

# SEMICONDUCTORES



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Reitor  
JOSÉ TADEU JORGE

Coordenador Geral da Universidade  
ALVARO PENTEADO CRÓSTA

EDITORA  
UNICAMP

Conselho Editorial

Presidente  
EDUARDO GUIMARÃES

ESDRAS RODRIGUES SILVA – GUITA GRIN DEBERT  
JOÃO LUIZ DE CARVALHO PINTO E SILVA – LUIZ CARLOS DIAS  
LUIZ FRANCISCO DIAS – MARCO AURÉLIO CREMASCO  
RICARDO LUIZ COLTRO ANTUNES – SEDI HIRANO

Jacobus W. Swart

# SEMICONDUCTORES

*Fundamentos, técnicas e aplicações*

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP  
DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

---

Sw255 Swart, Jacobus Willibrordus.  
*Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações* / Jacobus Willibrordus Swart.  
– Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.  
  
1. Semicondutores. 2. Microeletrônica. I. Título.

ISBN 978-85-268-0818-8 CDD 537.622  
621.3817

---

Índices para catálogo sistemático:  
1. Semicondutores 537.622  
2. Microeletrônica 621.3817

Copyright © by Jacobus Willibrordus Swart  
Copyright © 2008 by Editora da Unicamp

1ª reimpressão, 2013

Direitos reservados e protegidos pela Lei 9.610 de 19.2.1998.  
É proibida a reprodução total ou parcial sem autorização,  
por escrito, dos detentores do direito.

Printed in Brazil.  
Foi feito o depósito legal.

Direitos reservados à  
Editora da Unicamp  
Rua Caio Graco Prado, 50 – Campus Unicamp  
CEP 13083-892 – Campinas – SP – Brasil  
Tél./Fax: (19) 3521-7718/7728  
www.editora.unicamp.br – vendas@editora.unicamp.br

*Dedico este livro a minha esposa Nilza  
e a meus filhos Hugo, Laura e Julia.*



## AGRADECIMENTOS

Sou muito grato aos alunos que colaboraram na elaboração das figuras e das ilustrações, bem como na revisão do texto: Antonio Carlos Torrezan, Laura Swart, Roberto Lacerda, Rogerio Villela Acquadro e Vitor Garcia. Agradeço ao amigo Homero M. Schneider pela revisão final do texto.

Agradeço também a colaboração da equipe de funcionários do Centro de Componentes Semicondutores (CCS) da UNICAMP pela contribuição na disponibilização de resultados e fotografias de dispositivos e equipamentos de processos de microfabricação.





# SUMÁRIO

PREFÁCIO .....	13
<b>1 — INTRODUÇÃO A MATERIAIS</b> .....	<b>17</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23
EXERCÍCIOS .....	24
<b>2 — REVISÃO SOBRE O COMPORTAMENTO DO ELÉTRON</b> .....	<b>25</b>
2.1 Problemas físicos anteriores à mecânica quântica .....	25
2.2 Mecânica quântica .....	31
2.3 Aplicações de mecânica quântica .....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40
EXERCÍCIOS .....	41
<b>3 — REVISÃO SOBRE LIGAÇÕES QUÍMICAS</b> .....	<b>43</b>
3.1 Propriedades mecânicas gerais de ligações .....	44
3.2 Tipos de ligações químicas .....	45
3.2.1 Ligações primárias .....	46
3.2.2 Forças de ligação secundária .....	51
3.3 Intensidade das forças de ligações .....	53
3.4 Modelo do modo de acoplamento de Feynman para ligações químicas .....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
EXERCÍCIOS .....	57
<b>4 — ESTRUTURA DA MATÉRIA</b> .....	<b>59</b>
4.1 Conceitos de cristalografia .....	60
4.2 Definições de planos e direções cristalográficas .....	65
4.3 Determinação da estrutura de um cristal .....	67
4.4 Defeitos em cristais .....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
EXERCÍCIOS .....	76
<b>5 — OBTENÇÃO DE CRISTAIS DE SILÍCIO (SI)</b> .....	<b>77</b>
5.1 Obtenção de Si policristalino grau eletrônico .....	79
5.2 Crescimento de cristal de Si pelo processo Czochralski (CZ) .....	82
5.3 Crescimento de cristal de Si pelo processo de fusão zonal flutuante (FZ) .....	87

5.4	Comparação entre os processos CZ e FZ.....	90
5.5	Caracterização e controle de qualidade dos tarugos de Si monocristalino.....	91
5.6	Obtenção de lâminas de Si.....	93
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>100</b>
	<b>EXERCÍCIOS.....</b>	<b>101</b>
<b>6</b>	<b>— TEORIA DO ELÉTRON LIVRE EM METAIS.....</b>	<b>103</b>
6.1	Elétrons livres.....	104
6.2	Densidade de estados e distribuição de Fermi-Dirac.....	105
6.3	Aplicações do modelo do elétron livre.....	111
6.3.1	Calor específico de elétrons livres em metais.....	111
6.3.2	A função trabalho.....	112
6.3.3	Emissão termiônica.....	113
6.3.4	Efeito Schottky.....	115
6.3.5	Emissão por campo.....	117
6.3.6	Efeito fotoelétrico.....	118
6.3.7	Lâmpadas incandescentes.....	119
6.3.8	Feixes de elétrons.....	119
6.3.9	Junção entre metais.....	120
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>
	<b>EXERCÍCIOS.....</b>	<b>122</b>
<b>7</b>	<b>— TEORIA DE BANDAS EM SÓLIDOS.....</b>	<b>123</b>
7.1	Modelo de Feynman.....	123
7.2	Modelo de Kronig e Penney.....	126
7.3	O conceito de massa efetiva.....	129
7.4	O número efetivo de elétrons livres de condução em uma banda.....	132
7.5	O número total de estados quânticos por banda.....	135
7.6	Metais, semicondutores e isolantes.....	137
7.7	Lacunas.....	139
7.8	Diagramas de bandas de semicondutores reais.....	141
7.9	Distribuição de portadores em temperatura finita.....	143
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>146</b>
	<b>EXERCÍCIOS.....</b>	<b>147</b>
<b>8</b>	<b>— SEMICONDUTORES.....</b>	<b>149</b>
8.1	Revisão de modelos para semicondutores.....	151
8.2	Propriedades dos portadores.....	153
8.3	Semicondutores extrínsecos.....	154
8.4	Distribuição de estados e portadores nas bandas.....	159
8.5	Concentração de portadores em equilíbrio.....	162

8.6	Variação do nível de Fermi com dopagem e temperatura.....	167
8.7	Ações de portadores.....	170
8.7.1	Ação de deriva.....	170
8.7.2	Ação de difusão.....	180
8.7.3	Superposição das ações de deriva e difusão.....	183
8.7.4	Relação de Einstein.....	183
8.7.5	Processos de geração e recombinação.....	185
8.8	Equações de estado de semicondutores.....	195
8.8.1	Equação de continuidade.....	195
8.8.2	Equações de difusão de portadores minoritários.....	197
8.8.3	Simplificações e soluções específicas das equações de difusão de portadores minoritários.....	198
8.8.4	Lei de Gauss.....	199
8.8.5	Exemplos de resolução de problemas.....	200
8.9	Conceitos complementares.....	204
8.10	Caracterização de semicondutores.....	211
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	220
	EXERCÍCIOS.....	221
<b>9</b>	<b>— ESTRUTURAS DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES.....</b>	<b>229</b>
9.1	Obtenção de camadas semicondutoras dopadas.....	229
9.2	Tecnologia planar de fabricação de dispositivos.....	246
9.3	Metalização e diagramas de fases.....	253
9.4	Exemplos de estruturas de dispositivos.....	263
9.5	Exemplo de integração de processo: nMOS.....	266
9.6	Evolução da microeletrônica.....	269
9.7	Outras aplicações das técnicas de microfabricação.....	282
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	285
	EXERCÍCIOS.....	286
<b>10</b>	<b>— JUNÇÕES EM SEMICONDUTORES.....</b>	<b>289</b>
10.1	A junção <i>pn</i> .....	289
10.1.1	Eletrostática de junção <i>pn</i> .....	291
10.1.2	Característica I–V de junção <i>pn</i> .....	312
10.2	A junção metal-semicondutor.....	331
10.2.1	Diagrama de bandas da junção metal-semicondutor em equilíbrio.....	332
10.2.2	Eletrostática do diodo de barreira Schottky ideal.....	334
10.2.3	Característica I–V de diodo Schottky ideal.....	339
10.2.4	Contatos metal-semicondutor ôhmicos.....	339
10.3	Heterojunções.....	341
10.4	Contato ou junção MOS.....	343

10.4.1 Análise eletrostática da estrutura MOS com polarização.....	346
10.4.2 Desempenho AC, ou característica capacitância-tensão, de capacitor MOS .....	357
Considerações finais .....	361
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	362
<b>EXERCÍCIOS</b> .....	363
<b>APÊNDICES</b> .....	365
I - Lista de símbolos .....	365
II - Constantes físicas selecionadas .....	370
III - Siglas .....	371
IV - Propriedades de alguns semicondutores e isolantes a 300 K .....	372
V - Símbolos de prefixos decimais .....	373
VI - Respostas de exercícios selecionados .....	373

## PREFÁCIO

Estamos atualmente vivendo a fase denominada sociedade da informação, em que a geração, o armazenamento, o tratamento, a transmissão, o uso e o domínio da informação e do conhecimento constituem a atividade social e econômica predominante. O acesso ao conhecimento e à informação, bem como seu uso, traz um enorme benefício para o nível de vida social e econômico da sociedade. Os produtos da sociedade de informação são baseados no emprego de dispositivos eletrônicos — optoeletrônicos, fotônicos e microssistemas (microsensores, microatuadores, micromáquinas) — fabricados em semicondutores, sendo o Si o semicondutor mais importante. As propriedades desse semicondutor são tão boas que podemos considerá-lo como uma dádiva da natureza.

Dada essa importância do Si, podemos classificar a sociedade atual como a da “idade do silício”, visto que, historicamente, se classificam as fases ou as idades das sociedades pelo material predominante na fabricação de seus utensílios. Na vida diária utilizamos silício desde o despertar (rádio-relógio) até o descansar ao final do dia (TV, rádio ou outros meios de entretenimento), passando pelo uso freqüente do relógio de pulso, telefone, computador, carro, utensílios domésticos com *chip* (forno de microondas e outros). Além disso, as várias atividades sociais e econômicas utilizam sistemas eletrônicos em diferentes funções, como sistemas de controle de fábricas e máquinas, ensino, segurança, medicina, agricultura, e assim por diante.

Todo o progresso científico e tecnológico que nos levou ao estágio da sociedade da informação ou à “idade do silício” é reflexo do esforço e/ou das contribuições de um grande número de cientistas e de engenheiros, os quais desenvolveram a teoria da mecânica quântica, estudaram os materiais e os processos de fabricação e idealizaram e projetaram dispositivos, circuitos e sistemas. As novas teorias quânticas do início do século XX abriram um amplo horizonte para o entendimento dos materiais e das novas invenções. Assim, o estudante deve almejar o aprendizado desses fundamentos científicos e tecnológicos, para poder contribuir com novos avanços na sua vida profissional ou até com idéias revolucionárias que possam resultar em novos conceitos, teorias e invenções. Durante uma vida profissional de 30 a 40 anos, muitas inovações devem ocorrer. Somente uma boa base dos

fundamentos científicos pode evitar que o profissional se torne obsoleto antes do tempo, auxiliando-o a assimilar as novidades que certamente encontrará. Novos dispositivos devem surgir nas próximas décadas, quando a evolução da atual microeletrônica chegar ao limite de redução de suas dimensões.

Mesmo que o engenheiro não vá trabalhar com materiais, dispositivos ou circuitos, o conhecimento desses temas o ajudará a entender suas aplicações. Se não for esse o caso, tais conhecimentos devem, no mínimo, ser de seu interesse por uma questão cultural básica em sua área profissional. Deve ser constrangedor para um engenheiro eletrônico ter que responder “não sei” a uma pergunta de um leigo a respeito do funcionamento dos materiais semicondutores e dos seus dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos, os quais constituem a base dos sistemas que desenvolve, utiliza ou vende. Infelizmente, essa situação não é incomum.

Este livro visa apoiar disciplinas de dispositivos semicondutores e/ou de materiais elétricos. Ele não constitui um material completo para essas disciplinas, pois, para isso, seria necessário estudar também vários outros materiais de fundamental importância, que incluem materiais dielétricos e isolantes, materiais para comunicações ópticas, materiais condutores de energia, materiais magnéticos, materiais supercondutores, entre outros.

O capítulo 1 traz uma introdução e uma motivação para o estudo de materiais. Apresentamos nos capítulos 2 e 3 uma revisão dos conceitos de mecânica quântica e de ligações químicas. No capítulo 4, apresentamos tipos de estruturas dos materiais sólidos, conceitos de cristalografia e defeitos. Técnicas de obtenção de cristais semicondutores de Si são estudadas no capítulo 5. No capítulo 6, estudamos o modelo de elétron livre em metais, enquanto modelos genéricos de bandas de energia de elétrons em materiais sólidos (isolantes, semicondutores e condutores) são tratados no capítulo 7. O capítulo 8 é dedicado ao estudo das propriedades dos semicondutores. Materiais e processos usados para fabricar estruturas e dispositivos semicondutores são discutidos no capítulo 9. Aproveitamos esse capítulo para introduzir os conceitos de diagramas de fases, importantes para compreender a síntese de vários materiais usados na fabricação de componentes. No capítulo 10, estudamos as junções de materiais, incluindo as homojunções e as heterojunções semicondutoras, a junção metal-semicondutor e, por fim, a junção metal-óxido-semicondutor. Essas junções formam os blocos construtivos de dispositivos.

Um planejamento para uma disciplina de materiais elétricos, de 60 horas de aula, poderia ser da seguinte forma: 15 horas sobre fundamentos de materiais (capítulos 1 a 7), 15 horas sobre semicondutores (capítulo 8), 7 horas sobre materiais e processos para dispositivos (capítulo 9), 8 horas sobre física de junções, e 15 horas sobre os outros materiais elétricos (que não constam neste livro). Ilustrações e animações interativas sobre os materiais, os processos e os dispositivos semicondutores estão em desenvolvimento e vêm sendo disponibilizadas na nossa página <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/ead.html>>.

Quem mais me motivou a elaborar este livro foram meus alunos. Entre eles, gostaria de mencionar os meus filhos Hugo e Laura, que me proporcionaram o grande prazer de tê-los como alunos. Não posso deixar de citar os colegas de trabalho e os alunos de pós-graduação, que contribuíram com discussões e elucidações de várias questões aqui tratadas.

Este livro é também resultado do bom nível de ensino recebido nas escolas públicas — que deveriam ser tratadas como um dos principais patrimônios de uma nação — onde cursei desde o primário até o doutorado (Ginásio Estadual de Artur Nogueira, em Artur Nogueira (SP); Colégio Culto à Ciência, em Campinas (SP); e Escola Politécnica da USP, em São Paulo (SP)). Notável foi a contribuição de vários professores, em especial meu orientador de doutorado, professor Edgar Charry. Paralelamente ao trabalho de doutorado, participei com ele e com o professor Joel Pereira de Souza do projeto do primeiro circuito integrado em nível LSI (*Large Scale Integration*), desenvolvido no país em meados dos anos 70, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Por fim, gostaria de mencionar a contribuição dos órgãos de apoio: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que me facultaram dois programas de pós-doutorado, além de alguns estágios de curta duração no exterior.

*Jacobus W. Swart*





## CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO A MATERIAIS

Observa-se que todos os segmentos da vida diária dependem de materiais, incluindo meios de transporte, residência, vestimenta, meios de comunicação, processamento de dados, comércio, lazer, produção de alimentos, itens de saúde e ensino, geração e transporte de energia, e muitos outros. Dessa forma, o conhecimento e a habilidade em produzir e manipular materiais afetam diretamente o nível de vida da população. Podemos afirmar que o nível de desenvolvimento de um povo está diretamente relacionado à sua habilidade em produzir e manipular os materiais. As culturas passadas foram classificadas de acordo com essa habilidade, como, por exemplo, a idade da pedra, a idade do bronze, e assim por diante. Como poderíamos, então, denominar a idade da cultura atual, das décadas em torno da virada do terceiro milênio da era cristã? Sugiro chamá-la de “idade do silício”.

Isso não constitui um exagero se considerarmos o silício material-base para a fabricação de componentes eletrônicos, presentes na grande maioria das atividades humanas, as quais incluem transporte (automóveis, aviões, trens, foguetes espaciais etc.), comunicação, computação, controle de processos industriais, medicina, instrumentos de análise e de pesquisa em todas as áreas, esporte, e muitas outras. É difícil imaginar uma atividade que não tenha alguma dependência indireta, ou mesmo direta, com algum sistema eletrônico. Como dependência indireta entende-se a produção de utensílios usados nas atividades humanas, a análise de seus resultados, o transporte e/ou comercialização de bens, e muitos outros exemplos. Como consequência, a eletrônica está se tornando o maior mercado mundial (maior que a automobilística, que a química etc.), com um valor total anual acima de 1 trilhão de dólares. Todas essas maravilhas eletrônicas, no entanto, são baseadas em materiais, sendo o semicondutor silício o mais importante. Mesmo assim, os outros materiais usados em engenharia eletrônica e elétrica são também fundamentais e imprescindíveis, devendo receber atenção no estudo de materiais elétricos. O principal objetivo deste texto é, portanto, oferecer ao leitor um conhecimento básico dos diversos materiais usados na engenharia elétrica e seus fundamentos, enfatizando o semicondutor silício.

Inicialmente é importante definirmos o que são materiais. Podemos dizer que materiais são substâncias cujas propriedades as tornam utilizáveis em estruturas, máquinas, dispositivos ou produtos consumíveis. Dessa forma, necessitamos conhecer as propriedades dos materiais. Como exemplo de materiais com propriedades distintas, temos: metais, cerâmicas, semicondutores, supercondutores, polímeros (plásticos), vidros, dielétricos, fibras, madeira, areia, pedra, vários conjugados etc.

Todos os produtos manufaturados, de qualquer tipo, dependem das características e das qualidades dos materiais empregados, ou seja, a qualidade de um produto está diretamente relacionada com a qualidade e as propriedades dos materiais. Um produto pode ser fabricado de acordo com um projeto excelente e por um processo de confecção também perfeito e, mesmo assim, pode apresentar defeitos. Esses defeitos podem estar associados aos defeitos do material utilizado ou até mesmo ao emprego de um material não adequado. Um material também poderá apresentar defeito produzido pelo meio em que estará exposto. Um exemplo observado recentemente foi a aplicação de uma capa de revestimento de plástico nos fios da rede elétrica. Em aproximadamente um ano, o plástico estava todo despedaçado e no chão, ou seja, a escolha do tipo de plástico nesse caso não foi adequada para suportar a exposição aos raios solares. Essa má escolha foi um grande prejuízo para a empresa e poderá ter custado o emprego do engenheiro responsável por isso.

De forma geral, especialistas em engenharia e ciência de materiais tratam da geração e aplicação do conhecimento que relaciona composição, estrutura e processamento de materiais com suas propriedades e seus usos. Essa ciência e essa engenharia englobam os seguintes aspectos dos materiais (ver Figura 1.1): a) a ciência e o entendimento básico dos materiais; b) a relação entre a estrutura, as propriedades e o desempenho de um material com seu processamento durante a confecção ou durante seu uso; c) as necessidades e as experiências sociais do uso dos materiais na confecção de produtos. Entre os itens *a* e *b*, inclui-se todo o acervo do conhecimento científico, enquanto entre os itens *c* e *b*, inclui-se o acervo de conhecimento empírico adquirido com o uso e a confecção dos materiais. Porém, a pesquisa, a produção e o uso de materiais não são domínio exclusivo dos profissionais de ciência e engenharia de materiais. O engenheiro, qualquer que seja sua especialidade, em algum momento do seu trabalho, lidará com materiais que serão usados em produtos e cuja especificação, aquisição e qualificação ele deverá conhecer. Mesmo que não trabalhe na produção do material ou na confecção do produto, o engenheiro estará interagindo com os profissionais responsáveis por essas funções e deverá ter elementos e linguagem para dialogar com eles. Portanto, é fundamental que todo engenheiro estude os materiais empregados em sua especialidade. O engenheiro deve considerar os seguintes aspectos na escolha de um material para uma dada aplicação: as propriedades do material, a agressividade do meio onde será utilizado o produto e, não menos importante, os aspectos econômicos. O engenheiro pode fazer um bom trabalho técnico ao escolher um material com propriedades excelentes e que suporte por longo período o ambiente e as condições em que será utilizado. Porém, se a produção do bem com esse material levar a empresa à falência, o engenheiro perderá seu emprego, apesar de sua boa solução técnica. Como exemplo, podemos citar os engenheiros ou as empresas que apostaram na utilização do material semiconductor GaAs

para a produção de circuitos integrados digitais. Mesmo tendo o GaAs algumas propriedades superiores ao do Si, sua escolha não se sustentou para a maioria das aplicações até o momento, devido a fatores econômicos e tecnológicos.

Temos um princípio básico de materiais que diz: “As propriedades de um material originam-se na sua estrutura interna”, ou seja, existe uma relação biunívoca entre propriedade e estrutura do material. A estrutura do material, no entanto, apresenta uma dependência estreita com a forma de seu processamento. Assim, há também uma relação das propriedades do material com as condições de seu processamento. A estrutura interna dos materiais envolve não apenas o tipo de átomo de sua constituição (composição), mas também como eles se associam entre si, formando cristais, moléculas ou microestruturas. Como exemplo, temos: a) a molécula básica  $C_2H_4$  (etileno) constitui um gás à temperatura ambiente; b) a polimerização em cadeia de 13 das mesmas moléculas básicas forma uma cera (sólido mole que se funde a  $55\text{ }^\circ\text{C}$ ); c) a polimerização de milhares das mesmas moléculas básicas resulta em um plástico chamado polietileno (sólido flexível).

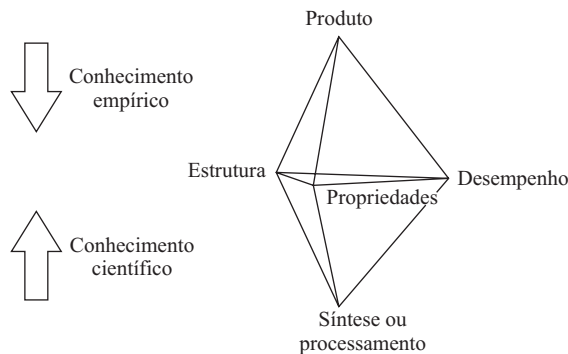


Figura 1.1: Aspectos gerais de engenharia e ciência dos materiais.

Qualquer ação que cause uma modificação da estrutura interna do material afetará suas propriedades. Essas ações podem ocorrer durante o processamento, como parte deste, ou durante o uso do produto (material), por esforços e/ou condições ambientais. Como exemplo, temos:

- um fio elétrico é fortalecido por processo de trefilamento (afinamento por estiramento);
- processamentos térmicos dos materiais (recozimentos, resfriamentos bruscos);
- borracha e plásticos expostos à luz e ao ar por longo tempo sofrem um endurecimento (ver exemplo dado acima);
- metal rompe por fadiga sob esforço mecânico cíclico;
- um ímã perde sua polaridade magnética sob ação prolongada de um campo elétrico tipo RF (radiofrequência);

- um semicondutor sofre danos (rompimentos de ligações químicas) quando exposto a radiação tipo nuclear ou espacial;
- uma trilha de interconexão elétrica pode sofrer um rompimento sob ação prolongada de uma corrente elétrica de alta densidade (processo chamado de eletromigração).

Entre os vários materiais que existem, a propriedade física que apresenta a maior variação é justamente a propriedade de maior interesse do engenheiro elétrico e eletrônico, ou seja, a condutividade elétrica dos materiais. Esta pode variar de  $10^{-18} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  (quartzo, poliestireno) a  $10^8 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  (prata, cobre), ou várias ordens de grandeza maiores que isso, no caso de supercondutores. Valores típicos são apresentados na Figura 1.2; valores exatos dependem da temperatura, da estrutura interna e do processo de fabricação.

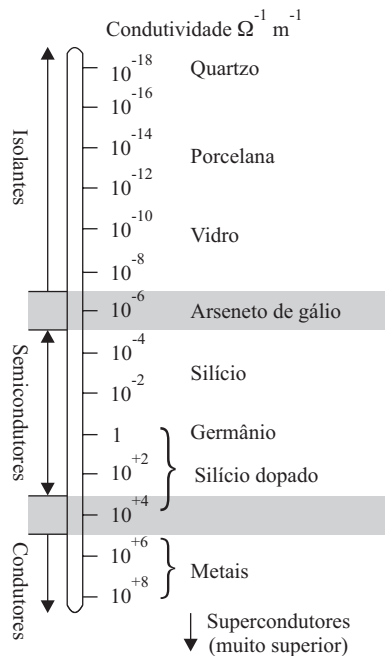


Figura 1.2: Valores aproximados de condutividade elétrica de materiais à temperatura ambiente.

Para finalizar, apresentamos em seguida uma classificação dos materiais. Estes podem ser classificados de modo geral em: 1) metais; 2) cerâmicas; 3) semicondutores; 4) polímeros; 5) conjugados; 6) biomateriais. Eles apresentam as seguintes propriedades gerais:

- Metais: São formados por combinação de elementos químicos metálicos; são bons condutores elétricos e térmicos (pela boa mobilidade de seus elétrons); são opacos (os elétrons absorvem a energia dos fótons de luz); são robustos, porém moldáveis.