УДК 535.33; 621.373.8

А.М. Негрійко, І.В. Мацнєв, В.М. Ходаковський, Л.П. Яценко
Інститут фізики НАН України, проспект Науки, 46, 03028, Київ
e-mail: negriyko@iop.kiev.ua

ВУЗЬКІ ОПТИЧНІ РЕЗОНАНСИ У ЛАЗЕРНІЙ СПЕКТРОСКОПІЇ ТА МЕТРОЛОГІЇ

Вузькі оптичні резонанси широко використовуються у спектроскопії надвисокої роздільної здатності та прецизійній лазерній метрології. У роботі коротко описані основні фізичні принципи формування вузьких оптичних резонансів, приклади їх реалізації з використанням сучасних лазерних систем. Розглядаються «темні» резонанси при взаємодії атома рубідію з випромінюванням фемтосекундного лазера, частотно-модуляційні резонанси нелінійного поглинання та нелінійної дисперсії молекулярного йоду, перспективи їх застосування.

Ключові слова: лазер, нелінійна лазерна спектроскопія, атом, молекула, фемтосекундний лазер.

Резонансний характер взаємодії світла з речовиною відіграв чи не ключову роль у формуванні протягом XX століття основних засад сучасної фізики, починаючи з квантової механіки, квантової електродинаміки, будови атомів і молекул, фізики твердого тіла, астрофізики і космології тощо. Значний прогрес у точності оптичних вимірювань пов'язаний з відкриттям лазерів, а розробка методів формування вузьких оптичних резонансів відкрила нові можливості для спектроскопії та метрології. Вузькі резонанси у спектрах нелінійного поглинання світла молекулами та атомами знаходять широке застосування у лазерній спектроскопії та лазерній метрології, зокрема, як квантові репери для стабілізації частоти лазера. Сьогодні формування вузьких оптичних резонансів здійснюється на основі нелінійних ефектів взаємодії атомів та молекул з лазерним випромінюванням (найбільш широко відомими є явища насиченого поглинання), або з використанням холодних атомів, молекул та іонів. Обидва методи дозволяють сформувати резонансний відгук з шириною, яка не обмежена ефектом Доплера, зумовленого тепловим рухом частинок (субдоплерівські, або «вузькі» оптичні резонанси).

Разом з тим, пошуки нових квантових реперів, які дають змогу реалізувати лазерні системи з новими покращеними якостями, активно продовжуються і потребують дослідження фундаментальних закономірностей взаємодії лазерного світла з квантовими системами у нових, недостатньо вивчених умовах. У даній роботі будуть розглянуті деякі напрями таких пошуків, а саме дослідження «темних» резонансів у взаємодії імпульсного випромінювання фемтосекундного лазера з атомами рубідію та частотно-модуляційні резонанси насиченого поглинання та насиченої дисперсії молекулярного йоду.

Темні резонанси при збудженні атомів рубідію фемтосекундним лазером

Одним з яскравих ефектів, зумовлених когерентністю квантових станів атомів є когерентне полонення населеності [1]. Полонення населеності проявляє себе як зменшення інтенсивності флуоресценції атома під впливом двох оптичних полів, що пов'язують два довгоживучі стани атома (один з яких може бути основним) з короткоживучим збудженим станом, у вузькому інтервалі зміни частоти одного з полів. Цей провал у інтенсивності флуоресценції спостерігається, коли різниця частот діючих на атом світлових полів рівна частоті переходу між нижніми довгоживучими станами (умова двофотонного резонансу). Він носить назву "темного резонансу" (dark resonance).

Фізичною основою полонення насе-

леності є формування у системі атом + поле стаціонарного стану, який утворюється як суперпозиція лише довгоживучих станів, і, отже, якщо атом перебуває в такому стані, він не випромінює світлових квантів. Ширина темного резонансу визначається тривалістю взаємодії атома з полем та часом релаксації елементів матриці густини, що описують довгоживучі стани, і може бути дуже малою, що є привабливим для застосування таких резонансів, зокрема, у метрології.

Темні резонанси можна формувати з використанням не тільки схеми зі збудженням атомної системи двома монохроматичними лазерними полями, а і схеми зі збудженням атомів багаточастотним лазерним полем фемтосекундного лазера, т.з. «частотним гребенем», який перекриває широкий спектральний діапазон еквідистантними частотними компонентами. Фіксований часовий інтервал між лазерними імпульсами визначає різницю частот сусідніх компонент “гребінця”, а широкий спектральний діапазон забезпечується малою тривалістю лазерних імпульсів.

Нехай ширина частотного гребінця перевищує частоту $\omega_{1,2}$, що відповідає різниці енергій довгоживучих станів. Якщо різниця між частотними компонентами “гребінця” ν вибрана таким чином, що $N\omega_1 \approx \nu_{1,2}$, де N – ціле (рис. 1), то за умови виконання $N\omega_1 = \nu_{1,2}$ можна чекати когерентного полонення населеності і, відповідно, провалу у спектрі флуоресцеїнції при зміні інтервалу між частотними компонентами поблизу $\omega_1 = \dfrac{\nu_{1,2}}{N}$ [2].

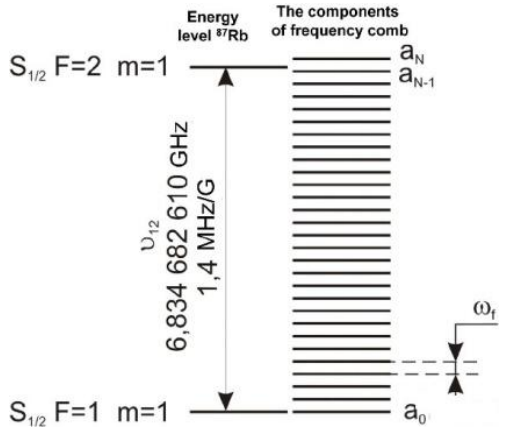

Рис. 1. Схема рівнів.

Для спостереження темного резонансу за такою схемою [3] використовувався фемтосекундний лазер з довжиною хвилі λ = 780,24 нм. частота повторення імпульсів лазера варіювалася поблизу 75,65 МГц. Діюче на атом випромінювання складалося з близько $N \approx 1300$ мод з потужністю однієї моди 2,3 мкВт. Схема експериментальної установки наведена на рис. 2.

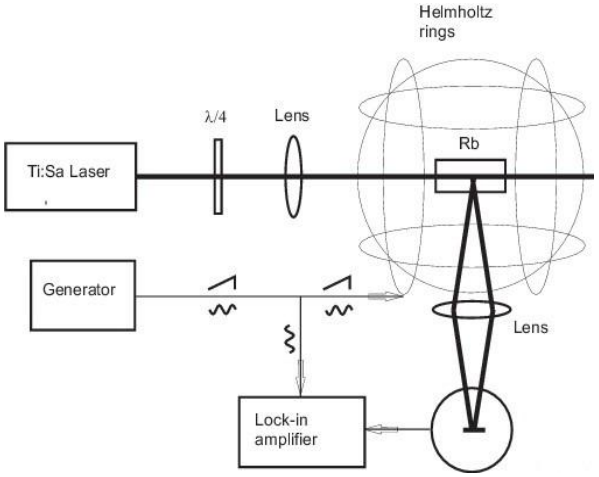

Рис. 2. Схема експерименту.

Промінь фемтосекундного лазера діаметром близько 6 мм проходив крізь чвертьхвильову пластинку і фокусувався лінзою з фокусною відстанню 40 см у комірку з парою рубідію з природною сумішшю ізотопів ^{87}Rb і ^{85}Rb (28% і 72% відповідно), температура якої становила 25 ^{0}C. Діаметр лазерного променя на ділянці реєстрації флуоресценції був близько 2 мм, так що частота Рабі для окремої моди складала 2, 6 МГц. Флуоресценцію рубідію реєстрували за допомогою фотоелектронного помножувача. Комірка містилася у центрі системи кілець Гельмгольца, дві пари з яких використовувалися для компенсації магнітного поля Землі, а третя пара створювала робоче магнітне поле вздовж напряму поширення променя. Сигнал з фотоелектронного помножувача проходив синхронне детектування на частоті 900 Гц і записувався на комп’ютер за допомогою плати АЦП.

В залежності від величини магнітного поля спостерігалися резонанси з N=39,40, 41 для ^{85}Rb та N=90,91 для ^{87}Rb в інтервалі $0 < B < 50$ Гс. Ідентифіковані параметри переходів, які відповідають резонансам когерентного полонення населеності.

Положення темних резонансів точно визначається величиною ω_f і для випадку,

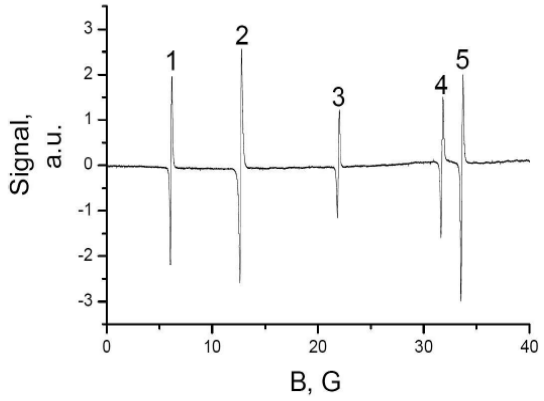

Рис. 3. Темні резонанси при збудженні D_1 лінії рубідію у комірці з буферним газом: 1: $m = -2$, N=40, ^{85}Rb, 2: $m = -1$, N=40, ^{85}Rb, 3: $m = -1$, N=90, ^{87}Rb, 4: $m = 1$, N=91, ^{87}Rb, 5: $m = 2$, N=41, ^{85}Rb, m — магнітне квантове число.

наведеному на малюнку, відповідає значенню ω_1 = 75,69 МГц [4].

Частотно-модуляційні резонанси насиченого поглинання молекулярного йоду

Щільний оптичний спектр молекулярного йоду широко використовується як репер для калібрування довжини хвилі в лазерній спектроскопії, стабілізації частоти лазерів у широкому діапазоні спектра: від зеленого (500 нм) до ближнього інфрачервоного (900 нм). Висока стабільність частоти гелій-неонового лазера на 543 нм, 612 нм, 633 нм, 640 нм, Nd: YAG лазера на довжині хвилі 532 нм (друга гармоніка), Ar^+ лазера на 514,5 нм досягається за рахунок використання субдоплірівських резонансів насиченого поглинання молекулярного йоду. Сім з 20 рекомендованих довжин хвиль для реалізації метра базуються на надтонких переходах $^{127}I_2$.

Стандартний підхід прецизійного вимірювання спектральних характеристик у спектроскопії надвисокої роздільної здатності (зсуву центра лінії, визначення різниці частот чи довжин хвиль спектральних компонентів тощо) базується на використанні двох ідентичних лазерів, стабілізованих по різних компонентах надтонкої структури, гетеродинуванні їх частот та вимірюванні частоти биття.

На відміну від такого підходу, пропонується реалізація методу бездоплеровської спектроскопії насичення надтонкої структури молекулярного йоду з «вбудованою» частотною мірою, завдяки чому можна здійснювати прецизійні спектральні вимірювання без використання згаданого вище методу оптичного гетеродинування.

Використовується метод частотної модуляційної спектроскопії [5], коли у схемі спостереження бездоплерівських резонансів оптична несуча частота лазерного поля модулюється з високою частотою. Якщо частота модуляції вища, ніж ширина спектральної лінії, то при взаємодії такого поля з лінією поглинання при насиченні поглинання або дисперсії виникає амплітудна модуляція лазерного поля, яка і детектується як сигнал фотоприймачем та обробляється синхронним детектором.

Важливою особливістю, яку ми використовуємо в нашому підході є те, що частотно-модуляційний резонанс насиченого поглинання має характерну структурру, частотна відстань між компонентами якої точно рівна частоті модуляції (рис. 4). Таким чином, при реєстрації спектра нелінійного поглинання молекулярного йоду у структурі спектра присутня частотна міра, яка може бути застосована для обробки спектра [6].

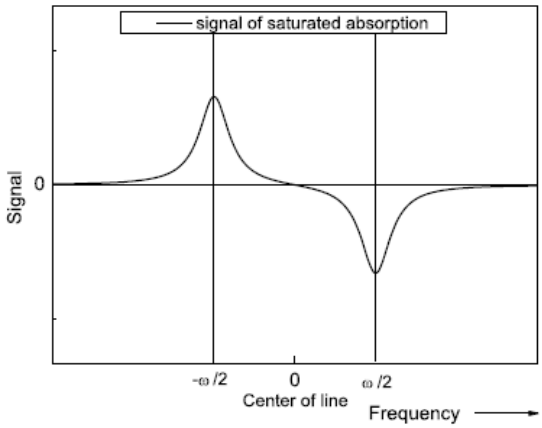

Рис. 4. Форма частотно-модуляційного резонансу насиченого поглинання.

Ми наводимо результати застосування методу частотно-модуляційної спектроскопії для дослідження надтонкої структури лінії поглинання гетеро ізотопного молекулярного йоду $^{127}I^{129}I$ в околі лінії неону 0,6403 нм. На рис. 5 показаний приклад надтонкої структури лінії погли-

нання, отриманий методом ЧМ-спектроскопії.

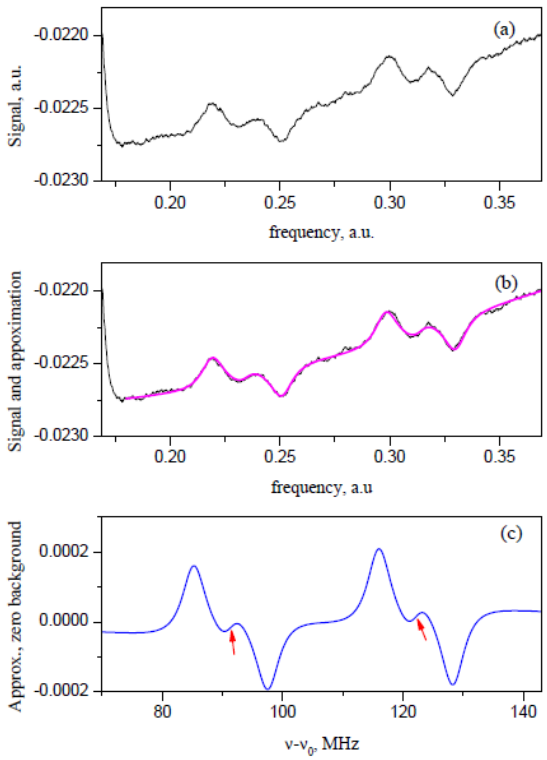

Рис. 5. Приклад обробки надтонкої структури лінії поглинання молекулярного йоду, отриманою за технікою ЧМ-спектроскопії: a - експериментальний спектр, b – апроксимація теоретичною кривою, c – оброблений спектр з вирахуванням фону. Відстань між структурними компонентами спектру 30,8 МГц.

Спектр реєструвався за допомогою напівпровідникового лазера із зовнішнім резонатором у класичній схемі реєстрації бездоплерівських оптичних резонансів. Комірка з молекулярним йодом збуджувалася зустрічними частотно-модульованими лазерними полями.

Висновки

Таким чином, методом частотно-модуляційної спектроскопії з використанням одного напівпровідникового лазера зареєстрований спектр надтонкої структури переходу $B^3\Pi_{0U}^+ - X^1\Sigma_g^+$ молекулярного йоду в околі довжини хвилі 640 нм. Частотна міра визначається частотою модуляції лазера (у даному експерименті 12,5 МГц), що дозволяє визначати різниці частот компонент надтонкої структури з точністю краще 100 кГц, що є високим показником для спектроскопії оптичного діапазону.

Наведені результати досліджень «темних» резонансів та частотно-модуляційних резонансів насиченого поглинання можуть бути застосовані для розробки і створення малогабаритних елементів квантових реперів для сучасних стабілізованих за частотою лазерів та вимірювальних приладів на їх основі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Alzetta G., Gozzini A., Moi L. and Orriols G. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour // Nuovo Cimento B 36, 1976. - v.5, iss.1. - P. 5-20.
2. Arissian L. and Diels J.-C. Repetition rate spectroscopy of the dark line resonance in rubidium // Opt. Commun., 2006. – 264. - P. 169–173.
3. Аузіньш М., Маліцький Р.А., Мацнев І.В., Негрійко А.М., Романенко В.І., Ходаковский В.М., Яценко Л.П. Дослідження темних резонансів в атомах рубідію у полі послідовностей світлових імпульсів // УФЖ, 2009. - т. 54. - С. 975-983.
4. Malitskiy R.A., Khodakovskiy V.M., Negriyko A.M., Romanenko V.I., Matsnev I.V., Yatsenko L.P. Magneto-optical CPT resonances in rubidium excited by femtosecond laser comb // Proc. SPIE 7993, ICONO 2010: International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, 799312 (January 10, 2011), P. 799312-1-799312-8.
5. Bjorklund G.C., Levenson M.D., Lenth W., Ortiz C. Frequency modulation (FM) spectroscopy // Appl. Phys. B, 1983. – V. 32. - P. 145–152.
6. Khodakovskiy V.M., Romanenko V.I., Matsnev I.V., Malitskiy R.A., Negriyko A.M., Yatsenko L.P. Frequency-modulation saturation spectroscopy of

molecular iodine hyperfine structure near 640 nm with a diode laser source // arXiv:0912.3252v1 [physics.atom-ph], 2009, P. 1-3.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2013

A.M. Negriyko, I.V. Matsnev, V.M. Khodakovskiy, L.P. Yatsenko
Institute of Physics National academy of Sciences of Ukraine, 46, Prospect Nauki, Kyiv, 03028
e-mail: negriyko@iop.kiev.ua

NARROW OPTICAL RESONANCES IN LASER SPECTROSCOPY ANA METROLOGY

The narrow optical resonances are widely used in ultra-high-resolution spectroscopy and precision laser metrology. The paper briefly describes the basic physical principles of narrow optical resonances, examples of implementation using advanced laser systems. The "dark" resonances formed at interaction of rubidium atoms with radiation femtosecond laser and frequency-modulation resonances of nonlinear absorption and nonlinear dispersion of molecular iodine, the prospects of their application are considered.

Keywords: laser, nonlinear laser spectroscopy, atom, molecule, femtosecond laser.

А.М. Негрийко, И.В. Мацнев, В.М. Ходаковский, Л.П. Яценко
Институт физики НАН Украины, проспект Науки, 46, 03028, Киев
e-mail: negriyko@iop.kiev.ua

УЗКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСЫ В ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И МЕТРОЛОГИИ

Узкие оптические резонансы широко применяются в спектроскопии сверхвысокого разрешения и прецизионной лазерной метрологии. В работе кратко описаны основные физические принципы формирования узких оптических резонансов, примеры их реализации с использованием современных лазерных систем. Рассматриваются «темные» резонансы при взаимодействии атома рубидия с излучением фемтосекундного лазера, частотно-модуляционные резонансы нелинейного поглощения и нелинейной дисперсии молекулярного йода, перспективы их применения.

Ключевые слова: лазер, нелинейная лазерная спектроскопия, атом, молекула, фемтосекундний лазер.