

Medida de Quatro Pontas

Autor: Mauricio Massazumi Oka
Versão 1.0 (janeiro 2000)

Introdução

A técnica de medida de quatro pontas é largamente usada para a medida de resistividades e resistências de folha. O método em si não é novo, tendo sido empregado já em 1916 para a medida de resistência de terra. Trata-se, em princípio, de um método não destrutivo, muito embora a pressão exercida pelos eletrodos sobre a superfície da amostra possa vir a danificar o material caso venha a ser excessivamente alta. A grande vantagem do método é a simplicidade da medida, incluindo-se o fato de não ser necessário um bom contato ôhmico entre o eletrodo e a amostra.

Princípio

A geometria das pontas usualmente empregada na medida de quatro pontas é mostrada na **Fig. 1**. Quatro eletrodos são dispostos linearmente. A corrente é injetada através de dois dos eletrodos e é medida a tensão sobre os outros dois. A configuração mais usual é utilizar os dois eletrodos externos para a injetar corrente e os dois internos, para medir a queda de tensão, mas em princípio qualquer das possíveis combinações pode ser usada. No caso em que se tem as pontas com espaçamentos variados sobre uma superfície semi-infinita prova-se que a resistividade é dada por:

$$\rho = \frac{2\pi(V/I)}{[1/s_1 + 1/s_3 - 1/(s_1 + s_2) - 1/(s_2 + s_3)]}$$

onde s_1 , s_2 e s_3 são os espaçamentos entre as pontas e V e I são a tensão medida e a corrente injetada, respectivamente.

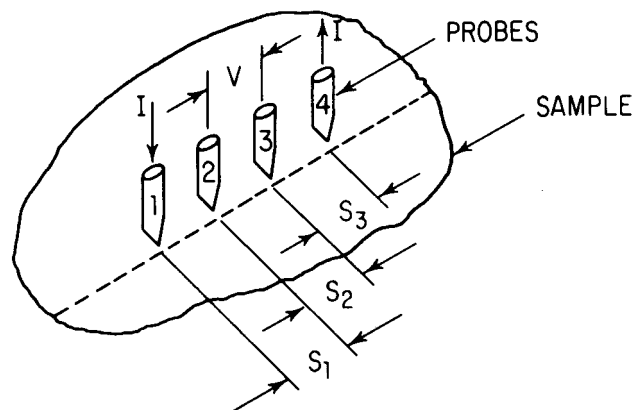
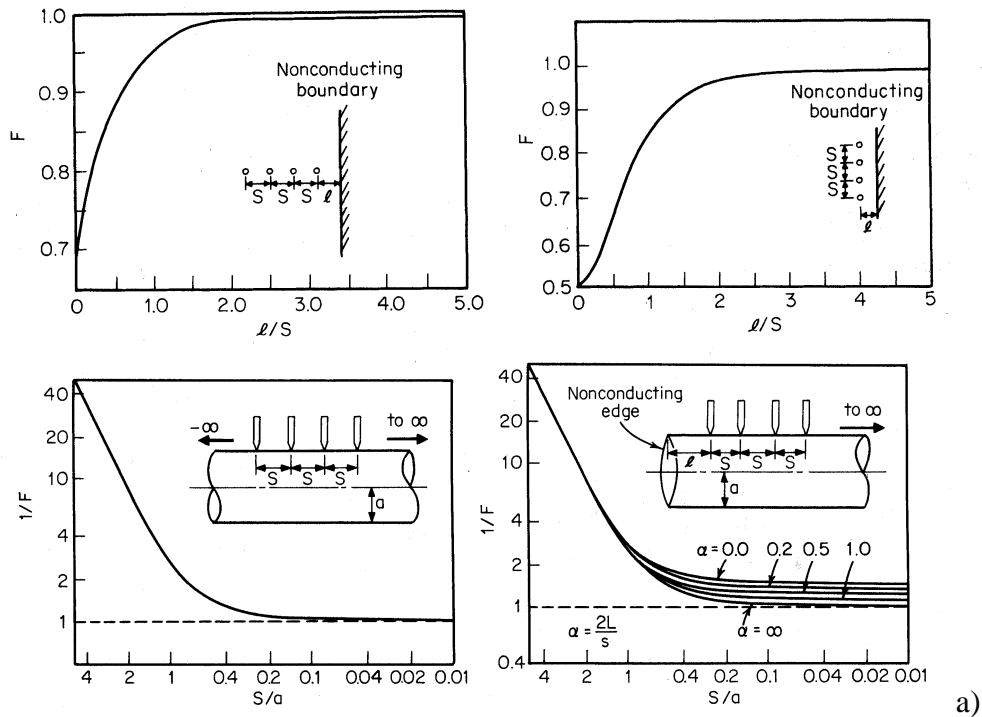


Fig. 1: Geometria empregada na medida de quatro pontas.

Para o caso em que as pontas estão igualmente espaçadas ($s = s_1 = s_2 = s_3$) a equação da resistividade reduz-se a:

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I}$$

Em muitos casos práticos a aproximação de um substrato semi-infinito não é válido e a equação da resistividade necessita de um fator de correção geométrico. A **Fig. 2** mostra, a título de exemplo, os fatores de correção (F) para alguns casos mais comuns.



b)
Fig. 2: Fatores de correção para a medida de quatro pontas, com $\rho_{real} = F\rho_{medido}$. a) Superfície plana. b) Cilindro circular.

Para um caso bastante útil na prática, de um filme com espessura t e resistividade ρ_1 sobre uma segunda camada de espessura infinita e resistividade ρ_2 prova-se que:

$$\rho_{medido} = \rho_1 \left(1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{k^n}{\sqrt{1 + (2nt/15)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + (2nt/15)^2}} \right] \right)$$

onde:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Vamos analisar um pouco mais detidamente os casos em que a camada 2 é um isolante ideal e um condutor ideal. Quando a camada 2 é um isolante, a expressão acima pode ser aproximada, para situações em que t/s é menor que 1 por:

$$\rho_1 \cong 0.73(t/s)\rho_{medido}$$

No caso em que a camada 2 é um condutor ideal ou um material com resistividade bastante baixa, só podemos encontrar uma solução analítica para o caso em que t/s seja maior que 0.5. Ou seja, caso se deseje uma medida deste tipo, é necessário garantir que $s < 2t$ de modo que quanto menor a espessura da camada que se deseja medir, menor tem de ser o espaçamento entre as pontas.

Quando se tem, por exemplo, a necessidade de medir uma camada fina de dimensão reduzida, é necessário duas correções. As correções são, em geral, consideradas independentes entre si e são dados em termos da medida V/I . Ou seja, nesse caso,

$$\rho = F_1 F_2 \rho_{medido}$$

onde F_1 é o fator de correção da proximidade de borda e F_2 é o fator de correção da espessura fina.

Quando se analisa filmes finos é usual avaliar o filme, não em termos de resistividade, mas em termos de resistência de folha (R_s). A resistência de folha é definida por:

$$R_s = \rho / t$$

de modo que a relação entre resistência e resistência de folha é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{Wt} = R_s \frac{l}{W}$$

onde l é o comprimento do elemento resistivo, W a sua largura e t a sua espessura. Ou seja, a resistência de folha pode ser definido como sendo a resistência de um elemento resistivo que tenha uma certa unidade de comprimento e largura padrão. Da mesma forma que para a resistividade, a resistência de folha pode ser dada por:

$$R_s = F^* (V / I)$$

onde F^* é o fator de correção geométrico para a resistência de folha. Para o caso em que a medida é feita com quatro pontas dispostas linearmente, igualmente espaçadas, a corrente sendo injetada pelas duas pontas da extremidade e a queda de potencial sendo medidas nas pontas internas, prova-se que o fator de correção (F^*) é dado por $\pi/\ln 2 \approx 4,532$.

Com relação à instrumentação, a única ressalva é que a fonte de corrente e o medidor de tensão precisam ter terras distintos. Vale ainda lembrar que uma das grandes vantagens do método é que não há necessidade de garantir um bom contato ôhmico para nenhuma das quatro pontas, o que simplifica de sobremaneira a execução das medidas.

Possíveis Fontes de Erro da Medida

Dimensão da Amostra

O erro mais óbvio no uso da técnica ocorre quando não se efetua todas as correções decorrentes das limitações geométricas.

Corrente de fuga do Substrato

Se a amostra medida for uma junção p-n, como por exemplo uma camada epitaxial tipo n ou p sobre um substrato do tipo inverso, a corrente de fuga pode causar erro de medida. Esta corrente pode ser alta em junções defeituosas ou quando esta junção sofre despolarização. Este último caso ocorre quando a resistência de folha torna-se maior que $1000 \Omega/\text{quadrado}$ ou se a corrente usada é muito alta. Em casos de dúvida é necessário efetuar medidas para várias correntes e efetuar a medida na faixa em que a medida é independente da corrente usada.

Espaçamento das pontas

Conforme visto, o espaçamento entre as agulhas entra diretamente no cálculo da resistividade. Portanto qualquer erro na determinação do espaçamento reverte em erro de leitura. Se o espaçamento entre as agulhas for ligeiramente diferente do valor nominal de s teremos:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{4s} (3\Delta x_1 - 5\Delta x_2 + 5\Delta x_3 - 3\Delta x_4)$$

onde Δx_i é o deslocamento da posição da i -ésima ponta em relação à sua posição nominal.

Luz

A luz incidindo sobre a superfície pode adicionar uma tensão espúria devido ao efeito fotovoltaico.

Temperatura

Como a resistividade dos semicondutores costumam variar de forma considerável com a temperatura, um erro de até alguns porcentos pode ser introduzido, tanto pela falta de controle da temperatura ambiente quanto pelo aquecimento da amostra por efeito Joule devido à corrente injetada. Este último caso ocorre principalmente quando se mede amostras com baixa resistividade, quando uma corrente considerável é necessária para obter uma leitura confiável da tensão. Para amostras com resistividades maiores que $10 \Omega \cdot \text{cm}$, por exemplo, uma diferença de 5° na temperatura causa uma diferença de 4% na leitura da resistividade.

Efeito termoeletrico

Gradientes de temperatura causados tanto pelo ambiente quanto por uma corrente excessivamente alta podem gerar tensões devido ao efeito termoeletrico. Diminuir a corrente minimiza o problema.

Injeção pelas pontas

Em amostras com altos tempos de vida médio dos portadores pode haver modulação da condutividade, prejudicando a determinação da resistividade.

Correntes Induzidas

Em sistemas que trabalham em corrente contínua pode ocorrer das correntes espúrias induzidas na amostra serem retificadas nos contatos das pontas. Para evita o problema o sistema tem de estar bem blindado. Recomenda-se efetuar a medida em várias direções e se for constatado leituras que variem conforme a direção é necessário melhorar a blindagem ou eliminar as fontes das correntes induzidas.

Corrente Injetada

Se a corrente injetada for muito alta causando aquecimento da amostra, a própria condutividade pode ser modulada.

Tensão Aplicada

Se o campo elétrico torna-se muito alto a mobilidade dos portadores se satura resultando uma resistividade maior que a real.

Aplicação do Medidor de Quatro Pontas para Levantar o Perfil de Resistividade

Muitas vezes é importante determinar o perfil de resistividade em microeletrônica, tanto lateralmente quanto em profundidade. Para realizar a perfilometria lateral basta realizar sucessivas medidas com pequenos deslocamentos laterais. Para a perfilometria em profundidade do silício é usual combinar as medidas pelo método das quatro pontas com a remoção de sucessivas camadas de silício, que pode ser feito por uma oxidação anódica seguida da remoção deste óxido. a resistência de folha da i -ésima camada removida é dada por:

$$R_s = \frac{R_i R_{i+1}}{R_{i+1} - R_i}$$

onde R_i e R_{i+1} são os valores da resistência de folha medidas antes e depois da remoção da camada de espessura Δx de silício.

Conhecida a espessura da camada removida (Δx) e supondo que a resistividade é essencialmente constante numa camada fina do material pode-se determinar a resistividade da camada por:

$$\rho(x) = \frac{R_i R_{i+1}}{R_{i+1} - R_i} \Delta x$$

Bibliografia

- 1) W. R. Runyan, "Semiconductor Measurements and Instrumentation", McGraw-Hill, New York, 1975.
- 2) S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2ª Edição, John Wiley & Sons, New York, 1981.