

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC**

NGUYỄN THỊ THU TRANG

**NGHIÊN CỨU TƯƠNG TÁC RAMAN KẾT HỢP
TRONG MÔI TRƯỜNG KHÍ ĐƯỢC CHỨA BỞI
SỢI QUANG TỬ LỖI RỘNG**

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ

Thái Nguyên-2018

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC**

NGUYỄN THỊ THU TRANG

**NGHIÊN CỨU TƯƠNG TÁC RAMAN KẾT HỢP
TRONG MÔI TRƯỜNG KHÍ ĐƯỢC CHỨA BỞI
SỢI QUANG TỬ LỖI RỖNG**

Chuyên ngành: Quang học

Mã số: 8.44.01.10

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

TS. Nguyễn Mạnh Thắng

Thái Nguyên-2018

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực. Những kết luận của luận văn chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

TÁC GIẢ LUẬN VĂN

NGUYỄN THỊ THU TRANG

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, em xin bày tỏ lòng biết ơn tới TS.Nguyễn Mạnh Thắng đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ em trong suốt quá trình thực hiện Luận văn này.

Em xin chân thành cảm ơn các thầy cô trong tổ bộ môn Quang học, Ban chủ nhiệm khoa Vật Lí, trường Đại học Khoa học – Đại Học Thái Nguyên đã giúp em hoàn thành Luận văn này.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn tới cơ quan Tạp chí Khoa học và Công nghệ quân sự - Viện Khoa học và Công nghệ quân sự đã tạo điều kiện cho tôi về mặt thời gian cũng như cơ sở vật chất để tôi hoàn thiện đề tài này.

Cuối cùng tôi xin chân thành cảm ơn sâu sắc tới gia đình, bạn bè, đồng nghiệp đã quan tâm, giúp đỡ và động viên tôi trong suốt quá trình thực hiện Luận văn.

Tôi xin chân thành cảm ơn!

Thái Nguyên, ngày tháng năm 2018

Học viên

Nguyễn Thị Thu Trang

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU.....	1
CHƯƠNG 1: TÁN XẠ RAMAN	7
1.1 Tán xạ Raman tự phát.....	7
1.2 Tán xạ Raman cưỡng bức	9
1.3 Tán xạ Raman tự phát và tán xạ Raman cưỡng bức	10
1.4 Hệ phương trình cổ điển mô tả tương tác tán xạ Raman cưỡng bức	12
1.5 Hệ phương trình Maxwell - Bloch cho tán xạ Raman.....	21
1.5.1 Toán tử ma trận mật độ	21
1.5.2 Hệ kích thích nguyên tử hai mức	22
1.5.3 Phương trình đảo mật độ nguyên tử	24
1.5.4 Mô men dao động cảm ứng	27
1.5.5 Phân cực phi tuyến.....	27
CHƯƠNG 2 : SỢI QUANG TỦ LỖI RỘNG (HC-PCFs)	31
2.1 Sợi quang truyền thống.....	31
2.2 Sợi tinh thể quang tử lõi rỗng	32
2.3 Dẫn sóng dựa trên vùng cấm quang tử	33
2.4 Mật độ trạng thái.....	36
2.5 HC-PCFs tăng cường hiệu ứng tương tác phi tuyến laser - khí.....	38
CHƯƠNG 3:TƯƠNG TÁC TÁN XẠ RAMAN KẾT HỢP THUẬN VÀ NGƯỢC TRONG MÔI TRƯỜNG KHÍ H ₂ ĐƯỢC CHỨA BỞI HC-PCFs.....	42
3.1 Tán xạ Raman cưỡng bức ngược kết hợp.....	43
3.1.1 Hệ phương trình tương tác ba sóng kết hợp.....	43
3.1.2 Sự tương tác và xuất hiện của chuỗi xung tín hiệu Stokes ngược.....	46
3.1.3 Dạng tiệm cận soliton của chuỗi xung Stokes.....	50
3.2 Tương tác Raman kết hợp thuận.....	50
3.2.1 Hệ phương trình tương tác Raman kết hợp thuận.....	50
3.2.2 Quá trình phát triển động học trong hệ tương tác Raman kết hợp thuận	51
KẾT LUẬN.....	55
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	57

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

SRS	Tán xạ Raman cưỡng bức
FSRS	Tán xạ Raman cưỡng bức thuận
BSRS	Tán xạ Raman cưỡng bức ngược
HC-PCFs	Sợi tinh thể quang tử lõi rỗng
PGB-PCFs	Sợi dẫn sóng hẹp lõi rỗng
Kagomé-PCFs	Sợi dẫn băng rộng lõi rỗng
TIR	Sợi quang “chiết suất bậc” truyền thống hoạt động bằng cơ chế phản xạ toàn phần bên trong sợi quang.
DOS	Mật độ trạng thái

DANH MỤC CÁC HÌNH

Hình 0. 1 Chùm Gaussian hội tụ trong không gian tự do.	2
Hình 0. 2: Chùm Gauss tập trung vào một mao dẫn đường kính 2a.....	3
Hình 0. 3: Chùm Gauss được hội tụ vào một sợi tinh thể quang tử rỗng HC-PCFs.....	4
Hình 0. 4: Cơ chế tạo SRS phân cực tròn quay trong HC-PCF.....	5
Hình 1. 1: Sơ đồ các mức năng lượng và các chuyển dịch trong tán xạ Raman	7
Hình 1. 2: Các quá trình tán xạ.	8
Hình 1. 3: Phân bố trường tán xạ Raman.....	9
Hình 1. 4: Mô hình phân tử tán xạ Raman.....	13
Hình 1. 5: Phụ thuộc độ cảm Raman vào tần số.	15
Hình 1. 6: Phụ thuộc độ cảm Raman vào tần số	17
Hình 1. 7: Quan hệ hợp pha giữa sóng Stokes và Đối Stoke trong tán xạ Raman	19
Hình 1. 8: Phụ thuộc của hệ số khuếch đại liên kết vào độ lệch pha.....	20
Hình 1. 9: Hệ hai mức năng lượng giữa trạng thái kích thích.....	23
Hình 1. 10: Giá trị kỳ vọng của moment lưỡng cực cảm ứng	27
Hình 2. 1: Sơ đồ cơ chế dẫn sáng của sợi quang truyền thống	31
Hình 2. 2: Cấu trúc của HC-PCFs với cấu trúc vỏ hình lục giác.....	32
Hình 2. 3: Biểu đồ truyền sóng của sợi quang	34
Hình 2. 4: Sơ đồ DOS (3.4a) cho lớp vỏ sợi quang được mô phỏng ở bên phải (3.4b) ...	37
Hình 2. 5: Cửa sổ truyền (transmission window) của sợi HC-PCFs (trái) và hình ảnh chụp mặt cắt ngang nó (phải).....	38
Hình 2. 6: Độ dài tương tác hiệu dụng Leff (màu đỏ) cho các cấu hình khác nhau	39
Hình 2. 7: So sánh giá trị M đối với các cấu hình khác nhau	41
Hình 3. 1: Sơ đồ hình học minh họa	42
Hình 3. 2: Sự phát triển động học của quá trình tương tác của ba trường	48
Hình 3. 3: Chuỗi xung tiệm cận dạng hyperbolic-secant bên	50
Hình 3. 4: Sự phát triển của quá trình tương tác Raman kết hợp thuận của ba trường bơm	53

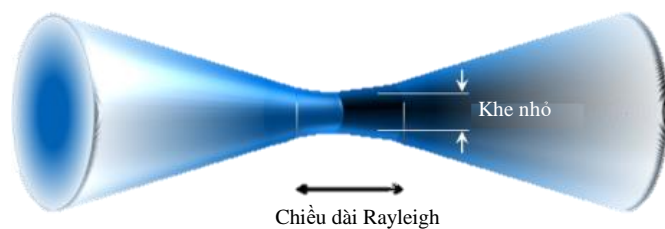
MỞ ĐẦU

Khi truyền qua môi trường vật chất, ánh sáng có thể hoạt động theo các cơ chế khác nhau, phụ thuộc vào tính chất của nó ánh sáng và môi trường. Ánh sáng có thể bị hấp thụ, truyền qua, phản xạ, khúc xạ, nhiễu xạ, tán xạ, biến điệu ..v.v..Tán xạ có thể được chia làm hai loại là tán xạ đàn hồi và tán xạ phi tuyến: Tán xạ đàn hồi hay còn gọi là tán xạ Rayleigh, tán xạ này không có sự chuyển hóa năng lượng giữa ánh sáng và vật chất, dẫn đến không có sự dịch chuyển tần số của sóng kích thích $\omega_s = \omega_0$ (trong đó ω_0 là tần số của sóng kích thích hoặc tần số bơm, ω_s là tần số của sóng tán xạ); Tán xạ phi tuyến hay còn gọi là tán xạ cưỡng bức, loại này có sự chuyển hóa năng lượng dựa vào sự va chạm giữa photons (lượng tử ánh sáng) và các phân tử hoặc nguyên tử của môi trường hoạt chất, kết quả dẫn đến sự dịch chuyển tần số của sóng kích thích, vạch phát dịch chuyển về phía tần số thấp hơn ω_0 gọi là vạch Stokes $\omega_s = \omega_0 - \Omega$, ngược lại vạch phát dịch chuyển về phía tăng tần số gọi là vạch đối Stokes (hoặc anti-Stokes) $\omega_{AS} = \omega_0 + \Omega$, trong đó Ω là tần số dao động cưỡng bức của phân tử hoặc tần số kết hợp nguyên tử do ánh sáng kích thích gây ra.

Năm 1928 C.V. Raman đã khám phá ra hiện tượng tán xạ không đàn hồi mang tên ông [1]. Ông gọi nó là loại bức xạ mới thứ cấp với cường độ tín hiệu được quan sát là rất yếu. Quả thật, đó là tán xạ Raman tự phát với tỷ lệ chuyển đổi tần số cực nhỏ chỉ khoảng $1:10^6$, có nghĩa là chỉ khoảng 1 trong tổng số 10^6 số photons của ánh sáng tới dịch chuyển thành photons của tín hiệu Stokes. Nâng cao hiệu suất dịch chuyển tần số là một thử thách của quang học phi tuyến trong thời gian dài, vấn đề chỉ được giải quyết khi laser được phát minh vào những năm 60 [2]. Laser là ánh sáng kết hợp có cường độ sáng rất cao, nó có thể được sử dụng để kích thích tạo ra hiệu ứng phi tuyến quang học nói chung và tán xạ Raman nói riêng mà ánh sáng thông thường không thể. Nếu như tán xạ Raman tự phát thì photon phát ra toàn bộ trong không gian góc 4π theo mô hình lưỡng cực điện cổ điển, thì nay sử dụng thấu kính để hội tụ có thể tạo ra chiều dài tương tác cỡ vài mm (chiều dài Rayleigh) để tạo ra chế độ tán xạ Raman cưỡng bức, do đó hiệu suất có thể nâng lên tới hàng chục phần trăm, tức là gấp hàng triệu lần so với chế độ tự phát [2,3].

Tán xạ Raman cưỡng bức (SRS) đã được quan sát đầu tiên trong dung dịch Nitrobenzene sử dụng laser Ruby [3]. Một thời gian ngắn sau khám phá đó, người ta nhận ra rằng quá trình tán xạ Raman cưỡng bức gắn liền cùng các phonon quang [4]. Những phonon quang này chính là những dao động đồng bộ của các nguyên tử môi trường hoạt chất, chúng có thể là các dao động hoặc quay, hoặc kích thích liên kết cả hai. Những kích thích kết hợp này chính là nguồn gốc tạo ra các phổ dao động Stokes tương ứng [5]. Nó cũng chính là đại lượng sinh ra quá trình quang học phi tuyến trong hệ phương trình mô tả trường điện từ Maxwell.

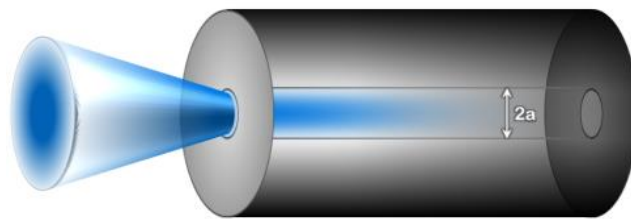
Để tạo hiệu ứng SRS trong môi trường khí thì chùm kích thích phải đạt cường độ ngưỡng cao. Ban đầu người ta hội tụ chùm laser qua một khe nhỏ trong không gian tự do hoặc trong bình khí hoạt chất để duy trì tương tác với khí Raman hoạt chất: khí Raman, ví dụ như khí H_2 được đổ đầy dọc bên trong bình dẫn khí, chùm laser cỡ vài chục mJ được hội tụ vào bên trong bình dẫn khí như **Hình 0.1**. Kết quả thu được hiệu suất tán xạ Raman chỉ vài % [6]. Hiệu quả thấp này có thể được giải thích một cách dễ dàng: khi tăng cường độ ánh sáng bằng cách hội tụ chùm tia, thì độ dài tương tác ngắn lại, có thể xấp xỉ với chiều dài Rayleigh. Thông thường các chùm laser được hội tụ mạnh bằng thấu kính thì chiều dài Rayleigh thường không dài hơn vài mm (xem **Hình 0.1** minh họa), mật độ photon đủ lớn để phát SRS bị giới hạn trong khoảng Rayleigh.



Hình 0.1: Chùm Gaussian hội tụ trong không gian tự do.

Cường độ ánh sáng đủ lớn cho tương tác khí-laser bị giới hạn bởi chiều dài Rayleigh của chùm tia (giới hạn bởi nhiễu xạ). Trên hình minh họa mật độ photon bằng màu sắc xanh, màu càng đậm thì mật độ photon (cường độ ánh sáng) càng lớn và ngược lại.

Để cải thiện hiệu suất tán xạ Raman, sau đó người ta thực hiện các thí nghiệm SRS trong một ống dẫn sóng thay vì bình khí để giam khí hoạt chất và cải thiện được mật quang học [7]. Tuy nhiên, hằng số suy giảm đối với ống dẫn sóng tỷ lệ với λ^2/a^3 , trong đó λ là bước sóng ánh sáng kích thích, a là bán kính trong ống dẫn sóng [8], do đó nếu bán kính trong của ống dẫn sóng càng nhỏ thì tổn hao quang học càng cao. Dẫn quang sử dụng ống dẫn sóng được minh họa trên **Hình 0.2**, trong đó màu xanh thể hiện chùm laser, độ đậm minh họa mật độ photon. Chúng ta nhận thấy sau khi truyền một đoạn ngắn thì chùm laser suy giảm đáng kể cường độ.



Hình 0.2: Chùm Gauss tập trung vào một ống dẫn sóng đường kính $2a$

Hằng số suy giảm tỷ lệ với đại lượng λ^2/a^3 , đại lượng này là rất cao đối với các ống dẫn sóng có bán kính lõi nhỏ.

Năm 1991, giáo sư Phillip St. John Russell cùng các cộng sự tại trường Đại học Bath, Vương quốc Anh đã đề xuất ý tưởng giam chùm laser vào một lõi rỗng của sợi quang tử dựa trên cơ chế vùng cấm quang tử hai chiều. Cấu trúc của nó bao gồm các mảng ống dẫn sóng khí cực nhỏ chạy dọc theo và bao quanh toàn bộ chiều dài của sợi quang, hoạt động như lớp vỏ sợi quang. Lớp vỏ bao quanh một lõi rỗng kích thước cỡ μm , lõi rỗng này hoạt động như một sai hỏng trong cấu trúc quang tử. Nếu được thiết kế phù hợp, lớp vỏ này sẽ tạo ra các vùng cấm và giam hầu như toàn bộ ánh sáng trong lõi rỗng. Cấu trúc tinh thể quang tử rỗng (HC-PCFs) được thiết kế và chế tạo lần đầu năm 1995, nó cho phép các nhà khoa học khả năng tiếp cận những trạng thái tương tác phi tuyến phức tạp vật chất - laser mà trước đó không thể tiếp cận được [9,10].