

ABSTRACT

This dissertation explores the interaction of light with quantum systems exhibiting different symmetry properties, specifically two-level polar systems without inversion symmetry, sustaining permanent dipole moments, and inversion-symmetric three-level systems. A comprehensive theoretical framework is developed to describe the dynamics of light-matter interactions in these systems as well as ensembles thereof, with a particular focus on the generation of low-frequency radiation and superluminal pulse propagation.

In two-level polar systems, the presence of permanent dipole moments introduces complex dynamical behaviors beyond traditional models. These include nonlinear Rabi oscillation frequencies with respect to the driving field amplitude and the generation of coherent low-frequency radiation. The proposed theory revisits and extends classical approaches, offering new insights into the role of permanent dipoles in light-matter interactions. By applying a series of unitary transformations, an analytically solvable model is derived, capturing the influence of the polarity of the system on its optical properties.

The thesis further investigates three-level systems, focusing on the phenomena of subluminal and superluminal propagation. A new, experimentally feasible scheme is proposed for achieving superluminal light propagation in rubidium vapors using a three-level ladder configuration by exploiting far-detuned two-photon transitions. This approach reduces pulse distortion and absorption compared to the scenarios exploiting single-photon transitions, enabling the observation of superluminal group velocities.

This research advances the understanding of light-matter interactions in both polar and nonpolar systems, offering new theoretical insights and proposing experimental scenarios in quantum optics. The findings have implications for coherent radiation generation, pulse propagation, and possible future applications in areas such as spectroscopy, imaging, and quantum communication.

STRESZCZENIE

Niniejsza rozprawa bada oddziaływanie światła z układami kwantowymi charakteryzowanymi różnym stopniem symetrii względem inwersji przestrzennej, w szczególności z dwupoziomowymi układami polarnymi z trwałymi momentami dipolowymi oraz z trójpoziomowymi układami o symetrii inwersyjnej. Opracowany w niej model teoretyczny opisuje dynamikę oddziaływania światła z materią zarówno w pojedynczych układach, jak i w ośrodkach cząsteczkowych, ze szczególnym uwzględnieniem generacji promieniowania o niskiej częstotliwości oraz propagacji impulsów z prędkościami nadświatłymi.

W polarnych układach dwupoziomowych obecność trwałych momentów dipolowych w złożony sposób modyfikuje ich dynamikę, której opis stanowił wyzwanie w ramach tradycyjnych modeli. Należą do nich oscylacje Rabiego z częstością nieliniowo skalującą się z amplitudą pola działającego na układ, a także generacja spójnego promieniowania o niskiej częstotliwości. Zaproponowana teoria uogólnia klasyczne podejście, koncentrując się na roli trwałych momentów dipolowych w oddziaływaniu światło-materia. W jej ramach, po zastosowaniu serii przekształceń unitarnych uzyskano w pełni analityczny model uwzględniający wpływ polarności układu na jego właściwości optyczne.

Rozprawa bada również trójpoziomowe układy kwantowe, koncentrując się na zjawiskach podświatłej i nadświatłej propagacji. Zaproponowano nowy, możliwy do wdrożenia w eksperymencie schemat uzyskania tego typu propagacji światła w parach rubidu z wykorzystaniem konfiguracji poziomów energetycznych w formie trójpoziomowej drabinki. Dzięki zastosowaniu daleko odstrojonego dwufotonowego przejścia, możliwe jest zredukowanie zniekształceń impulsu i ograniczenie absorpcji w stosunku do scenariuszy eksperymentalnych wykorzystujących przejścia jednofotonowe, co umożliwia obserwację nadświatłych prędkości grupowych.

Badania te poszerzają zrozumienie oddziaływania światła z materią zarówno w układach polarnych, jak i niepolarnych poprzez nowe podejścia teoretyczne oraz propozycje realizacji eksperymentalnych w optyce kwantowej. Wyniki mogą mieć istotne znaczenie dla realizacji scenariuszy generacji spójnego promieniowania, propagacji impulsów oraz możliwych przyszłych zastosowań w takich dziedzinach jak spektroskopia, obrazowanie i komunikacja kwantowa.