

КВАНТОВІ СЕНСОРИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Л.С. Білецька

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

1. Вступ

Історія людського прогресу нерозривно пов'язана з еволюцією засобів вимірювання навколишнього світу — від перших еталонів ваги в античній торгівлі до атомних годинників, що синхронізують сучасну цифрову інфраструктуру[1]. Наразі людство стоїть на порозі «другої квантової революції», яка знаменує перехід від використання макроскопічних властивостей речовини до цілеспрямованого маніпулювання одиночними квантовими станами та частинками[2][3]. У цьому контексті квантова сенсорика та метрологія виступають найбільш зрілим та практично орієнтованим сегментом квантових технологій, демонструючи високу комерційну життєздатність вже сьогодні.[3][4] На відміну від класичних датчиків, що базуються на макроскопічних принципах, квантові сенсори використовують фундаментальні явища природи — квантову суперпозицію, заплутаність, когерентність та стиснення станів — для вимірювання фізичних величин із точністю, обмеженою виключно принципом невизначеності Гейзенберга[3][5][6]. Це дозволяє долати стандартну квантову межу (SQL), що обмежує класичні системи через дробовий шум, і досягати теоретичної межі Гейзенберга. Квантові частинки, такі як окремі атоми, іони, фотони або дефекти в кристалічній решітці, забезпечують стабільність і чутливість, недоступну для жодного механічного пристрою[1][8]. Сфера застосування квантових сенсорів охоплює широкий спектр критично важливих галузей: від біомедицини, де новітні біологічні кубіти дозволяють «бачити» процеси всередині живих клітин на субмолекулярному рівні[9], до оборонного сектора, де квантові гравіметри та акселерометри відкривають шлях до суверенної навігації, незалежної від систем GPS[10][11]. Згідно з прогнозами ринку, сегмент квантової сенсорики може досягти обсягу в 7–10 мільярдів доларів до 2035 року, що підкреслює його стратегічну важливість для глобальної економіки[12]. Сучасний вектор розвитку галузі спрямований на подолання викликів декогеренції та оптимізацію параметрів SWaP-C (розмір, вага, потужність та вартість)[13]. Кінцевою метою є перехід від громіздких лабораторних установок до інтегрованої квантової фотоніки (IQP), де джерела світла, пастки для атомів та детектори одиночних фотонів будуть розміщені на єдиному кремнієвому чіпі[14]. Ця стаття присвячена аналізу фундаментальних принципів роботи квантових сенсорів, огляду їхніх ключових типів та дослідженню перспектив їхнього впровадження у глобальну екосистему вимірювань майбутнього.

2. Теоретична частина

Фундаментальна перевага квантових сенсорів над класичними базується на використанні специфічних явищ квантової механіки, які дозволяють проводити вимірювання з точністю, обмеженою лише принципом невизначеності Гейзенберга[1][2][3]. У класичній метрології точність вимірювання обмежена стандартною квантовою межею (SQL), де похибка оцінки параметра θ масштабується як $\frac{1}{\sqrt{N}}$ (де N -кількість незалежних частинок або вимірювань)[5]. Квантові ресурси дозволяють досягти межі Гейзенберга, де похибка масштабується лінійно як $\frac{1}{N}$ [6]. Ефективність квантового зондування визначається чотирма основними ресурсами: Квантова суперпозиція: Дозволяє квантовому біту (кубіту) перебувати одночасно у лінійній комбінації станів 0 та 1[10]. Це забезпечує можливість паралельного зондування середовища, що дає повніше представлення вимірюваного параметра порівняно з класичними системами[2]. Квантова запутаність: створює кореляції між частинками незалежно від відстані між ними[14]. Запутаність є критичним ресурсом для подолання межі SQL та пригнічення шумів, що дозволяє групі частинок діяти як єдиний високочутливий детектор [6]. Квантове стиснення: процес перерозподілу невизначеності між спряженими змінними (наприклад, фазою та амплітудою)[7]. Стиснення дозволяє виявляти сигнали нижче рівня вакуумного шуму, що є принципово важливим для детектування надслабких магнітних полів або гравітаційних хвиль[4]. Квантова когерентність: Здатність системи зберігати фазову інформацію протягом певного часу (часу когерентності T)[7]. Тривалість когерентності безпосередньо визначає вікно можливостей для проведення точних вимірювань[9][10].

Квантова теорія оцінки параметрів Для кількісного визначення точності квантового сенсора використовується інформація Фішера (FI)[8]. Основною фігурою якості є квантова інформація Фішера (QFI), яка визначає мінімально можливу дисперсію оцінки параметра через нерівність Крамера-Рао[6]. Згідно з цією теорією, точність вимірювання зростає, якщо квантовий стан системи різко змінюється при незначній зміні зовнішнього параметра[8][9]. QFI дозволяє оптимізувати вимірювальний протокол, вибираючи такий базис спостережуваних величин, який максимізує вилучення інформації з квантової системи[10][11].

Багаточастинкові системи та квантова критичність Сучасна теорія розглядає квантову критичність як потужний ресурс для сенсорики[12]. У точках квантового фазового переходу відбувається закриття енергетичної щілини між основним та першим збудженим станами[13]. У таких точках квантова інформація Фішера демонструє розбіжність, що дозволяє досягати суперлінійного масштабування чутливості, яке може перевищувати навіть межу Гейзенберга[6]. Використання багаточастинкових систем, таких як спінові ланцюжки або моделі Хаббарда, дозволяє створювати сенсори, стійкі

до декогеренції та втрати окремих частинок, оскільки інформація про параметр закодована у колективних станах усієї системи [14].

3. Різновиди квантових сенсорів та датчиків

Сучасна технологічна екосистема квантових вимірювань, що виникла в межах «другої квантової революції», базується на прецизійному маніпулюванні поодинокими квантовими станами для досягнення чутливості, обмеженої лише фундаментальним принципом невизначеності Гейзенберга [1][2].

Атомні годинники. Найбільш зрілим класом таких пристроїв є атомні годинники, які використовують квантові переходи в ізольованих атомах цезію, рубідію або стронцію як стабільний еталон частоти, причому новітні оптичні годинники на іонних пастках здатні підтримувати точність із похибкою в одну секунду за понад три мільярди років, що на порядки перевищує можливості традиційних мікрохвильових стандартів[3][4].

Квантові акселерометри та гіроскопи. Паралельно розвиваються квантові інерціальні датчики, такі як акселерометри та гіроскопи, що працюють на принципах інтерферометрії атомних хвиль холодних атомів у вакуумі, дозволяючи реалізувати системи «мертвого рахунку» для автономної навігації під водою чи в тунелях без доступу до GPS протягом багатьох тижнів[6][7].

Квантові гравіметри та градіометри. Близькими до них за архітектурою є квантові гравіметри та градіометри, які використовують хвильову природу атомів рубідію у вільному падінні для фіксації мікроскопічних аномалій гравітаційного поля Землі, що робить їх незамінними для моніторингу вулканічної активності, пошуку підземних тунелів, корисних копалин та відстеження рівня ґрунтових вод без інвазивного втручання[10][11].

Квантові магнітометри. Сектор квантової магнітометрії представлений кількома конкуруючими технологіями, серед яких надпровідникові інтерференційні пристрої (SQUID) залишаються еталоном за рівнем шуму (фемтотесла), проте потребують дорогого кріогенного охолодження[6]. Альтернативою виступають магнітометри з оптичним накачуванням (OPM), що базуються на прецесії спінів атомів у парах лужних металів і працюють при кімнатній температурі, що дозволяє створювати гнучкі «шоломи» для магнітоенцефалографії, які дають пацієнтам змогу рухатися під час сканування мозку[7]. Ще вищу просторову роздільну здатність забезпечують азотновакансійні (NV) центри в алмазі точкові дефекти кристалічної решітки, що діють як наномасштабні магнітометри, термометри та датчики тиску, здатні картографувати магнітні поля в мікросхемах або вимірювати температуру всередині окремих живих клітин[8][9].

Біологічні кубіти та квантові точки. У 2025 році було зроблено прорив у галузі біологічних кубітів, де вчені навчилися кодувати квантову інформацію безпосередньо у флуоресцентні білки всередині живих клітин, що відкриває шлях до неінвазивного спостереження за модифікаціями протеїнів та ранньої

діагностики таких складних хвороб, як Альцгеймера[9]. Квантові точки, як напівпровідникові нанокристали з розмірною залежною флуоресценцією, доповнюють цей інструментарій, виступаючи високочутливими імуносенсорами для виявлення біомаркерів раку яєчників чи ревматоїдного артриту в наднизьких концентраціях[11].

Рідбергівські радіочастотні приймачі. Специфічну нішу займають Rydberg-сенсори, які використовують високозбуджені стани атомів із гігантськими дипольними моментами для створення універсальних антен, здатних приймати сигнали в діапазоні від кГц до ТГц, включаючи Wi-Fi та Bluetooth, причому ці пристрої є самокаліброваними завдяки зв'язку чутливості з фундаментальними атомними константами[5].

Фотонні квантові сенсори. Фотонні квантові сенсори, зокрема системи фантомного зображення (Ghost Imaging), використовують кореляції між заплутаними парами фотонів для отримання зображень об'єктів, з якими реєструючі фотони ніколи безпосередньо не взаємодіяли, що дозволяє бачити крізь туман, дим або біологічні тканини з мінімальною кількістю частинок[12].

Квантові лідари та радары. Квантові лідари та радары використовують ці ж принципи для покращення виявлення стелс-цілей у зашумленому середовищі, долаючи обмеження класичного відбиття світла[13]. Реєстрацію цих поодиноких квантових подій забезпечують детектори одиночних фотонів, такі як напівпровідникові лавинні діоди (SPAD), що працюють у режимі Гейгера, або надпровідникові нанодіоди (SNSPD), які при температурі близько 1,5 К досягають ефективності понад 90%, забезпечуючи гігабітну швидкість космічного зв'язку та квантову передачу ключів (QKD)[15].

Квантові оптомеханічні сенсори. Крім того, існують спеціалізовані оптомеханічні сенсори, де світло лазерів взаємодіє з механічним рухом мембран чи дзеркал, дозволяючи вимірювати переміщення на рівні $10^{-20} \frac{\text{м}}{\sqrt{\text{Гц}}}$, що є критичним для детектування гравітаційних хвиль та вимірювання маси поодиноких вірусів[14]. Усі ці датчики поступово інтегруються на єдині кремнієві чіпи в межах концепції інтегрованої квантової фотоніки (IQP), що має на меті зменшити їхні габарити, енергоспоживання та вартість, перетворюючи лабораторні прототипи на повсюдні елементи майбутнього «квантового інтернету речей» до 2035 року.

Література

1. Solace Global Foundation. Quantum Sensors: Next-Generation Precision Measurement. Solace Global Foundation. URL: <https://www.solaceglobal.world/the-wisdom/quantum-sensors-next-generation-precision-measurement>
2. Quantum Technologies. Fraunhofer-Gesellschaft. URL:

<https://www.fraunhofer.de/en/research/fraunhofer-strategic-research-fields/quantum-technologies.html>.

3. Quantum Sensing and High-Precision Applications - Monolithic Power Systems, <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/sensors/future-trends-and-innovations-in-sensing/quantum-sensing-and-high-precision>

4. Scientists sidestep Heisenberg uncertainty principle in precision sensing experiment. The University of Sydney. URL: <https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2025/09/25/scientists-sidestep-heisenberg-uncertainty-in-quantum-sensing-experiment.html>.

5. Quantum Biosensors on Chip: A Review from Electronic and Photonic Integrated Circuits to Future Integrated Quantum Photonic Circuits - MDPI, <https://www.mdpi.com/3042-5344/1/2/5>

6. Introduction – Open Quantum Sensing and Measurement Notes. Interactive TextBooks. URL: <https://interactivetextbooks.tudelft.nl/qsm/src/index.html>.

7. Quantum Detecting and Sensing | Argonne National Laboratory, URL: <https://www.anl.gov/quantum/detecting-and-sensing>

8. What is Quantum Sensing - QuEra, URL: <https://www.quera.com/glossary/quantum-sensing>

9. Why ‘quantum proteins’ could be the next big thing in biology. Scientific American. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/why-quantum-proteins-could-be-the-next-big-thing-in-biology/>.

10. Top 10 Breakthroughs of the Year in physics for 2025 revealed – Physics World. Physics World. URL: <https://physicsworld.com/a/top-10-breakthroughs-of-the-year-in-physics-for-2025-revealed/>.

11. Lviv State University of Internal Affairs Institutional Repository (LvSUIAIR): Головна сторінка. URL: <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/6900/1/22.12.2023.pdf> page=118.

12. Quantum Sensors for Next-Generation Sensing: Techniques, Applications, and Recent Advancements | Request PDF – ResearchGate, URL: <https://www.researchgate.net/publication/388243990> Quantum Sensors for Next-Generation Sensing Techniques Applications and Recent

13. Quantum Sensing – Introduction and Taxonomy. PostQuantum - Quantum Computing, Quantum Security, PQC. URL: <https://postquantum.com/quantum-sensing/quantum-sensing-intro-taxonomy/>.

14. Quantum nanoscale sensing | Department of Materials - University of Oxford, URL: <https://www.materials.ox.ac.uk/article/quantum-nanoscale-sensing>