

Trabalho

Título em Português:	Estudo das Propriedades de Cavidades Plasmônicas para uso em Repetidores Quânticos
Título em Inglês:	Study of the Properties of Plasmonic Cavities for use in Quantum Repeaters
Autor:	Gabriel Lima Alves
Instituição:	Universidade de São Paulo
Unidade:	Instituto de Física de São Carlos
Orientador:	Euclydes Marega Junior
Área de Pesquisa / SubÁrea:	Física da Matéria Condensada
Agência Financiadora:	CNPq - PIBIC

Estudo das Propriedades de Cavidades Plasmônicas para uso em Repetidores Quânticos

Gabriel Lima Alves

Euclydes Marega Junior

Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo

gabriel.limaalvs@usp.br

Objetivos

A comunicação quântica surge como um novo paradigma para a transmissão e proteção da informação, fundamentando-se nos princípios da mecânica quântica para criar canais intrinsecamente seguros [1]. No entanto, sua aplicação prática ainda enfrenta desafios significativos, sobretudo devido às perdas e à decoerência que limitam a distância confiável de propagação dos estados quânticos.

Uma alternativa promissora para contornar essas limitações é o uso de repetidores quânticos [2], que empregam técnicas como teleporte quântico, purificação e troca de entrelaçamento para ampliar o alcance da comunicação. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo simular, como etapa preliminar a futuras implementações experimentais, um guia de onda plasmônica projetado para acoplar fótons únicos a uma memória quântica.

Métodos e Procedimentos

Para alcançar esse objetivo, utilizamos o pacote de simulação SeQuenCe [3], uma ferramenta de código aberto em Python desenvolvida para modelar redes quânticas. Esse simulador modela a dinâmica da luz quântica em diferentes componentes e protocolos, incluindo canais de comunicação, memórias quânticas e detectores de fótons

únicos, além de possibilitar a avaliação de arquiteturas de repetidores quânticos.

Como parte deste trabalho, o guia de onda plasmônico foi modelado com base em softwares de simulação numérica que utilizam o método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Essa etapa forneceu perfis realistas de perdas, posteriormente incorporados ao SeQuenCe, de modo a aproximar as simulações das condições esperadas em implementações experimentais.

Resultados

O estudo investigou de forma sistemática como variações geométricas [4], como a largura do guia de onda e o tamanho do gap, assim como a escolha de diferentes materiais [5], incluindo metais nobres e alternativas plasmônicas, influenciam a eficiência de transmissão do campo elétrico e as perdas associadas. A partir dessa análise, foi possível identificar combinações de geometria e material que apresentam melhor desempenho para a implementação proposta.

Também foram realizadas simulações exploratórias no SeQuenCe com o objetivo de compreender o funcionamento dos principais componentes utilizados em arquiteturas de repetidores quânticos. Como exemplo, a Figura 1 apresenta a relação entre a perda de fótons e a distância de propagação para diferentes valores de atenuação.

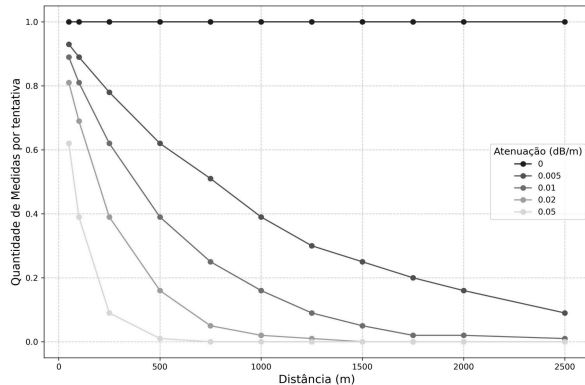


Figura 1: Perda de fótons em função da distância de propagação para diferentes valores de atenuação.

Por fim, foi modelada uma rede quântica com uma arquitetura de repetição simplificada, utilizando os parâmetros otimizados determinados nas etapas anteriores. Esse teste preliminar permitiu avaliar a viabilidade do uso do guia de onda plasmônico no contexto da comunicação quântica.

Conclusões

Os resultados das simulações indicam que, apesar das perdas inerentes aos sistemas plasmônicos, o confinamento de modos em escala nanométrica pode trazer benefícios relevantes para a fotônica quântica integrada, desde que os guias de onda sejam projetados visando sua eficiência. A análise de diferentes configurações permitiu identificar os principais compromissos entre redução de perdas e intensificação do campo, fornecendo diretrizes práticas para otimizar circuitos quânticos plasmônicos.

Dessa forma, este trabalho demonstra a viabilidade de integrar simulações clássicas baseadas em FDTD a métodos estocásticos quânticos, estabelecendo um framework de co-projeto para o desenvolvimento de dispositivos híbridos quânticos escaláveis.

Referências

- [1] Nielsen, M. A., and I. L. Chuang, 2000, Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- [2] Briegel, H.-J., Dür, W., Cirac, J. I., & Zoller, P. (1998). Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication. *Physical Review Letters*, 81(26), 5932–5935. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5932>
- [3] WU, Xiaoliang et al. SeQUeNCe: a customizable discrete-event simulator of quantum networks. *Quantum Science and Technology*, v. 6, set. 2021. DOI: 10.1088/2058-9565/ac22f6.
- [4] Ghorashi, A., Rivera, N., Shi, B., Sundararaman, R., Kaxiras, E., Joannopoulos, J., & Soljačić, M. (2024). Highly confined, low-loss plasmonics based on two-dimensional solid-state defect lattices. *Physical Review Materials*. <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.8.l011001>
- [5] Huang, C.-C., Chang, R.-J., & Cheng, C.-W. (2021). Ultra-Low-Loss Mid-Infrared Plasmonic Waveguides Based on Multilayer Graphene Metamaterials. *Nanomaterials*, 11(11), 2981. <https://doi.org/10.3390/NANO11112981>

Study of the Properties of Plasmonic Cavities for use in Quantum Repeaters

Gabriel Lima Alves

Euclydes Marega Junior

Institute of Physics of São Carlos, University of São Paulo

gabriel.limaalvs@usp.br

Objectives

Quantum communication emerges as a new paradigm for the transmission and protection of information, relying on the principles of quantum mechanics to create intrinsically secure channels [1]. However, its practical application still faces significant challenges, mainly due to losses and decoherence that limit the reliable propagation distance of quantum states.

A promising alternative to overcome these limitations is the use of quantum repeaters [2], which employ techniques such as quantum teleportation, purification, and entanglement swapping to extend the reach of communication. In this context, the aim of this work is to simulate, as a preliminary step toward future experimental implementations, a plasmonic waveguide designed to couple single photons to a quantum memory.

Materials and Methods

To achieve this goal, we employed the SeQuenCe package [3], an open-source Python tool developed to model quantum networks. This simulator describes the dynamics of quantum light in different components and protocols, including communication channels, quantum memories, and single-photon detectors, while also

enabling the evaluation of quantum repeater architectures.

As part of this work, the plasmonic waveguide was modeled using numerical simulation software based on the finite-difference time-domain (FDTD) method. This step provided realistic loss profiles, which were subsequently incorporated into SeQuenCe in order to bring the simulations closer to the conditions expected in experimental implementations.

Results

The study systematically investigated how geometric variations [4], such as waveguide width and gap size, as well as the choice of different materials [5], including noble metals and plasmonic alternatives, influence the transmission efficiency of the electric field and the associated losses. From this analysis, it was possible to identify geometry–material combinations that show better performance for the proposed implementation.

Exploratory simulations were also carried out in SeQuenCe with the aim of understanding the behavior of the main components used in quantum repeater architectures. As an example, Figure 1 shows the relationship between photon loss and propagation distance for different attenuation values.

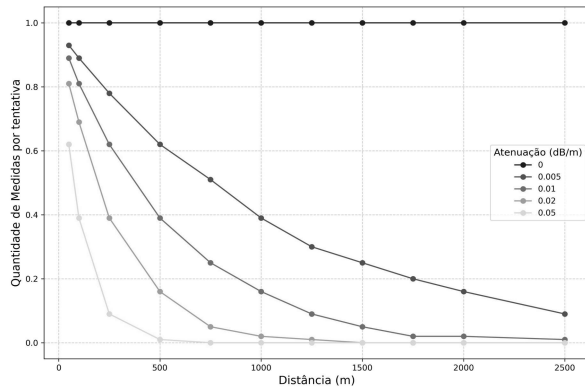


Figure 1: Photon loss as a function of propagation distance for different attenuation values.

Finally, a quantum network with a simplified repeater architecture was modeled using the optimized parameters determined in the previous steps. This preliminary test made it possible to assess the feasibility of employing the plasmonic waveguide in the context of quantum communication.

Conclusions

The simulation results indicate that, despite the inherent losses in plasmonic systems, nanoscale mode confinement can provide significant benefits for integrated quantum photonics, provided that waveguides are designed with efficiency in mind. The analysis of different configurations made it possible to identify the main trade-offs between loss reduction and field enhancement, offering practical guidelines for optimizing plasmonic quantum circuits.

In this way, this work demonstrates the feasibility of integrating classical FDTD-based simulations with quantum stochastic methods, establishing a co-design framework for the development of scalable hybrid quantum devices.

References

- [1] Nielsen, M. A., and I. L. Chuang, 2000, Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- [2] Briegel, H.-J., Dür, W., Cirac, J. I., & Zoller, P. (1998). Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication. *Physical Review Letters*, 81(26), 5932–5935. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5932>
- [3] WU, Xiaoliang et al. SeQUeNCe: a customizable discrete-event simulator of quantum networks. *Quantum Science and Technology*, v. 6, set. 2021. DOI: 10.1088/2058-9565/ac22f6.
- [4] Ghorashi, A., Rivera, N., Shi, B., Sundararaman, R., Kaxiras, E., Joannopoulos, J., & Soljačić, M. (2024). Highly confined, low-loss plasmonics based on two-dimensional solid-state defect lattices. *Physical Review Materials*. <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.8.l011001>
- [5] Huang, C.-C., Chang, R.-J., & Cheng, C.-W. (2021). Ultra-Low-Loss Mid-Infrared Plasmonic Waveguides Based on Multilayer Graphene Metamaterials. *Nanomaterials*, 11(11), 2981. <https://doi.org/10.3390/NANO11112981>