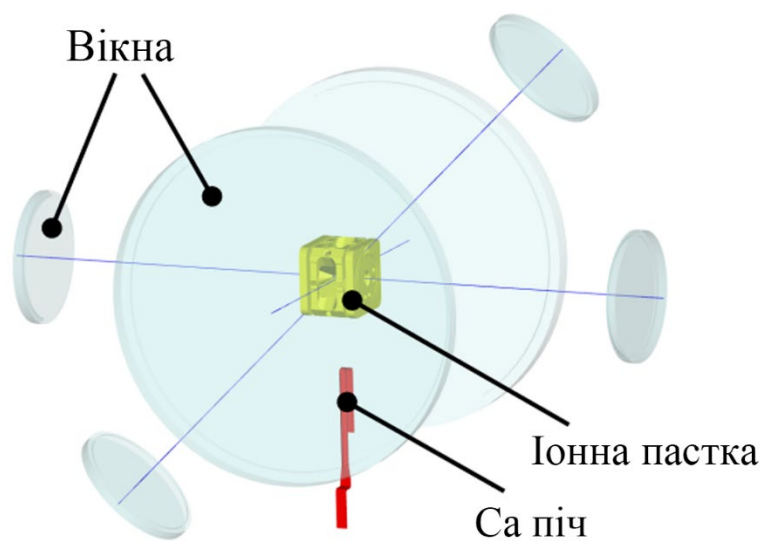


Рисунок 2.8 – Іонна пастка і піч для створення іонів $^{40}\text{Ca}^+$. Адаптовано з праці [4]

Далі необхідно створити іони, які надалі будуть утримуватися. Існує два принципи: створення іонів всередині пастки, або введення іонів ззовні з подальшим їх захопленням. При створенні іонів всередині пастки вони одразу стають захопленими, якщо виконується умова стабільності. Спочатку використовувалося електронне бомбардування матеріалу, за допомогою електронної пушки, що призводить до зарядження поверхні та вивільнення з неї іонів. Метод досить простий, але невибірковий. При потраплянні будь-якого іншого матеріалу під електронне бомбардування, частинки присутні у вакуумній системі, можуть бути іонізовані та захоплені. Іншим методом стала фотоіонізація поверхні за допомогою лазера налаштованого на резонансний перехід атома і іншого лазера для збудження атому матеріалу. Перевагами такої методики є селективність та ізотопна селективність. В установці, яку ми розглядаємо, використовується метод фотоіонізації атомів Са. Атоми випаровуються під дією електричного струму, що проходить крізь матеріал та іонізуються за допомогою двох іонізаційних лазерів (рис.2.8).

Іони також можуть бути утворені іонізатором, але не можуть бути завантажені в пастку. Головною проблемою є те, що вони внаслідок прискорення до центру пастки матимуть достатньо енергії, щоб подолати потенціал пастки. Тому, зазвичай, потрібно знайти спосіб вимкнути поле, щоб іони могли потрапити в її центр, а потім увімкнути його знову. Поки іони не матимуть достатньо енергії, щоб подолати потенціал, вони залишатимуться в пастці. У такому випадку можливе застосування механізму охолодження, наприклад буферного газу в радіочастотній пастці. Тоді іони, які пролітають крізь пастку, можуть бути охолоджені достатньо, щоб перебувати в області захоплення і зберігатися в пастці. Це дає можливість накопичувати іони в пастці протягом певного періоду часу [7,16]. Вікна (рис.2.9) необхідні для можливості опромінювати захоплені іони та для проходження неklasичного випромінення, яке вивільняється з досліджених іонів. Вікна мають спеціальні характеристики для нівелювання сферичних аберацій, які виникають при проходженні крізь скло. Ще одним способом використання вікон є візуальний доступ до установки і фотофіксації за допомогою камер [4, 26].

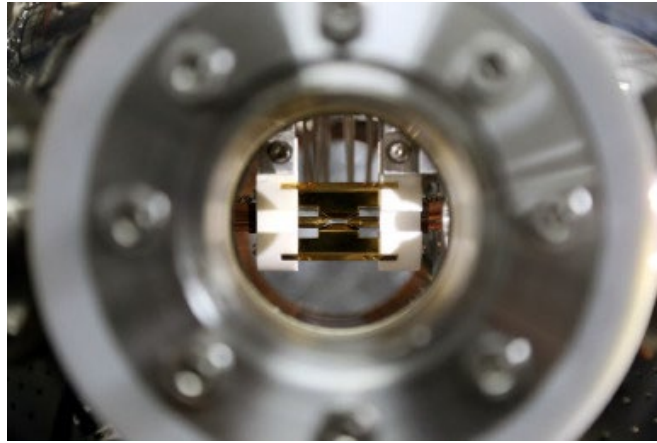


Рисунок 2.9 – Фото ЛІП через вікно для візуального спостереження [26]

2.3. Принцип дії електрооптичних пасток

Основною проблемою РЧ іонних пасток є виникнення енергії зіткнення, що спричинена енергією мікроруку, індукований атомно-іонною взаємодією. Згідно з праці Ламбрехта А., РЧ мікрорух буде існувати навіть у нульових розсіювальних електричних полях, а також показав, що температура іона захопленого РЧ полем обмежена мінімальним значенням ≈ 1 мК. Альтернативним методом захоплення іонів для уникнення небажаного впливу мікрорухів є використання дипольної оптичної пастки. Утримання іонів відбувається за допомогою двох лазерів налаштованих на різну частоту коливання. Також можливе захоплення іонів одновимірним оптичним пучком, сформованим двома лазерами направленими назустріч один-одному [27].

Основним принципом при оптичному захваті і утриманні є властивість світла мати імпульс і створювати тиск на об'єкт (рис.2.10). Частинка, яка потрапляє в поле дії променя розсіює його і переміщується в напрямку концентрації променя, тобто до його звуження. Одним із способів захоплення в електрооптичних пастках (ЕОП) реалізується електрооптичним потенціалом, що виникає внаслідок взаємодії суперпозиції одновимірної оптичної решітки з електричним квадрупольним потенціалом (рис.2.11).

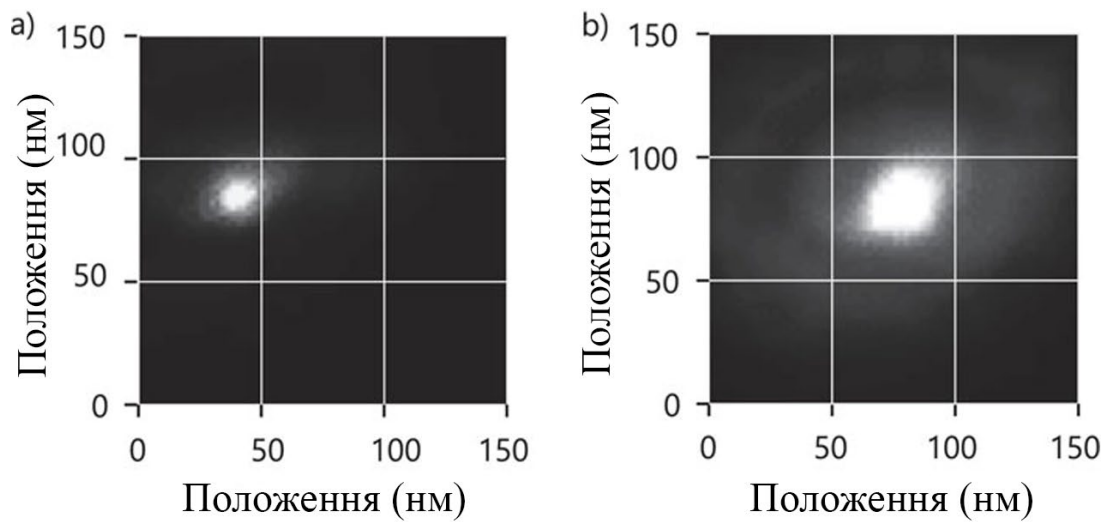


Рисунок 2.10 – Положення захопленої частинки відносно центру: РЧ іонна пастка Пауля (а) та дипольна оптична іонна пастка (б). Адаптовано з роботи [28]

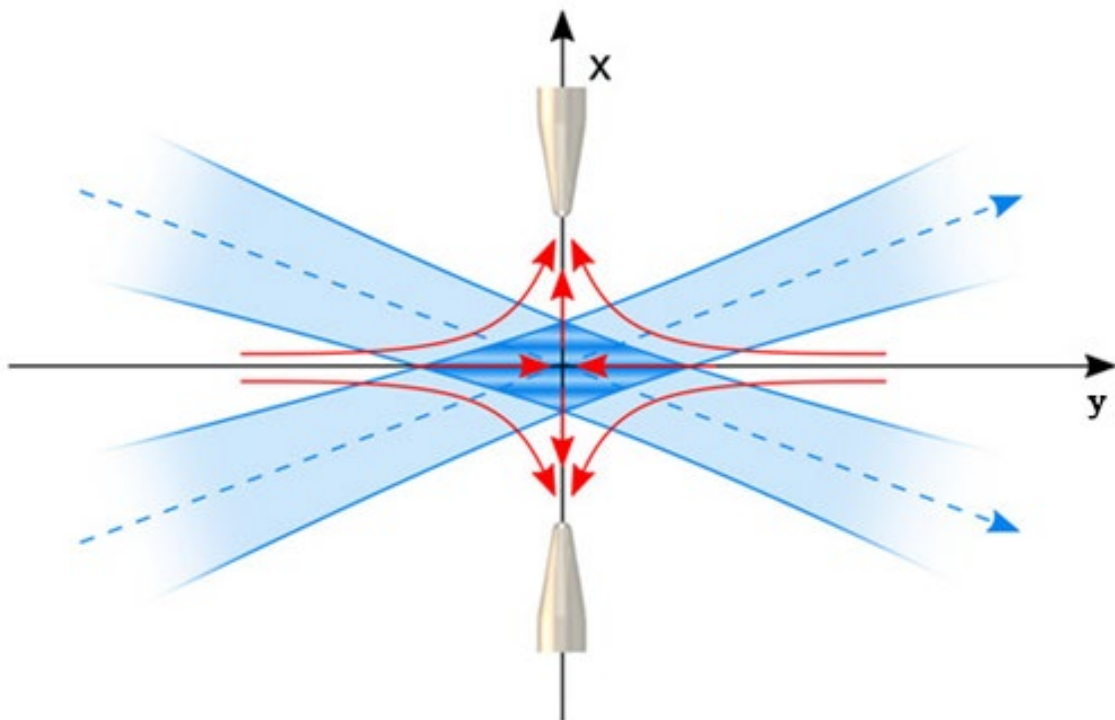


Рисунок 2.11 – Зображення силових ліній у ЕОП: червоні лінії – квадрупольний РЧ потенціал, синій – напрямки лазерних променів Гауса [27]

Оптичний потенціал утворюється інтерференцією двох перехрещених лазерних променів, налаштованих на довжину хвилі, найближчу до атомного переходу іонів. РЧ потенціал створюється пасткою Пауля для утримання в радіальній площині, в той час як оптичний потенціал утримує іони вздовж напрямку оптичної решітки (рис. 2.11). Маємо таке рівняння потенціалу з локальним мінімумом оптичної решітки:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{опт}}(x, y, z) = & \left(\frac{8\alpha P}{\pi w_{0x} w_{0y}} \left(\frac{1}{\widetilde{w}_x^2} - \frac{4\pi^2}{d^2} \right) + \frac{kq\Phi}{r_0^2} \right) x^2 + \\ & + \left(\frac{8\alpha P}{\pi w_{0x} w_{0y}^3} - \frac{kq\Phi}{2r_0^2} \right) y^2 + \left(\frac{8\alpha P}{\pi w_{0x} w_{0y} \widetilde{w}_z^2} - \frac{kq\Phi}{2r_0^2} \right) z^2, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де α – коефіцієнт поляризації атома, w_{0x} і w_{0y} – радіуси лазерних променів, P – потужність лазерного променя, k – коефіцієнт геометричної форми електродів

$$\widetilde{w}_x = \left(\frac{\cos(\theta)^2}{w_{0x}^2} - \frac{\sin(\theta)^2}{2z_r^2} \right), \quad \widetilde{w}_z = \left(\frac{\sin(\theta)^2}{w_{0x}^2} - \frac{\cos(\theta)^2}{2z_r^2} \right), \quad (2.6)$$

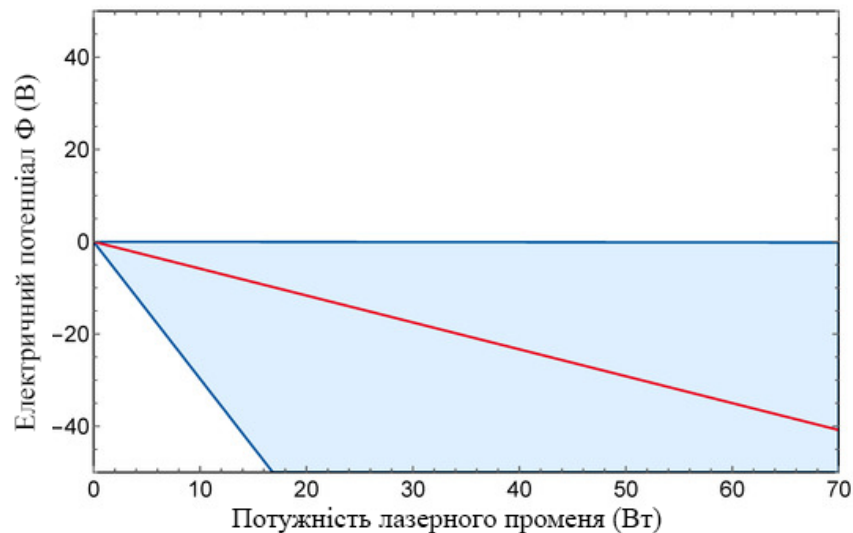


Рисунок 2.12 – Графік області стабільного утримання іонів з параметрами потужності лазерного променя та електричного потенціалу. Червона лінія вказує на параметри утримання, коли сили утримання будуть однакові у всіх площинах. Адаптовано з праці [27]

Частинки у радіальних площинах x та y утримуються потенціалом електродів. Утримання в осі z проходить внаслідок перехрещення двох лазерних променів, де утворюється оптична решітка. Тому параметри електрооптичного потенціалу залежать від параметрів P та Φ [27].

Іншим видом є дипольні ЕОП (рис.2.12), в яких використовуються два лазери, направлені один до одного таким чином, що фокуси кругових променів Гауса збігаються в одній точці з їх хвильовим вектором, вирівняним відносно іонів, що знаходяться в центрі звуження променів. Також, як і в минулому методі, використовується РЧ пастка для підтримання захоплених іонів у двох площинах. Дж. Шмітдт у своїх дослідях захоплював іони тільки дипольною оптичною пасткою, але час утримання набагато менший, в порівнянні з використанням ЕОП. Особливістю цього методу є те, що один із лазерів повинен випромінювати промінь з довжиною хвилі у видимому спектрі, а інший у ближньому інфрачервоному. Також додатково можуть використовуватися лазери накачки і лазери для методу доплерівського охолодження для зменшення мікроруху і більш стабільного і тривалого утримання, що виникає внаслідок дії РЧ пастки [15,29].

У дослідженні Д. Бикова були проаналізовані дані мікроруху в РЧ і ЕОП іонних пастках. Експеримент полягав у захопленні іону спочатку в РЧ пастку, вимірювання його значення мікроруху на проміжку часу. Потім іон захоплювався дипольною ЕОП і додатково охолоджувався лазером і також вимірювався мікрорух з фотофіксацією [28].

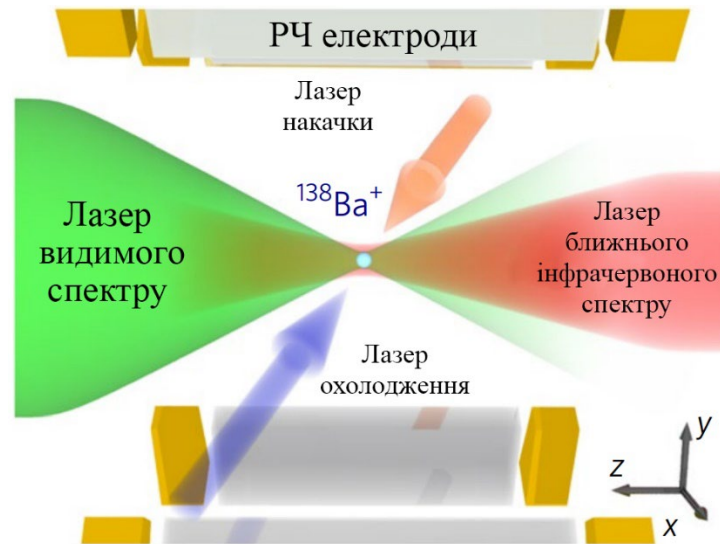


Рисунок 2.13 – Схема принципу захоплення іона дипольною ЕОП з додатковими лазерами накачки і доплерівського охолодження. Адаптовано з праці [29]

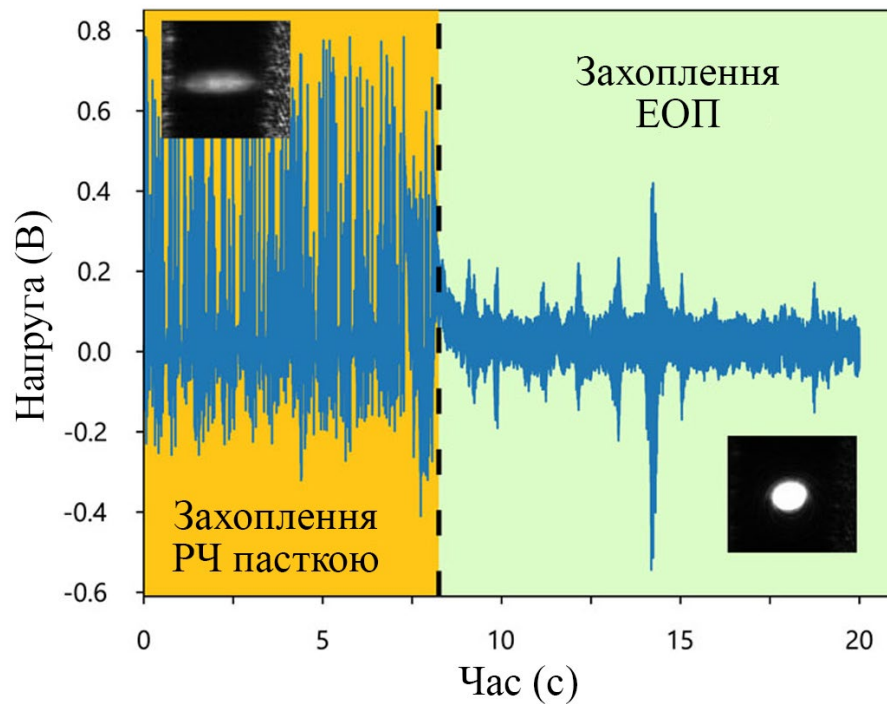


Рисунок 2.14 – Графік мікроруку частинки при захопленні в РЧ пастку і ЕОП з Доплерівським охолодженням. У кутках розташовані фото частинки у відповідні моменти. Адаптовано з праці [28]

2.4. Конструкція електрооптичних пасток

Головною вимогою до конструкції електрооптичних пасток є оптичний доступ до місця захоплення, якого має бути достатньо для доступу системи кількох лазерних променів для маніпулювання частинками та оптичного переміщення частинок до пастки. При розгляді першого методу створення електрооптичної пастки, квадрупольний потенціал утворюється кільцевими електродами на вершині конічних опор, для утримання іонів у радіальній площині. Конічні опори мають отвори для проходження лазерних променів. Форма також обрана для вільного доступу відбитих лазерних променів до центру пастки і утворення оптичної решітки. Для її створення використовуються два лазери з довжиною хвилі 457.7 нм, що відповідає синьому кольору, промені перехрещуються під кутом $\theta = 10^\circ$. Для направлення і фокусування променів використовується система дзеркал із радіусом кривизни 100 мм. Важливим аспектом є вірне позиціонування дзеркал на підкладці [27].

При використанні другого методу електрооптичного захвату головною відмінністю є направленість променів один до одного. Близькій інфрачервоний лазер має довжину хвилі 1064 нм, лазер видимого спектру 532 нм (див. рис. 2.8.). При варіанті з двома однаковими, але взаємно перпендикулярними за поляризацією використовуються лазери з довжиною хвилі 1064 нм. Лазерні промені направляються і фокусуються за допомогою системи лінз і дзеркал до точки захвату іонів. Один із променів поляризується поляризаційним фільтром і роздвоюється для потрапляння на квантовий фотодіод для визначення його положення. Це необхідно для корегування параметрів РЧ пастки і більш точного позиціонування частинки. Утримання у радіальній площині проходить вже розглянутою у минулих підрозділах ЛПП [28,29]

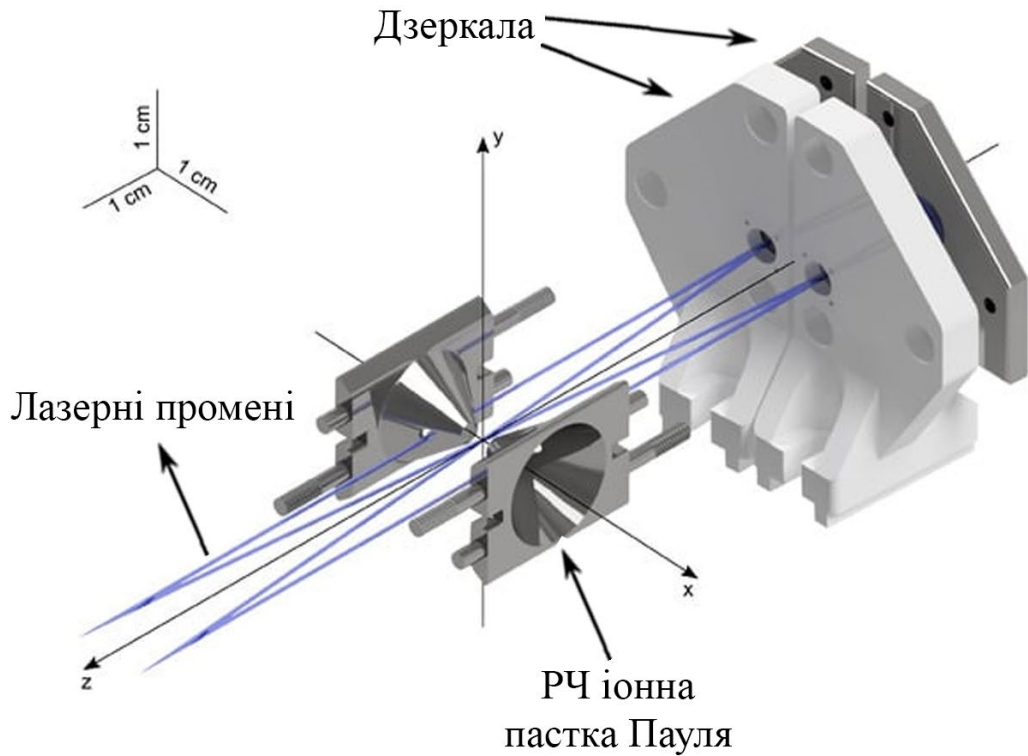


Рисунок 2.14 – Конструкція ЕОП з використанням захвату оптичною решіткою. Адаптовано з праці [27]

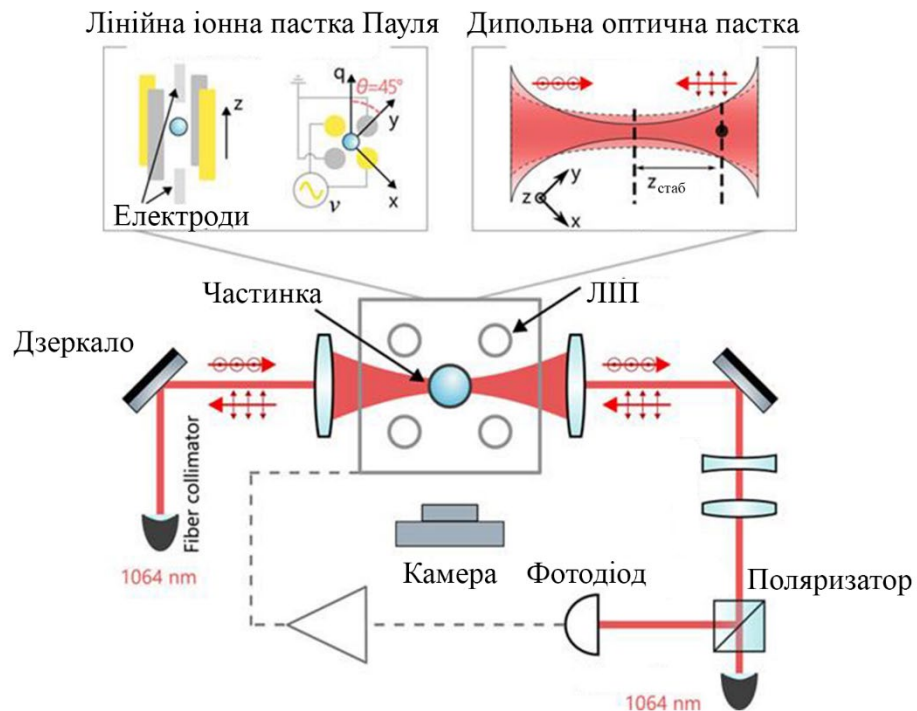


Рисунок 2.15 – Конструкція ЕОП із захватом частинки взаємно перпендикулярними за поляризацією лазерами. Адаптовано з праці [28]

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗАХОПЛЕНИХ ІОНІВ

3.1. Проведення експерименту

Експериментальна частина кваліфікаційної роботи була проведена на ЛПП, описаній у підрозділі 2.2. Попередньо у камері був досягнутий високий вакуум, тому всі розрахунки проводяться з використанням величин у вакуумі. Захоплення іонів $^{40}\text{Ca}^+$ проводиться поступово, коли захоплена необхідна кількість іонів – вимикаємо Ca піч і іонізаційні лазери. Захоплення проходило при радіальній частоті РЧ поля $\omega_{RF} \approx 30.2$ МГц і потужністю на котушках Гельмгольца 1-4 Вт. Спостерігати за іонами можна у реальному часі за допомогою EMCCD камери. Спочатку був захоплений одиночний іон, для спостереження іони були охолодженні, використовувався метод доплерівського охолодження за допомогою двох лазерів із довжиною хвилі 397 нм та 866 нм, відбите світло відповідає більш яскравому кольору в порівнянні з фоном [4].

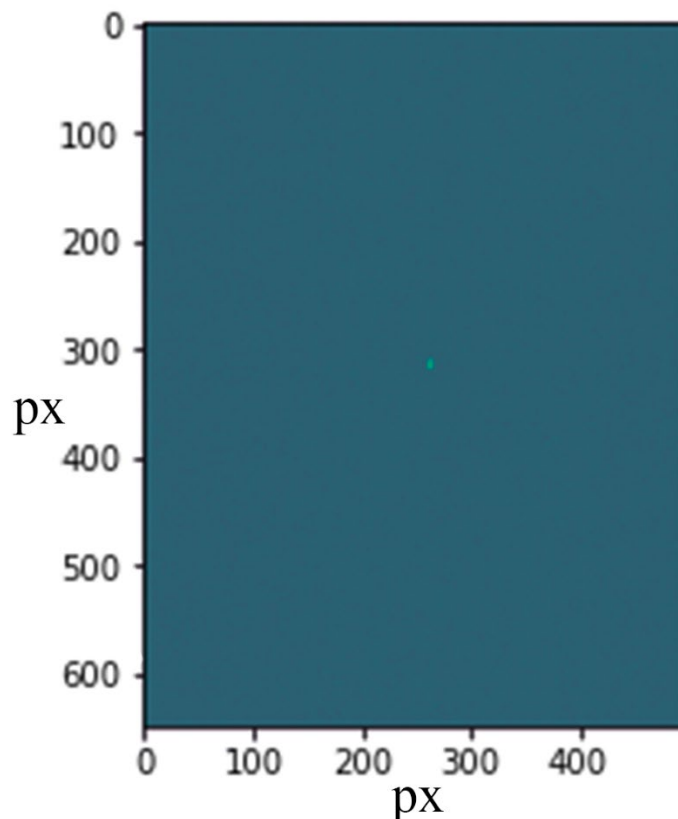


Рисунок 3.1 – Зображення одиночного захопленого іону $^{40}\text{Ca}^+$ у ЛПП

Далі були захоплені у ЛПП два іони $^{40}\text{Ca}^+$. Для проведення розрахунків і більшої вибірки для експерименту, поступово збільшувалась напруга на торцевих електродах від 0 В до 800 В. Одночасно, за допомогою EMCCD камери фіксувались два іони і дані записувались у файл зі значенням напруги у момент фіксації. Переведення файлу у зображення проводилось у програмі написаній на Python. Слід зазначити, що на зображеннях, градація осей у пікселях. Будемо досліджувати зображення, отримані при трьох значеннях напруги: 21 В, 43 В, 129 В.

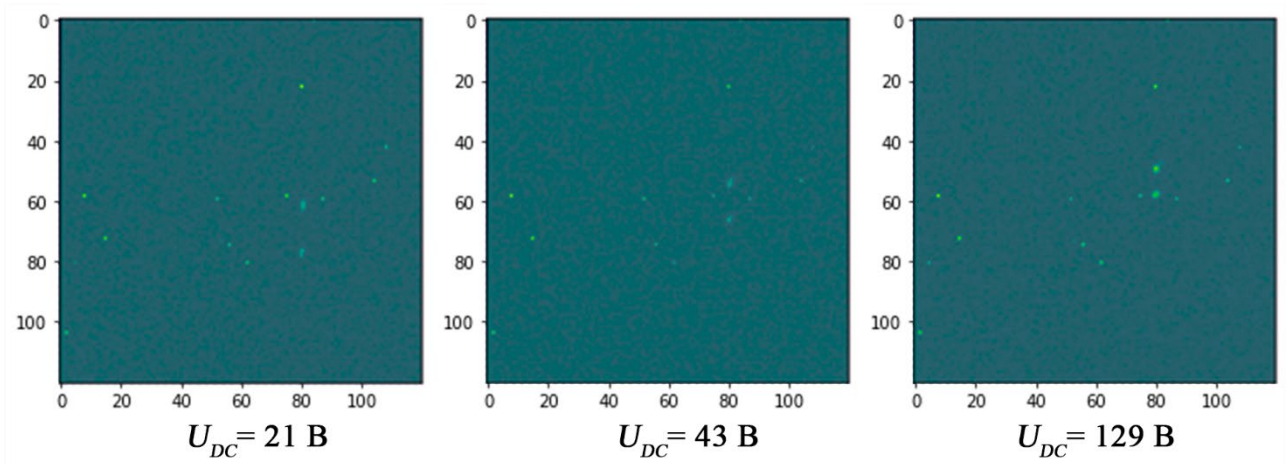


Рисунок 3.2 – Зображення двох захоплених іонів $^{40}\text{Ca}^+$ з напругою на ЛПП: 21 В, 43 В, 129 В

На зображеннях ми бачимо два іони, що зі збільшенням напруги на торцевих електродах наближаються один до одного, що відповідає теорії. Тому, можемо зробити висновок, що ЛПП працює вірно. Варто зазначити, що на зображеннях також присутні артефакти камери, що виникають внаслідок цифрового збільшення. Ці артефакти легко відрізнити від іонів тим, що вони не змінюють своє положення в залежності від значення напруги.

3.2. Розрахунок відстані між двома іонами і розмірів зображень двох іонів $^{40}\text{Ca}^+$

Геометричні параметри іонів відіграють важливу роль в квантовій фізиці через їх вплив на квантові властивості та взаємодію іонів з оточуючим середовищем. Тому цілком розрахункової частини є визначення відстані між іонами і розміри їх зображень на камері. Як вже було зазначено, на зображеннях ми маємо розміри тільки в пікселях, тому необхідно визначити розміри одного пікселя. Це можливо зробити, якщо розрахувати теоретичну відстань між двома іонами. Як вже було згадано, ЛПП мають перевагу над іншими типами пасток у тому, що можуть утримувати іони в стрічці, через те що псевдопотенціал виникає лише в радіальній площині і це дозволяє керувати осьовою площиною незалежно. Положення двох іонів відносно центру пастки вздовж однієї осі може бути визначено за таким співвідношенням:

$$z_1 = -\left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} l, \quad z_2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} l, \quad (3.1)$$

де l – параметр відстані у пастці

$$l = \sqrt[3]{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m \omega_z^2}}, \quad (3.2)$$

де e – заряд електрона;

ϵ_0 – електрична стала;

m – маса захопленої частинки;

ω_z – кутова частота РЧ поля.

$$\omega_z = \sqrt{\frac{2k|e|U_{DC}}{mz_0^2}}, \quad (3.3)$$

де k – геометричний параметр пастки;

z_0 – довжина електродів пастки ($z_0 = 9.21$ мм).

Геометричний параметр пастки змінюється в залежності від форми і розмірів іонної пастки, тому необхідно розрахувати його для нашої ЛПП [4].

$$k = \frac{\omega_z^2 m z_0^2}{2|e|U_{DC}}, \quad (3.4)$$

Для визначення невідомого відношення кутової частоти РЧ поля до прикладеної напруги необхідно знайти відношення осьової частоти f_z до прикладеної напруги. Для цього необхідно захопити одиночний іони і налаштувати частоту невеликого гармонічного коливання на одному з електродів до того моменту, коли іон увійде у резонанс. Для нашої пастки вже були проведені такі виміри і отримані результати представлені на графіку.

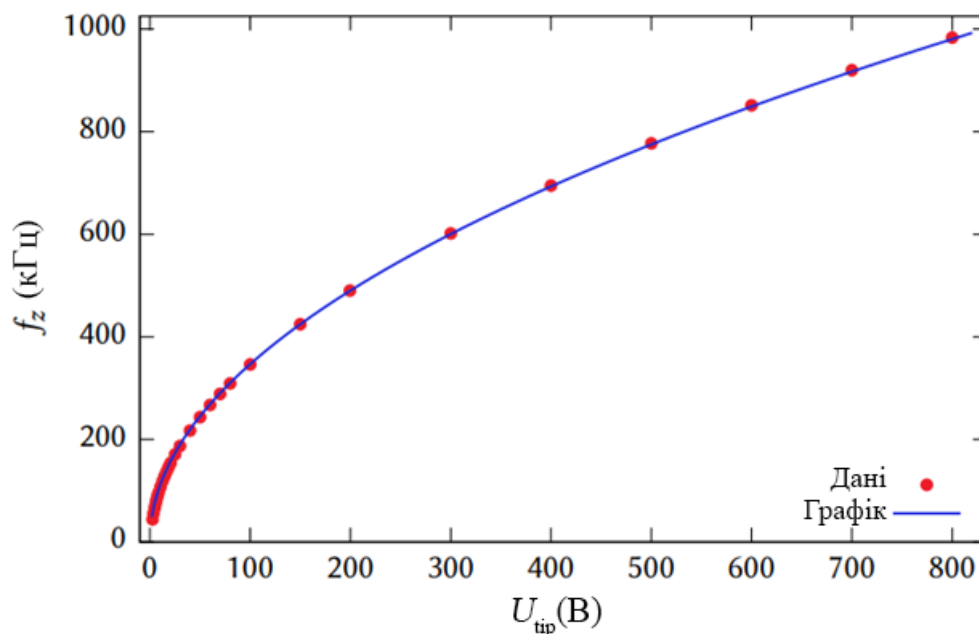


Рисунок 3.3 – Графік залежності осьової частоти одиночного іону $^{40}\text{Ca}^+$ від прикладеної напруги на електроди пастки. Червоними точками позначено вимірні дані. Адаптовано з праці [4]

Осьова частота пов'язана з кутовою частотою РЧ поля таким співвідношенням:

$$\omega_z = 2\pi f_z \quad (3.5)$$

Отримаємо такі значення кутової швидкості для наших значень напруги

Таблиця 3.1 – Значення кутової частоти РЧ поля від напруги на торцевих електродах

U_{DC} , В	21	43	129
f_z , кГц	160	230	398
ω_z , кГц	1004.8	1444.4	2499.4

Маса іону $^{40}\text{Ca}^+$ становить за табличними даними 39.96 а.о.м, що при переведенні у систему СІ становить $\approx 6.64 \cdot 10^{-26}$ кг. Тепер можемо провести розрахунки геометричного параметру ЛПП.

$$k_{21} = \frac{1004.8^2 * 6.64 * 10^{-26} * (9.21 * 10^{-3})^2}{2 * 1.6 * 10^{-19} * 21} = 0.846.$$

$$k_{43} = \frac{1444.4^2 * 6.64 * 10^{-26} * (9.21 * 10^{-3})^2}{2 * 1.6 * 10^{-19} * 43} = 0.854.$$

$$k_{129} = \frac{2499.4^2 * 6.64 * 10^{-26} * (9.21 * 10^{-3})^2}{2 * 1.6 * 10^{-19} * 129} = 0.854.$$

$$k = \frac{0.846 + 0.854 + 0.854}{3} = 0.851.$$

Тепер у нас є всі необхідні дані для розрахунку відстані між двома іонами, що виразимо з двох відстаней відносно центру пастки:

$$d = 2 \left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} l, \quad (3.6)$$

$$d = 2 \left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{|e|z_0^2}{8\pi\epsilon_0 k U_{DC}}}, \quad (3.7)$$

За вираженою формулою знайдемо відстані між іонами

$$d_{21} = 2 \left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{1.6 * 10^{-19} * (9.21 * 10^{-3})^2}{8 * 3.14 * 8.85 * 10^{-12} * 0.851 * 21}} = 18.98 \text{ мкм}$$

$$d_{43} = 2 \left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{1.6 * 10^{-19} * (9.21 * 10^{-3})^2}{8 * 3.14 * 8.85 * 10^{-12} * 0.851 * 43}} = 14.94 \text{ мкм}$$

$$d_{129} = 2 \left(\frac{1}{2}\right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{1.6 * 10^{-19} * (9.21 * 10^{-3})^2}{8 * 3.14 * 8.85 * 10^{-12} * 0.851 * 129}} = 10.36 \text{ мкм}$$

Для визначення розмірів зображення іонів необхідно дізнатися розміри одного пікселю зображення, знятого камерою. Для цього на зображеннях необхідно визначити кількість пікселів між центрами іонів.

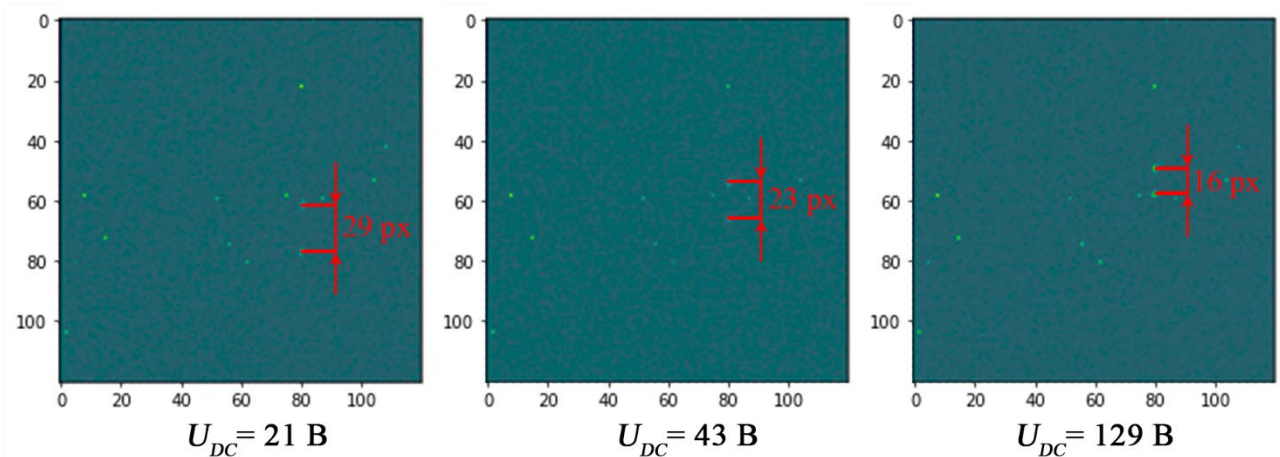


Рисунок 3.4 – Визначення відстаней у пікселях між іонами $^{40}\text{Ca}^+$

Визначимо розміри одного пікселю

$$a_{px} = \frac{d}{d_{px}}, \quad (3.7)$$

$$a_{px}(U_{21}) = \frac{18.98 * 10^{-6}}{29} = 0.654 \text{ мкм/рх}$$

$$a_{px}(U_{43}) = \frac{14.94 * 10^{-6}}{23} = 0.650 \text{ мкм/рх}$$

$$a_{px}(U_{129}) = \frac{10.36 * 10^{-6}}{16} = 0.648 \text{ мкм/рх}$$

$$a_{px} = \frac{0.654 + 0.650 + 0.648}{3} = 0.65 \text{ мкм/рх}$$

Тепер можемо визначити геометричні розміри зображення захопленого іону на камері, для цього використаємо зображення одиночного захопленого іону

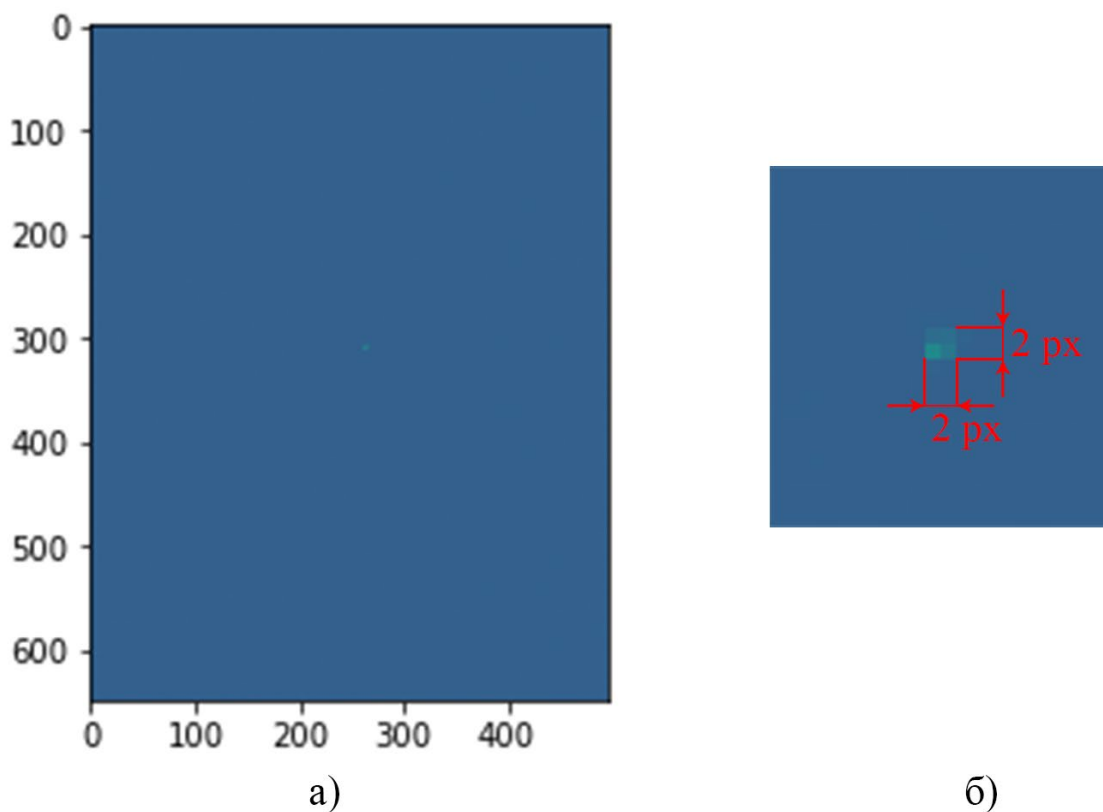


Рисунок 3.5 – Визначення розміру одного іону $^{40}\text{Ca}^+$: а) зображення захопленого іону $^{40}\text{Ca}^+$ у ЛПП; б) збільшене у 5 разів зображення для наочності

Знаючи розміри одного пікселю, можемо визначити радіус і діаметр іону на зображенні отриманим камерою. На отримані значення впливає мікrorух частинки та роздільна здатність камери:

$$r_{^{40}\text{Ca}^+} = 0.65 \text{ мкм.}$$

$$D_{^{40}\text{Ca}^+} = 1.3 \text{ мкм.}$$

3.3. Розрахунок параметрів Кулонівського кристалу, що складається з іонів $^{40}\text{Ca}^+$

Також у даній праці буде розглянуто захоплення Кулонівських кристалів, які складаються з іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у ЛПП. Кулонівські кристали представляють собою просторово-впорядковану структуру мікрочастинок, елементи якої формуються і керуються тільки законами класичної електромагнітної взаємодії замкнених заряджених частинок [31]. Для захоплення використовуємо ЛПП з параметрами радіальної частоти РЧ поля $\omega_{RF} \approx 188.4$ МГц і напругою на торцевих електродах $U_{DC} = 800$ В. Іони $^{40}\text{Ca}^+$ охолоджуються доплерівським охолодженням за допомогою лазерів з довжиною хвилі 397 нм та 866 нм [31].

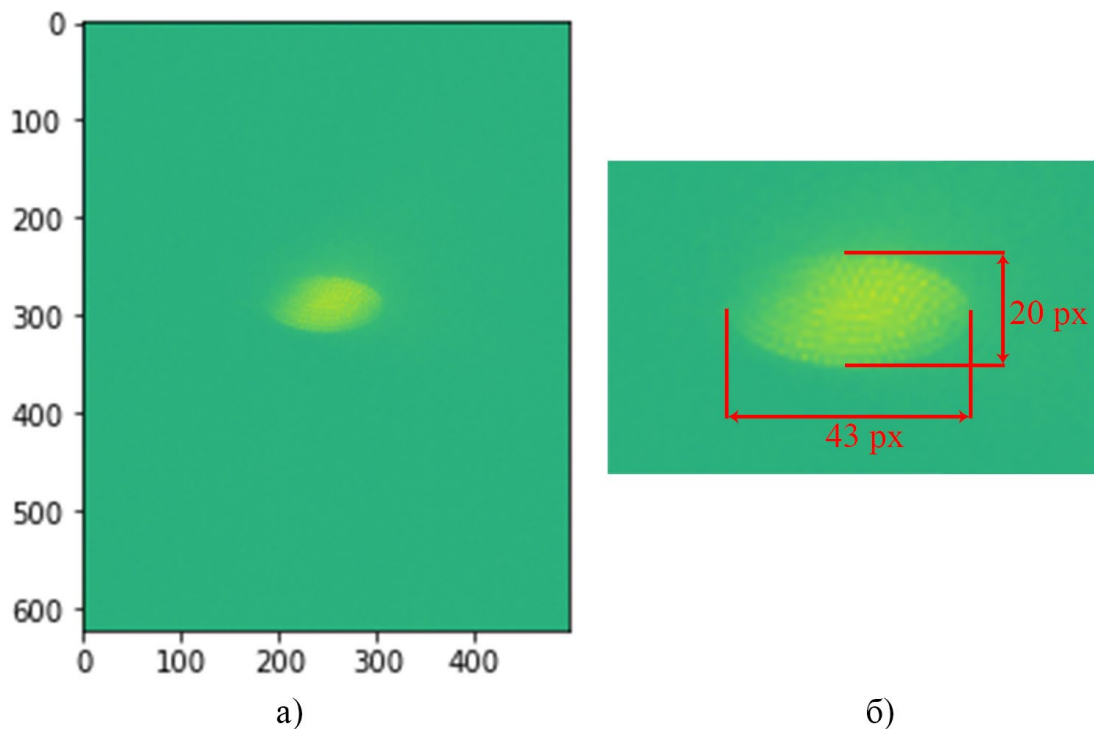


Рисунок 3.6 – Визначення розмірів по зображенню: а) зображення Кулонівського кристалу, що складається з іонів $^{40}\text{Ca}^+$; б) збільшене зображення кристалу у 2 рази

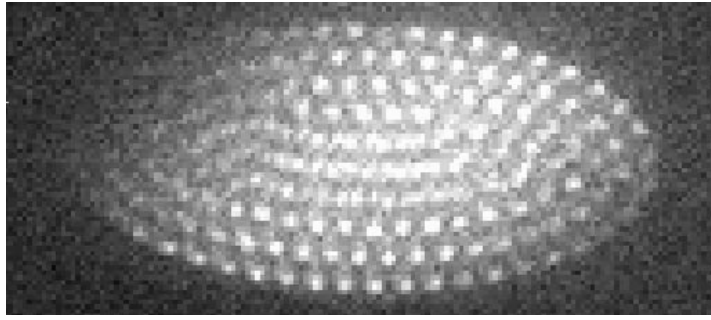


Рисунок 3.7 – Зображення захопленого Кулонівського кристалу з іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у ЛПП

Так як вже відомий розмір одного пікселю, визначимо геометричні розміри Кулонівського кристалу за рис. 3.6. Кулонівський кристал має осьову симетрію, так як захоплений у ЛПП. Тоді маємо такі розміри кристалу:

$$a = 27.95 \text{ мкм.}$$

$$b = c = 13 \text{ мкм.}$$

Розрахуємо об'єм Кулонівського кристалу, враховуючи його сфероїдальну форму:

$$V = \frac{4}{3} \pi a b^2, \quad (3.9)$$

$$V = 1.98 * 10^{-14} \text{ м}^3$$

ВИСНОВКИ

1. При виконанні кваліфікаційної роботи проведено аналіз фізичних принципів функціонування, класифікації та конструктивно-технологічних особливостей радіочастотних та електрооптичних оптичних іонних пасток, які знайшли застосування в мас-спектрометрії, атомній фізиці, точних квантових годинниках та квантових комп'ютерах.

2. Показано, що радіочастотні іонні пастки (квадрупольні, пастки Пауля) - це вид іонної пастки, в якій для уловлювання заряджених частинок використовується змінне електромагнітне поле. Найпростішою геометрією електричного поля в такій пастці є квадруполь, але в спеціалізованому обладнанні можуть використовуватися складніші геометрії. Пастки можна розділити на два класи, залежно від того, як коливання поля забезпечують утримання, в трьох чи двох вимірах. У двовимірному випадку (так званій лінійній радіочастотній пастці), обмеження руху частинки в третьому напрямку забезпечується статичним електричним полем.

3. На основі аналізу літературних даних встановлено, що основним принципом дії електрооптичної іонної пастки при захваті і утриманні іонів є електрооптичний потенціал, який виникає внаслідок взаємодії суперпозиції одновимірної оптичної решітки з електричним квадрупольним потенціалом.

4. У ході виконання експериментальної частини роботи отримані захоплені одиночні іони, система з двох іонів та Кулонівський кристал з іонів $^{40}\text{Ca}^+$ у ЛПП. Розраховані ідеальні відстані між двома іонами за напругою на торцевих електродах, величина якої складала 21; 43 і 129 В.

5. Встановлено, що радіус зображення іонів $^{40}\text{Ca}^+$ становить 0.65 мкм, геометричні розміри і об'єм Кулонівського кристалу мають величини $a = 27.95$ мкм і $b = c = 13$ мкм та $V = 1,98 \cdot 10^{-14}$ м³ відповідно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Paul W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles // *Reviews of Modern Physics*. 1990. Vol. 62, № 3. P. 531–540.
2. DeVoe R.G. Elliptical ion traps and trap arrays for quantum computation // *Physical Review A*. 1998. Vol. 58, № 2. P. 910–914.
3. Mihalcea B. M., Filinov V.S., Syrovatka R.A., Vasilyak L.M. The physics and applications of strongly coupled Coulomb systems (plasmas) levitated in electrodynamic traps // *Physics reports*. 2023. Vol. 1016. P. 1–103.
4. Obšil P. Nonclassical and coherent emission from trapped ion crystals: Ph.D. thesis: Olomouc, 2021. P. 105.
5. Constructing a Paul ion trap for undergraduate laboratories. *Scholars at Harvard*. 2016, 9 p. https://scholar.harvard.edu/peter_chang_portfolio/classes/constructing-paul-ion-trap-undergraduate-laboratories (date of access: 16.04.2023).
6. Biercuk M.J., Uys H., Britton J.W., VanDevender A.P., Bollinger J.J. Ultrasensitive detection of force and displacement using trapped ions // *Nat. Nanotechnol.* 2010. Vol. 5, № 9. P. 646–650.
7. Knoop M., Madsen N., Thompson R.C. *Physics with Trapped Charged Particles: Lectures from the Les Houches Winter School*. London: Imperial College Press & World Scientific, 2014. P. 376.
8. Miao S. N., Qin H.R., Xin N.C., Han J.Z., Chen Y.T., Zhang J.W., Wang L.J. Sympathetic cooling of a large $^{113}\text{Cd}^+$ ion crystal with $^{40}\text{Ca}^+$ in a linear Paul trap // *Chinese journal of physics*. 2023. Vol. 83. P. 242-252.
9. Yum D., Choi T. Progress of quantum entanglement in a trapped-ion based quantum computer // *Current applied physics*. 2022. Vol. 41. P. 163-177.
10. Fang X., Xie J., Chu S., Jiang Y., An Y., Li C., Gong X., Zhai R., Huang Z., Qiu C., Dai X. Quadrupole-linear ion trap tandem mass spectrometry system for clinical biomarker analysis // *Engineering*. 2021. Vol. 16. P. 56-64.

11. McGloin D. Optical tweezers: 20 years on // *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*. 2006. Vol. 364, № 1849. P. 3521–3537.
12. Perego E., Duca L., Sias C. Electro-Optical ion trap for experiments with atom-ion quantum hybrid systems // *Applied sciences*. 2020. Vol. 10, № 7. P. 2222.
13. Leschhorn G., Hasegawa T., Schaetz T. Efficient photo-ionization for barium ion trapping using a dipole-allowed resonant two-photon transition // *Appl. Phys. B*. 2012. Vol. 108. P. 159–165.
14. Zipkes C., Ratschbacher L., Palzer S., Sias C., Köhl M. Hybrid quantum systems of atoms and ions // *Journal of physics: conference series*. 2011. Vol. 264. P. 012019.
15. Schmidt J., Lambrecht A., Weckesser P., Debatin M., Karpa L., Schaetz T. Optical trapping of ion coulomb crystals // *Physical review X*. 2018. Vol. 8, № 2.
16. Xiao G., Kuang T., Xiong W., Han X., Luo H. A PZT-assisted single particle loading method for dual-fiber optical trap in air // *Optics & laser technology*. 2020. Vol. 126. P. 106115.
17. Schäpers A., Hellesø O. G., Fick J. Optical trapping in air on a single interference fringe // *Optics communications*. 2023. P. 129412.
18. Kim B., Jeong H., Lee Y.S., Hong S., Ohet K. Spatially selective DNA deposition on the fiber core by optically trapping an aqueous droplet and its application for ultra-compact DNA Fabry-Perot temperature sensor // *Sensors and actuators reports*. 2021. Vol. 3. P. 100038.
19. Setoura K., Tsuji T., Ito S., Kawano S., Miyasaka H. Opto-thermophoretic separation and trapping of plasmonic nanoparticles // *Nanoscale*. 2019. Vol. 11, № 44. P. 21093-21102.
20. Eltony A. M., Gangloff D., Shi M., Bylinskii A., Vuletić V., Chuang I.L. Technologies for trapped-ion quantum information systems // *Quantum information processing*. 2016. Vol. 15, № 12. P. 5351–5383.
21. Tyagi R., Kumar P., Sharma U. Metabolomics techniques: a brief update // *Epigenetics and metabolomics*. 2021. Vol. 28. P. 1–29.

22. Libbrecht K. G., Black E. D. Improved microparticle electrodynamic ion traps for physics teaching // *American journal of physics*. 2018. Vol. 86, № 7. P. 539–558.
23. Konenkov N. V., Ding C. F., Konenkov A. N. Modelling of a linear ion trap operation in the second stability region // *Heliyon*. 2022. Vol. 8, № 12. P. e12260.
24. Mandal P., Das S., De Munshi D., Dutta T., Mukherjee M. Space charge and collective oscillation of ion cloud in a linear Paul trap / *Int. J. Mass Spectrom*. 2014. Vol. 364. P. 16–20.
25. Cooper N., Coles L.A., Everton S., Maskery I., Campion R.P., Madkhaly S., Morley C., O’Shea J., Evans W., Saint R., Krüger P., Oručević F., Tuck C., Wildman R.D., Fromhold T.M., Hackermüller L. Additively manufactured ultra-high vacuum chamber for portable quantum technologies // *Additive manufacturing*. 2021. Vol. 40. P. 101898.
26. Wu W., Zhang T., Chen P.-X. Quantum computing and simulation with trapped ions: on the path to the future // *Fundamental research*. 2021. Vol. 1, № 2. P. 213–216.
27. Perego E., Duca L., Sias C. Electro-Optical ion trap for experiments with atom-ion quantum hybrid systems // *Applied sciences*. 2020. Vol. 10, № 7. P. 2222.
28. Bykov D.S., Meusburger M., Dania L., Northup T.E. Hybrid electro-optical trap for experiments with levitated particles in vacuum // *Review of scientific instruments*. 2022. Vol. 93, № 7. P. 07320.
29. Lambrecht A., Schmidt J., Weckesser P., Debatin M., Karpa L., Schaez T. Long lifetimes and effective isolation of ions in optical and electrostatic traps // *Nature photonics*. 2017. Vol. 11, № 11. P. 704–707.
30. Drewsen M. Ion Coulomb crystals // *Physica B: condensed matter*. 2015. Vol. 460. P. 105–113.
31. Kovalenko A., Babjak D., Lešundák A., Podhora L., Lachman L., Obšil P., Pham T., Číp O., Filip R., Slodička L. Emergence of super-Poissonian light from indistinguishable single-photon emitters // *Optica*. 2023. Vol. 10, №2. P. 456–463