

МАТЕМАТИЧКА ГИМНАЗИЈА

МАТУРСКИ РАД

из предмета физике

Успоравање светлосних импулса у атомској пари

Ученик:

Милан Крстајић, 4д

Ментор:

Станко Николић

Београд, јун 2013.

Садржај

1. Увод.....	3
2. Физика светлосних импулса.....	4
1. Фазна и групна брзина	
2. Понашање импулса у зависности од особина средине	
3. Електромагнетно индукована транспаренција.....	6
4. Успоравање светлосних импулса у пари рубидијума.....	8
5. Експеримент.....	9
1. Експериментална поставка	
2. Добијени резултати	
6. Закључак.....	12
7. Литература.....	13
8. Захвалност.....	14

1. Увод

Једна од популарних тема у модерној таласној и квантној оптици је проучавање импулса електромагнетног зрачења. Развој модерне технологије омогућио је стварање физичких услова у којима се могу проучавати разне особине импулса светлости. Овај рад је усмерен на описивање феномена успоравања светлосних импулса у атомској пари. Наиме, могуће је створити услове у пари рубидијума (Rb) при којима је групна брзина светлосног импулса знатно мања од брзине светлости (постигнуте су брзине и од неколико десетина метара у секунди; при експерименталној поставци која је описана у овом раду могуће је постићи брзину од неколико километара у секунди). Групна брзина таласа зависи од дисперзије оптичке средине (зависности индекса преламања од фреквенције светлости). С обзиром да се потребна дисперзија јавља при фреквенцијама које одговарају апсорпционим линијама оптичког медијума пресудно је обезбедити услове ниске апсорпције у оптичкој средини да би појава уопште могла бити примећена. Овакве услове је могуће постићи помоћу феномена *електромагнетно индиковане транспаренције*. Ради се о квантном феномену који се јавља када се помоћу ласера међусобно спрегну енергетски нивои у атому рубидијума. Тада се атом доводи у такозвано „тамно стање“ у ком одсуствује апсорпција светлости иако њена фреквенција одговара некој од апсорпционих линија. На тај начин, атомска средина постаје транспарентна за резонантно ласерско зрачење при чему је због велике дисперзије индекса преламања у околини атомског прелаза омогућено веома споро простирање светлосних импулса.

У овом раду су, поред основних теоријских разматрања, представљени опис експеримента рађеног у Центру за фотонику Института за физику у Београду, као и експериментални резултати успоравања ласерских импулса у ЕИТ средини.

2. Светлосни импулси

Импулси су посебна врста таласа. За разлику од равних таласа који имају јединствену фреквенцију, импулси се због просторне локализованости састоје од континуалног опсега фреквенција које се налазе у околини неке централне фреквенције. То се може објаснити помоћу Хајзенбергових релација неодређености. Ако је ΔE енергетска неодређеност импулса, а τ његова (временска) ширина, важи релација неодређености између те две величине:

$$\Delta E \tau \geq \hbar \quad (1)$$

Како је енергетска неодређеност $\Delta E = \hbar \Delta \omega$, следи да је $\Delta \omega \geq \frac{1}{\tau}$ што указује да импулс мора чинити опсег фреквенција ширине $\Delta \omega$.

Сваки импулс има свој облик који је дефинисан као расподела интензитета таласа дуж правца простирања. У општем случају, фреквентне компоненте путују различитим брзинама кроз материјалну средину. У одређеним условима, импулс недеформисан излази из материјалне средине што је могуће само ако све компоненте путују истом брзином која зато не сме да зависи од њихових фреквенција.

Фазна и групна брзина

Фазна брзина је брзина кретања фазе таласа кроз простор. Једнака је:

$$v_p = \frac{k}{\omega} = \frac{c}{n} \quad (2)$$

k – таласни вектор

ω – кружна фреквенција таласа.

c – брзина светлости

n – индекс преламања

Све таласне компоненте које чине импулс се крећу фазном брзином.

Групна брзина је брзина преношења енергије таласа (може се рећи и облика таласа) кроз простор. Једнака је:

$$v_g = \frac{dk}{d\omega} \quad (3)$$

Таласни вектор k се може представити као:

$$k = \frac{n\omega}{c} \quad (4)$$

При чему је индекс преламања функција фреквенције светлости у околини атомског прелаза. Израз за групну брзину онда постаје :

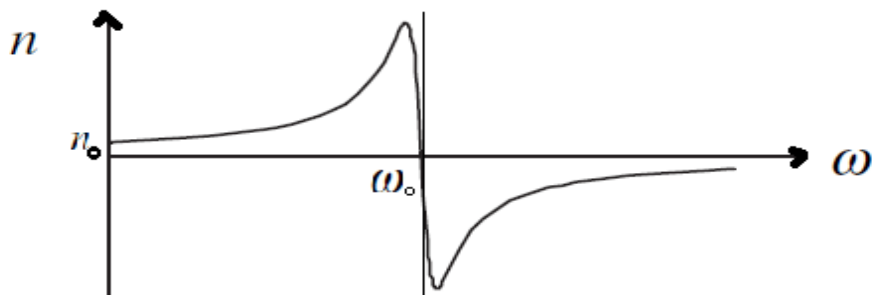
$$v_g = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (5)$$

Групна брзина је заправо брзина простирања импулса.

Утицај особина оптичке средине на кретање импулса

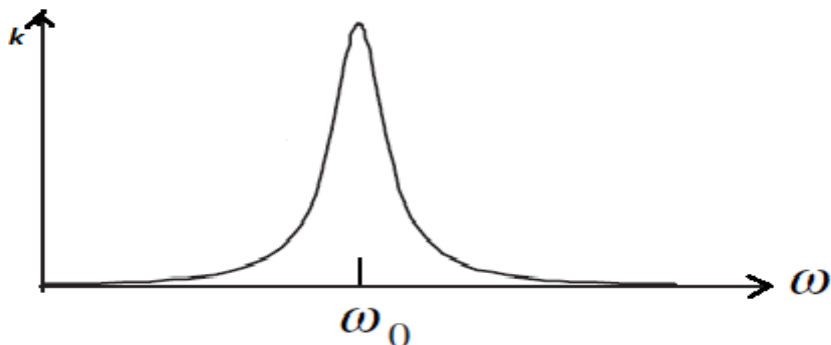
Најзначајније особине светлосног импулса су дужина трајања и временски облик. При проласку кроз неку средину говоримо и брзини импулса, његовој дисторзији и пригушењу. Фазна брзина таласа се не може значајно смањити јер је за то потребна средина са изразито великим индексом преламања. Међутим, из формуле за v_g можемо закључити да се значајно смањење групне брзине неког таласа може остварити у срединама са великом дисперзијом, $\frac{dn}{d\omega}$. Да би се импулс простирао без дисторзије, односно да би одржавао свој облик, потребно је да зависност $k(\omega)$ буде линеарна, односно да се за импулс може дефинисати јединствена групна брзина. Што је веће одступање зависности $k(\omega)$ од линеарне, дисторзија импулса је израженија.

Да би могли да уочимо феномен успоравања светлосних импулса потребно је остварити оптичку средину са великом дисперзијом и довољно малом дисторзијом и пригушењем. Такви услови се могу постићи у парама рубидијума на фреквенцијама које су блиске фреквенцијама апсорпционих линија(слика 1).



Слика 1 – Зависност индекса преламања средине од фреквенције светлости у околини фреквенције апсорпционе линије (ω_0).

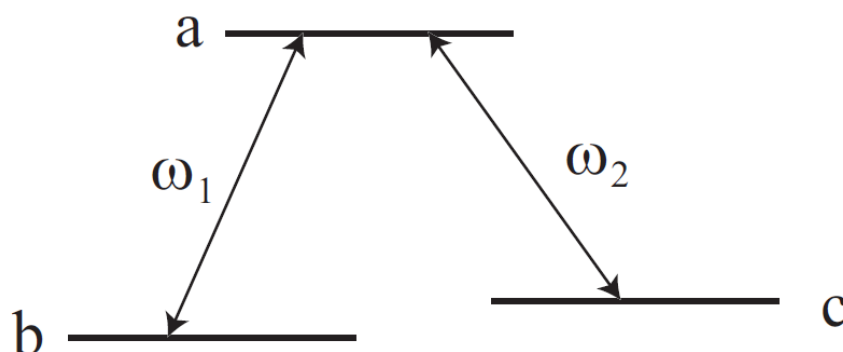
Како је коефицијент апсорпције изразито висок (слика 2) на поменутиим фреквенцијама феномен се може приметити једино помоћу феномена електромагнетно-индуковане транспаренције(ЕИТ - феномен) .



Слика 2 – Зависност коефицијента апсорпције средине од фреквенције светлости у околини фреквенције апсорпционе линије (ω_0)

3. EIT-феномен

Посматрајмо понашање атома са три енергетска нивоа под утицајем два светлосна зрака 1 и 2. Два енергетски блиска стања ($|b\rangle$ и $|c\rangle$) заједно са стањем $|a\rangle$ чине Λ – конфигурацију (а може се рећи и Λ – шему). Нека су светлосни зраци такви да фреквенција зрака 1 одговара фреквенцији прелаза $|a\rangle \rightarrow |b\rangle$, а фреквенција зрака 2 одговара фреквенцији прелаза $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$.



Слика 3 – Λ -конфигурација; $\omega_1 = \omega_a - \omega_b$ и $\omega_2 = \omega_a - \omega_c$.

Таласна функција која описује овај систем је облика:

$$|\psi\rangle = C_a|a\rangle + C_b|b\rangle + C_c|c\rangle \quad (6)$$

Хамилтонијан овог система је :

$$H = H_0 + H_1 \quad (7)$$

Где су:

$H_0 = \hbar\omega_a|a\rangle\langle a| + \hbar\omega_b|b\rangle\langle b| + \hbar\omega_c|c\rangle\langle c|$ - слободни део Хамилтонијана који се односи на енергије атомских нивоа;

$H_1 = -\frac{\hbar}{2}(|a\rangle\langle b|\Omega_1 e^{-i\omega_1 t} + |b\rangle\langle a|\Omega_1^* e^{i\omega_1 t}) - \frac{\hbar}{2}(|a\rangle\langle c|\Omega_2 e^{-i\omega_2 t} + |c\rangle\langle a|\Omega_2^* e^{i\omega_2 t})$ - део Хамилтонијана који описује интеракцију система са спољашњим електричним пољем.

Ω_1 и Ω_2 су комплексне Рабијеве фреквенције које описују интеракције светлосних зрака са стањима атома: Нека су E_1 и E_2 електрична поља (у комплексној репрезентацији), а d_{ab} и d_{ac} диполни моменти прелаза $|a\rangle \rightarrow |b\rangle$ и $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$, тада је $\Omega_1 = \frac{E_1 d_{ab}}{\hbar}$ и $\Omega_2 = \frac{E_2 d_{ac}}{\hbar}$.

Решавањем Шредингерове једначине за овај систем се добија скуп таласних функција које описују овај систем. Свака таласна функција одговара различитом скупу почетних услова. Једно од решења је и следећа таласна функција:

$$|\psi(t)\rangle_{dark} = \frac{\Omega_2(t)e^{-i\omega_b t}|b\rangle - \Omega_1(t)e^{-i\omega_c t}|c\rangle}{\sqrt{|\Omega_1(t)|^2 + |\Omega_2(t)|^2}} \quad (8)$$

Стање које описује ова таласна функција се зове тамно стање. Тамно стање представља суперпозицију стања $|b\rangle$ и $|c\rangle$ које карактерише деструктивна интерференција прелаза $|b\rangle \rightarrow |a\rangle$ и $|c\rangle \rightarrow |a\rangle$. Резултат је нулта вероватноћа за прелаз атома на побуђено стање.

Почетни услови који одговарају овом стању су :

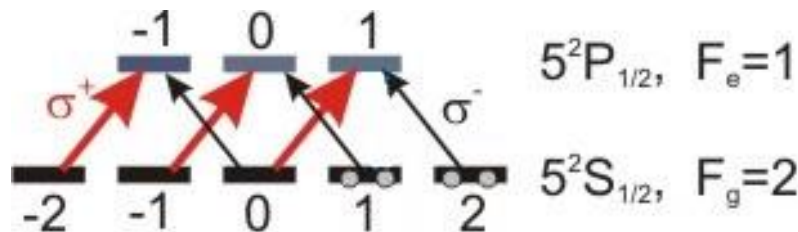
$$|\psi(0)\rangle_{dark} = \frac{\Omega_2(0)|b\rangle - \Omega_1(0)|c\rangle}{\sqrt{|\Omega_1(0)|^2 + |\Omega_2(0)|^2}} \quad (9)$$

Уколико је $|\Omega_1| \ll |\Omega_2|$ (што одговара случају када је једно поље много јаче од другог), онда је тамно стање заправо веома блиско чистом стању $|b\rangle$.

ЕИТ такође обезбеђује смањену апсорпцију у околини апсорпционе линије тако да таласне компоненте импулса које одступају од централне фреквенције (фреквенције апсорпционе линије) могу да несметано прођу кроз узорак гаса. Тај опсег фреквенција је врло узак, али је његова ширина довољна да средина буде транспарентна за све компоненте светлосног импулса. Крива која представља зависност коефицијента трансмисије од разлике фреквенције светлости од централне фреквенције се зове ЕИТ-резонантна крива.

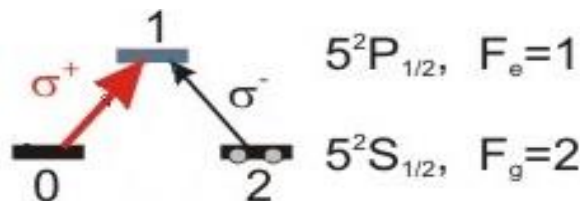
4. Успоравање светлосних импулса у пари рубидијума

Енергетска стања рубидијума значајна за овај феномен су: $5^2S_{1/2}, F_g=2$ и $5^2P_{1/2}, F_e=1$. Енергетска разлика између ових нивоа одговара таласној дужини од 795 nm. Оба енергетска нивоа имају магнетне поднивое (ниво $5^2S_{1/2}, F_g=2$ има 5 поднивоа са квантним бројевима: -2, -1, 0, 1, 2 ; ниво $5^2P_{1/2}, F_e=1$ има 3 поднивоа са квантним бројевима: -1, 0, 1). Услед селекционих правила, дозвољени су само прелази при којима се квантни број магнетног поднивоа мења за +1, апсорпцијом σ^+ поларизоване светлости, односно за -1, апсорпцијом σ^- поларизоване светлости (слика 4). σ^+ поларизована светлост је заправо кружно поларизована светлост чија правац поларизације ротира у позитивном геометријском смеру, док је σ^- поларизована светлост кружно поларизована светлост чија равна поларизације ротира у негативном геометријском смеру.



Слика 4 - Енергетски нивои атома рубидијума

Тада је могуће уочити три магнетна поднивоа који чине Λ -конфигурацију (два са нивоа $5^2S_{1/2}, F_g=2$ са квантним бројевима магнетног поднивоа 0 и 2 и један са нивоа $5^2P_{1/2}, F_e=1$ са квантним бројем магнетног поднивоа 1). Поменути Λ -конфигурација је илустрована на слици 5.



Слика 5 - Λ -конфигурација међу енергетским нивоима рубидијума

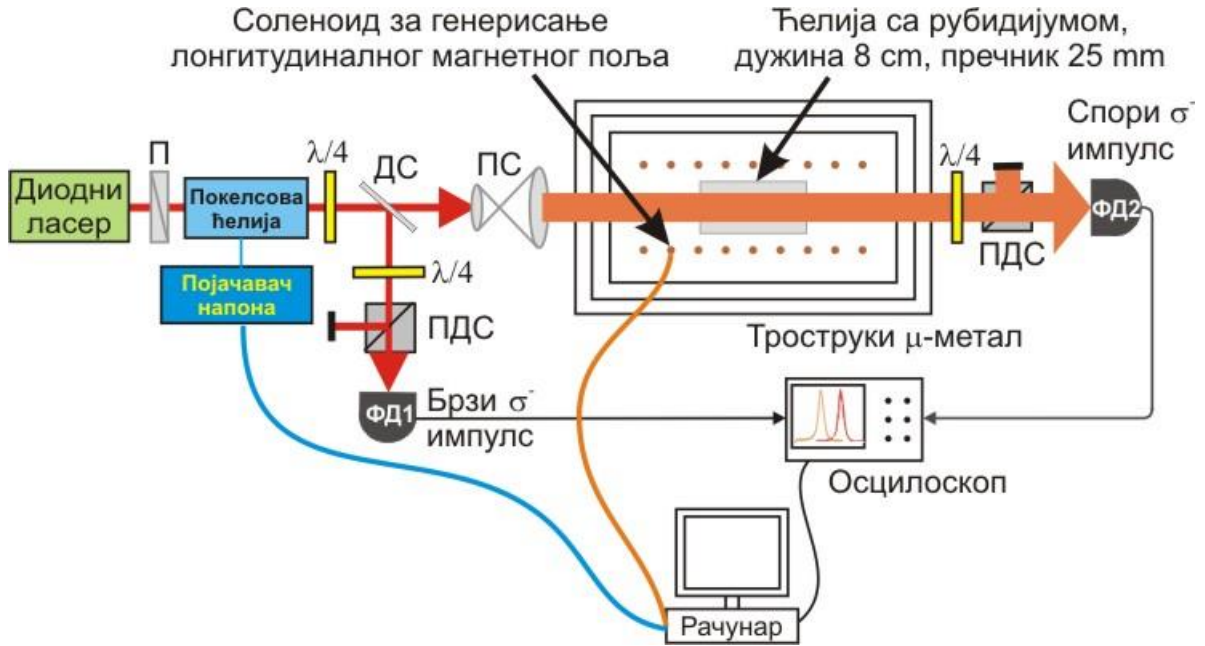
Уколико кроз узорак пропустимо два зрака јаки, σ^+ поларизовани и слаби, σ^- поларизовани, чије фреквенције одговарају прелазу $5^2S_{1/2}, F_g=2 \rightarrow 5^2P_{1/2}, F_e=1$, задовољени су услови за ЕИТ- феномен. Тада је узорак транспарентан за σ^- зрак. Пуштањем импулса овог зрака и мерењем времена његовог проласка кроз узорак рубидијума може се приметити значајно мања брзина простирања у поређењу са брзином светлости у вакууму.

5. Експеримент

У овом поглављу је представљен експеримент у коме је измерено успоравање светлосних импулса σ^- поларизације у атомској пари рубидијума.

Експериментална поставка

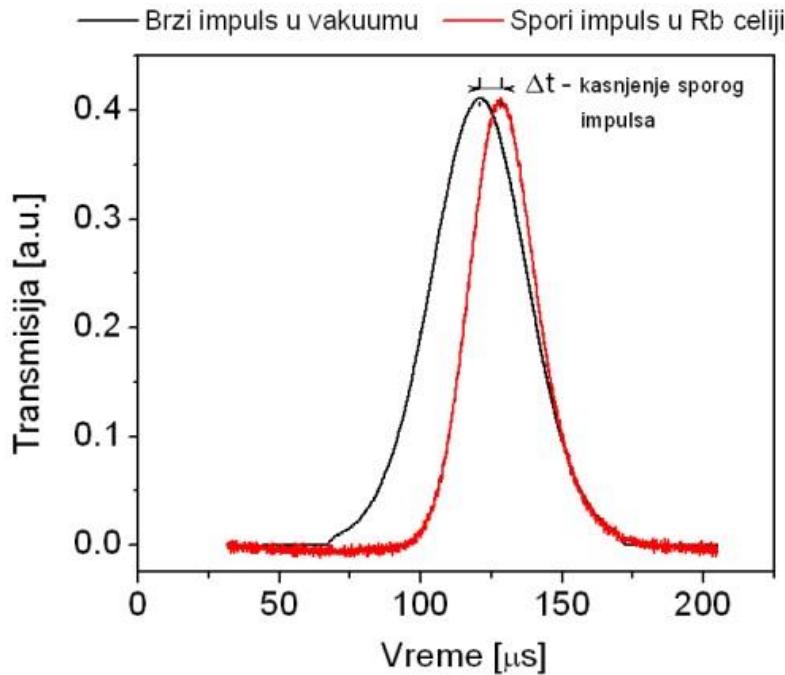
На слици 6 је дата шема експеримента:



Слика 6. – Експериментална шема (П – Поларизатор; ДС – Делитељ снопа; ПС – Проширивач снопа; ПДС – Поларизациони делитељ снопа; ФД1 и ФД2 - Фотодиоде)

Експеримент користи диодни лазер чија је фреквенција подешена тако да одговара прелазу $5^2S_{1/2}, F_g = 2 \rightarrow 5^2P_{1/2}, F_e = 1$ код изотопа ^{87}Rb . За генерисање лазерских импулса се користи Покелсова ћелија. Покелсова ћелије је двојно-преламајући кристал чији нередовни индекс преламања зависи од напона доведеног на електроде које су у танком слоју напарене на супротне стране кристала. Како је лазерски снап линеарно поларизован пре проласка кроз Покелсову ћелију дуж правца који заклапа угао од 45° са редовном и нередовном осом кристала, можемо посматрати компоненте електричног поља светлосног таласа дуж поменутих осе двојнопреламајућег кристала. Разлика индекса преламања дуж редовне и нередовне осе је пропорционална примењеном напону. То омогућава да се фазна разлика компоненти, односно поларизација снопа контролише напонски. На излазу из Покелсове ћелије је постављена $\frac{\lambda}{4}$ плочица која од компоненте која лежи дуж редовне осе кристала прави σ^+ зрак, а од компоненте дуж нередовне осе кристала прави σ^- зрак. Довођењем напонског импулса жељеног облика на Покелсову ћелију можемо добити слаби импулс σ^- поларизоване светлости. У лазерском снопу се након проласка кроз Покелсову ћелију и $\frac{\lambda}{4}$ плочицу налазе два светлосна поља: једно слабо, σ^- поларизације и једно јако, σ^+ поларизације. Како оба поља потичу из истог лазерског извора, потпуно су кохерентна што

драстично појачава ефекте ЕИТ-а и успоравање светлосних импулса. Даље се један део снопа усмерава кроз рубидијумску ћелију, а други на један од фотодетектора. Део снопа који пролази кроз узорак се после проласка шаље на други фотодетектор. $\frac{\lambda}{4}$ плочица и поларизациони делитељ снопа испред детектора служе за издвајање σ^- зрака јер заједно са њим путује и јака σ^+ поларизована светлост. Сигнали са оба фотодетектора се доводе на осцилоскоп, на коме се може уочити временско кашњење, Δt , спорог σ^- импулса у односу на брзи импулс (слика 7).



Слика 7. – Резултат мерења на осцилоскопу.

Групна брзина импулса, v_g , се може израчунати као:

$$v_g = \frac{L}{\Delta t} \quad (10)$$

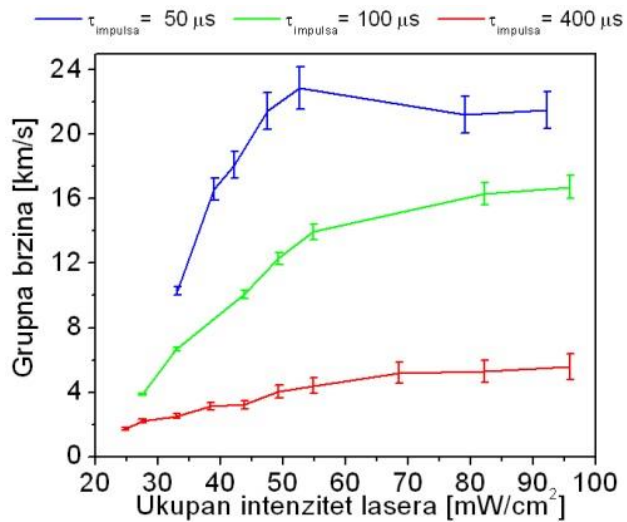
где је L – Дужина пута светлосног импулса кроз узорак рубидијума.

Добијени резултати

За резултат са слике 7. се добија групна брзина:

$$v_g \approx 9 \frac{km}{s}$$

Интензитет и ширина светлосних импулса су такође фактори који утичу на овај феномен. На слици 8. је дат график на коме су представљена успорења импулса различитих интензитета и ширина.



Слика 8. - График зависности брзине успореног импулса од његове ширине и интензитета

Добијени резултати показују да се мање групне брзине добијају при мањем интензитету ласерског снопа и већој ширини импулса. Ово је у сагласности са теоријским предвиђањима. Наиме, при већим снагама ласерског зрачења, криве ЕИТ- резонанце постају шире па је шира и дисперзиона крива индекса преламања око атомског прелаза. То значи да се $\frac{dn}{d\omega}$ смањује што повећава групну брзину у сагласности са једначином (5). Такође, код краћих импулса, већа је неодређеност енергије светлосног импулса сходно Хајзенберговим релацијама неодређености (1) па се неке од спектралних компоненти импулса налазе ван опсега криве ЕИТ-резонанце. Због тога импулси путују већом групном брзином и напуштају рубидијумску ћелију деформисаног облика.

6. Закључак

Из приложених резултата експеримента се види да је могуће значајно успорити светлосне импулсе. Успешно су изведени и експерименти у којима су постигнуте још мање групне брзине. Осим што је задивљујућа чињеница да је могуће успорити светлост, најбржу појаву у природи, ови резултати такође доносе много тога корисног. Како је успоравање светлосних импулса такође могуће и у оптичким влакнима, ова појава може наћи примену у информационим технологијама јер ће омогућити већу манипулацију сигнаlima који се користе за пренос података. Светлост се на сличан начин може и меморисати у медијумима као што је пара рубидијума и цезијума. У будућности се ова појава може користити за конструкцију квантних рачунарских меморија.

Јасно је да овај занимљиви феномен има потенцијал да нађе широку примену и да се на њему заснивају нове технологије. Зато и јесте од великог интересовања за модерну науку.

7. Литература

- [1] Storage of Light in Atomic Vapor, D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth and M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. 86 (2001)
- [2] Slow and Fast Light, R. W. Boyd, D. J. Gauthier (2001)
- [3] Electromagnetically Induced Transparency: Optics in Coherent Media, M. Fleischhauer, A. Imamoglu and J. P. Marangos, Reviews of Modern Physics 77 (2005)
- [4] Light Speed Reduction to 18 Meters per Second in an Ultracold Atomic Gas, L.V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton and C. H. Behroozi, Nature 397 (1999)
- [5] Density Operator and Applications in Nonlinear Optics, F. L. Kien and K. Hakuta (2004),
- [6] Propagation of Light Pulses through Medium with Electromagnetically Induced Transparency, S. N. Nikolić, V. Đokić, A. J. Krmpot, S. M. Ćuk and B. M. Jelenković (2011)
- [7] Све што вас је интересовало из кванте механике и мало више од тога, Д. Латас (2013)

8. Захвалност

Овим путем се захваљујем ментору, Станку Николићу, за сву помоћ и знање које ми је пружио током израде овог матурског рада.