



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 155

Sylwia Zielińska-Kaniasty

PROPAGACJA I ZATRZYMYWANIE ŚWIATŁA W CZTEROPOZIOMYM OŚRODKU ATOMOWYM O KONFIGURACJI TRÓJNOGA

**LIGHT PROPAGATION AND STORAGE
IN A FOUR-LEVEL ATOMIC MEDIUM
IN THE TRIPOD CONFIGURATION**

BYDGOSZCZ – 2012

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski

REDAKTOR DZIAŁOWY
dr Mieczysław Naparty

OPINIODAWCY
prof. dr hab. Roman Ciuryło
prof. dr hab. Stanisław Kryszewski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE
mgr Aleksandra Cieślewicz

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2012

Publikację wydano przy wsparciu projektu
„Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności”
współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego
w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego
Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.wu.utp.edu.pl>

Wyd. I. Nakład 100 egz. Ark. aut. 7,7. Ark. druk. 9,3. Zamówienie nr 5/2012
Oddano do druku i druk ukończono w maju 2012
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

Podsumowanie

W pracy przedstawiono opis procesów związanych z propagacją i zatrzymaniem światła w czteropoziomowym ośrodku atomowym o konfiguracji trójnoga. Zebrano, usystematyzowano i zsyntetyzowano wszystkie dotychczas otrzymane wyniki dotyczące propagacji i zatrzymywania impulsów laserowych w dyskutowanym układzie. Na szerokim tle zaprezentowano wyniki własne uzyskane z udziałem autorki. Przedyskutowano zarówno zagadnienie stacjonarnych własności dyspersyjnych ośrodka, wskazując na możliwość ich aktywnej modyfikacji, jak i dynamiki kontrolowalnej propagacji, zatrzymywania i wypuszczania impulsów świetlnych. Złożona struktura rozważanego ośrodka atomowego powoduje istnienie więcej niż jednego stanu ciemnego, co prowadzi do wytworzenia dodatkowych przedziałów częstości o małej absorpcji i normalnej dyspersji. W pracy dokonano analizy optycznych właściwości ośrodka w kategoriach podatności elektrycznej oraz kształtu i położenia okien przezroczystości.

Zmiany czasie dwóch pól kontrolnych umożliwiają sterowanie przezroczystością ośrodka i dynamiką propagacji słabego impulsu sygnałowego, a ich wyłączenie pozwala na zatrzymanie w nim światła. W pracy opisano zatrzymanie klasycznego świetlnego impulsu sygnałowego w układzie atomowym o konfiguracji trójnoga, które polega na odwzorowaniu impulsu w dwie spójności atomowe, które w fazie zatrzymania można zmieniać w sposób kontrolowany, regulując parametry pól kontrolnych lub stosując zewnętrzne oddziaływania. Ze względu na to, że sygnał zatrzymany w ośrodku o konfiguracji trójnoga jest zapisany w dwóch spójnościach atomowych, może również być wypuszczony niezależnie z każdej z nich lub z ich dowolnej superpozycji. W szczególności w pracy przedyskutowano różne możliwe sytuacje, gdy dla odpowiedniej różnicy faz między obiema koherencjami w ogóle niemożliwe jest uwolnienie impulsu; gdy w fazie zatrzymania zastosuje się zewnętrzne pole magnetyczne, spowoduje się periodyczne zmiany natężenia impulsu wypuszczanego z próbki. Czasowe rozsuniecie włączenia pól kontrolnych w fazie wypuszczania skutkuje uwolnieniem impulsu w dwóch częściach, których prędkości grupowe mogą być różne. Stan kwantowy ośrodka atomowego, w którym informacja niesiona przez impuls została zapisana

w procesie zatrzymania, może być wykorzystany do jej przechowania. Umożliwia to sterowanie właściwościami zatrzymanego impulsu, a tym samym daje możliwość kontrolowanego modyfikowania informacji kwantowej zawartej w pamięci.

W pracy przeprowadzono osobną analizę zatrzymania i wypuszczania impulsu sygnałowego opisanego w języku skwantowanego pola elektromagnetycznego i wykazano, że ośrodek atomowy w konfiguracji trójnoga wraz z polami kontrolnymi jest elastycznym urządzeniem światłodzielnym w domenie czasowej, a w szczególności pozwala realizować impulsy czasowo splątane (*time bins*). Daje możliwość dokonywania kontrolowanego „sklejania” podczas wypuszczenia dowolnej liczby wcześniej zatrzymanych w nim fotonów poprzez odpowiednie dobranie parametrów pól wypuszczających. W pracy wykazano także, że zatrzymanie światła w ośrodku może prowadzić do zależnej od pól kontrolnych modyfikacji właściwości statystycznych wiązki próbnej.

Zanalizowano także zjawisko jednoczesnego rozchodzenia się dwóch impulsów sygnałowych w warunkach elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości. Przechodząc przez układ, każda z wiązek próbnych powoduje zmiany dyspersyjnych właściwości ośrodka dla drugiej, a wymuszona przezroczystość wzmacnia wzajemnie efekty związane z oddziaływaniem nieliniowym obu wiązek. Optyczny efekt Kerra, który zachodzi w układzie o konfiguracji trójnoga, umożliwia uzyskanie dużych nieliniowych zmian przesunięć fazowych obu rozchodzących się w układzie impulsów i stwarza podstawy do wykorzystania tegoż układu jako bramki fazowej. W badanym układzie można także zatrzymywać sekwencje impulsów i wypuszczać je później w takiej samej lub odwrotnej kolejności, co realizuje się przez umieszczenie próbki w polu magnetycznym i zastosowanie gradientowego echa fotonowego. W pracy wykazano, że w ośrodku atomów w konfiguracji trójnoga, oświetlonym polem sterującym w postaci fali stojącej, własności optyczne mają charakter periodyczny. Prowadzi to do powstania pasm wzbronionych dla propagacji impulsu. Włączenie dodatkowego pola kontrolnego w postaci fali biegnącej pozwala na kontrolowaną modyfikację struktury pasmowej ośrodka oraz widm odbicia i transmisji wiązki próbnej. Padając na ośrodek o periodycznych własnościach optycznych, dwie wiązki sygnałowe ulegają rozdzieleniu na część przepuszczoną i odbitą, a faza każdej z nich jest nieliniowo modyfikowana w krzyżowym efekcie Kerra. Pokazano również, że w układzie atomowym w konfiguracji trójnoga można realizować jednokubitowe i dwukubitowe bramki logiczne o charakterze deterministycznym, pracujące na świetle zatrzymanym, w których operacje logiczne wykonuje się w pamięci kwantowej na wzbudzeniach atomowych.

Bogata struktura rozważanego układu, zawierającego cztery poziomy atomy sprzężone trzema polami laserowymi, powoduje, że jest on niezwykle plastyczny i daje możliwości realizacji ogromnego bogactwa różnych procesów fizycznych. W szczególności pozwala on na rozważanie najrozmaitszych wariantów propagacji światła, jego zatrzymania oraz kontroli nad tymi procesami. Układ atomowy o konfiguracji trójnoga, ze względu na złożoną dynamikę i sterowalność układu kwantowego, umożliwia efektywne przetwarzanie impulsów świetlnych,

co w dalszej perspektywie może zostać wykorzystane do konstrukcji metamateriałów oraz optycznych przetworników informacji kwantowej.

Procesy opisane teoretycznie w pracy są oparte na subtelnych kwantowych efektach interferencyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja nie jest łatwa. Ważę i aktualność tej tematyki potwierdza fakt, że po okresie licznych doświadczeń nad układami trójpoziomowymi, w 2011 roku po raz pierwszy w ośrodku atomowym o konfiguracji trójnożą obserwowano doświadczalnie zatrzymanie impulsu laserowego i wypuszczanie go za pomocą różnych sekwencji pól kontrolnych oraz pokazano możliwość interferencji pochodzących z dwóch kanałów wzbudzeń atomowych, wygenerowanych poprzez zatrzymanie światła w zimnych atomach rubidu, a więc właśnie efektów należących do klasy zjawisk opisanych w rozprawie.

Summary

The presented dissertation is a comprehensive and systematic study on light propagation and storage in a four-level atomic medium in the tripod configuration and a complete review of the results obtained up to now. This configuration, which is richer by one level than the lambda system, admits new effects and gives an opportunity to study different new aspects of pulse propagation. This model allows for steering the propagation through different combinations of the control fields and performing operations on stored light by manipulating two atomic coherences, compared with one in the lambda system. It is believed that atomic systems in the tripod configuration are important due to their rich dynamics and controllability. They allow for an effective processing of light pulses, which may in the future be applied for constructing metamaterials and optically based information processors. At the present stage of the development of this area of quantum optics there was a strong need of an overview including a synthesis and systematization of the results and their presentation in a uniform manner. This paper is supposed to fill this gap. The results of other authors are summed up and commented upon, using a common notation, and the author's own results are shown on such a background.

A study has presented a behavior of one or two probe pulses propagating in the presence of two or one control fields. Propagation effects are systematized according to whether the control fields are running or standing waves. The introduction gives a brief presentation of the subject. The comprehensive chapter 2 begins with a presentation of the used formalism and its interpretation. It contains a detailed description of electromagnetically induced transparency, light propagation and storing in the generic lambda system. Chapter 3 is devoted to a description of the propagation and storing of a classical laser pulse in an atomic medium in the tripod configuration and its polariton analysis is presented. It also includes a discussion of possibilities of performing manipulations on stored light in order to obtain the desired properties of the released pulse or pulses. In chapter 4 the details are presented of how the medium may play the role of a light-controlled beam-splitting system in the time domain in the case of two con-

trol fields. It also contains a discussion of how statistical properties of a quantum field are changed after the pulse has been released, how to process time-entangled pulses (light bins) and how to realize the Hong-Ou-Mandel interference. The change of the phase of two propagating weak pulses in a medium dressed by a single control field is investigated in chapter 5 and a possibility is indicated of constructing a phase gate due to considerable values of nonlinear (Kerr) phase shifts in the conditions of electromagnetically induced transparency, including the problem of a proper evaluation of the atomic states' populations. A possibility of realizing some one- and two-qubit gates, working on atomic excitations due to stored polarized photons in the atomic medium of tripod polarization, is discussed in chapter 6.

In the subsequent part of the work the case is described in which the control pulse/pulses are standing waves. The results concerning creation of band gaps and their dependence on internal and external parameters and an analysis of transmission and reflection spectra of the probe pulse are presented in chapter 7. Chapter 8 sums up the results concerning nonlinear phase shifts in the Kerr effect for both transmitted and reflected beams.

Some technical details are presented in three appendices. The work includes an extensive bibliography of the subject.