

Universidade Federal de São Carlos

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso 2

*Eletromigração controlada em dispositivos de micropontes de
alumínio e bismuto*

Aluno: Marcos Vasconcellos Mistura

Curso de Graduação: Bacharelado em Física

Orientador: Prof. Dr. Maycon Motta

São Carlos

2025

Agradecimentos

Somente quem já passou pela graduação conhece as boas e difíceis experiências que esse período proporciona. Porém, por trás dessa trajetória, há pessoas que ajudam a amenizar os desafios e tornar a jornada mais leve. A seguir, expresso minha gratidão a essas pessoas tão queridas e especiais.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família: minha mãe, Patrícia, e meu pai, Romildo, sem os quais nada disso seria possível. Foram eles que me ofereceram o suporte emocional e financeiro necessário para que eu pudesse me dedicar aos estudos. Também sou grato aos meus irmãos, Miguel e Matheus, que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando a seguir em frente.

Quero ainda prestar minha homenagem aos meus avôs, Salvador e Vitória, que infelizmente já não estão entre nós, mas que, sem dúvida, ficariam felizes e orgulhosos ao presenciar este meu momento.

Agradeço também a todos os professores que contribuíram para o meu aprendizado e amadurecimento ao longo da graduação. Além disso, expresso minha gratidão às pessoas que desempenham funções essenciais na universidade, como a equipe de limpeza, os profissionais da cozinha e os técnicos, cujo trabalho é fundamental para o funcionamento e a qualidade do ambiente acadêmico.

Em especial, expresso minha gratidão ao Prof. Dr. Maycon, pela acolhida no grupo de pesquisa GSM e por acreditar no meu potencial e no meu trabalho. Agradeço ainda ao doutorando Caio e ao pós-doutorando Elijah, pelo apoio, paciência e companheirismo durante nossas atividades no laboratório.

Por fim, minha profunda gratidão à minha querida e amada Maria, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e incentivando a seguir em frente. Obrigado por me ouvir incansavelmente nos momentos de cansaço e estresse e por permanecer firme ao meu lado, mesmo quando minha tagarelice com quem eu conheço tornava tudo ainda mais desafiador. Sei que não foi fácil, mas sua paciência e carinho foram fundamentais nessa jornada.

Resumo

A eletromigração é um fenômeno em que átomos se deslocam dentro de um material devido à aplicação de altas densidades de corrente elétrica. Esse efeito pode levar à formação de vazios e acúmulos atômicos, resultando em falhas em dispositivos eletrônicos. No entanto, quando controlada, a eletromigração pode ser utilizada para modificar materiais em escala atômica. Neste trabalho, investigamos os efeitos da eletromigração em micropontes de bismuto, um material de interesse tecnológico por suas propriedades como isolante topológico. Como primeiro passo, a eletromigração foi realizada em dispositivos metálicos de alumínio, demonstrando a viabilidade do controle preciso desse processo. Os resultados obtidos foram compatíveis com a literatura, reforçando a confiabilidade da metodologia adotada. Em seguida, aplicamos o protocolo ao bismuto, cujas características semicondutoras impuseram desafios adicionais no controle da eletromigração. Para superar essas dificuldades, testamos diferentes condições experimentais, variando parâmetros da eletropulsão, temperatura e atmosfera. Inicialmente, a eletromigração foi realizada em condições ambiente, ajustando o protocolo para alcançar temperaturas mais altas devido à influência do efeito Joule no experimento. Posteriormente, realizamos testes sob baixa pressão e a 350 K, buscando maior controle do processo. Os resultados indicaram um caminho promissor para modificar propriedades do bismuto de maneira controlada, embora o controle fino da eletromigração ainda não esteja completamente estabelecido. Esses avanços traçam perspectivas para experimentos futuros, permitindo otimizar parâmetros e aprofundar a compreensão dos mecanismos que governam a eletromigração no bismuto, visando aplicações em dispositivos baseados nesse material.

Lista de Figuras

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Representação do processo de EM destacando a força eletrostática (\vec{F}_E) e a força de vento de elétrons (\vec{F}_{wind}). Imagem retirada de [5]. | 1 |
| 2 | Imagens de MEV de (a) um dispositivo de microponte virgem (<i>Virgin</i>) feito de Al e (b) do mesmo dispositivo após ser submetido à eletromigração pulsada depois de sete ciclos (<i>After EM7</i>). No painel (b) é destacada a formação de vazios (<i>voids</i>) ou poros do lado direito e protuberâncias (<i>hillocks</i>) do lado esquerdo da microponte. Imagem retirada de [5]. | 2 |
| 3 | Tipos de eletromigração: (a) EM volumétrica, b) EM de filmes finos. No caso desse último, uma quantidade significativa de átomos migram no material gerando protuberâncias (<i>hillocks</i>) e vazios (<i>voids</i>). Imagem retirada de [11]. | 5 |
| 4 | Na imagem (a) há a ilustração da amostra enumerando os seus 15 dispositivos destacando-se também as dimensões em μm dos <i>pads</i> e da constricção nos quais foram feitos os contatos. Já em (b) temos as conexões elétricas esquematizadas dos dispositivos, indicando onde se aplicou a corrente elétrica (I+ e I-) e os pontos de leitura de voltagem (V+ e V-). | 10 |
| 5 | Processo de litografia por feixe de elétrons: (a) temos uma camada dupla de resiste depositado sobre o substrato por <i>spin coating</i> . (b) Um feixe de elétrons é utilizado para escrever ponto a ponto as estruturas desejadas nas camadas de resiste, induzindo mudanças nas propriedades físicas da área exposta. (c) Em seguida, a amostra é colocada em uma solução química para remover o resiste exposto (processo de revelação). (d) Por fim, o material em excesso é removido quimicamente com a remoção do resiste (<i>lift-off</i>). Após o <i>lift-off</i> , obtém-se o filme final com o padrão desejado. Adaptado de [5]. | 12 |
| 6 | Processo para a fabricação dos <i>pads</i> de Al nos dispositivos de Bi. Adaptado de [5]. | 13 |

| | | |
|----|--|----|
| 7 | Pulsos de corrente elétrica aplicada em função do tempo representando o protocolo de eletropulsção para realizar eletromigração de maneira controlada. | 14 |
| 8 | Estação de prova (<i>Probe Station</i>) construída no GSM para a realização da eletromigração pulsada, com a câmera posicionada para localizar a amostra e as quatro agulhas para contatos elétricos. | 15 |
| 9 | (a) Dedo-frio do criostato Oxford MicroStatHe. No detalhe em (b), montagem do substrato com 15 dispositivos sobre a placa PCB conectada à <i>sourcemeeter</i> . Os contatos elétricos da placa de circuito com as trilhas de cobre foram conectados por meio de fios de ouro com o dispositivo de bismuto. | 16 |
| 10 | (a) Visão geral do Wire Bonder. (b) Região onde a amostra de bismuto é posicionada para a realização da conexão elétrica. Nesse ponto, a agulha do equipamento, operando em frequência ultrassônica, promove a fixação do fio condutor sobre os pads da amostra, assegurando um contato confiável. (c) Imagem obtida por microscopia óptica, na qual a amostra de bismuto já conectada aos fios de ouro pode ser visualizada em detalhes, evidenciando a qualidade da ligação elétrica estabelecida. | 17 |
| 11 | Representação do MEV com o detector ETD ilustrado no canto inferior esquerdo. | 18 |
| 12 | Curva de resistividade em função da temperatura ($\rho(T)$) é apresentado da seguinte forma: no painel (a), de um dos dispositivos de bismuto estudado, que demonstra seu comportamento semicondutor. No painel (b), é apresentada uma curva de $\rho(T)$ de Al exibindo um comportamento metálico, com a resistividade aumentando conforme a temperatura aumenta [13]. | 20 |
| 13 | Curvas de R_{min} do dispositivo Al1 em (a) e R_{max} em (b) em função da corrente dos pulsos, passado por apenas 1 eletropulsção (EM1). | 21 |
| 14 | (a) Imagem usando MEV de um dispositivo qualquer usado sem realizar a eletropulsção, ou seja, virgem, mostrando a polaridade de aplicação da corrente. (b) Imagem de MEV do dispositivo Al1 após a primeira rodada de eletropulsção (EM1), evidenciando a formação de <i>voids</i> e <i>hillocks</i> | 22 |

| | | |
|----|--|----|
| 15 | Curvas de R_{min} em função da corrente elétrica em (a) do Al2 com EM2 e em (b) do Al3 com EM3. | 23 |
| 16 | (a) Imagem de MEV de Al2 usado com EM2 realizado. (b) Imagem de MEV de Al3 após EM3, mostrando a formação do rompimento gerada pela EM na constrição do material. | 24 |
| 17 | EM do dispositivo Bi1. (a) Curvas de R_{min} (azul) e R_{max} (vermelha), com inserção mostrando a região da curva que precede a queda repentina da resistência. Nos painéis inferiores são apresentadas as imagens de MEV obtidas (b) antes (para uma amostra irmã) e (c) depois do protocolo de eletropulsção. Na imagem pós eletromigração são destacados caminhos percolativos formados pela movimentação de material entre as trilhas do dispositivo. | 26 |
| 18 | EM do dispositivo Bi2. As curvas de (a) R_{min} e (b) R_{max} são apresentadas para duas rodadas de eletropulsção consecutivas, sendo a primeira identificada pela cor azul e a segunda pela cor vermelha. No painel (c) é apresentada uma imagem de MEV do dispositivo após os experimentos de EM, revelando que não há qualquer efeito visível na constrição central. . . | 27 |
| 19 | EM do dispositivo Bi3 em condições controladas de temperatura e pressão. As curvas de (a) R_{min} e (b) R_{max} são apresentadas para as 6 rodadas de EM realizadas, com cada rodada identificada por uma cor diferente. A imagem inserida no painel (b) destaca o comportamento decrescente de R_{max} até aproximadamente 2 mA. Nos painéis (c) e (d) são apresentadas as imagens de MEV do dispositivo antes e depois da EM, respectivamente. | 29 |
| 20 | Danos causados ao dispositivo Bi4 durante a EM. (a) Imagem óptica mostrando o caminho percolativo ao longo de uma das trilhas e (b) imagem de MEV na região do <i>pad</i> metálico correspondente. | 30 |

21 EM do dispositivo Bi5. As curvas de (a) R_{min} e (b) R_{max} são apresentadas para as 3 rodadas de EM realizadas e identificadas por diferentes cores (preta, vermelha e azul). A imagem inserida no painel (b) destaca o comportamento decrescente de R_{max} até aproximadamente 2 mA. Nos painéis (c) e (d) são apresentadas as imagens de MEV do dispositivo antes e depois da EM, respectivamente. 31

Lista de Tabelas

- 1 Condições de EM dos dispositivos de bismuto. São apresentadas as condições de temperatura e pressão empregadas, além de parâmetros do protocolo de eletropulsção, como duração dos pulsos, tempo e corrente de prova. . . . 24

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução e Motivação | 1 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 4 |
| 2.1 | Contribuição da força motriz para a eletromigração | 4 |
| 2.2 | A difusão atômica e a densidade de corrente | 7 |
| 2.3 | Processo de EM do alumínio e do bismuto | 8 |
| 3 | Materias e métodos | 9 |
| 3.1 | Fabricação dos dispositivos | 9 |
| 3.1.1 | Layout | 9 |
| 3.1.2 | Fabricação | 11 |
| 3.2 | Protocolo de Eletropulsção | 12 |
| 3.2.1 | Probe Station | 14 |
| 3.2.2 | Criostato Oxford MicrostatHe | 15 |
| 3.3 | Wire Bonder | 16 |
| 3.4 | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 18 |
| 4 | Resultados e Discussões | 19 |
| 4.1 | Eletropulsção no Alumínio | 20 |
| 4.2 | Eletropulsção no Bismuto | 24 |
| 5 | Conclusão | 32 |

1 Introdução e Motivação

A resistência elétrica de materiais ocorre quando os portadores de carga são espalhados por defeitos no potencial cristalino, transferindo momento linear para a rede cristalina [1, 2, 3]. Sem uma corrente elétrica aplicada, os elétrons transferem momento aleatoriamente, mas com uma corrente aplicada, o espalhamento dos elétrons tem uma direção preferencial [4]. Apesar da baixa energia individual dos portadores de carga, a grande quantidade de elétrons no transporte de corrente resulta em uma transferência total de momento que pode induzir a difusão de átomos usualmente na direção do fluxo de carga. Dessa forma, a eletromigração (EM) é a difusão atômica em sólidos induzida por uma corrente elétrica, sendo, portanto, um fenômeno coletivo que requer alta densidade de corrente para ocorrer, como ilustrado na Fig. 1.

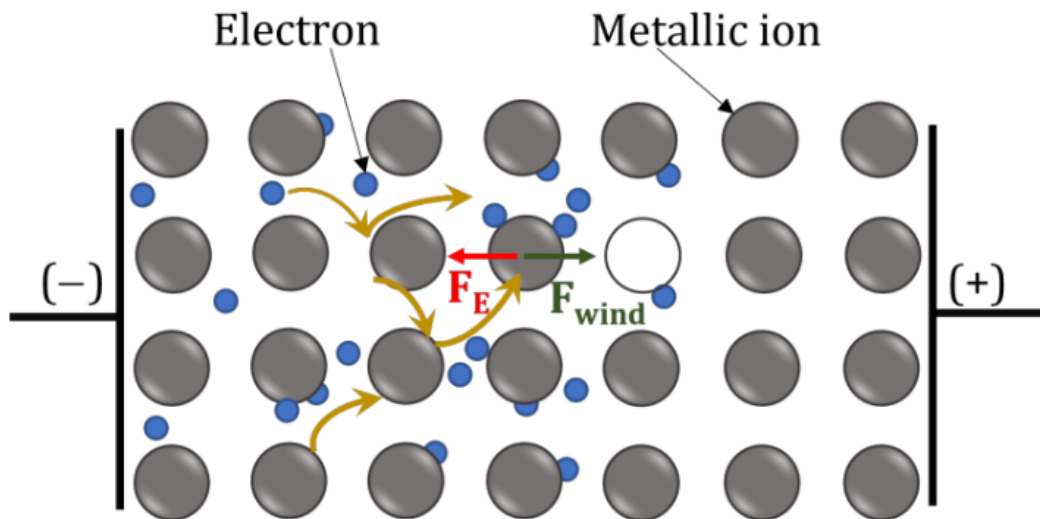


Figura 1: Representação do processo de EM destacando a força eletrostática (\vec{F}_E) e a força de vento de elétrons (\vec{F}_{wind}). Imagem retirada de [5].

Esse processo de espalhamento é intensificado pelo aquecimento devido ao efeito Joule, que aumenta a vibração térmica dos íons no material. Assim, os átomos são submetidos a uma transferência de momento que atua como uma força de arraste ou “vento” de elétrons (*electron wind*) [5]. À medida que os átomos se deslocam na rede cristalina, vacâncias se movem na direção oposta, resultando em regiões de depleção de átomos, chamadas de

vazios ou poros (*voids*), e acúmulo em outras regiões, formando protuberâncias, extrusões ou morros (*extrusions* ou *hillocks*), como mostrado na imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na Fig. 2. Essas alterações são conhecidas por causar falhas em circuitos integrados e dispositivos eletrônicos [3]. O desenvolvimento da técnica de MEV foi fundamental para a identificação e compreensão da EM, pois no início da indústria da microeletrônica, esse fenômeno foi observado em circuitos integrados (CIs) com falhas durante o seu funcionamento [1].

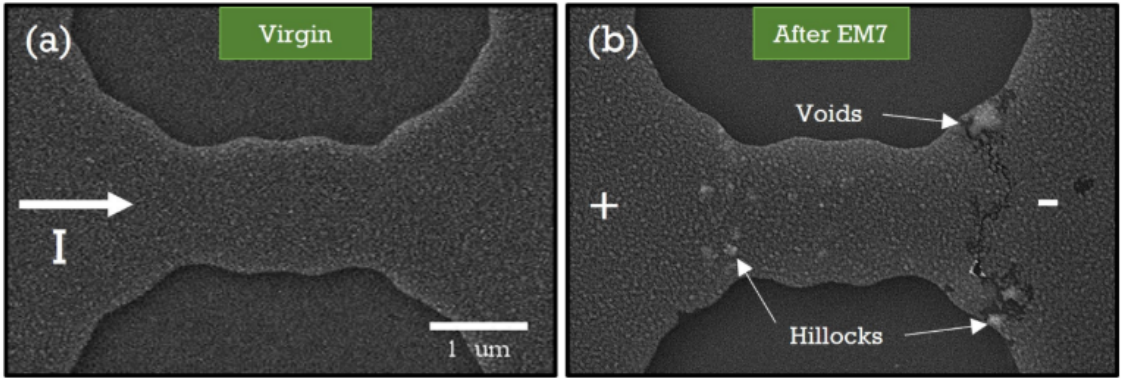


Figura 2: Imagens de MEV de (a) um dispositivo de microponte virgem (*Virgin*) feito de Al e (b) do mesmo dispositivo após ser submetido à eletromigração pulsada depois de sete ciclos (*After EM7*). No painel (b) é destacada a formação de vazios (*voids*) ou poros do lado direito e protuberâncias (*hillocks*) do lado esquerdo da microponte. Imagem retirada de [5].

Além da eletromigração, outros mecanismos podem ser responsáveis pela difusão atômica em sólidos. Para que ocorra a difusão atômica de um lugar para outro do material, é necessário que haja um outro fluxo igual, mas no sentido oposto, chamado de fluxo de vacâncias (Θ_v). Logo, o fluxo de vacâncias pode ser escrito, de forma geral, como sendo:

$$\Theta_v = -D \left(\nabla C - \frac{Z^* e}{k_B T} C \rho J - \frac{Q}{k_B T^2} C \nabla T + \frac{f \Omega}{k_B T} C \nabla \sigma \right). \quad (1)$$

O primeiro termo à direita refere-se à difusão induzida pelo gradiente de vacâncias ∇C , com C sendo a concentração de vacâncias, seguido pelo termo de eletromigração e, por último, os termos das forças motrizes devido aos gradientes de temperatura ∇T e de

tensão mecânica $\nabla\sigma$. Aqui, f representa o fator de relaxação de vacância, Ω o volume atômico, D a difusividade, T a temperatura, k_B a constante de Boltzmann, Z^* a carga nuclear efetiva, e a carga do elétron, J a densidade de corrente, ρ a resistividade e Q a carga total. Portanto, conclui-se que o fator dominante na Eq. 1 para os estudos propostos neste projeto será o segundo termo, que representa a difusão atômica durante o processo de eletromigração [5].

Recentemente, o protocolo por eletropulsção (veja Fig. 7 e uma explicação mais detalhada na Seção 3.2) foi utilizado para estudar a eletromigração de dispositivos de constricção com diferentes ângulos feitos de uma bicamada de Nb e Al, com espessuras de 50 nm e 7 nm, respectivamente [5, 6]. O alumínio atuou como uma camada protetora sobre o Nb, que é usado em várias aplicações supercondutoras, incluindo cavidades de aceleradores de radiofrequência, dispositivos de interferência quântica ou SQUIDs, junções de tunelamento Josephson, elos fracos e linhas de transmissão supercondutoras flexíveis [7, 8].

A EM moderada induzida por eletropulsção é um fenômeno ainda pouco explorado, especialmente em materiais como o bismuto. Enquanto a bicamada Nb/Al já foi investigada sob esse aspecto [5], o bismuto conta com apenas dois estudos na literatura, nenhum dos quais utilizando uma abordagem controlada como a eletropulsção [9, 10]. Dessa forma, estudaremos o alumínio como ponto de partida para compreender aspectos básicos da eletropulsção. Em seguida, serão mostrados várias tentativas para controlar a EM por eletropulsção em dispositivos de bismuto.

Ao investigar esse processo de forma sistemática, espera-se contribuir para a compreensão dos mecanismos fundamentais que regem a eletromigração em materiais com comportamento semicondutor, comparando a eletropulsção e seus efeitos no bismuto e em um material com comportamento já conhecido, como o alumínio.

Para a realização desse estudo, o objetivo inicial é realizar um estudo da resistividade elétrica do alumínio e do bismuto em função da temperatura para compreender o suas respostas elétricas. Em seguida realizar experimentos de EM no alumínio para compreender o controle no deslocamento de matéria, depois buscar o controle da EM em dispositivos de bismuto, variando condições e parâmetros, como da eletropulsção, temperatura e

atmosfera e, por fim, realizar análise morfológica do dispositivo utilizando MEV.

A seguir, será apresentada uma breve seção dedicada a metodologia empregada nos experimentos, destacando o layout e o processo de fabricação dos dispositivos de alumínio e de bismuto utilizados nos experimentos. Posteriormente, será detalhado o protocolo de eletropulsção desenvolvido, especificando as condições experimentais e os equipamentos usados. Por fim, serão discutidos os resultados obtidos a partir da eletropulsção dos dispositivos de alumínio e bismuto, realizando uma análise comparativa entre os dois materiais. O trabalho será concluído com uma discussão final sobre os avanços da pesquisa e suas perspectivas futuras.

2 Fundamentação Teórica

Nesta seção são estabelecidos os conceitos teóricos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, a dizer: a contribuição da força motriz para a eletromigração, a difusão atômica e a densidade de corrente, e, por último, uma breve descrição da EM no alumínio e no bismuto.

2.1 Contribuição da força motriz para a eletromigração

Para que o processo de eletromigração em um filme fino aconteça, é necessária uma densidade de corrente elétrica relativamente alta, da ordem de $10^7 \frac{A}{cm^2}$. Dada essa densidade de corrente, é importante que a temperatura local, aumentada pelo Efeito Joule, mantenha-se abaixo da temperatura de fusão do material (cerca de $271,4^\circ C$ para o bismuto e $660,3^\circ C$ para o alumínio). No caso de dispositivos micrométricos obtidos a partir de filmes finos, isso é possível pela grande eficiência da dissipação de calor pelo substrato [11].

Existem dois tipos de eletromigração relacionados à geometria do material: a eletromigração volumétrica, como exemplo de um fio condutor, e a eletromigração por filme fino, representadas na Fig. 3. Na volumétrica, os átomos se movem por meio de defeitos na rede cristalina gerando uma baixa eficiência do transporte de átomos, enquanto que

em filmes finos, os átomos vão se deslocar no contorno dos grãos, aumentando a eficiência do transporte de material [11].

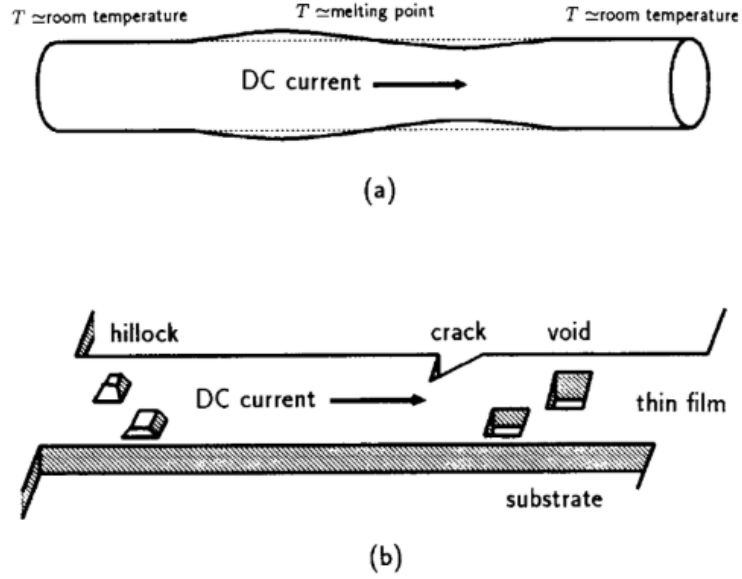


Figura 3: Tipos de eletromigração: (a) EM volumétrica, b) EM de filmes finos. No caso desse último, uma quantidade significativa de átomos migram no material gerando protuberâncias (*hillocks*) e vazios (*voids*). Imagem retirada de [11].

Para que a EM seja disparada e continue ocorrendo, é necessária uma força motriz. Essa força apresenta duas contribuições: a força eletrostática, gerada pela interação do campo elétrico aplicado e a carga de um íon móvel, e a força de arrasto dos portadores de carga, que ocorre devido a transferência de momento durante o espalhamento dos portadores de corrente. Em geral, se o portador for um elétron a força de arrasto deles terá direção oposta à força eletrostática [11].

Portanto, a força motriz atuando em um único íon é dada por

$$\vec{F} = Z^* q \vec{E}, \quad (2)$$

no qual q é a carga elementar e \vec{E} é o vetor campo elétrico aplicado. A carga efetiva Z^* é escrita como:

$$Z^* = Z_{el} + Z_w, \quad (3)$$

com Z_{el} e Z_w sendo a contribuição eletrostática e de arrasto, respectivamente. Além disso,

o módulo da força de arrasto é o momento total transferido por unidade de tempo, dado por:

$$F_w = \pm n\sigma_d v q E \tau = \pm q E n \lambda \sigma_d, \quad (4)$$

com + sendo as lacunas ou buracos e – a contribuição dos elétrons, n a concentração de portadores de corrente, v a velocidade dos portadores de carga, λ o caminho livre médio de um portador de corrente, σ_d a seção de choque de espalhamento de um átomo móvel.

Portanto, usando as Eqs.(2), (3) e (4), é possível chegar em

$$Z_w = \pm \lambda \sigma_d = \pm \frac{n \rho_d}{N_d \rho}, \quad (5)$$

sendo ρ a resistividade convencional, N_d a concentração de átomos móveis e ρ_d a resistividade parcial apenas aos átomos móveis [11]. Já essas resistividades são definidas como:

$$\rho_d = \frac{m}{n q^2 \tau_d} = \frac{m N_d \sigma_d v}{n q^2}, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{m}{n q^2 \tau} = \frac{m v}{n q^2 \lambda}, \quad (7)$$

com m sendo a massa de um portador de corrente, τ_d o tempo médio livre devido apenas ao espalhamento por átomos móveis, τ sendo o tempo médio livre entre os eventos de espalhamento e v a velocidade microscópica média do portador de carga. O módulo do momento transferido de um portador de corrente para um átomo móvel em um único evento de espalhamento é:

$$\Delta p = \pm q E \tau = \pm \frac{q E \lambda}{v}. \quad (8)$$

Assim, realizando uma estimativa numérica do alumínio para fins comparativos de contribuição da carga efetiva para a EM, similar à [11], obtem-se os valores de $\rho = 2,82 \cdot 10^{-8} \Omega.m$, $n \approx 6,02 \text{ eletrons}/m^3$ e a energia de fermi $E_f \approx 11,7 \text{ eV}$. E por fim, chega-se em $v = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2E_f}{m}} \approx 2,03 \cdot 10^6 \text{ m/s}$, $n\lambda \approx 4,68 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-2}$ e $Z_w \approx -21,6$. Como $Z_{el} \approx 1$, concluiu-se que a contribuição da força de arrasto é muito maior do que a eletrostática para o processo de EM.

2.2 A difusão atômica e a densidade de corrente

A difusão atômica refere-se ao movimento induzido dos átomos dentro de um material, impulsionado por gradientes de concentração, tensão mecânica, temperatura ou campo elétrico. No contexto da eletromigração, esse movimento é induzido pela interação das partículas carregadas com o campo elétrico aplicado, resultando no deslocamento direcionado dos átomos ou íons dentro do material condutor [12]. A seguir, apresenta-se a equação que modela esse comportamento para partículas ionizadas:

$$\vec{v} = \beta \vec{F}, \quad (9)$$

com β sendo a mobilidade, \vec{v} o vetor de velocidade das vacâncias e \vec{F} o vetor da força motriz do processo. Segundo *Nernst-Einstein*:

$$\beta = \frac{D}{k_B T}, \quad (10)$$

A Eq. (10) desempenha um papel crucial na compreensão da influência da temperatura na EM. É importante lembrar que, no fluxo de vacâncias, há a presença de um gradiente térmico, o que indica que variações de temperatura podem induzir o movimento das vacâncias dentro do material. Além disso, a difusividade atômica (D) aumenta com a temperatura, conforme descrito pela relação de *Arrhenius*, dada por:

$$D = D_0 \exp \frac{-E_a}{k_B T}, \quad (11)$$

com D_0 sendo o coeficiente de difusão intrínseco e E_a a energia de ativação. Isso significa que a temperatura atua como um fator essencial para a mobilidade dos átomos, fornecendo a energia necessária para que os íons superem a barreira de potencial que os mantém presos em seus sítios na rede cristalina. Note também que a difusividade D multiplica todos os demais termos no fluxo de vacâncias na Eq. (1), evidenciando seu papel determinante na intensidade do processo de migração, incluindo a EM.

A relação entre o fluxo atômico induzido por corrente j , definido como o número de partículas que passam através de uma unidade de área, e a velocidade de difusão é dada por:

$$\vec{j} = C \vec{v}. \quad (12)$$

Então, substituindo as Eq. (9) e (10 em (12) ontêm se o fluxo como sendo:

$$\vec{j} = \frac{CD\vec{F}}{k_B T}. \quad (13)$$

Por fim, com a Eq.(2) e sabendo que $\vec{E} = \rho\vec{J}$, encontramos que o fluxo de átomos devido a uma corrente elétrica é:

$$\vec{j} = \frac{CD}{k_B T} Z^* q \rho \vec{J}. \quad (14)$$

Como os átomos só podem se deslocar se tiver uma vacância na vizinhança, então é necessário haver uma diferença de concentração de vacâncias e átomos para se ter uma diferença de fluxo para que ocorra a EM [12]. Dessa forma, o fluxo de átomos pode ser escrita como:

$$\vec{j} = -D \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{DCZ^*}{k_B T} q \rho \vec{J}. \quad (15)$$

Dessa forma, analisamos as contribuições da força motriz da eletromigração, deduzimos o fluxo de átomos envolvido no processo e avaliamos a influência da temperatura para que a EM ocorra. Observamos que a carga efetiva de arrasto é o principal fator determinante da EM e que a densidade do fluxo atômico está diretamente relacionada à densidade de corrente elétrica e aumenta com a temperatura. Isso indica que, quanto maior for J , maior será a probabilidade de início do processo de EM. Além disso, temperaturas mais altas aumentam a intensidade das vibrações dos átomos na rede cristalina, facilitando a migração atômica e, conseqüentemente, aumentando o fluxo atômico.

2.3 Processo de EM do alumínio e do bismuto

Nos últimos anos, resistores e interconexões de filmes finos tornaram-se amplamente utilizados em circuitos integrados. O alumínio se destaca como um dos materiais mais empregados devido à sua fácil evaporação e compatibilidade com outros processos de fabricação. O alumínio foi escolhido para iniciar este estudo devido à extensa literatura disponível sobre a EM nesse material [1, 2, 3, 5, 4, 12, 13]. Diversos trabalhos investigam a faixa de temperatura mais adequada para a ocorrência do fenômeno, além da densidade de corrente elétrica necessária para controlar o fluxo atômico e, conseqüentemente, o processo

de EM. Essas informações fornecem uma base sólida para compreender os mecanismos envolvidos e estabelecer parâmetros experimentais mais precisos.

No entanto, ao contrário do alumínio, o bismuto, um material com propriedades de isolante topológico e grande interesse em aplicações na spintrônica, ainda carece de estudos aprofundados sobre a EM [9, 10]. Na Ref. [9] foram estudadas nanoestruturas de bismuto, com largura inicial em torno de 150 nm, foram eletromigradas com êxito à temperatura ambiente e em condições de alto vácuo, por meio da aplicação controlada de rampas de voltagem e do ajuste preciso de sua condutância. Já em [10] foram realizadas medições de eletromigração em função da temperatura (de 300 K até 450 K) com baixas pressões (10^{-7} Torr) usando o protocolo de *feedback* e aplicando rampas de voltagem para controlar o movimento dos átomos. Essa lacuna na literatura representa um desafio significativo para a definição de parâmetros fundamentais, como a faixa de temperatura ideal e os protocolos de aplicação de corrente elétrica, essenciais para a investigação do controle da EM nesse material utilizando a eletropulsção.

3 Materias e métodos

Nesta seção os materiais e métodos utilizados serão apresentados em três partes: fabricação dos dispositivos, protocolo de eletropulsção e uma breve descrição do MEV usado para analisar os dispositivos eletropulsados.

3.1 Fabricação dos dispositivos

Essa subseção foi dividida em duas partes: layout dos dispositivos de micropontes e processos de fabricação.

3.1.1 Layout

Em cada substrato de Si/SiO₂ há um total de 15 dispositivos. O layout dos dispositivos de Al e Bi estudados é o mesmo e está apresentado na Fig. 4(a). No meio do dispositivo há uma ponte com 2 μm de largura e 4 μm de comprimento, com uma ponte de 4 μm

de largura e $4 \mu\text{m}$ de comprimento de cada lado dessa constricção central. Como a ponte central possui uma área menor, há um aumento da densidade de corrente devido ao efeito de aglomeração de corrente, que resulta em uma maior probabilidade do processo de EM ocorrer nessa região. Ao redor das pontes micrométricas há vários *pads* para a confecção de contatos elétricos, sendo que as posições dos contatos de corrente e tensão são mostradas na Fig. 4(b). Nessa configuração, a queda de tensão na ponte central é monitorada e a corrente passa ao longo de todo o dispositivo.

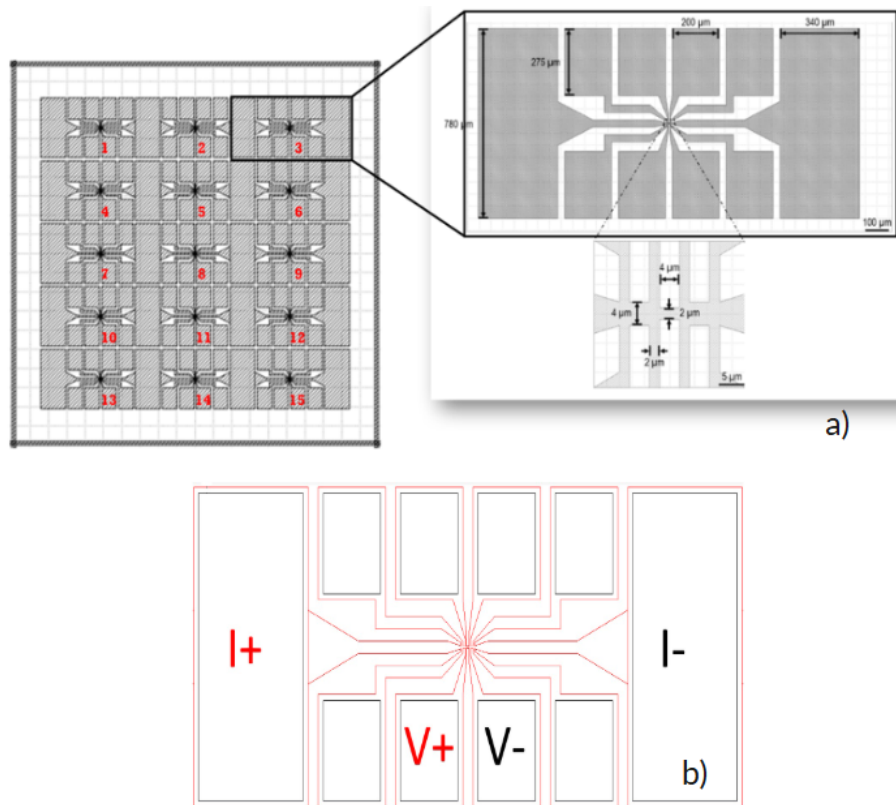


Figura 4: Na imagem (a) há a ilustração da amostra enumerando os seus 15 dispositivos destacando-se também as dimensões em μm dos *pads* e da constricção nos quais foram feitos os contatos. Já em (b) temos as conexões elétricas esquematizadas dos dispositivos, indicando onde se aplicou a corrente elétrica ($I+$ e $I-$) e os pontos de leitura de voltagem ($V+$ e $V-$).

3.1.2 Fabricação

As amostras de Al e Bi foram fornecidas e fabricadas pelo Prof. Alejandro Silhanek da Universidade de Liège - Bélgica através do método de Litografia por Feixe de Elétrons (EBL). Inicialmente, um substrato de Si/SiO₂ é revestido com camadas independentes de PMMA e coPMMA usando um *spin coating*. Em seguida, realiza-se um pré-aquecimento a 180°C para evaporar o solvente e fixar o resiste polimérico. A Fig. 5(a) ilustra esquematicamente o processo de deposição do duplo resiste [5].

Depois disso, o substrato coberto com PMMA/coPMMA é colocado na câmara da plataforma de EBL. O feixe de elétrons, devidamente regulado, expõe o resiste no layout mostrado na Fig. 4, resultando em uma mudança na solubilidade das regiões irradiadas (mudança de cor na Fig. 5(b)), devido à quebra das cadeias poliméricas.

Na etapa seguinte, as regiões expostas do resiste são removidas (resiste positivo) por imersão em metilisobutilcetona (MIBK) diluída em álcool isopropílico (IPA) [5]. Essa fase de revelação é ilustrada na Fig. 5(c).

A máscara de resiste obtida é então colocada em uma câmara de evaporação para a metalização. O filme fino de Al com 30 nm de espessura é depositado por feixe de elétrons (*e-beam deposition*), em uma câmara previamente evacuada a 10⁻⁸ mbar (pressão de base), com uma taxa de deposição de 1 Å/s sob uma pressão de trabalho de Ar de 5,3 mbar. O resiste restante e as camadas de Al que o cobrem são removidos, deixando apenas as partes metálicas que estavam em contato direto com o substrato. Essa última etapa, conhecida como *lift-off*, é ilustrada na Fig. 5(d), resultando no dispositivo desejado.

Entretanto, uma nova etapa de litografia foi realizada para a fabricação dos *pads* de contato de Al representado pela Fig. (6) tanto nos dispositivos de alumínio quanto nos de bismuto. Nesse caso, o fotorresiste positivo (AZ MIR 701) foi depositado por *spin-coating* a 3000 rpm e curado a 100 °C por 60 s. Antes disso, o *wafer* foi tratado com Hexametildisilazano (HMDS) em baixa pressão para melhorar a aderência do fotorresiste. A camada de fotorresiste foi exposta à luz ultravioleta por 20 s, após ser colocada em contato com a fotomáscara contendo o padrão das trilhas de contato. Em seguida, o fotorresiste e o *wafer* foram aquecidos a 110 °C por 60 s. O *wafer* foi então desenvolvido

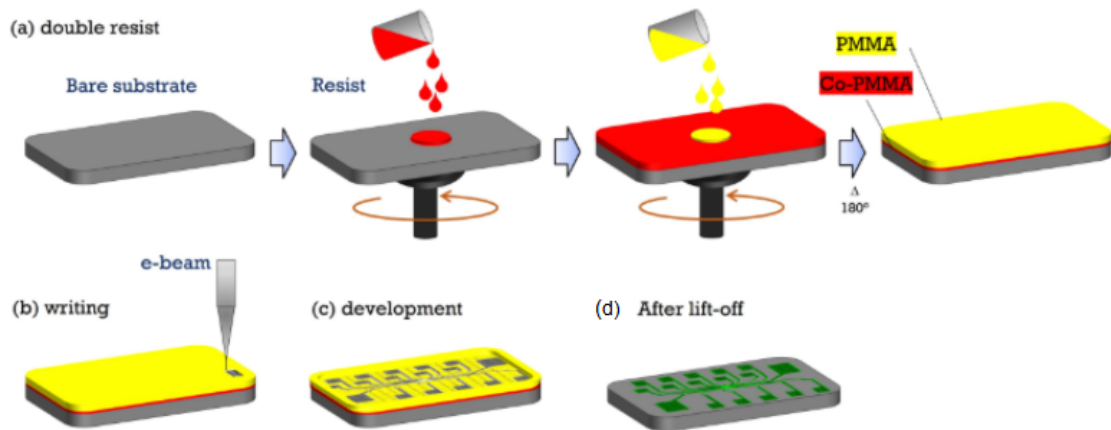


Figura 5: Processo de litografia por feixe de elétrons: (a) temos uma camada dupla de resiste depositado sobre o substrato por *spin coating*. (b) Um feixe de elétrons é utilizado para escrever ponto a ponto as estruturas desejadas nas camadas de resiste, induzindo mudanças nas propriedades físicas da área exposta. (c) Em seguida, a amostra é colocada em uma solução química para remover o resiste exposto (processo de revelação). (d) Por fim, o material em excesso é removido quimicamente com a remoção do resiste (*lift-off*). Após o *lift-off*, obtém-se o filme final com o padrão desejado. Adaptado de [5].

manualmente, imergindo-o em solução reveladora (AZ 726 MIF) por 20 s, seguido de enxágue com água deionizada (DIW) e secagem com jato de N_2 . Após a litografia, uma camada de alumínio de 200 nm foi depositada sobre o fotorresiste usando feixe de elétrons, com taxa de deposição de 1 \AA/s e pressão de câmara de $1,8 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$. Por fim, as amostras foram imersas em 50 ml de N-metil-2-pirrolidona (NMP) a $160 \text{ }^\circ\text{C}$ por 10 min três vezes, enxaguadas com IPA e secas com jato de N_2 .

3.2 Protocolo de Eletropulsção

Na última década, a percepção negativa da EM mudou à medida que a comunidade científica passou a compreender melhor os mecanismos físicos envolvidos e a controlá-los. Hoje, a EM controlada é vista como uma ferramenta promissora para modificar propriedades de materiais em escalas micro e nanométricas com resolução atômica. Para isso, é necessário um protocolo rigoroso com um algoritmo de controle que indique quando

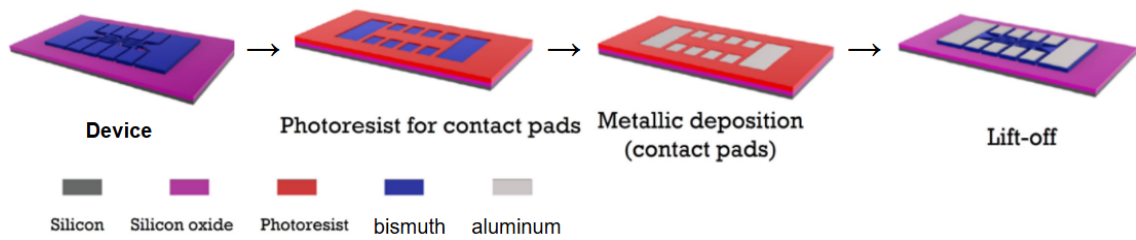


Figura 6: Processo para a fabricação dos *pads* de Al nos dispositivos de Bi. Adaptado de [5].

a EM pode causar dano irreversível ao dispositivo [2].

A eletropulsção é um protocolo que permite realizar EM moderada em diferentes dispositivos. Ela consiste na aplicação de pulsos de corrente elétrica de corrente com amplitudes linearmente crescentes, durante curtos intervalos de tempo (na ordem de 1 s) [5, 14]. A resistência da amostra é medida durante os pulsos, sendo chamada de R_{max} , e também entre os pulsos, chamada de R_{min} , sendo a última obtida pela média da resistência para a aplicação de correntes em polaridades opostas e de baixíssimas intensidades (usualmente $100 \mu A$), por tempo superior à duração dos pulsos (usualmente 20 s), como ilustrado na Fig. 7. É importante destacar que R_{max} captura o efeito Joule, enquanto R_{min} não. Isso ocorre porque, durante a aplicação do pulso de corrente, a resistência da amostra aumenta devido ao aquecimento gerado pela dissipação de potência elétrica. Esse aumento de temperatura local, por sua vez, afeta a resistividade do material, possibilitando identificar esse efeito. Por outro lado, quando o pulso elétrico é interrompido, a amostra passa por um processo de resfriamento, reduzindo sua temperatura e, conseqüentemente, redefinindo sua resistência elétrica. Nesse estágio, o efeito Joule se torna menos significativo, resultando em uma leitura de R_{min} livre de efeitos de aquecimento.

O objetivo de utilizar esse protocolo é induzir uma eletromigração moderada e evitar que rupturas geradas pelo crescimento de vazios ocorram, monitorando o aumento da resistência até um valor de corte ou limite. Como a EM depende também da temperatura, um aumento na resistência do metal leva a um maior aquecimento por efeito Joule, que promove um aumento na difusão, e também resulta no aumento da densidade de corrente

local pela diminuição da área devido aos poros, podendo levar ao surgimento de novos vazios e até mesmo ao rompimento do material, caso uma resistência de corte não seja previamente estabelecida.

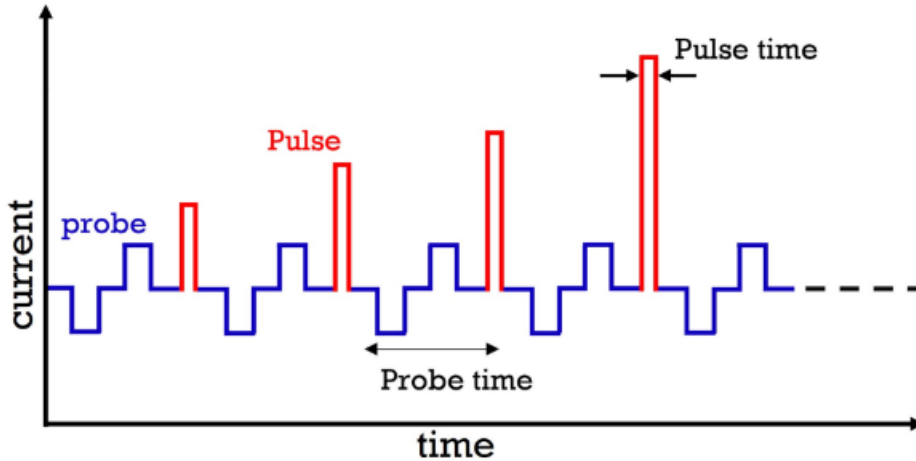


Figura 7: Pulsos de corrente elétrica aplicada em função do tempo representando o protocolo de eletropulsção para realizar eletromigração de maneira controlada.

Para os dispositivos de Al e Bi, a taxa de aumento da corrente foi de 0,1 mA/pulso. O valor da resistência de corte foi estabelecido quando R_{min} aumentava em 5% do seu valor inicial. Em geral, antes do rompimento, o dispositivo de Al poderia ser eletromigrado por 4 vezes. Já no Bi, esse controle fino ainda não foi estabelecido.

3.2.1 Probe Station

Os primeiros experimentos utilizando o protocolo de eletropulsção com o Al e o Bi foram realizados na *Probe Station*, uma estação experimental dedicada à eletromigração, contruída no Grupo de Supercondutividade e Magnetismo (GSM), conforme ilustrado na Fig. 8. Essa estação de testes é composta por quatro agulhas de contato, cuidadosamente posicionadas sobre os *pads* dos dispositivos de Al e Bi. Essas agulhas desempenham um papel fundamental no experimento, pois são conectadas simultaneamente a uma fonte (Sourceter Keithley 2461) que atua tanto na aplicação de corrente elétrica quanto na leitura de tensão, permitindo a realização das medições elétricas de forma precisa, em

condições atmosféricas e em temperatura ambiente.

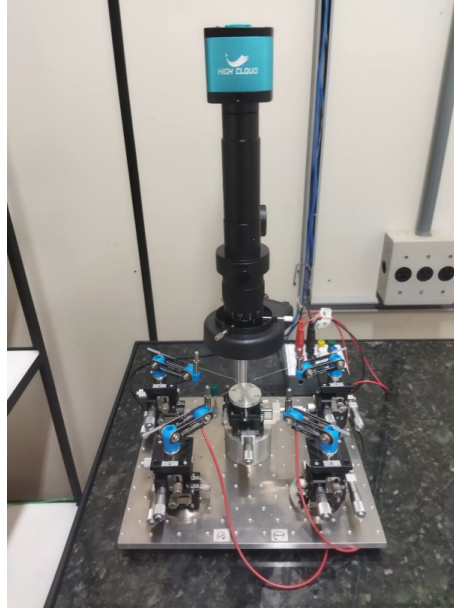


Figura 8: Estação de prova (*Probe Station*) construída no GSM para a realização da eletromigração pulsada, com a câmera posicionada para localizar a amostra e as quatro agulhas para contatos elétricos.

A eletropulsção foi conduzida por meio de um software programado especificamente para esse experimento, que opera utilizando a técnica de quatro pontas. Nesse método, uma corrente elétrica é aplicada entre duas das agulhas, enquanto a diferença de potencial (tensão elétrica) é medida pelas outras duas agulhas restantes. Esse procedimento garante medições mais confiáveis, minimizando a influência da resistência de contato entre os eletrodos e a amostra.

3.2.2 Criostato Oxford MicrostatHe

A estação de Imageamento Magneto-ótico disponível no Laboratório do GSM possui um criostato de hélio líquido que também foi utilizado para realizar o processo de eletropulsção nas amostras de bismuto, devido à sua capacidade de operar sob condições altamente controladas de atmosfera e temperatura.

Dada a importância da temperatura na EM e a possibilidade de oxidação pela exposição ao ambiente, testes em baixas pressões ($\sim 10^{-6}$ Torr) e temperatura de 350 K

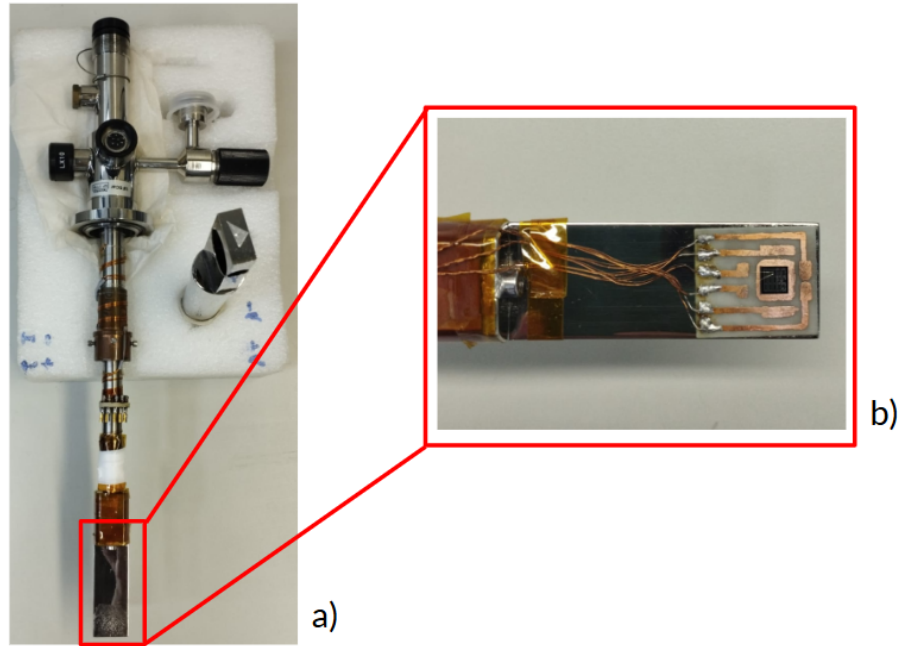


Figura 9: (a) Dedo-frio do criostato Oxford MicroStatHe. No detalhe em (b), montagem do substrato com 15 dispositivos sobre a placa PCB conectada à *sourcemeter*. Os contatos elétricos da placa de circuito com as trilhas de cobre foram conectados por meio de fios de ouro com o dispositivo de bismuto.

foram realizados na tentativa de aumentar o controle sobre o processo da EM em Bi. No presente experimento, essas condições foram ajustadas para baixas pressões e 350 K (aproximadamente $77\text{ }^\circ\text{C}$), proporcionando um cenário adequado para estudar os efeitos da eletromigração no bismuto e para evitar sua oxidação, conforme descrito na literatura [9, 10].

A Fig. 9 apresenta o dedo frio do criostato e no detalhe é possível ver a montagem da amostra realizada com uma placa de circuito impresso de cobre conectadas aos fios ligados à fonte de corrente e ao nanovoltímetro.

3.3 Wire Bonder

Os contatos elétricos entre a amostra e a placa de circuito com as trilhas de cobre para realização da EM no criostato foram cuidadosamente instalados utilizando o equipamento Wire Bonder modelo TPT HB05 (Fig. 10), disponível no GSM. Para a realização

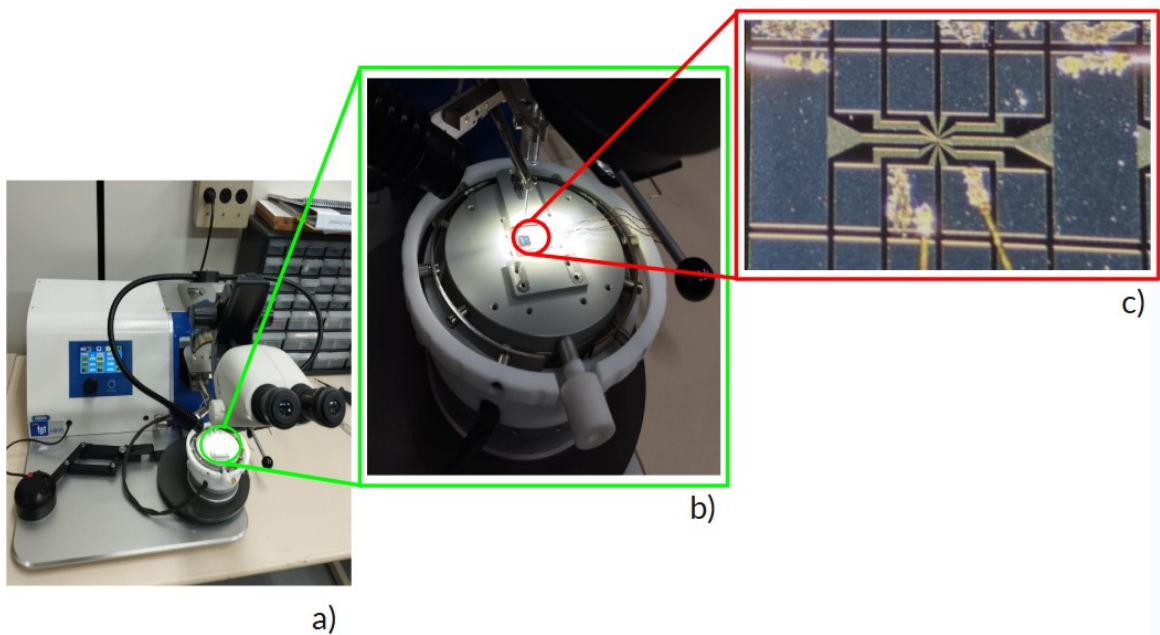


Figura 10: (a) Visão geral do Wire Bonder. (b) Região onde a amostra de bismuto é posicionada para a realização da conexão elétrica. Nesse ponto, a agulha do equipamento, operando em frequência ultrassônica, promove a fixação do fio condutor sobre os pads da amostra, assegurando um contato confiável. (c) Imagem obtida por microscopia óptica, na qual a amostra de bismuto já conectada aos fios de ouro pode ser visualizada em detalhes, evidenciando a qualidade da ligação elétrica estabelecida.

dessa etapa, foi empregado o modo de ligação conhecido como *wedge bonding*, no qual o equipamento opera excitando uma agulha por meio de vibrações ultrassônicas com uma determinada frequência [15, 16]. Durante esse processo, um fio metálico é pressionado contra a superfície do material na região de contato, garantindo a fixação adequada da conexão elétrica. Além disso, usou-se uma temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ para que os fios de ouro se fixassem no cobre da placa de circuito e nos pads de alumínio do dispositivo de bismuto.

Nos experimentos de eletropulsção conduzidos neste trabalho, foram utilizados fios de ouro com um diâmetro de $25\text{ }\mu\text{m}$, escolhidos por suas propriedades de condução e compatibilidade com a técnica de ligação, visto que antes disso foram realizados vários testes iniciais com fios de alumínio do mesmo diâmetro mas não foi obtido sucesso. A

conexão formada por esse processo resulta em uma área de contato tipicamente da ordem de $50 \mu m^2$, o que é essencial para assegurar uma resistência elétrica reduzida no circuito. Essa característica é fundamental para garantir medições elétricas precisas e minimizar perdas associadas à dissipação de energia [16].

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens de MEV foram tomadas no Microscópio FEI Magellan 400 L, disponível no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar. Nesse equipamento existe um tipo de detector, denominado *Everhart-Thornley Detector* (ETD) que é usado para captar elétrons secundários (SE) emitidos da superfície da amostra. Normalmente, esse detector opera com uma grade coletora que aplica um potencial positivo para atrair os elétrons secundários e direcioná-los para um cintilador onde são convertidos em um sinal óptico amplificado [17].

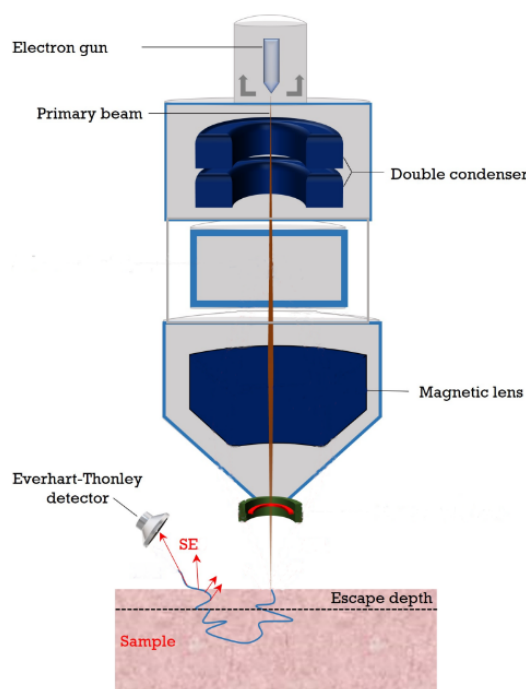


Figura 11: Representação do MEV com o detector ETD ilustrado no canto inferior esquerdo.

Esse microscópio apresenta dois modos distintos, relacionados a focalização do feixe de

elétrons na amostra: o modo *immersion*, em que é aplicado um campo magnético para aumento da resolução, e o modo *field-free*, no qual esse campo magnético é desligado. Para a investigação das micropontes de bismuto e alumínio, com o objetivo de analisar os dispositivos inicialmente virgens e, posteriormente, as modificações estruturais provocadas pela eletropulsão nas micropontes, foi utilizado o ETD, ilustrado na Fig. 11, no modo *field-free*, evitando o carregamento excessivo nos dispositivos. Com a mesma finalidade, foram utilizadas uma distância de trabalho de 2 mm e uma tensão de aceleração dos elétrons de 2 keV. O MEV é essencial para a análise detalhada da microestrutura das amostras, possibilitando uma avaliação mais precisa das mudanças causadas pela eletropulsão.

4 Resultados e Discussões

Para dar início as discussões dos resultados é importante discutir o comportamento das propriedades elétricas do bismuto em relação à temperatura. O dispositivo de bismuto apresentou desafios consideráveis no controle de sua EM devido a ser um semimetal com comportamento semicondutor [18].

A Fig. 12 apresenta as curvas de resistividade elétrica em função da temperatura dos dois materiais estudados neste trabalho. Na Fig. 12(a), observa-se que o comportamento do Bi é característico de um semicondutor, isto é, os elétrons são movidos da banda de valência para a banda de condução devido à temperatura. Como consequência, a resistividade elétrica do material diminui com o aumento da temperatura.

Por outro lado, a Fig. 12(b) exibe a curva $\rho(T)$ do Al, que apresenta um comportamento metálico. Essa característica decorre do fato de que, em metais, as bandas de valência e de condução se sobrepõem. Assim, o aumento da resistividade ocorre devido a um aumento nas colisões entre os elétrons e os íons da rede, pois a vibração desses íons cresce com o aumento da temperatura, resultando em um aumento da resistividade elétrica.

Esses comportamentos distintos destacam a influência da temperatura em cada material, uma vez que ela afeta diretamente a resistência elétrica de cada dispositivo submetido a pulsos elétricos. Nesse sentido, neste trabalho foram comparados os efeitos da EM no

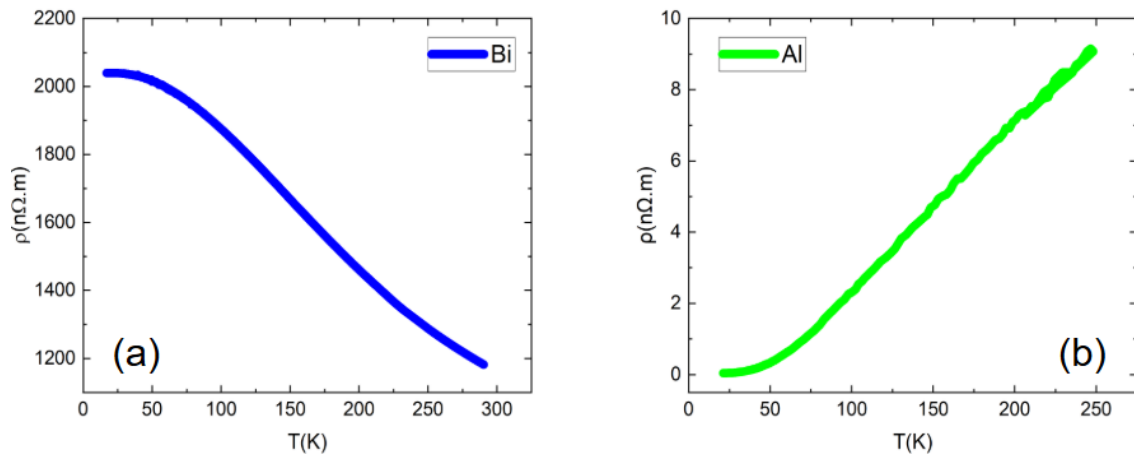


Figura 12: Curva de resistividade em função da temperatura ($\rho(T)$) é apresentado da seguinte forma: no painel (a), de um dos dispositivos de bismuto estudado, que demonstra seu comportamento semicondutor. No painel (b), é apresentada uma curva de $\rho(T)$ de Al exibindo um comportamento metálico, com a resistividade aumentando conforme a temperatura aumenta [13].

alumínio e no bismuto, a fim de elucidar a existência ou não de controle no processo. A pesquisa sobre EM em semicondutores não é tão extensa como nos metais [11] já que vários mecanismos de espalhamento se tornam importantes nesse caso.

4.1 Eletropulsção no Alumínio

Dentre os materiais utilizados para a fabricação de resistores e interconexões, o alumínio tem se destacado como uma das escolhas preferidas [13]. Isso se deve, principalmente, à sua baixa resistividade elétrica, que permite uma eficiente condução da corrente, a sua baixa temperatura de fusão, que torna o processo mais barato, e à sua excelente compatibilidade com os processos de fabricação convencionais da indústria. Além disso, o alumínio apresenta uma facilidade significativa de deposição por evaporação térmica ou por feixe de elétrons, técnicas amplamente utilizadas na fabricação de filmes finos.

Outro fator que contribui para a popularidade do alumínio é sua boa aderência a substratos comuns, como o dióxido de silício (SiO_2), garantindo uma deposição uniforme e uma interface estável entre as camadas do circuito [13]. Além disso, sua reatividade con-

trolada facilita o processo de formação de contatos metálicos confiáveis sem comprometer a integridade estrutural dos componentes.

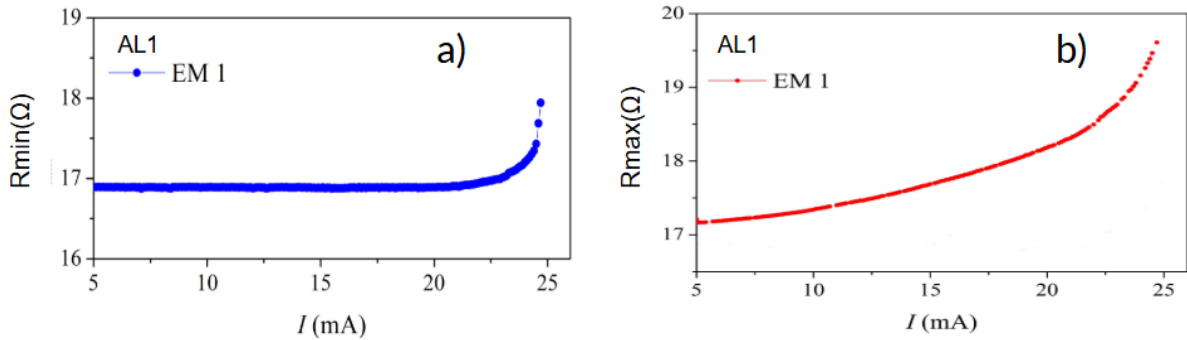


Figura 13: Curvas de R_{min} do dispositivo AL1 em (a) e R_{max} em (b) em função da corrente dos pulsos, passado por apenas 1 eletropulsção (EM1).

Como a eletromigração em alumínio tem sido extensivamente estudada, iniciaremos estudando esse material padrão para compreender os efeitos da eletropulsção, empregando o que consideramos o protocolo padrão: pulso inicial de 0,1 mA, duração dos pulsos de 1 s, corrente de prova de 0,1 mA e tempo de prova de 20 s. A Fig. 13 apresenta curvas da primeira rodada de EM (EM1) de um dispositivo chamado de AL1, com um critério de corte de 5% no aumento de R_{min} . O painel (a) mostra a curva $R_{min}(I)$, que apresenta um valor constante de resistência de 17 Ω até a corrente de aproximadamente 21 mA. Já o painel (b) apresenta a curva $R_{max}(I)$ na qual é possível verificar um aumento quadrático da resistência devido ao efeito Joule.

O fato de R_{min} ser constante em (a) indica que a EM não começa imediatamente com o aumento da corrente de pulso I , isto é, a curva ainda é reversível. Inicialmente, a resistência se mantém estável porque o material ainda não atingiu as condições críticas para que os átomos comecem a se mover de maneira significativa sob a influência da corrente elétrica.

Conforme a corrente aplicada aumenta, a densidade de corrente na região de constrição também cresce, elevando a temperatura local devido ao efeito Joule. Esse aquecimento progressivo aumenta a probabilidade de migração atômica e facilita o deslocamento dos átomos, levando ao início do regime de EM. Quando a corrente atinge amplitudes ele-

vadas, cerca de 24 mA, ocorre um aumento abrupto da resistência, o que sinaliza que modificações irreversíveis estão acontecendo no dispositivo. Esse comportamento evidencia que a amostra entrou efetivamente no regime de EM, onde o transporte de massa induzido pela corrente elétrica passa a afetar significativamente sua estrutura e propriedades elétricas.

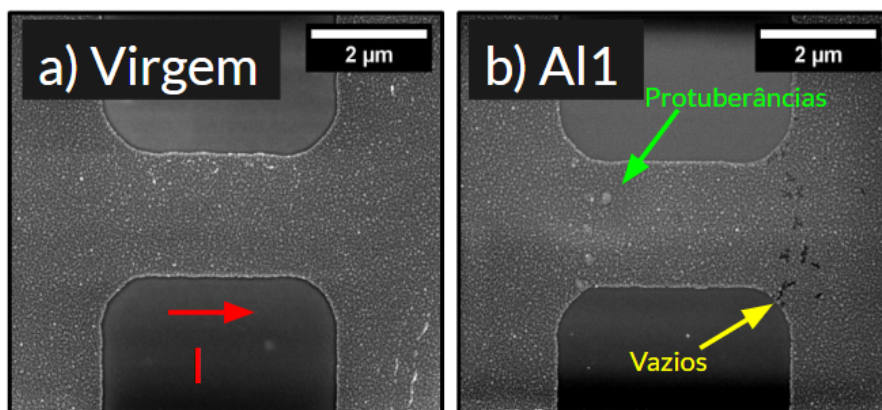


Figura 14: (a) Imagem usando MEV de um dispositivo qualquer usado sem realizar a eletropulsção, ou seja, virgem, mostrando a polaridade de aplicação da corrente. (b) Imagem de MEV do dispositivo Al1 após a primeira rodada de eletropulsção (EM1), evidenciando a formação de *voids* e *hillocks*.

Após EM1 do dispositivo Al1, realizou-se o imageamento via MEV a fim de visualizar as mudanças na morfologia da amostra devido à EM. Na Fig. 14(a) tem-se a imagem de MEV antes da eletropulsção evidenciando o posicionamento original dos grãos na constricção. Já em (b) tem-se a imagem após EM1 ocorrer, mostrando a formação de *voids* e *hillocks* gerados pela movimentação atômica e de vacâncias. Essas formações são coerentes com a polaridade da corrente elétrica aplicada (sentido convencional), uma vez que, nesse cenário, a força resultante do deslocamento atômico atua no sentido da direita para a esquerda, resultando na diminuição da área do dispositivo na sua extremidade direita o que leva a um aumento da resistência. Também, é possível ver que apenas um ciclo de eletropulsção não foi capaz de gerar rompimento no dispositivo.

Depois disso, foram realizados dois ciclos de eletropulsção (EM2) em outro dispositivo, chamado de Al2, e três ciclos de eletropulsção (EM3) para outro dispositivo (Al3).

A Fig. 15(a) mostra a curva de R_{min} em função de I para de EM2 de Al2. Já em (b) é representado a curva de R_{min} por I com EM3 evidenciando o surgimento da falha devido a resistência de Al3 tender ao infinito.

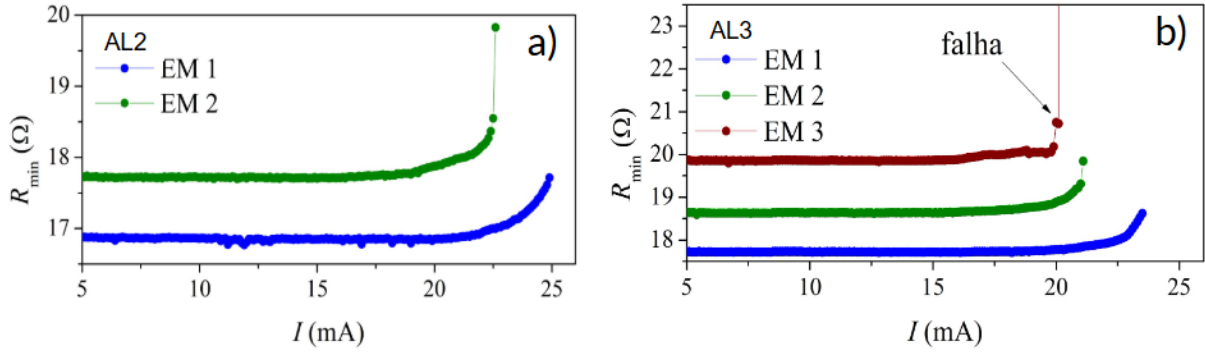


Figura 15: Curvas de R_{min} em função da corrente elétrica em (a) do Al2 com EM2 e em (b) do Al3 com EM3.

Observa-se que, a cada novo ciclo de eletropulsção, o mesmo dispositivo inicia com a mesma resistência que apresentava ao final do ciclo anterior. Isso indica que as modificações estruturais acumuladas durante cada ciclo de eletropulsção são preservadas, influenciando o comportamento do material no ciclo seguinte. Na Figura 15(b), por exemplo, nota-se que ao final do primeiro ciclo de AL2, a resistência de corte atinge aproximadamente 18,2 Ω . Esse mesmo valor é registrado no início do segundo ciclo para Al2, demonstrando que as alterações induzidas são permanentes. O mesmo padrão se repete para Al3, até que a resistência atinja um limite crítico e o dispositivo falhe evidenciando um rompimento do material. Esse comportamento sugere que os efeitos acumulativos da EM, como a formação de *voids* e *hillocks* persistem de um ciclo para o outro, influenciando diretamente a resistência do material e, conseqüentemente, o tempo de vida útil do dispositivo.

Após essa análise, é possível ver que na Fig. 16(a) há mais *voids* e *hillocks* devido EM2. Em (b), vemos que a EM3 foi ainda maior a ponto de romper a contração de Al3 devido às maiores quantidades de falhas acumuladas. Portanto, notou-se que para os dispositivos de Al foi possível controlar a EM utilizando ciclos de eletropulsção conforme os resultados

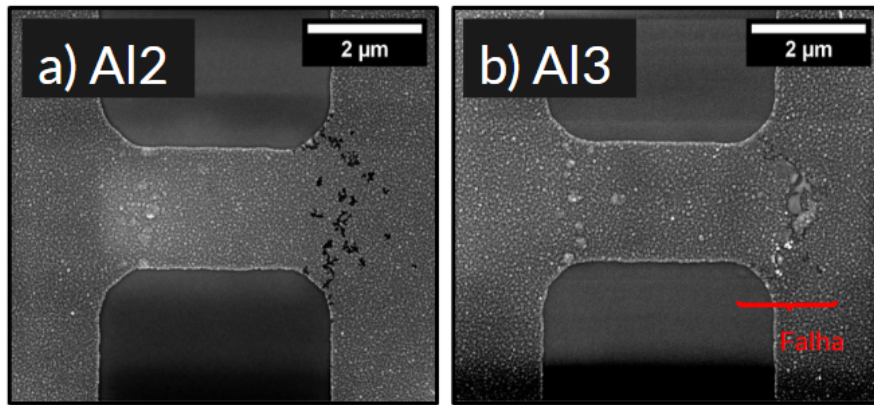


Figura 16: (a) Imagem de MEV de Al2 usado com EM2 realizado. (b) Imagem de MEV de Al3 após EM3, mostrando a formação do rompimento gerada pela EM na constrição do material.

obtidos em estudos anteriores sobre a EM em Al [5]. Além disso, os dados experimentais confirmam a eficácia e a confiabilidade da estação de prova utilizada, demonstrando sua capacidade de reproduzir e validar fenômenos associados à EM em filmes finos metálicos.

4.2 Eletropulsção no Bismuto

Para o bismuto, realizou-se a eletropulsção de cinco dispositivos diferentes: Bi1, Bi2, Bi3, Bi4 e Bi5. Esses experimentos foram realizados tanto na *Probe Station* quanto no criostato, com as principais condições e parâmetros de eletromigração descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de EM dos dispositivos de bismuto. São apresentadas as condições de temperatura e pressão empregadas, além de parâmetros do protocolo de eletropulsção, como duração dos pulsos, tempo e corrente de prova.

| Dispositivos | Temperatura (K) | Pressão | Duração dos pulsos (s) | Tempo de prova (s) | Corrente de prova (mA) |
|--------------|-----------------|-------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| Bi1 | 300 | atmosférica | 5 | 5 | 0.1 |
| Bi2 | 300 | atmosférica | 1 | 5 | 1.0 |
| Bi3 | 350 | vácuo | 1 | 20 | 0.1 |
| Bi4 | 350 | vácuo | 1 | 20 | 0.1 |
| Bi5 | 300 | atmosférica | 1 | 20 | 0.1 |

O primeiro teste de eletromigração no bismuto foi realizado no dispositivo Bi1. Nesse primeiro momento, dado que a literatura [9, 10] aponta a necessidade de altas temperaturas para viabilizar a eletromigração e considerando a ausência de um sistema de controle ou aquecimento da amostra na probestation, optou-se por gerar aquecimento local ajustando os parâmetros do protocolo de eletromigração. Assim, no experimento inicial, aplicamos pulsos de corrente com duração de 5 segundos, cinco vezes maior que a duração padrão empregada na eletromigração do alumínio.

As curvas de R_{min} e R_{max} obtidas nesse experimento são apresentadas na Fig. 17(a). Observa-se uma queda abrupta da resistência elétrica do dispositivo, em ambas as curvas, para correntes em torno de 3,3 mA. No entanto, a região que antecede essa queda exibe comportamentos distintos. Inicialmente, há um valor constante de R_{min} (878,7 Ω) e, posteriormente, um aumento gradual da resistência, seguindo uma tendência semelhante à observada no alumínio, mas sem ultrapassar o limite de 5% estipulado como critério de corte. Já para R_{max} , nota-se uma diminuição acentuada da resistência, um comportamento inesperado para um sistema metálico sujeito ao aquecimento por efeito Joule. Esse resultado reforça o caráter semicondutor do bismuto, sugerindo que o aumento da temperatura local pode ter elevado a densidade de portadores de carga disponível na banda de condução, resultando em uma redução da resistência elétrica.

As Fig. 17(b) e 17(c) apresentam imagens de MEV obtidas antes e depois da eletromigração, respectivamente. Comparando essas figuras, observa-se que o processo de eletromigração resultou em danos severos: ao longo das três constrições, surgiram caminhos semelhantes a sulcos erosivos, indicando uma remoção agressiva de material do dispositivo. Além disso, na região do substrato, entre as trilhas utilizadas para a leitura de tensão, nota-se a presença de material aparentemente conectando essas trilhas (destacado em amarelo na Fig. 17(c)). A movimentação desse material, dada sua morfologia, pode estar associada a um aumento excessivo de temperatura, levando à fusão do bismuto. A percolação do bismuto entre as trilhas pode explicar a queda da resistência elétrica, uma vez que, nesse cenário, a leitura de tensão no dispositivo é comprometida.

No dispositivo Bi2, foi adotada uma estratégia diferente: em vez de aumentar a duração dos pulsos de corrente, optamos por elevar a corrente de prova durante a medição

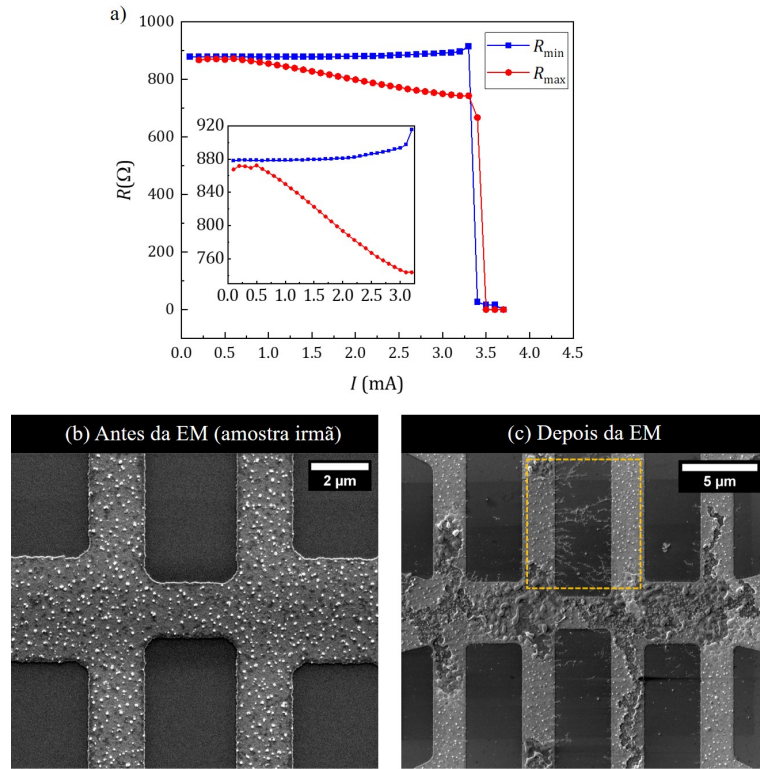


Figura 17: EM do dispositivo Bi1. (a) Curvas de R_{min} (azul) e R_{max} (vermelha), com inserção mostrando a região da curva que precede a queda repentina da resistência. Nos painéis inferiores são apresentadas as imagens de MEV obtidas (b) antes (para uma amostra irmã) e (c) depois do protocolo de eletropulsção. Na imagem pós eletromigração são destacados caminhos percolativos formados pela movimentação de material entre as tri-lhas do dispositivo.

de R_{min} para 1 mA. Dessa forma, esperávamos que o efeito Joule desempenhasse um papel mais significativo ao longo de todo o experimento, permitindo que a potência dissipada contribuísse para o processo de eletromigração.

Foram realizadas duas rodadas de eletromigração, cujos resultados estão apresentados na Fig. 18, com R_{min} no painel (a) e R_{max} no painel (b). As curvas de R_{min} seguem o comportamento esperado, apresentando um aumento gradual a partir de um determinado valor de corrente. Já para R_{max} , observa-se novamente uma diminuição, semelhante ao que ocorreu no dispositivo Bi1. No entanto, neste caso, ambas as curvas exibem pontos de

inflexão em aproximadamente 3,1 mA e 3,4 mA, a partir dos quais R_{max} passa a aumentar. Esse comportamento sugere uma possível mudança nos mecanismos de espalhamento, dependente da temperatura local. A identificação e a compreensão desses mecanismos no bismuto serão estudados futuramente.

É importante destacar que, para R_{min} , após a primeira rodada de eletromigração (EM1), o aumento da resistência em 5% se mostrou efetivo. A resistência final da EM1 corresponde à resistência inicial da segunda rodada de eletromigração (EM2), indicando que esse protocolo possibilita um controle mais preciso sobre a resistência do dispositivo.

A Fig. 18(c) apresenta uma imagem de MEV da constricção central do dispositivo após as duas rodadas de eletromigração. Nessa região, não foram identificadas mudanças morfológicas evidentes, sugerindo que as alterações permanentes na resistência elétrica não resultam de modificações estruturais visíveis nessa escala. Assim, é possível que as variações na resistência sejam consequência de transformações cristalinas ou rearranjos na estrutura eletrônica do material, que não podem ser diretamente capturados pela técnica. Infelizmente, essa amostra foi riscada e não foi possível realizar novos processos de EM.

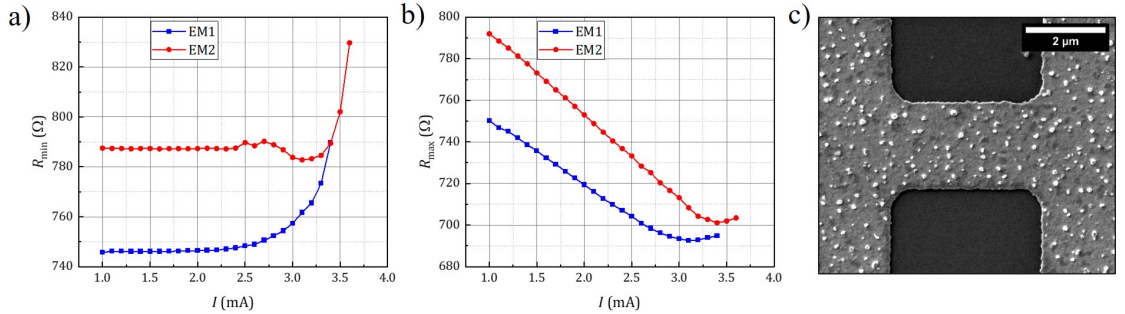


Figura 18: EM do dispositivo Bi2. As curvas de (a) R_{min} e (b) R_{max} são apresentadas para duas rodadas de eletropulsção consecutivas, sendo a primeira identificada pela cor azul e a segunda pela cor vermelha. No painel (c) é apresentada uma imagem de MEV do dispositivo após os experimentos de EM, revelando que não há qualquer efeito visível na constricção central.

O dispositivo Bi3 foi submetido ao processo de eletromigração no criostato descrito na Seção 3.2.2, de modo a garantir condições controladas de temperatura e pressão. Conside-

rando a possibilidade de oxidação do material ao ser aquecido em ambiente atmosférico, realizamos os experimentos em vácuo, com uma pressão da ordem de 10^{-6} Torr. Para fornecer a energia térmica necessária ao estabelecimento da eletromigração, o dispositivo foi aquecido até 350 K. Os contatos elétricos foram feitos por *wire bonding*, utilizando fios de ouro. Quanto aos parâmetros utilizados no protocolo de EM, foram mantidos os mesmos que para o alumínio.

No total, foram realizadas seis rodadas de eletromigração. Durante a última rodada (EM6), o dispositivo falhou, comportando-se como um circuito aberto. As curvas de R_{min} e R_{max} obtidas ao longo do experimento são apresentadas na Fig. 19, nos painéis (a) e (b), respectivamente. Embora algumas flutuações em R_{min} tenham sido observadas — possivelmente relacionadas a fatores externos, como a qualidade dos contatos elétricos —, o mesmo comportamento de mudança efetiva na resistência foi mantido, seguindo o padrão de aumentos de 5%.

O comportamento de R_{max} , por outro lado, se mostrou distinto: apesar de ainda apresentarem quedas suaves até aproximadamente 2 mA, todas as curvas passaram a crescer quase linearmente após esse ponto. Esse comportamento reforça a hipótese de que a temperatura desempenha um papel crucial no mecanismo de condução dos filmes de bismuto. Além do fornecimento externo de energia térmica, é importante destacar que o ambiente de vácuo também pode influenciar o sistema, alterando suas propriedades de dissipação de calor. Em condições ambiente, a troca térmica com o ar atmosférico pode facilitar a dissipação de calor, enquanto, em vácuo, esse processo ocorre de maneira distinta, podendo impactar a distribuição de temperatura no dispositivo.

As Fig. 19(c) e 19(d) apresentam imagens de MEV da amostra antes e depois da eletromigração, respectivamente. Após a falha do dispositivo na sexta rodada, observamos que os danos estruturais se concentram na região central do dispositivo. Aparentemente, o protocolo adotado parece ter resultado na localização espacial dos danos causados na constrição central. No entanto, as flutuações em R_{min} parece indicar que pode estar havendo algum outro problema.

Para testar a reprodutibilidade dos resultados obtidos, realizamos o mesmo experimento no dispositivo Bi4. No entanto, já na segunda rodada de eletromigração, o dispositi-

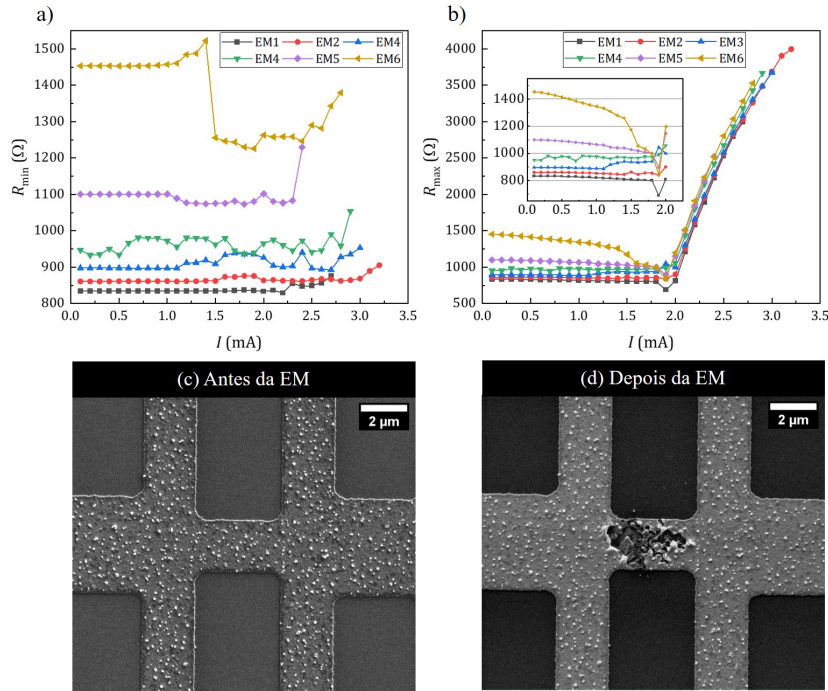


Figura 19: EM do dispositivo Bi3 em condições controladas de temperatura e pressão. As curvas de (a) R_{min} e (b) R_{max} são apresentadas para as 6 rodadas de EM realizadas, com cada rodada identificada por uma cor diferente. A imagem inserida no painel (b) destaca o comportamento decrescente de R_{max} até aproximadamente 2 mA. Nos painéis (c) e (d) são apresentadas as imagens de MEV do dispositivo antes e depois da EM, respectivamente.

tivo falhou, levando-nos a inspecioná-lo com um microscópio óptico (Fig. 20(a)). Observamos um padrão de falha semelhante ao detectado na amostra Bi1, apresentando uma morfologia que lembra um sulco erosivo. A análise mais detalhada no MEV (Fig. 20(b)) revelou um defeito no *pad* metálico conectado à trilha onde os danos da falha foram identificados. Esse defeito sugere um evento de descarga elétrica, levando a um aumento significativo de temperatura, uma vez que a morfologia observada se assemelha a um processo de fusão do material.

Esse problema, aliado às flutuações de resistência detectadas no dispositivo Bi3, levantou dúvidas sobre a qualidade dos contatos elétricos estabelecidos sobre os *pads* metálicos. Para investigar essa possibilidade, realizamos novos testes na *Probe Station* com o dispositi-

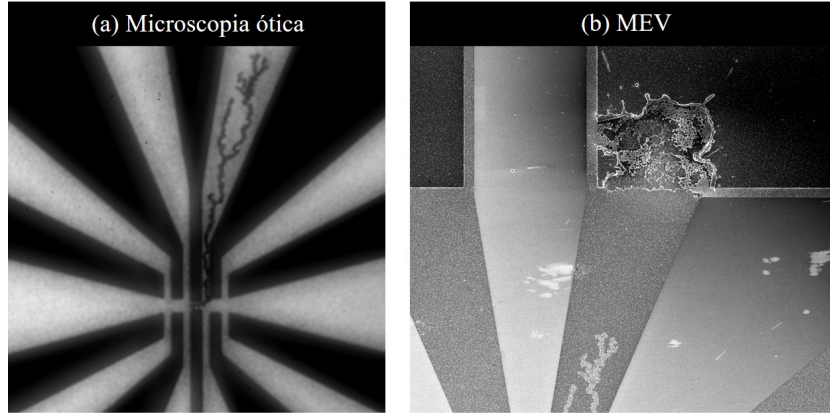


Figura 20: Danos causados ao dispositivo Bi4 durante a EM. (a) Imagem óptica mostrando o caminho percolativo ao longo de uma das trilhas e (b) imagem de MEV na região do *pad* metálico correspondente.

tivo Bi5. O protocolo de eletromigração seguiu os mesmos parâmetros padrão, mas, desta vez, as agulhas responsáveis pelo fornecimento de corrente foram posicionadas diretamente sobre o bismuto, evitando contato com os *pads* metálicos.

Foram realizadas três rodadas consecutivas de eletromigração usando o protocolo padrão de eletropulsção. Os resultados, apresentados na Fig. 21, indicam uma melhoria no processo. As curvas de R_{min} , mostradas para as três rodadas no painel (a), seguiram o comportamento esperado para um protocolo de eletromigração controlada. Já as curvas de R_{max} , apresentadas no painel (b), reproduziram o comportamento inicialmente decrescente e depois crescente, observado anteriormente no dispositivo Bi3. Essa mudança de resposta sugere que os *pads* de alumínio podem, de fato, não ser ideais para experimentos envolvendo transporte eletrônico no bismuto. Uma possível explicação é o estabelecimento de estados eletrônicos localizados na interface entre o metal e o semicondutor [19], resultando em barreiras de potencial que podem afetar diretamente o processo de eletromigração [19]. Por fim, as Fig. 21(c) e 21(d) apresentam imagens de MEV antes e depois da eletromigração, respectivamente, onde, mais uma vez, não foram detectadas mudanças morfológicas visíveis.

A inconsistência dos resultados obtidos no criostato pode estar relacionada à maneira como os contatos elétricos são estabelecidos via *wire bonding*. Como não há garantia de

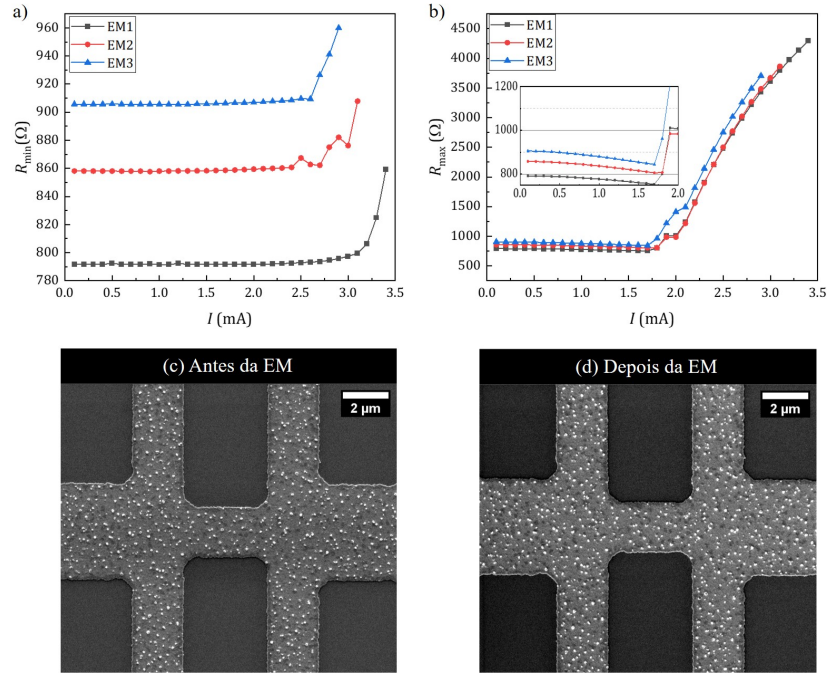


Figura 21: EM do dispositivo Bi5. As curvas de (a) R_{min} e (b) R_{max} são apresentadas para as 3 rodadas de EM realizadas e identificadas por diferentes cores (preta, vermelha e azul). A imagem inserida no painel (b) destaca o comportamento decrescente de R_{max} até aproximadamente 2 mA. Nos painéis (c) e (d) são apresentadas as imagens de MEV do dispositivo antes e depois da EM, respectivamente.

que os fios estão posicionados exclusivamente sobre os *pads* metálicos ou se penetram até o bismuto, variações no contato podem influenciar a resposta elétrica dos dispositivos.

Embora realizamos avanços no estudo da EM em dispositivos de micropontes de bismuto, ainda não foi possível controlar completamente a movimentação atômica. Os resultados de R_{max} mostram a necessidade de se compreender os mecanismos de espalhamento desse material. Os desafios encontrados ao longo desse trabalho reforçam a necessidade de continuar investigando o dispositivo Bi5. Um avanço importante será o uso técnicas locais de caracterização para mapear as mudanças ocorridas entre um ciclo e outro, como a utilização da técnica de *microRaman* disponível no LCE/DEMa/UFSCar, além da realização de novos ciclos de EM. Adicionalmente, estudos nas interfaces metal-semicondutor entre o Al e o Bi também serão realizados para compreender o seu papel nos processos de

EM. Um outra possibilidade será fazer o estreitamento das constrições usando feixes de íon focalizados (FIB), para um tamanho mais próximo do apresentado na Ref. [9], para que a densidade de corrente local seja ainda maior, favorecendo o processo de EM.

5 Conclusão

Como conclusão, a análise comparativa entre o alumínio e o bismuto sob o processo de eletropulsção revela diferenças notáveis em seus comportamentos durante a EM, refletindo as distintas propriedades desses materiais. O alumínio, amplamente utilizado na fabricação de resistores e interconexões devido à sua baixa resistividade e facilidade de processamento, apresenta uma EM com maior grau de controle em temperatura ambiente. Nos experimentos realizados, há uma formação gradual de *voids* e *hillocks* na constrição que resultam de ciclos de migração atômica sob o efeito de corrente elétrica. A partir desses dados, conclui-se que a EM no alumínio pode ser reproduzida e monitorada de forma eficaz. O estudo do bismuto revelou-se mais complexo devido ao seu caráter semicondutor e a existência de distintos mecanismos de espalhamento. As falhas observadas e a migração atômica descontrolada, em alguns casos, indicam que o comportamento do bismuto durante ciclos de EM ainda não foi controlado de forma eficaz. Mesmo em condições de temperatura elevada e baixa pressão, o bismuto não apresentou o mesmo padrão de migração atômica controlada observado no alumínio. Os resultados apresentados sugerem que a EM no bismuto é fortemente influenciada por variáveis extrínsecas, representando um desafio adicional para controlar o processo. Dessa forma, o estudo aponta para a necessidade de aprofundamento das investigações para compreender plenamente a EM do bismuto.

Referências

- [1] J. R. Lloyd. **Electromigration for Designers: An Introduction for the Non-Specialist**. Disponível em: <https://www.eetimes.com/electromigration-for-designers-an-introduction-for-the-non-specialist/>. Acessado em 18/07/2024.
- [2] D. G. Pierce e P. G. Brusius. **Electromigration: a Review**. *Microelectronics Reliability* 37, 1053 (1997).
- [3] M. Saka. **Metallic Micro and Nano Materials: Fabrication with Atomic Diffusion**. Berlin: Springer (2011).
- [4] P. S. Ho and T. Kwok. **Electromigration in metals**. *Report on Progress in Physics* 52, 301 (1989).
- [5] E. A. Abbey. **Electromigration of multiterminal transport bridges**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos. Tese de doutorado (2023).
- [6] S. Marinkovic *et al.* **Effect of Moderate Electropulsing on Nb Multiterminal Transport Bridges**. *Phys. Rev. App.* 19, 054009 (2023).
- [7] D. Proch. **Superconducting cavities for accelerators**. *Rep. Prog. Phys.* 61, 431 (1998).
- [8] R. Kleiner, D. Koelle, F. Ludwig, and J. Clarke. **Superconducting quantum interference devices: State of the art and applications**. *Proc. IEEE* 92, 1534 (2004).
- [9] S. Sangiao, J. M. Michalik, L. Casado, M. C. Martínez-Velarte, L. Morellón, M. Ibarra, J. M. Teresa. **Conductance steps in electromigrated Bi nanoconstrictions**. *Phys.Chem. Chem. Phys.* 15, 5132 (2013).
- [10] T. Ruytenberg. **Electromigration in Bismuth**. Holanda: Leiden University. Tese de Mestrado (2015).

- [11] H. Yasunaga, A. Natori **Electromigration on semiconductor surfaces** Tóquio: Department of Electronics Engineering, The University of Electro-Communications, (1992).
- [12] F. M D’Heurle, R. Rosenberg, **Electromigration in thin films**. Physics of Thin Films, v. 7, Nova York: Academic Press, 1973, p. 257-310.
- [13] P. B. Ghate **Some observations on the electromigration in aluminum films** Applied Physics Letters, vol. 11, pp. 14–16, 07 1967.
- [14] V. S. Zharinov, X.D. A. Baumans, A. V. Silhanek, E. Janssens, and J. Van de Vondel. **Controlled electromigration protocol revised**. Review of Scientific Instruments 89, 043904 (2018).
- [15] X. Baumans. **Nano-engineering superconducting junctions by atomic migration**. Liège: University of Liège. Tese de doutorado (2019).
- [16] D. do Carmo. **Manipulação da penetração regular de fluxo magnético e avalanches termomagnéticas em filmes supercondutores**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos. Tese de doutorado (2017).
- [17] Joseph J. Goldstein et al. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. 4th ed. New York: Springer, 2018.
- [18] Chang, T.-R.; Lu, Q.; Wang, X.; Lin, H.; Miller, T.; Chiang, T.-C.; Bian, G. **Band Topology of Bismuth Quantum Films**. Crystals 2019, 9, 510. <https://doi.org/10.3390/cryst9100510>
- [19] Bardeen, John; **Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact**. Phys. Rev. 1947. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.717>