



Fundação Universidade Federal do ABC

Pró reitoria de pesquisa

Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP, CEP

09210-580

Bloco L, 3ºAndar, Fone (11) 3356-7617

iniciacao@ufabc.edu.br

Projeto de Iniciação Científica submetido  
para avaliação no Edital: EDITAL Nº  
4/2022 - PROPES (11.01.07) Nº do  
Protocolo: 23006.008277/2022-40

**Título do projeto:** Desenvolvimento de Detectores de Fótons Únicos baseados em Nanofios Supercondutores de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  para Uso em comunicação de dados

**Palavras-chave do projeto:** Telecomunicação, Nanofios, Fótons, SNSPD, Supercondutores

**Área do conhecimento do projeto:** Engenharia de Materiais/Materiais não-metálicos

## **SUMÁRIO:**

<b>1. RESUMO:</b>	<b>3</b>
<b>2. INTRODUÇÃO:</b>	<b>4</b>
<b>3. OBJETIVOS:</b>	<b>5</b>
<b>4. METODOLOGIA:</b>	<b>6</b>
<b>5. VIABILIDADE:</b>	<b>12</b>
<b>6. CRONOGRAMA:</b>	<b>12</b>
<b>7. REFERÊNCIA:</b>	<b>14</b>

## 1. RESUMO:

Detectores de Fótons Únicos por Nanofios Supercondutores (do inglês Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors: SNSPD) são dispositivos sensores baseados em nanoestruturas supercondutores para detectar baixo número de fótons de determinada faixa de comprimento de onda com alta eficiência e de forma ultrarrápida. Eles operam em temperaturas extremamente baixas e com resistência elétrica nula que sofre alteração ao ser atingida por um fóton, permitindo a sua aplicação em computadores quânticos, comunicação e transmissão óptica de dados.

Com o propósito de utilizar esse nanodispositivo para comunicação e transmissão de dados, nesse projeto de iniciação científica pretende-se inicialmente efetuar uma série de caracterizações físicas, químicas, estruturais e morfológicas nos nanofios supercondutores de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) sintetizados pelo grupo de pesquisa utilizando preenchimento de moldes nanométricos e por eletrofiação, de forma a garantir as propriedades ideais para a aplicação. Em seguida, utilizando de processos de litografia e deposição dos nanofios em eletrodos interdigitais de ouro sobre substrato de silício, executar os testes óticos no circuito montado com o nanodispositivo. Em paralelo, aprofundar o estudo nas referências bibliográficas correlacionadas para confrontar os resultados obtidos com os da literatura e aprimorar o desenvolvimento do projeto. Levantamento inicial mostrou poucos trabalhos publicados neste tema, o que reforça a importância do estudo. O circuito será montado com diferentes configurações de nanofios e testes de transmissão/detecção de fótons serão efetuados para mensurar a eficiência das diferentes montagens.

Espera-se inicialmente obter resultados equivalentes à literatura e caso seja necessário, durante o desenvolvimento do projeto, o processo de síntese do material ou de confecção do nanodispositivo serão readequados para otimizar uso como SNSPD. E dessa forma, pretende-se analisar os resultados visando comparar o método de síntese dos nanofios de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  com as fotorespostas, determinando a melhor configuração para o equipamento construído.

Espera-se que com esse trabalho de Iniciação Científica o aluno possa ter contato com as diversas técnicas de síntese e caracterização de nanomateriais e desenvolver uma aplicação avançada que, além de agregar o seu conhecimento, possa contribuir para o desenvolvimento dessa área no Brasil.

## 2. INTRODUÇÃO:

É de senso comum que o desenvolvimento econômico de um país depende de seu desenvolvimento científico e do avanço tecnológico. Quando se olha a descoberta ou a aplicação de novos materiais avançados, cria-se condições para a criação de equipamentos de alta tecnologia que geram riqueza e bem-estar à sociedade de forma direta ou indireta. Para atingir essa condição, é necessário estar na fronteira do conhecimento da ciência e tecnologia de modo a gerar conhecimento científico, inovação e recursos.

Detectores de Fótons Únicos baseados em Nanofios Supercondutores (ou em inglês Superconducting Nanowire Single-Photon detectors: SNSPD),<sup>[1][2]</sup> são nanofios fabricados com o propósito de detectar inicialmente um único fóton por vez, ou o menor número possível, utilizando a interferência desse fóton no fenômeno da supercondução, que permite a condução de eletricidade sem resistência quando resfriado a temperaturas extremamente baixas e qualquer perturbação nesse estado supercondutor é detectável pela variação da resistência ou da condução elétrica.<sup>[3][4]</sup>

Os SNSPD's ganharam atenção a partir de 2002 quando surgiram trabalhos utilizando-os na área de comunicações e de transmissão de dados, devido à detecção na faixa de comprimento de ondas de 810 nm e aperfeiçoado para detectar comprimentos maiores que 1500 nm. Esses nanodispositivos foram aplicados para transmissão de dados por microondas no comprimento de onda de 1500nm graças à rápida detecção do SNSPD montado. Além disso, conseguem detectar fótons oriundos de longas distâncias e com extrema velocidade. O desafio ainda é obter a melhor combinação na configuração do dispositivo, tipo de material utilizado, temperatura de operação (sistema de resfriamento) e modo de transmissão, que facilitaria ou não o processo de transmissão de informação via fótons.<sup>[4]</sup>

O material a ser utilizado nesse estudo é o supercondutor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , pois possui a vantagem de, além de ter uma alta temperatura crítica de 92K, ter uma boa absorção na frequência de infravermelho, sendo assim amplamente usado na produção de SNSPD.<sup>[5]</sup> Utilizando também de referências de SNSPD construídos com nanofios baseados em outros supercondutores, como NbN, espera-se construir um dispositivo sensor para realizar os ensaios óticos e obter informações como

eficiência, absorção de fótons e do comprimento de onda de trabalho. Dessa forma, pretende-se testar a qualidade do nanodispositivo montado e determinar a melhor configuração para o uso pretendido envolvendo transmissão e comunicação de dados. Como um objetivo geral, neste trabalho pretende-se analisar a melhor composição químico/física dos nanofios para uso como SNSPD e determinar a melhor configuração de dispositivo para o uso na área de comunicação, ao mesmo tempo gerando conhecimento, tecnologia e inovação nesta área.

### 3. OBJETIVO:

A partir das informações e dados obtidos da literatura científica no tema abordado, será efetuado um estudo comparativo de SNSPD's montados a partir de nanofios de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  obtido por eletrofiação e por preenchimento de moldes, além da configuração de montagem utilizando um único nanofio ou de vários depositados em um eletrodo interdigital. Espera-se com essa análise, atingir o objetivo principal que é determinar o melhor *set-up* de SNSPD usando nanofios de YBCO para o uso nas áreas de comunicação e transmissão de dados.

Para atender esse objetivo principal, pretende-se que o aluno realize ou acompanhe as seguintes etapas:

- caracterizar os nanofios supercondutores morfologicamente utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-FEG) e obter a estequiometria dos elementos presentes através de um Espectrômetro de Energia Dispersiva de raios X (EDX) acoplado;
- caracterização estrutural dos nanofios pela técnica de difração de raios X e verificar as fases presentes e, caso necessário, realizar tratamento térmico para obter a fase desejada.
- separar os nanofios para a deposição em eletrodos simples ou interdigitais, através da técnica de dieletroforese, o que permite os fios ficarem dispostos em paralelo – construção dos nanodispositivos.
- realizar os ensaios de medida de resistência em função da temperatura e de magnetização em função da temperatura e campo aplicado para verificar a resposta supercondutora dos nanofios obtidos, em sistemas criogênicos dedicados.
- realizar ensaios preliminares para verificar a sensibilidade dos nanodispositivos montados, monitorando a resistência elétrica com a incidência de

um feixe de laser em comprimentos de ondas variados e potência controlada – posteriormente, usando um circuito de chopper e lock-in, verificar o tempo de resposta do sistema e com isso efetuar ensaios para determinar a possível taxa de dados transmitidos.

Por fim, espera-se que com as caracterizações realizadas e correlações com os resultados obtidos o aluno participe da escrita de um artigo e obtenha um *know-how* que o permita vislumbrar outros usos futuros desses dispositivos, criando ferramentas e soluções para resolver os problemas que venham a surgir no decorrer do trabalho. Assim, também espera-se com esse trabalho iniciar uma nova linha de pesquisa no nosso grupo e colocar o Brasil com condições de dominar esse tipo de tecnologia.

#### **4. METODOLOGIA**

Inicialmente o aluno irá executar um levantamento bibliográfico referente a nanofios baseados em  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , sistemas SNSPD e de metodologias de comunicação utilizado nas referências. Pretende-se aproveitar essa etapa para ensinar o aluno a pesquisar em bancos de dados confiáveis. Informações como velocidade de transmissão de dados, sensibilidade, diâmetro e comprimento do fio utilizado, faixa de comprimento de onda detectável e temperatura de trabalho serão utilizados para nortear a aplicação do dispositivo SNSPD para posterior comparação.

[4][5]

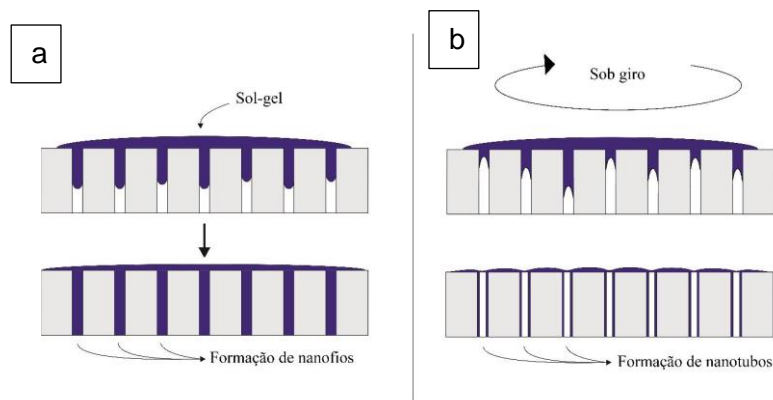
Embora os nanofios de YBCO já estejam preparados, caso seja necessário o aluno poderá aprender a obter os nanofios através de duas tecnologias:

##### **4.1- preenchimento de moldes**

Inicialmente deve-se preparar através de uma metodologia Sol-gel, uma síntese de óxidos a partir de hidrólise e condensação de alcoóxidos metálicos. Essa solução com viscosidade ajustada será utilizada no processo de preenchimento de moldes de policarbonato e de alumina, encontradas comercialmente com diâmetro interno de poro entre 20 e 400 nm. Durante o processo, o fluido entra nos poros por efeito de capilaridade caso haja boa molhabilidade em relação a membrana utilizada, como ilustra a Figura 1a) a seguir. Por essa razão, o preenchimento é influenciado pelas características do fluido, tais como viscosidade, composição e condutividade.

No caso da deposição por *spin coater*, além do efeito de capilaridade, a variação de pressão gerada pelo giro da membrana e do fluido influencia na conformação de nanotubos, como mostrado na Figura 1b).

Figura 1 – À esquerda, ilustração do processo de preenchimento de membrana nanoporosa com sol-gel em condições normais. À direita, infiltração do sol-gel sob giro da membrana, resultando na formação de nanotubos.

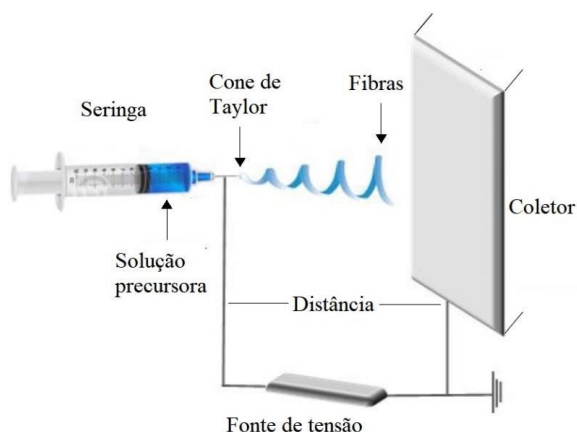


Para remoção dos nanofios, no caso de moldes de alumina usa-se uma solução de KOH para dissolver o molde e para as de policarbonato basta aquecer a 400°C.

#### 4.2- Eletrofiação

A eletrofiação é uma técnica relativamente simples e de baixo custo que tem como objetivo a produção de fibras inteiriças ou ocas, bem definidas e com diâmetros da ordem de micrômetros até nanômetros. Para isso, utiliza-se de tensão elétrica DC aplicada a um capilar metálico através do qual passa a solução contendo os reagentes precursores, como exemplificado na Figura 2. Geralmente, uma seringa com agulha de extremidade reta é utilizada como reservatório de solução e capilar. Essa seringa é conectada a uma bomba que controla o fluxo de líquido que sai pelo orifício. Em frente ao capilar, em uma distância determinada, é colocado um anteparo metálico aterrado sobre o qual as fibras são depositadas durante o processo. A alta voltagem aplicada no sistema, geralmente entre 1 e 30 kV, possibilita a formação das fibras contínuas que saem do orifício do capilar. <sup>(6)</sup>

Figura 2 – Exemplo simplificado de um sistema de eletrofiiação.



#### 4.2- Caracterizações dos nanofios e montagem dos dispositivos

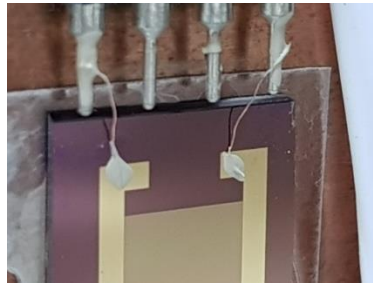
Como já dito anteriormente, para a caracterização morfológica dos nanofios, ou mesmo dos nanodispositivos montados, pretende-se utilizar os MEV's (JEOL MS-6701F) disponíveis na Central Experimental Multiusuários (CEM) da UFABC, de forma a obter os comprimentos e diâmetros médio dos nanofios, bem como as dimensões dos grãos formados. Com o acessório EDX acoplado, verificar a presença dos elementos desejados ou contaminações que possam ocorrer durante o processo de síntese.

As identificações das fases cristalinas das amostras sintetizadas serão feitas a partir de dados colhidos utilizando os equipamentos de difração de raios X também presentes na CEM (D8 FOCUS, Bruker).

As medidas de variação da resistência elétrica serão realizadas em um criostato de ciclo fechado com eletrônica dedicada (fonte de corrente e voltímetro) com o objetivo de determinar a temperatura crítica  $T_c$  de transição supercondutora para garantir a temperatura de trabalho do nanodispositivo. Para isso os nanofios serão depositados em eletrodos interdigitais de ouro, mostrados abaixo em um porta-amostra do sistema criogênico:



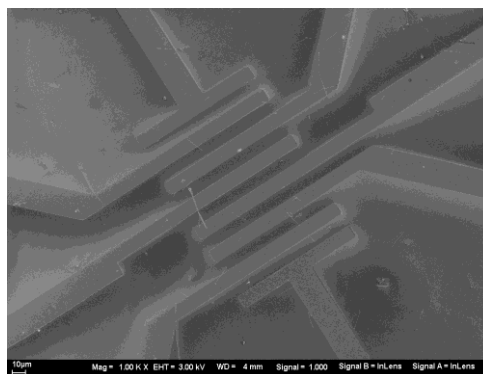
Figura 3: Exemplo de dispositivo preparado para medidas elétricas.



Também com o intuito de obter as propriedades supercondutoras das amostras, as medidas magnéticas dos materiais sintetizados serão realizadas em um magnetômetro SQUID (MPMS3 SQUID VSM EverCool, Quantum Design) também pertencente à CEM. Os modos de varredura serão de magnetização em função da temperatura ( $M \times T$ ) nas rotinas de resfriamentos sem campo aplicado (Zero Field Cooling, ZFC) e com campo aplicado (Field Cooling, FC) e magnetização em função do campo magnético aplicado ( $M \times H$ ).

Para a confecção dos nanodispositivos deverá ser utilizado técnica de litografia ótica (fotoreteste, máscara adequada, lâmpada UV para exposição, revelação e litoff) para desenhar um padrão de interdigital de menor dimensão e com espaçamentos entre eletrodos de 5  $\mu\text{m}$  de forma a depositar poucos nanofios. Para direcionar os nanofios nos eletrodos, deverá ser utilizado a técnica de dieletroforese para alinhamento e deposição dos nanofios dispersos em suspensão e gotejados sobre os eletrodos confeccionados (exemplo imagem abaixo para um nanofio depositado).

Figura 4: Exemplo de dispositivo preparado com eletrodos menores.

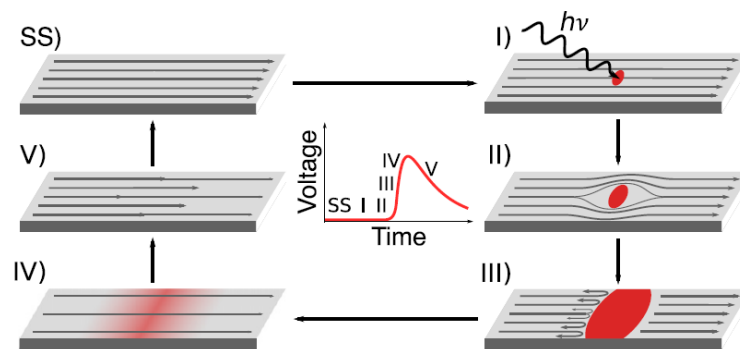


A partir dessa montagem, o número de fios depositados, o seu tamanho e morfologia, bem como as propriedades supercondutoras, deverão influenciar na

resposta do circuito como SNSPD, no caso para explorar a melhor condição para detecção de fótons, velocidade de detecção para recepção dos dados [7, 8, 9, 10 e 11]

Uma configuração para testes como SNSPD envolve o seguinte esquema mostrado na figura 5: [3,4]

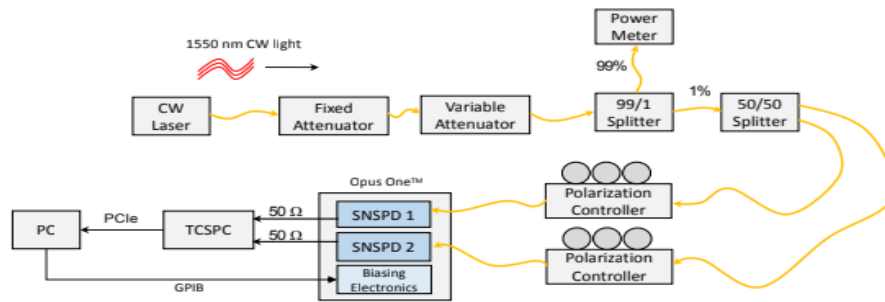
Figura 5: Esquema básico do funcionamento de um SNSPD extraído da referência 3, mostrando a mudança local do estado supercondutor para normal pela incidência de um fóton e sendo detectado pela variação da voltagem lida.



Macroscopicamente falando, conforme figura 5, no estado estacionário (SS) os nanofios são alimentados com uma corrente que circula pelo supercondutor sem perdas e com resistência nula, através dos pares de Cooper. Na absorção do fóton (I) temos a criação de quase-partículas e fônons (II) localmente que levam à formação de uma região no estado normal não supercondutor (III) gerando uma voltagem devido à resistência que se origina. Em seguida ocorre um processo de recuperação do estado supercondutor (IV) demandando um tempo e voltando à corrente inicial (V). O “reset” do sistema é limitado pela indutância cinética do dispositivo [3].

Uma configuração para medida mais complexa de desempenho de um sistema SNSPD é demonstrado na figura 6 a seguir extraída da referência 4:

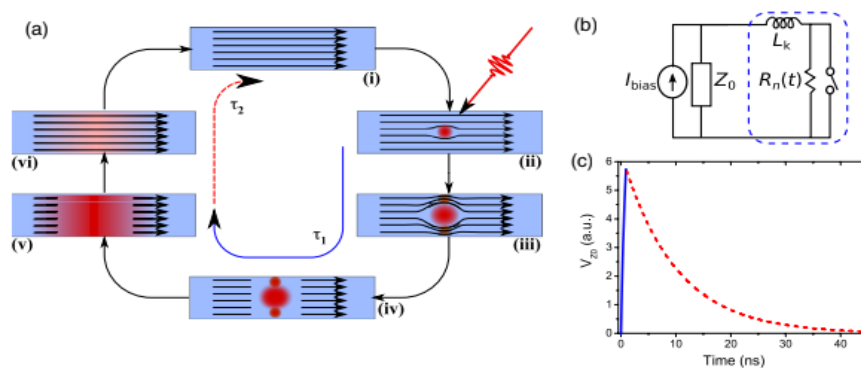
Figura 6: Esquema de equipamento para teste de contagem de fóton e transmissão de dados extraído da referência 4.



Basicamente essa configuração é utilizada para testar a eficiência de detecção e o tempo-morto do Sistema. Possui um laser na faixa de 1550nm com um Sistema de feed-back e que é atenuado para minimizar o número de fótons/segundo usando atenuadores específicos. O pulso de saída dos SNSPD's é enviado para um contador de fóton multi-canal correlacionado no tempo (TCSPC) e no caso da referência tem resolução de 25ps e contagem contínua de 50Mcps por canal.

Na metodologia a ser utilizada nesse projeto de pesquisa, deverá ser utilizada a montagem em um criostato de ciclo fechado com janela ótica para incidência do laser que deverá ser atenuado com lentes específicas e, utilizando um power meter, deverá ajustar a intensidade do feixe para o menor valor possível. Utilizando um sistema de chopper mais um lock-in amplificador de sinal, deverá ser obtido o tempo de resposta do sistema montado com o pulso gerado, com uma curva de resposta similar ao mostrado abaixo figura 7c, mas com vários pulsos:

Figura 7: Esquema básico do comportamento de um SNSPD com circuito equivalente. Extraído da Referência 4.



## **5. VIABILIDADE:**

Os equipamentos descritos na metodologia são acessíveis através da Central Experimental Multiusuários e dos presentes no laboratório de pesquisa do grupo. O grupo já possui experiência na síntese, caracterização e montagem de nanodispositivos, de forma que o aluno terá total apoio para o desenvolvimento do seu trabalho. Espera-se que com a dedicação do aluno possa-se criar todas as condições para criar massa crítica nessa área de nanodispositivos sensores de fótons únicos e aplicar nas diversas outras possibilidades além da comunicação de dados.

## **6. CRONOGRAMA:**

Para a realização desse projeto de Iniciação Científica, podemos dividir as etapas de trabalho da seguinte forma:

1. Levantamento bibliográfico;
2. Caracterização dos nanofios:
  - Difração de Raio-X;
  - Microscopia Eletrônica de Varredura + EDS;
  - Medidas magnéticas utilizando SQUID
3. Confecção dos dispositivos iniciais para caracterização elétrica e determinação da Temperatura crítica e viabilidade de uso;
4. Síntese dos nanomateriais caso seja necessário após as caracterizações do material já produzido pelo grupo.
5. Confecção dos nanodispositivos para ensaios óticos como SNSPD em diferentes configurações utilizando processos de micro e nanolitografia; Verificação dos dispositivos montados utilizando MEV  
Construção com polarizadores e detectores;
6. Teste com Circuito pra verificar a sensibilidade e tempo de resposta à incidência de fótons - após montagem da configuração de ensaio com polarizadores/atenuadores e eletrônica de detecção de fótons.
7. Análise dos resultados obtidos na etapa 6 - sensibilidade na recepção dos fótons e tempo de resposta em função dos comprimentos de ondas aplicados e correlação com as outras propriedades e configurações utilizadas.
8. Confecção dos relatórios e possível publicação em revistas com avaliação por pares.

Mês/Tarefas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Levantamento bibliográfico												
2. Caracterização dos nanofios												
3. Confeção dos dispositivos iniciais												
4. Síntese dos nanomateriais*												
5. Confeção dos nanodispositivos SNSPD e ensaios óticos												
6. Teste com Circuito para detecção												
7. Análise dos resultados obtidos												
8. relatórios e artigo												

Tabela 1:Cronograma de Detectores de Fótons Únicos em Nanofios Supercondutores de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

\* caso seja necessário

## REFERÊNCIAS:

- 1- Arpaia R, Ejrnaes M, Parlato L, Tafuri F, Cristiano R, Golubev D, et al. High-temperature superconducting nanowires for photon detection. *Phys C Supercond its Appl.* 2015;509:16–21.
- 2- Natarajan CM, Tanner MG, Hadfield RH. Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications. *Supercond Sci Technol.* 2012;25(6):63001.
- 3 - Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications (2021 - Iman Esmaeil Zadeh)
- 4 - Superconducting nanowire single-photon detectors: A perspective on evolution, state-of-the-art, future developments, and applications (2021 - Iman Esmaeil Zadeh)
- 5 - Review of Superconducting Nanostrip Photon Detectors using Various Superconductors (2021 - Hiroyuki SHIBATA)
- 6 – Mitchell GR. Electrospinning: principles, practice and possibilities. Royal Society of Chemistry; 2015. 276 p.
- 7- Design of a Ground-Based Optical Receiver for the Lunar Laser Communications Demonstration (2011 - Matthew E. Grein)
- 8 - 781 Mbit/s photon-counting optical communications using a superconducting nanowire detector (2006 - Bryan S. Robinson)
- 9 - Free-space-coupled superconducting nanowire single-photon detectors for infrared optical communications (2016 - Francesco Bellei)
- 10 - Performance and characterization of a modular superconducting nanowire single photon detector system for space-to-Earth optical communications links(2018-Brian E. Vyhnalek)
- 11 - Few-mode fiber coupled superconducting nanowire single-photon detectors for photon efficient optical communications(2018-Brian E. Vyhnalek)
- 12-NbN superconducting nanowire single-photon detector with an active area of 300  $\mu\text{m}$ -in-diameter(2019-Chengjun Zhang)