

**CURSO DE ELETRÔNICA
ELETRÔNICA ANALÓGICA**

NEWTON C. BRAGA



Instituto NCB

www.newtoncbraga.com.br

contato@newtoncbraga.com.br

CURSO DE ELETRÔNICA -

Eletrônica Analógica

Autor: Newton C. Braga

São Paulo - Brasil - 2012

Palavras-chave: Eletrônica - Engenharia Eletrônica
- Componentes - Educação Tecnológica

Diretor responsável: Newton C. Braga

Diagramação e Coordenação: Renato Paiotti

MAIS INFORMAÇÕES

INSTITUTO NEWTON C. BRAGA

<http://www.newtoncbraga.com.br>

NOTA IMPORTANTE

Esta série de livros fornece conhecimentos básicos de eletrônica para cursos regulares, cursos a distância e para autodidatas consistindo, portanto numa literatura cuja finalidade é apoio, iniciação ou complementação de conhecimentos. Sua aquisição não implica no direito a obtenção de certificados ou diplomas os quais devem ser emitidos pelas instituições que adotam o livro ou ainda ministram cursos de outras formas. Da mesma forma o autor ou a editora não se responsabilizam por eventuais problemas que possam ser causados pelo uso indevido das informações nele contidas como o não funcionamento de projetos, ferimentos ou danos causados a terceiros de forma acidental ou proposital, ou ainda prejuízos de ordem moral ou financeira. Os eventuais experimentos citados quando realizados por menores devem ter sempre a supervisão de um adulto. Todo cuidado foi tomado para que o material utilizado seja encontrado com facilidade na época da edição do livro, mas as mudanças tecnológicas são muito rápidas o que nos leva a não nos responsabilizarmos pela eventual dificuldade em se obter componentes para os experimentos quando indicados em outros livros desta série.

Copyright by
INSTITUTO NEWTON C. BRAGA
1ª edição

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução total ou parcial, por qualquer meio ou processo, especialmente por sistemas gráficos, microfilmicos, fotográficos, reprográficos, fonográficos, videográficos, atualmente existentes ou que venham a ser inventados. Vedada a memorização e/ou a recuperação total ou parcial em qualquer parte da obra em qualquer programa juscibernético atualmente em uso ou que venha a ser desenvolvido ou implantado no futuro. Estas proibições aplicam-se também às características gráficas da obra e à sua editoração. A violação dos direitos autorais é punível como crime (art. 184 e parágrafos, do Código Penal, cf. Lei nº 6.895, de 17/12/80) com pena de prisão e multa, conjuntamente com busca e apreensão e indenização diversas (artigos 122, 123, 124, 126 da Lei nº 5.988, de 14/12/73, Lei dos Direitos Autorais).

ÍNDICE

1 - Semicondutores, Diodos 11

1.1 – Estrutura e propriedades de materiais semicondutores.....	11
1.2 – Junções PN	15
1.3 – O diodo semiconductor	17
1.4 – Tipos de diodos	21
1.4.1 - Diodos de Germânio	21
1.4.2 - Código Pro-electron	22
1.4.3 - Diodos de Silício de Uso Geral	23
1.4.4 - Diodos Retificadores de Silício	23
1.5 – O diodo zener	24
1.5.1 - Nomenclatura dos diodos zener	26
1.6 – O LED (Diodo Emissor de Luz)	27
1.6.1 – TV de LEDs	29
1.6.2 – Usando LEDs	30
1.7 – Os foto-diodos	31
1.7.1 - Uso dos Foto-Diodos	33
1.8 – Outros tipos de diodo: Schottky, tunel, varicap, etc.	33

2 - Fontes de Alimentação,

Circuitos com Diodo 41

2.1 -A Fonte de alimentação	41
2.2 – O transformador e sua função	43
2.3 – Retificação	46
2.4 – Filtragem	50
2.4.1-Fator de Ripple	53
2.5 – Regulagem	54
2.5.1 – Calculando um Circuito de Regulagem com Diodo Zener	55
2.5.2 – Outros Componentes Reguladores	58
2.5.3 – Fontes sem transformador	58
2.6 - Circuitos com diodos	63
2.7 – Multiplicadores de tensão	67
2.7.1 – Dobradores de tensão	67
2.7.2 – Triplicadores de tensão	67
2.7.3 – Quadruplicadores de tensão	68
2.7.4 – Multiplicador de tensão por n	68

3 - Transistores Bipolares73

3.1- A estrutura do transistor	74
3.2 – Polarização	75
3.3 – Configurações	81
3.4 - O transistor na prática.....	84
3.4.1 – Transistores de Uso Geral	85
3.4.2 – Transistores de Potência	86
3.4.3 –Transistores de RF	87
3.4.4 - Aplicações de Alta Velocidade	89
3.5 - Tipos e identificação de terminais.	90
3.6 – Especificações	91

4 - Circuitos com transistores 95

4.1 - O Transistor como chave	96
4.1.2 - Chaves Eletrônicas na Prática	97
4.1.3 - No Computador e circuitos lógicos	100
4.2 – Polarização do transistor como amplificador	101
4.2.1 – Famílias de curvas	102
4.2.2 – Os circuitos de polarização	103
4.3 – Ganhos Alfa e Beta	106
4.4 - Reguladores de Tensão	107
4.5 - Acoplamentos	110
4.5.1 - Acoplamento direto	111
4.5.2 - Acoplamento Darlington	112
4.5.3 - Acoplamento RC	113
4.5.4 - Acoplamento LC	114
4.5.5 - Acoplamento a transformador	115
4.6 – Desacoplamentos	117

5 - Transistor Unijunção e de Efeito de Campo 123

5.1 - A Estrutura do Transistor Unijunção	124
5.1.1 – O Transistor Programável Unijunção ou PUT.....	127
5.2 – Outras Aplicações Para os Transistores Unijunção	128
5.3 – Os Transistores de Efeito de Campo de Junção (JFET)	129

5.4 – Transistores de efeito de campo MOS	134	7 - Osciladores	181
5.5 – Cuidados com a ESD	138	7.1 - O QUE SÃO OSCILADORES	182
5.5.1 - Prevenção	140	7.2 – Oscilador Hartley	185
5.5 – Polarização e circuitos com transistores de efeito de campo MOS	142	7.2.1 – Fórmula Para a Frequência do Oscilador Hartley	186
5.7 – Os Transistores de potência, Power MOS ou Power-MOSFETS.....	145	7.3 - OSCILADOR COLPITTS	187
5.7.1 - Na Prática	148	7.3.1 - Oscilador de Colpitts	188
6 - SCRS, TRIACs	153	7.4 - OSCILADOR DE BLOQUEIO	189
6.1 – Estrutura e funcionamento do SCR	154	7.5 - OSCILADOR DE DUPLO T	190
6.2 – Especificações dos SCRs	158	7.6 – Oscilador por Deslocamento de Fase	193
6.2.1 - Tensão máxima entre o anodo e o catodo (VD e VR)	158	7.7 - MULTIVIBRADOR ASTÁVEL	196
6.2.2 - Corrente máxima no sentido direto (ID)	159	7.7.1 – Ciclo Ativo	198
6.2.3 - Potência de dissipação	159	7.7.2 – Cálculo da Frequência do Multivibrador Astável	199
6.2.4 - Corrente de disparo (IGT)	160	7.8 - Harmônicas	201
6.2.5 - Velocidade de operação (dV/dt).....	160	7.9 - OSCILADOR DE RELAXAÇÃO	203
6.2.6 – Os LASCR	161	7.9.1- Oscilador de Relaxação com Lâmpada Neon	204
6.3 - CIRCUITOS PRÁTICOS	162	7.10 - OUTROS OSCILADORES	206
6.3.1 - Circuitos de corrente contínua	162	7.11 – Controle de frequência	207
6.3.2 - Circuitos de corrente alternada	165	7.12 – Base comum	208
6.3.3 - Problemas de interferências (RFI)	167	8 - Amplificadores	213
6.4 – Estrutura do TRIAC	168	8.1 - OS AMPLIFICADORES DE ÁUDIO	214
6.5 – Especificações do TRIAC	169	8.1.1 - Impedância de entrada	214
6.5.1 - Tensão máxima de trabalho (VDRM)	170	8.1.2 - Sensibilidade	215
6.5.2 - Corrente máxima IT(RMS)	170	8.1.3 - Impedância de saída	215
6.5.3 - Corrente de disparo IGT	170	8.1.4 - Potência ou amplitude de sinal	215
6.6 - Circuitos práticos	170	8.1.5 – Amplificadores Analógicos e Digitais ...	219
6.7 – Outros componentes da família dos tiristores	173	8.1.6 – Pré-amplificadores de áudio	220
6.7.1 - SUS	173	8.1.7 – Como Eliminar Roncos de 60 Hz	221
6.7.2 - SBS	174	8.1.8 – Drivers ou Impulsores	227
6.7.3 - Diac	175	8.1.9 – Amplificadores de potência	227
6.7.4-Quadrac	177	8.2 - CLASSES DE AMPLIFICADORES	228
6.7.5 – SIDAC	177	8.3 - AMPLIFICADORES EM CONTRAFASE	230
6.7.6 - Outros	178	8.4 – AMPLIFICADORES EM SIMETRIA COMPLEMENTAR	232
		8.5 - AMPLIFICADORES DE RF	236
		8.6 - AMPLIFICADORES SINTONIZADOS	239
		8.7 – AMPLIFICADORES EM CONTRAFASE	241
		8.8 – AMPLIFICADORES INTEGRADOS	243

ÍNDICE

9 - Outros componentes importantes 247

- 9.1 - Os Varistores 247
 - 9.1.1 - A “Sujeira” Da Rede de Energia 250
 - 9.1.2 - Como a sujeira afeta os equipamentos eletrônicos 254
 - 9.1.3 - As Proteções que já existem 255
- 9.2 - Transdutores de Efeito Hall 257
- 9.3 - VÁLVULA GEIGER-MULLER 259
- 9.4 - PILHAS SOLARES 262
- 9.5 - MOSTRADORES DE CRISTAL LÍQUIDO 265
- 9.6 - Outros dispositivos 269
 - 9.6.1 - Cristais 269
 - 9.6.2 - Lâmpadas de xenônio 270
 - 9.6.3 - ACOPLADORES ÓPTICOS 271
 - 9.6.4 - Chaves ópticas 273
 - 9.6.5 - O Tubo de raios catódicos 274
 - 9.6.6 - Diodos Laser 278
 - 9.6.7 - Motores de Passo 280

10 - Os circuitos integrados 285

- 10.1 - Integrando componentes 285
- 10.2 - O Circuito integrado 292
- 10.3 - Tipos de Circuitos Integrados 294
 - 10.3.1- O Invólucro DIL 297
 - 10.3.2 - Outros invólucros 298
- 10.6 - Tecnologia SMD 300
 - 10.6.1 - Códigos Para Resistores SMD 301
- 10.7 - Como usar os integrados 308
- 10.8 - Como testar circuitos integrados 309
- 10.9 - Circuitos integrados na prática 309

11 - Amplificadores operacionais, 555 313

- 11.1 - O Amplificador Operacional 313
 - 11.1.1- Invólucros 318
 - 11.1.2 - Na Prática 319
 - 11.1.3 - O que significa Rail-to-Rail (RRO) 320
- 11.2 - CMRR - Rejeição em Modo Comum 322
- 11.3 - Fontes para amplificadores operacionais 323
- 11.4 - Aplicações Práticas 326
- 11.5 - Osciladores e filtros 333
 - 11.5.1 - Cálculos para o oscilador com Amplificador Operacional 335
- 11.6 - O Circuito Integrado 555 341
 - 11.6.1 - Monoestável 342
 - 11.6.2 - Astável 344
 - 11.6.3 - Instruções de uso do 555 344

12 - Reguladores de tensão, Amplificadores

integrados 349

- 12.1 - Reguladores fixos 349
 - 12.1.1- Reguladores de tensão 78xx 350
- 12.2 - Reguladores ajustáveis 353
 - 12.2.1 - O LM350 354
 - 12.2.2 - Low Dropout ou LDO 356
- 12.4 - Amplificadores de áudio integrados 360
 - 12.4.1 - Amplificador LM386 361
 - 12.4.2 - Amplificador de Prova com o TDA7052 362
 - 12.4.3 - TDA2002 de 8 Wrms 364
 - 12.4.4 - LM4765 366
- 12.5 - Amplificadores em ponte (BTL) 369

Anexos

RESPOSTAS 375

LINKS UTEIS 375

APRESENTAÇÃO

Em 1972, já com experiência no ensino de eletrônica em cursos presenciais, fui contratado por uma grande organização de ensino por correspondência para renovar seu curso prático de eletrônica. Completado esse trabalho, fui trabalhar na Editora Saber em 1976 onde passei a publicar nas páginas da Revista Saber Eletrônica o primeiro Curso de Eletrônica em Instrução Programada, uma novidade que atraiu a atenção de milhares de leitores que tiveram sua formação inicial totalmente apoiada nos ensinamentos que então disponibilizamos.

O sucesso desse curso fez com que em diversas ocasiões posteriores o curso fosse repetido e atualizado nas páginas da mesma revista e na revista Eletrônica Total. Neste intervalo publicamos a primeira edição completa desse curso que recebeu o nome de Curso Básico de Eletrônica e chegando até sua quinta edição, posteriormente sendo em 2009 transformado numa apostila.

No entanto, desde a primeira edição e o primeiro curso na revista, muita coisa mudou, e se bem que diversas atualizações fossem feitas, chegou o momento de se fazer algo novo, adaptado aos novos tempos da eletrônica, num formato mais atual e com conteúdo que seja mais útil a todos que desejarem aprender o básico da eletrônica. Desta forma o conteúdo do curso anterior foi separado em dois, Curso Básico de Eletrônica (já publicado – Vol 1 da série) e Curso de Eletrônica Analógica (que é este volume – Vol 2), os quais devem ser completados com a versão já existente do Curso de Eletrônica Digital. O Curso de Eletrônica Digital que deve ser remodelado, com a divisão em dois volumes, terá nova abordagem e, num quinto volume, teremos a parte prática.

Assim, nesta primeira edição do Curso de Eletrônica Analógica, abordamos todo o conhecimento daquelas edições e mais informações atuais sobre novas tecnologias, novos componentes e novas aplicações. Podemos dizer que este livro, como os demais, podem ser considerados a plataforma de iniciação ideal para muitos cursos, dos técnicos às disciplinas eletivas, da reciclagem de conhecimentos até aqueles que desejam ter na eletrônica uma segunda atividade ou precisam deles para o seu trabalho em área relacionada.

Newton C. Braga

Desde 1976, quando criamos a primeira versão de um Curso de Eletrônica básico que pudesse servir de iniciação aos que desejassem ter conhecimentos da eletrônica, essa ciência passou por grandes transformações. Do fim da válvula ao transistor, quando começamos, e os primeiros circuitos integrados, a eletrônica evoluiu para a tecnologia dos CIs de alto grau de integração, os FPGAs, os DSPs, microcontroladores e as montagens em superfície. Assim, nosso livro Curso de Eletrônica, com o primeiro volume tratando da Eletrônica Básica, e este segundo sobre Eletrônica Analógica, pode ser considerado um curso atualizado com finalidades um pouco diferentes das que visava na época de sua criação original. A eletrônica em nossos dias não é propriamente um fim, onde uma vez domada ela por si só, já permite que as pessoas encontrem uma atividade direta que lhes dê renda ou possam almejar um emprego. A eletrônica hoje é um meio de se alcançar qualificações em outras áreas, como as telecomunicações, informática, automação, segurança, eletrônica embarcada e muito mais. Assim, nosso curso visando justamente às necessidades de conhecimento que a preparação para essas áreas pedem, tem uma abordagem direta e rápida de conceitos que, em princípio, não exigem conhecimento prévio dos que desejam aprender.

Capítulo 1- Nele estudaremos a estrutura dos materiais semicondutores, como seus átomos se ligam e como estes materiais podem ser dopados de modo a ter suas características alteradas para a obtenção dos componentes modernos. Veremos também como funcionamos diodos semicondutores e seus principais tipos.

Capítulo 2 – Neste capítulo tomaremos contato com os circuitos práticos com diodos, incluindo as fontes de alimentação. Veremos como funcionam os diversos tipos de fontes, como a retificação, filtragem e a regulação da tensão são obtidas numa fonte.

Capítulo 3 - O terceiro capítulo tratará do mais importante de todos os componentes semicondutores que é o transistor bipolar. Analisaremos sua estrutura, sua polarização e os circuitos básicos. Também estudaremos as diferentes famílias de transistores com que podemos contar para projetos e aplicações. e outros.

Capítulo 4 – Neste capítulo encontraremos os transistores em circuitos práticos. Veremos como os transistores podem ser usados como chaves e de que modo podem ser utilizados para amplificar sinais. Também trataremos dos acoplamentos e desacoplamentos dos circuitos transistorizados.

Capítulo 5 – Este capítulo tratará de dois outros componentes da família dos transistores, os transistores unijunção e os transistores de efeito de campo. Analisaremos suas configurações e suas aplicações práticas.

Capítulo 6 – Outros componentes importantes obtidos com a utilização de materiais semicondutores formando junções são os SCRs e os Triacs. Estes componentes, da família dos tiristores, serão estudados neste capítulo. Teremos seus principais circuitos de aplicação e seus tipos.

Capítulo 7 – Um tipo muito importante de circuito encontrado em grande quantidade de projetos é o que gera sinais. Este capítulo tratará justamente destes circuitos, que são os circuitos osciladores. Analisaremos os tipos e como são utilizados.

Capítulo 8 – Uma aplicação muito importante dos semicondutores se deve a sua capacidade de amplificar sinais. Assim, neste capítulo veremos como os transistores são usados na amplificação de sinais. Amplificadores de áudio e RF serão estudados neste capítulo.

Capítulo 9 – Além dos componentes estudados nos capítulos anteriores, existem muitos outros. Alguns deles serão estudados nesta lição, como os varistores, a válvula Geiger, as células solares e os mostradores de cristal líquido. Também trataremos das lâmpadas de xenônio, acopladores e chaves ópticas além da lâmpada de xenônio.

Capítulo 10 – Este capítulo cuidará dos circuitos integrados. A possibilidade de montarmos numa única pastilha de materiais semicondutores leva a uma infinidade de aplicações eletrônica. Esta lição mostrará como isso é feito e também dos componentes SMD.

Capítulo 11 – Este capítulo cuidará de circuitos integrados muito importantes em nossos dias. Trataremos da família dos amplificadores operacionais e também de um dos mais populares dos circuitos integrados, o timer 555, fornecendo dados para sua utilização.

Capítulo 12 - No último capítulo do nosso livro trataremos dos circuitos integrados utilizados como reguladores de tensão e também dos amplificadores de áudio lineares ou analógicos encontrados na forma de circuitos integrados.

Enfim, o conteúdo estudado pode ser considerado como o segundo degrau de uma escada que levará os interessados a um mundo de conhecimento técnico capaz de significar sua realização profissional e muito mais que isso, a satisfação pessoal de dominar as mais importantes tecnologias de nosso tempo.

Newton C. Braga



» Semicondutores

» Diodos

Toda eletrônica moderna se baseia nos materiais semicondutores. São suas propriedades que permitem a fabricação dos principais componentes modernos, dos mais simples como diodos e transistores, até os mais complexos como os circuitos integrados comuns, microprocessadores, microcontroladores, DSPs, FPGAs e muito mais. Neste capítulo vamos estudar estes materiais, suas propriedades elétricas e como eles podem ser usados em eletrônica. O capítulo consta dos seguintes itens:

- 1.1 – Estrutura e propriedades de materiais semicondutores
- 1.2 – Junções PN
- 1.3 – O diodo semicondutor
- 1.4 – Tipos de diodos
- 1.5 – O diodo zener
- 1.6 – O LED (Diodo Emissor de Luz)
- 1.7 – Os foto-diodos
- 1.8 – Outros tipos de diodo: Schottky, tunnel, varicap, etc.

1.1 – Estrutura e propriedades de materiais semicondutores

Conforme afirmamos na apresentação deste capítulo, muitos componentes modernos como transistores, circuitos integrados e outros, em que se baseia a eletrônica moderna, são fabricados a partir de certos materiais que apresentam propriedades elétricas especiais. Estes materiais são denominados semicondutores.

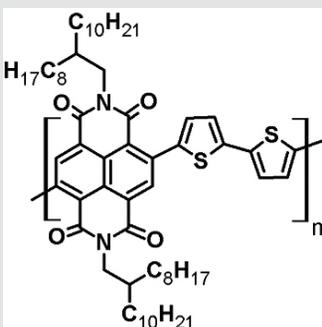
Estudamos nos capítulos do Curso Básico (volume anterior da série) que existem dois tipos de comportamentos dos materiais em relação à capacidade de conduzir a corrente elétrica. Existem os materiais através da qual a corrente pode fluir com facilidade, sendo denominados condutores, e os materiais em que a corrente não pode passar, denominados isolantes.

Supercondutores

No curso básico falamos de um tipo especial de condutor que, em temperaturas muito baixas, perde totalmente a resistência. Estes materiais, que nas temperaturas comuns apresentam uma certa resistência, passam a ter uma resistência nula, tornando-se assim supercondutores.

Semicondutores orgânicos

Já é possível, através de tecnologias especiais, criar moléculas orgânicas (a base de carbono) que apresentam propriedades elétricas semicondutoras. Os primeiros componentes eletrônicos baseados nesta tecnologia começam a aparecer em algumas aplicações como, por exemplo, em sensores. Na figura A, uma molécula orgânica que se comporta como um semicondutor N



Molécula orgânica desenvolvida na Universidade de Stanford e que se comporta como um semicondutor N.

Dentre os condutores, destacamos os metais, os gases ionizados, as soluções iônicas, etc. Dentre os isolantes, destacamos o vidro, a borracha, a mica, plásticos, etc.

Há, entretanto, uma terceira categoria de materiais, um grupo intermediário de materiais que não são bons condutores, pois a corrente tem dificuldade em passar através deles, mas não são totalmente isolantes. Nestes materiais, os portadores de carga podem se mover, mas com certa dificuldade. Estes materiais são denominados “semicondutores”.

Dentre os materiais semicondutores mais importantes, que apresentam essas propriedades, destacamos os elementos químicos silício (Si), germânio (Ge) e o Selênio (Se). Numa escala de capacidades de conduzir a corrente, eles ficariam em posições intermediárias, conforme mostra a figura 1.

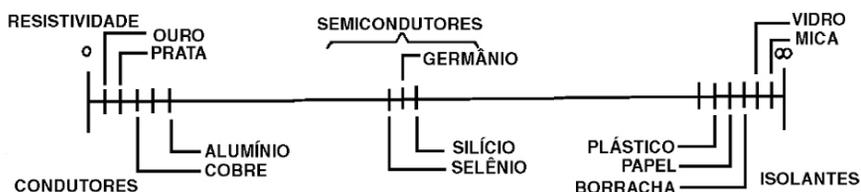


Figura 1 – A escala de condutividade dos materiais

Durante certo tempo, muitos componentes eletrônicos eram feitos exclusivamente à base de germânio, caso dos primeiros transistores, mas depois o silício praticamente tomou conta da tecnologia eletrônica e hoje alguns outros materiais começam a aparecer em aplicações importantes como o Gálio (Ga), índio (In), e diversas ligas que incluem a utilização destes materiais em conjunto.

Para entendermos o comportamento desses materiais, será interessante analisarmos o modo como os átomos estão dispostos nesses materiais. No germânio e no silício, os átomos possuem 4 elétrons em sua última camada de modo que, quando eles formam uma estrutura, esses átomos se dispõem da maneira que pode ser vista na figura 2.

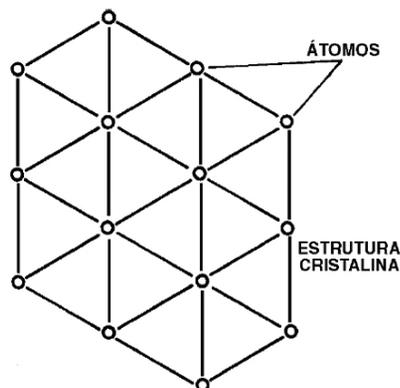


Figura 2 – A estrutura cristalina do silício e do germânio

Trata-se de uma estrutura cristalina em que a disposição se mantém em toda a extensão do corpo, dotando-os de propriedades especiais.

Para os que já estudaram química de uma forma um pouco mais avançada, esta estrutura mostra que o equilíbrio é alcançado. De fato, a tendência dos átomos numa estrutura é a união de tal forma que na última camada tenhamos sempre 8 elétrons.

Assim, na forma de um cristal, como o que vimos, tanto o Germânio como o Silício podem compartilhar os elétrons das últimas camadas dos átomos vizinhos, de tal forma que sempre teremos 8 elétrons em torno de cada núcleo, conforme o leitor poderá ver na figura 3.

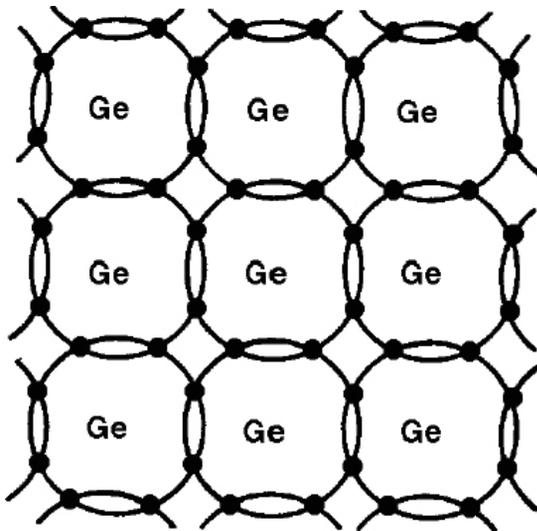


Figura 3 – Os átomos compartilham elétrons de modo que cada um fique com sua camada externa completa;

Esse compartilhamento faz com que a estrutura obtida seja muito estável, e os elétrons tão firmemente presos nos pontos em que devem permanecer que sua mobilidade é reduzida através do material.

Como os elétrons são os portadores de carga, a dificuldade que encontram em se movimentar por entre os átomos dessa estrutura, dificulta a passagem de qualquer corrente elétrica. Isso faz com que a resistividade de materiais semicondutores puros, como o silício ou o germânio, seja muito alta.

Na sua forma pura nenhum material semicondutor, como o Silício e o Germânio, encontra aplicações práticas na eletrônica, mas a situação muda se adicionarmos certas “impurezas” a esses materiais.

Essas impurezas consistem em substâncias cujos átomos tenham em sua última camada um número de elétrons diferente de 4. E, para que o efeito desejado seja obtido, a adição dessas impurezas se faz numa quantidade extremamente pequena, da ordem de poucas partes por milhão ou p.p.m..

Temos então duas possibilidades de adição de impurezas aos materiais semicondutores:

- Elementos cujos átomos possuam 5 elétrons na última camada (camada de valência). Estes elementos são denominados pentavalentes.
- Elementos cujos átomos possuam 3 elétrons na última camada (camada de valência). Estes elementos são denominados trivalentes.

O primeiro caso pode ser visto na figura 4. Trata-se do elemento arsênio (As) que possui 5 elétrons na sua última camada. Vamos supor que formamos uma estrutura em que cada átomo de arsênio fique cercado por átomos de germânio (ou silício).

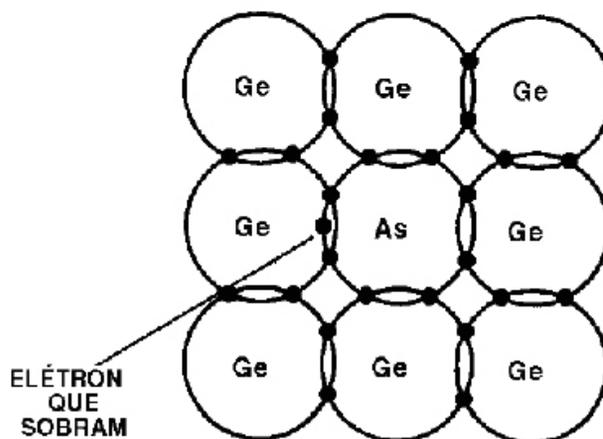


Figura 4 – Obtendo um material tipo N

Como os átomos vizinhos só podem compartilhar 8 elétrons, na forma mostrada na figura, sobra um elétron no local em que existe um átomo com 5 elétrons. Este elétron que sobra tem mobilidade, podendo se deslocar através do material. O elétron pode saltar de átomo para átomo, movimentando-se através da estrutura.

Esta mobilidade permite que ele seja usado como um “portador” de cargas, ou seja, num agente que possibilita a circulação de correntes.

Assim, nos materiais dopados com estes átomos, a resistividade é menor e eles apresentam maior capacidade de conduzir a corrente. Como os portadores de carga são elétrons (negativos), dizemos que se trata de um material semiconductor do tipo N (negativo).

Na segunda possibilidade, acrescentamos uma impureza que tenha átomos dotados de 3 elétrons na última camada como, por exemplo, o índio (In), obtendo-se então uma estrutura conforme o leitor poderá constatar pela figura 5.

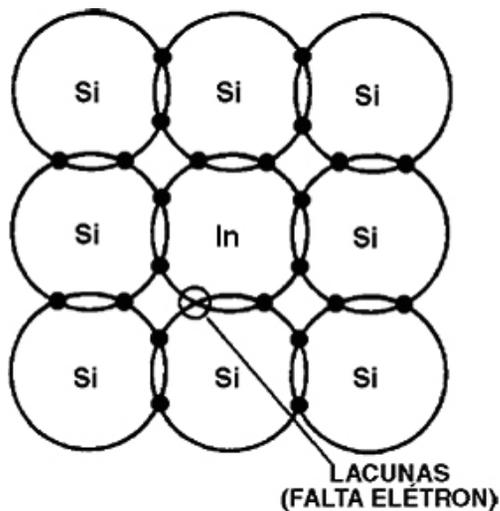


Figura 5 – Estrutura de um material P, dopado com índio (In)

Obs.: desenhamos as estruturas desta figura e a anterior em um plano para maior facilidade de entendimento. Na verdade elas são tridimensionais.

Veja então que no local em que se encontra o átomo dopante (In) não existem 8 elétrons para ser compartilhados, mas apenas 7. Sobra então uma vaga ou “lacuna” que poderia ser preenchida por elétrons.

Esta lacuna tem uma propriedade importante. Ela pode receber elétrons que se movimentam através do material. Os elétrons, que estão se movimentando através do material, podem “saltar” para essas lacunas, deslocando-se através dele. Em outras palavras, a presença de lacuna facilita a movimentação de cargas através do material, também diminuindo sua resistividade.

Como os portadores de cargas, neste caso, são as lacunas, ou seja, a falta de elétrons, que poderia ser associada a uma carga positiva, pois ela predomina nesse local, dizemos que o material semiconductor assim obtido é do tipo P (positivo).

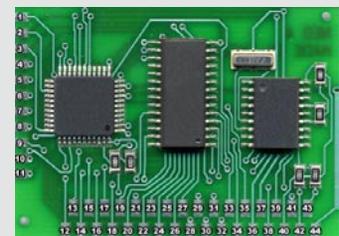
Podemos elaborar materiais semicondutores tanto do tipo P como do tipo N, usando elementos como o silício, germânio e diversos outros, com aplicações amplas na eletrônica. Basta dopar estes materiais como os elementos trivalentes ou pentavalentes que estudamos.

1.2 – Junções PN

Quando juntamos dois materiais semicondutores de tipos diferentes, P e N, forma-se entre eles uma junção que tem propriedades elétricas importantes. Na verdade, são as propriedades das junções semicondutores que tornam possível a fabricação de todos os dispositivos semicondutores modernos, do diodo, passando pelo transistor ao circuito integrado.

Os Chips

Em uma grande quantidade de equipamentos modernos como computadores, celulares, televisores, DVDs, MP3, etc. existem componentes que popularmente são denominados “chips”. Esses chips, na verdade, são pequenas pastilhas semicondutoras de silício existentes dentro de componentes denominados “circuitos integrados”. Os circuitos integrados possuem milhares ou mesmo milhões de componentes virtuais que são obtidos, desenvolvendo-se regiões microscópicas de materiais N e P. Essas regiões, atuando em conjunto fazem com que o circuito possa exercer funções muito complexas, algumas das quais estudaremos ainda nesse curso. É graças às propriedades dos materiais semicondutores, e do que ocorre quando tipos diferentes são unidos de diversas maneiras, que todas as maravilhas da eletrônica moderna são possíveis.



“Chips” (circuitos integrados), montados numa placa

A junção semicondutora é parte integrante de dispositivos como os SCRs, Triacs, LEDs, MOSFETs, e muitos outros. Por esse motivo, entender seu comportamento elétrico é vital para qualquer pessoa que pretenda se aprofundar nos conhecimentos de eletrônica. Se não soubermos como funcionam essas funções, não teremos condições de entender como funciona qualquer dispositivo semicondutor que as utilize.

Para entender como funciona a junção, vamos partir de dois pedaços de materiais semicondutores, um P e outro N, que são unidos, de modo a formar uma junção, conforme mostra a figura 6.

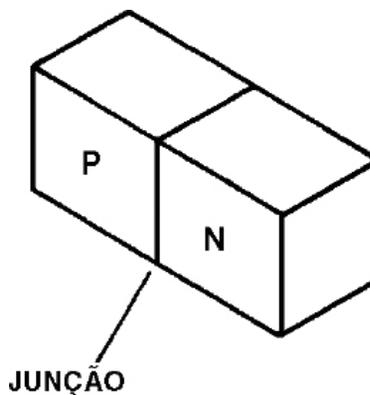


Figura 6 – Obtendo uma junção PN

No local da junção, os elétrons que estão em excesso no material N se deslocam até o material P, procurando então lacunas, onde se fixam.

O resultado é que temos elétrons neutralizando lacunas, ou seja, nesta região não temos mais material nem N e nem P, mas sim material neutro. No entanto, ao mesmo tempo em que ocorre a neutralização, uma pequena tensão elétrica passa a se manifestar entre as duas regiões de material semicondutor.

Essa tensão, que aparece na junção, consiste numa verdadeira barreira que precisa ser vencida para que possamos fazer circular qualquer corrente entre os dois materiais. Conforme o fenômeno sugere, o nome dado é “barreira de potencial”, conforme mostra a figura 7.

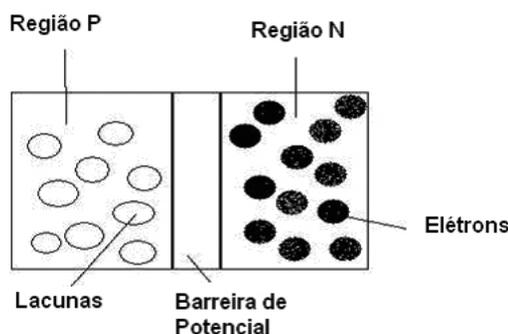


Figura 7 – A barreira de potencial

Esta barreira possui um valor que depende da natureza do material semiconductor usado, sendo da ordem de 0,2 V para o germânio e 0,6 V para o silício.

A estrutura indicada, com dois materiais semicondutores, P e N, forma um componente que apresenta propriedades elétricas importantes e que denominamos “diodo semiconductor”, ou simplesmente “diodo”. É dele que trataremos no próximo item.

1.3 – O diodo semiconductor

Para fazer uma corrente elétrica circular através de uma estrutura, como a estudada no item anterior, com dois materiais P e N formando uma junção, existem duas possibilidades, ou dois sentidos possíveis: a corrente pode fluir do material P para o N, ou vice-versa.

Na prática, veremos que diferentemente dos corpos comuns que conduzem a eletricidade, a corrente não se comporta da mesma maneira nos dois sentidos.

A presença da junção faz com que um comportamento completamente diferente se manifeste em cada caso.

Vamos então supor inicialmente que uma bateria seja ligada a estrutura formada pelos dois pedaços de material semiconductor que formam a junção, ou seja, à estrutura PN.

O material P é ligado ao pólo positivo da bateria, enquanto que o material N é ligado ao pólo negativo. Ocorre então uma repulsão entre cargas que faz com que os portadores de carga do material P, ou seja, as lacunas se movimentem em direção à junção, enquanto que os portadores de carga do material N, que são os elétrons livres, se afastam do pólo da bateria sendo empurrados em direção à junção.

Os portadores de carga positivos (lacunas), e os negativos (elétrons), se encontram na região da junção onde, por terem polaridades diferentes se recombinam e são neutralizados. A recombinação dessas cargas, “empurradas” pela bateria, abre caminho para que novas cargas sejam empurradas para essa região, formando assim um fluxo constante.

Esse fluxo, nada mais é do que uma corrente elétrica que pode fluir livremente através do componente, sem encontrar muita resistência ou oposição. Dizemos, nessas condições, que o componente, esta polarizado no sentido direto, conforme mostra a figura 8.

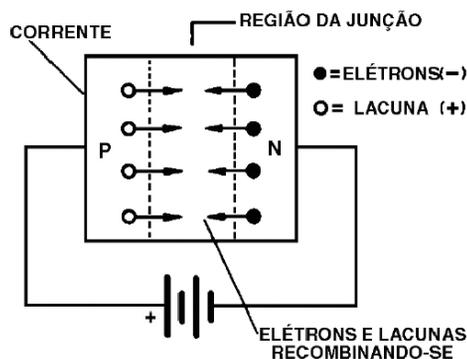


Figura 8 – Junção polarizada no sentido direto

Esse componente, denominado “diodo”, conforme já vimos, deixa então a corrente passar sem oposição quando polarizado no sentido direto.

Por outro lado, se invertermos a polaridade da bateria em relação aos pedaços de material semiconductor dessa estrutura, o fenômeno que se manifesta é diferente. Os portadores do material N são atraídos para o pólo positivo do gerador se afastando da região da junção. A polarização inversa pode ser visualizada na figura 9.

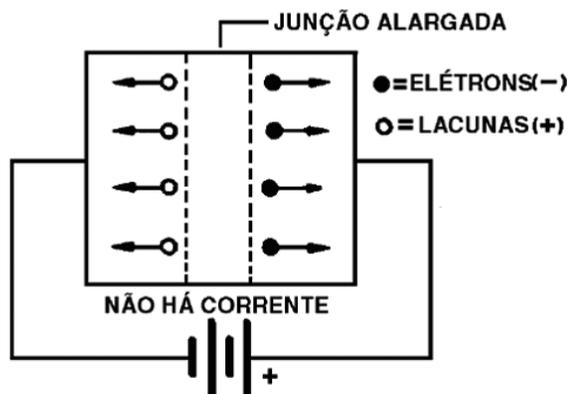


Figura 9 – Junção polarizada no sentido inverso

Da mesma forma, os portadores do material P também se afastam da junção, o que significa que temos um “alargamento da junção”, com um aumento da barreira de potencial que impede a circulação de qualquer corrente elétrica. A estrutura polarizada desta forma, ou seja, polarizada no sentido inverso, não deixa a corrente passar.

Na prática, uma pequena corrente da ordem de milionésimos de ampère pode circular, mesmo quando o diodo está polarizado no sentido inverso. Esta corrente “de fuga” se deve ao fato de que o calor ambiente agita os átomos do material de tal forma que, um ou outro portador de carga pode ser liberado, transportando corrente dessa forma.

Como a intensidade dessa corrente varia com a temperatura, uma estrutura desse tipo, ou seja, um diodo, também pode ser usado

como um excelente sensor de temperaturas. Termômetros eletrônicos, sensores de calor que ligam uma ventoinha quando um componente se aquece são baseados nessa propriedade dos diodos semicondutores.

Veja então que uma simples estrutura PN de Silício ou de Germânio já resulta num importante componente eletrônico que é o diodo. Na figura 10 o leitor terá a estrutura e o símbolo usado para representar o componente que lembra uma “seta”, indicando o sentido da corrente.

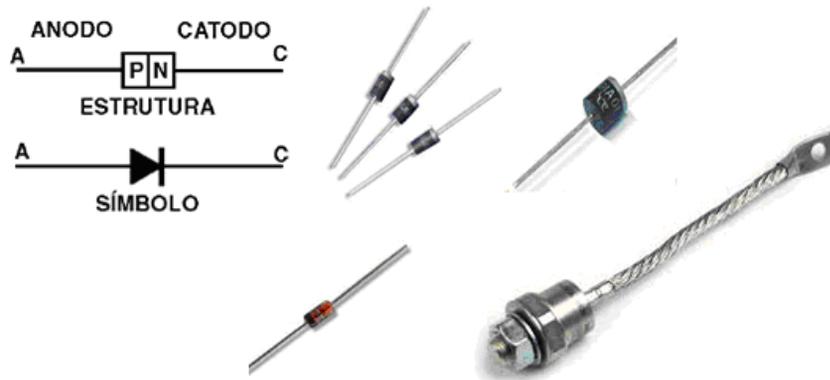


Figura 10 – Símbolo, estrutura e aspectos dos principais tipos de diodos

Na mesma figura temos os aspectos desses componentes, cujo tamanho depende da intensidade da corrente que podem controlar, ou conduzir, e também da tensão máxima que pode se manifestar entre seus terminais. Veja que existe uma faixa ou anel em alguns tipos de diodos, indicando o lado do catodo, ou seja, o lado do material N.

O diodo semicondutor pode então ser polarizado de duas formas, conforme o leitor verá na figura 11.

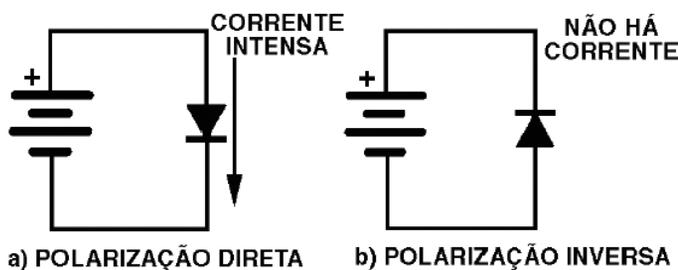


Figura 11 – Polarização direta e polarização inversa de um diodo.

Se o diodo for polarizado como mostra a figura em (a), com o pólo positivo da bateria ou outra fonte de energia elétrica em seu anodo, a corrente pode fluir com facilidade, pois o diodo apresenta uma resistência muito baixa. Dizemos que o diodo está polarizado no sentido direto.

Se a polarização for feita conforme mostra a mesma figura em (b), então nenhuma corrente pode circular. Dizemos que o diodo está polarizado no sentido inverso.

Diodo sensor

Diodos, como o da figura, podem ser usados como sensores de temperatura em diversas aplicações práticas.



Diodos SMD

Da mesma forma que muitos outros componentes eletrônicos, existem versões dos diodos em invólucros extremamente pequenos, denominados SMD (para montagem em superfície). Na figura A temos exemplos.



Figura A - diodos SMD

É muito comum que seja feita a comparação de um diodo semicondutor com uma “válvula hidráulica de retenção”, como a mostrada na figura 12.

Analogias

Muitos componentes eletrônicos podem ser analisados de forma mais simples de entender, se fizermos comparações com análogos (semelhantes) como os hidráulicos e pneumáticos. Assim, os fluidos, como a água ou um gás, fazem as vezes da corrente elétrica nestes dispositivos que funcionam de formam semelhante.

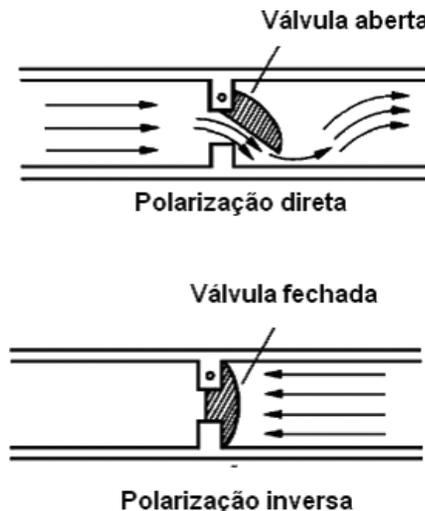


Figura 12 – A válvula hidráulica de retenção funciona como um diodo

Se a água for forçada a circular num sentido (direto), a válvula abre, deixando-a passar livremente. No entanto, se a água for forçada no sentido oposto (inverso), a válvula se mantém fechada e a água não pode circular.

Por estas propriedades, um diodo semicondutor pode ser usado em muitas aplicações eletrônicas importantes, muitas das quais teremos a oportunidade de ver nesse curso.

Observe ainda que, devido ao fato de que precisamos vencer a barreira de potencial de 0,2 V para os diodos de germânio, e 0,6 V para os diodos de silício, quando ocorre a condução, aparece sobre o componente sempre essa tensão, independentemente da intensidade da corrente que está circulando através dele, conforme é possível ver pela figura 13.

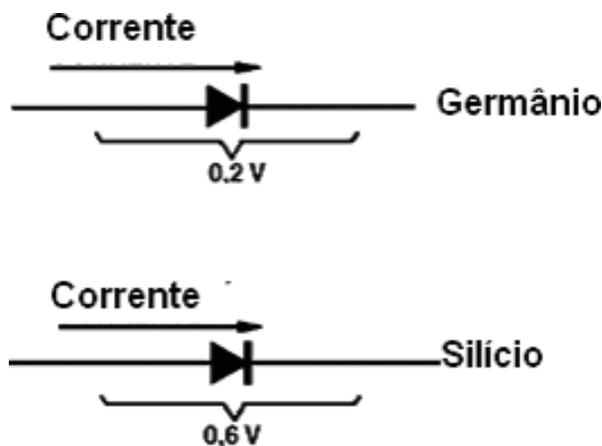


Figura 13 – Queda de tensão num diodo