

1. Identificação da Proposta

Título: Processamento e armazenamento de informação codificada na luz utilizando a geração de modos com momento angular orbital

Instituição Executora do Projeto: UACSA/UFRPE – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, PE.

Orientador: Prof. Weliton Soares Martins (CPF: 055.580.144-66).

Coorientador: Prof. Rafael Alves de Oliveira (CPF: 060.534.824-39).

2. Introdução

A necessidade de aumentar a capacidade dos sistemas de telecomunicações é impulsionada pelo rápido crescimento do fluxo de informação, motivando a busca por novos meios de transmissão e processamento a taxas cada vez mais elevadas e de forma segura [1]. Dentro deste contexto, tem crescido o interesse da comunidade científica nas áreas de pesquisa em computação e comunicação quântica. Além da importância da compreensão dos fundamentos da mecânica quântica o estudo destas teorias tem grande aplicação tecnológica como, por exemplo, o desenvolvimento de computadores com uma maior capacidade de processamento e a transmissão de informação de forma inviolável utilizando os atuais protocolos de criptografia quântica [2].

Um dos requisitos fundamentais para processamento de informação clássica ou quântica é a capacidade de armazenar e processar essa informação. Existem diferentes arquiteturas para implementação do processamento quântico de informação, como o uso de sistemas óticos [3]. Porém, como dois feixes de luz não interagem, é necessário um meio não-linear para intermediar a interação, realizando o armazenamento e processamento da informação codificada na luz, que tem um papel fundamental no desenvolvimento desses sistemas, usada como portadora da informação.

A informação pode ser codificar na luz de diferentes formas usando, por exemplo, estados de polarização representando um único bit ou tratando-se das propriedades quânticas da luz, um qubit. Um nova forma que vem sendo explorada é o uso de feixes com momento angular orbital, como feixes com modo Laguerre Gauss (LG) especificado por uma carga topológica, que apresenta importantes vantagens em relação a sistemas baseados em dois estados. Os modos LG formam uma base de dimensão infinita acarretando no aumento da capacidade de codificação e processamento de informação [4, 5].

Nesse projeto nos propomos a estudar teórico e experimentalmente processos não lineares de alta ordem induzido em um vapor atômico a temperatura ambiente, com o objetivo de usar esses efeitos para o processamento e armazenamento de informação. Nessa linha existem alguns trabalhos, que demonstram a possibilidade de armazenar informação em ensembles atômicos, dentro de um regime semiclássico [6] e no regime puramente quântico onde é armazenado um único fóton [7,8]. Esses trabalhos exploram basicamente processos não-lineares de terceira ordem. Buscamos portanto ampliar as possibilidades analisando outros processos de alta ordem, propondo o uso desses sistemas para implementação de algoritmos e portas lógicas quânticas. Os experimentos serão realizados usando uma célula contendo vapor atômico de césio ou rubídio à temperatura ambiente simplificando bastante o aparato experimental, diferentemente dos atuais trabalhos que exploram amostras de átomos frios [9, 10].

O primeiro passo, antes de partimos para o estudo do armazenamento e processamento de informação usando processos não-lineares de alta ordem, será a implementação do aparato experimental para estudar o sinal de EIT (Electromagnetically Induced Transparency) [12]. Esse aparato permitirá estudar os processos de descoerência em vapor atômico contido em uma célula com coating os quais produzem um alargamento no sinal. Para os experimentos que desejamos implementar é importante aumentar o tempo de vida das informações armazenadas através da eliminação dos efeitos de descoerência. Para isto é importante caracterizar esses processos usando feixes com modo gaussiano e Laguerre Gauss. Esta primeira etapa do projeto permitirá os estudantes envolvidos se familiarizarem com o aparato ótico, técnicas de instrumentação eletrônica, física atômica e aspectos teóricos envolvidos.

Na segunda etapa do projeto estudaremos o processo de armazenamento da luz e mistura de onda no vapor atômico à temperatura ambiente, explorando processo não-linear de terceira ordem, caracterizado por uma susceptibilidade $\chi^{(3)}$. Os processos de descoerência, a baixa densidade de átomos, assim como a saturação do vapor atômico são os principais fatores que limitam o tempo de armazenamento e relação sinal ruído na extração da informação gravada. Nesta etapa é preciso otimizar vários fatores, tais como, a

densidade ótica, intensidade dos feixes buscando maximizar o processo de leitura da informação. A terceira etapa consiste em estudar os processos não lineares de alta ordem. Nesta etapa modificaremos a configuração do aparato experimental explorando processos de quinta e sétima ordem. A medida que exploramos efeitos não lineares de ordem maiores esbarramos na dificuldade de detecção dos sinais, pois quanto maior a ordem de não-linearidade acessada menor é a amplitude do sinal extraído. Assim, iniciaremos os trabalhos teóricos analisando a possibilidade de implantação de portas lógicas e algoritmos quânticos explorando esses efeitos não lineares.

3. Objetivos

3.1 Geral

- Este projeto tem como objetivo principal o estudo teórico e experimental do processamento, armazenamento de informação, usando um meio atômico para intermediar a interação entre dois ou mais feixes de luz, explorando efeitos não lineares de alta ordem.

3.2 Específicos

- Implementação do aparato experimental para estudar o sinal de EIT;
- Estudo dos processos de descoerência em células de vapor atômico com coating a temperatura ambiente;
- Análise do sinal de armazenamento e mistura de onda explorando não linearidades de terceira ordem;
- Caracterização dos efeitos não lineares de alta ordem induzidos no vapor atômico;
- Armazenar e processar a informação codificada na luz através da geração de feixes com momento angular orbital;
- Analisar a possibilidade de implantação de portas lógicas e algoritmos quânticos explorando os efeitos não lineares de alta ordem.

4. Metodologia

Nessa seção descreveremos de forma geral a metodologia que iremos adotar para atingir os objetivos tratados na seção anterior. Iniciaremos então pela discussão da primeira linha. A primeira parte será a montagem do experimento para observação do sinal de EIT, composto de um conjunto de componentes óticos como espelhos, polarizadores, lâmina de atraso de fase para manipular o feixe laser de acordo com a necessidade do experimento. O experimento será realizado usando um laser semiconductor com grade externa, largura de linha da ordem de 1,0 MHz, travado em frequência usando um circuito eletrônico de travamento e uma referência dada por uma absorção saturada. O feixe laser é dividido por um polarizador, controlando a frequência de cada um dos feixes com um modulador acusto-ótico independentemente. Em um segundo cubo polarizador os feixes são sobrepostos, incidindo na célula de prova com polarizações ortogonais, sendo separando novamente após a transmissão pela célula. Usamos então um detector de baixo ruído e alta eficiência para adquirir o sinal de EIT, obtido varrendo a frequência de um dos feixes. Para aquisição do sinal desenvolveremos um sistema de aquisição utilizando Labview para controlar a varredura realizada de forma lenta, adquirindo o sinal e realizando um conjunto de médias para cada valor de frequência.

Para analisar a descoerência por tempo de trânsito, mediremos então a largura do sinal de EIT variando o diâmetro dos feixes, comparando os resultados obtidos na célula com e sem o coating, bem como realizaremos medidas variando a intensidade dos feixes. Para estudar o sinal de EIT usando feixes com diferentes cargas topológicas, usaremos um SLM (modulador espacial de luz) para produzir os feixes com modo LG, de modo a caracterizar o sinal de EIT em função da carga topológica.

Nas duas outras linhas iremos implementar apenas algumas mudanças no aparato experimental apresentada. Essas modificações incluem incidir um terceiro feixe na amostra necessário para o processo de armazenamento e mistura de onda explorando efeitos não lineares de terceira ordem e de mais alta ordem. Nessas etapas desenvolveremos um sistema necessário para controlar o instante de tempo que cada feixe incide na amostra, e usaremos uma CCD para analisar o perfil espacial dos feixes com o objetivo de identificar a carga topológica no feixe gerado pelo processo de mistura de onda.

5. Aderência aos critérios de Priorização

5.1. Reserva de bolsas para Cursos Novos.

O programa de pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS), vinculado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA–UFRPE), está iniciando suas atividades em 2019.1. O PPENGFIS foi aprovado na 181ª reunião do CTC-CAPES em dezembro de 2018.

5.2. Apoio diferenciado à pós-graduação em Engenharias.

O projeto está vinculado ao programa de pós-graduação em Engenharia Física, sediado na UACSA-UFRPE, pertencente à grande área de Materiais da CAPES.

5.3. Projeto em temas estratégicos para o desenvolvimento do estado - Arranjos produtivos locais (APLs) do estado: Porto Digital

Este projeto será desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS) da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA-UFRPE), Campus das Engenharias, que é situado na cidade do Cabo de Santo Agostinho-PE. O desenvolvimento deste projeto é fundamental para a consolidação das atividades de pesquisa na cidade do Cabo de Santo Agostinho implicando em um ambiente propício para o desenvolvimento tecnológico de Pernambuco e, em particular, para o desenvolvimento do Porto Digital do Estado. O objetivo do projeto quanto ao desenvolvimento e aplicação de novas técnicas para processar e armazenar informação codificada na luz é de importância para o setor tecnológico de Pernambuco, particularmente para o desenvolvimento de novas estratégias em Teoria da Informação e Comunicação, área de interesse central do Porto Digital. Contribuindo também para a formação dos estudantes da área de tecnologia, principalmente agregando na formação dos estudantes conhecimentos na área de ótica.

6. Resultados Esperados

Do ponto de vista científico, nos propomos a estudar processos fundamentais da interação radiação matéria, abordando diferentes processo não lineares de alta ordem em células de vapor atômico, tendo como o objetivo empregar esses processos para o armazenamento e processamento de informação codificada na luz. Buscamos então compreender os mecanismos básicos da interação da luz com sistemas atômico explorando novos processos. Dentro dessa linhas as principais contribuições esperadas no desenvolvimento desse projeto são:

1. Desenvolvimento implementação de novas técnicas para processar e armazenar informação, explorando efeitos não lineares de alta ordem, bem como analisar a possibilidades de implementação de portas lógicas e algoritmos quânticos;
2. Implementação do sistema experimental para estudar processos fundamentais de descoerência em vapor atômicos que estão ligados diretamente ao tempo de armazenamento da informação;
3. Desenvolvimento e aplicações de técnicas para manipular as propriedades óticas do meio, utilizando os efeitos não lineares de alta ordem induzidos no meio;

Essas contribuições tem sua importância tanto do ponto de vista fundamental como para aplicações tecnológicas, pois este tema é de grande interesse no desenvolvimento de sistemas de comunicações óticas, no regime clássico ou explorando as propriedades quânticas da luz.

7. Cronograma de Atividades

1. Revisão bibliográfica;
2. Disciplinas obrigatórias e eletivas;
3. Elaboração do modelo teórico da interação da luz com sistemas atômicos para estudar os efeitos não lineares, bem como a propagação da luz nesse meio;

4. Montagem do aparato ótico-mecânico para obter e analisar o sinal de EIT e desenvolvimento do sistema de controle e aquisição de dados;
5. Modificar aparato ótico para analisar o sinal de mistura de 4 ondas e armazenamento da informação codificada na luz utilizando feixes LG, bem como explorar efeito não linear de alta ordem;
6. Desenvolvimento de portas lógicas e algoritmos baseados nas possíveis operações explorando o efeitos não lineares de alta ordem;
7. Escrita de artigos e elaboração da dissertação.

Atividades	1º Semestre	2º Semestre	3º Semestre	4º Semestre
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

9. Referências Bibliográficas

- [1] Wang, Jian, Yang, Jeng-Yuan, Fazal, Irfan M, Ahmed, Nisar, Yan, Yan, Huang, Hao, Ren, Yongxiong, Yue, Yang, Dolinar, Samuel, Tur, Moshe, et al. 2012. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature photonics*, 6(7), 488–496.
- [2] Gisin, Nicolas, & Thew, Robert Thomas. 2010. Quantum communication technology. *Electronics letters*, 46(14), 965–967.
- [3] Kok, Pieter, Munro, WJ, Nemoto, Kae, Ralph, TC, Dowling, Jonathan P, & Milburn, GJ. 2005. Linear optical quantum computing. *arxiv preprint quant-ph/0512071*.
- [4] Franke-Arnold, Sonja, Allen, Les, & Padgett, Miles. 2008. Advances in optical angular momentum. *Laser & photonics reviews*, 2(4), 299–313.
- [5] Straupe, Stanislav, & Kulik, Sergei. 2010. Quantum optics: The quest for higher dimensionality. *Nature photonics*, 4(9), 585–586.
- [6] Tabosa, JWR, & Petrov, DV. 1999. Optical pumping of orbital angular momentum of light in cold cesium atoms. *Physical review letters*, 83(24), 4967.
- [7] de Oliveira, Rafael A, Mendes, Milrian S, Martins, Weliton S, Saldanha, Pablo L, Tabosa, Jos´e WR, & Felinto, Daniel. 2014. Single-photon superradiance in cold atoms. *Physical review a*, 90(2), 023848.
- [8] Leach, Jonathan, Padgett, Miles J, Barnett, Stephen M, Franke-Arnold, Sonja, & Courtial, Johannes. 2002. Measuring the orbital angular momentum of a single photon. *Physical review letters*, 88(25), 257901.
- [9] Felinto, D, Moretti, D, de Oliveira, RA, & Tabosa, JWR. 2010. Delayed four-and six-wave mixing in a coherently prepared atomic ensemble. *Optics letters*, 35(23), 3937–3939.
- [10] Greenberg, Joel A, & Gauthier, Daniel J. 2012. High-order optical nonlinearity at low light levels. *Epl (europhysics letters)*, 98(2), 24001.
- [11] de Oliveira, R. A., Borba, G. C., Martins, W. S., Barreiro, S., Felinto, D., & Tabosa, J. W. R. 2015. Nonlinear optical memory for manipulation of orbital angular momentum of light. *Optics letters*, 40(21), 4939–4942.
- [12] Figueroa, E, Vewinger, F, Appel, J, & Lvovsky, AI. 2006. Decoherence of electromagnetically induced transparency in atomic vapor. *Optics letters*, 31(17), 2625–2627.