

MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS**VOLUME 7****SUMÁRIO**

PROPRIEDADES ESTRUTURAIS E OPTOELETRÔNICAS DE LIGAS AMORFAS DE GERMÂNIO - Rafael Salomão Angelo da Silva	664
MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS - Luiz Carlos Baron	693
SEMICONDUCTORES - Marcos Gabriel Tragueta	719
ESTUDO DO ELEMENTO QUÍMICO TÂNTALO E SUAS APLICAÇÕES EM MATERIAIS ELÉTRICOS - Leandro Copetti Walter	733
FOTODIODOS E FOTOTRANSISTORES - Luiz Gustavo Lazzarin.....	747
LDR - LIGHT DEPENDENT RESISTOR: RESISTOR VARIÁVEL DE ACORDO COM INCIDÊNCIA DE LUZ - Guilherme Ghellere.....	757
TELEVISORES E MONITORES - Diego Fernando Borges	769
TRANSISTORES - Marcos Vinícius Santos	787

PROPRIEDADES ESTRUTURAIS E OPTOELETRÔNICAS DE LIGAS AMORFAS DE GERMÂNIO

Rafael Salomão Angelo da Silva

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento cada vez maior sobre propriedades dos materiais contribuiu bastante para a introdução de novos dispositivos utilizado em engenharia elétrica. Para poder realizar as aplicações nas diversas áreas de engenharia, é necessário ter um conhecimento de conceitos de ciência dos materiais.

Materiais amorfos são materiais não cristalinos que em sua estrutura atômica, não há presença de periodicidade ou ordem espacial. Apesar destes materiais não apresentarem uma estrutura sólida, eles podem ser mais rígidos, e tem como característica propriedades únicas. São feitos pela rápida solidificação de ligas metálicas, e possuem fácil magnetização pelo fato de seus átomos estarem arranjados de maneira aleatória, o que facilita a orientação dos domínios magnéticos.

2. MATERIAIS AMORFOS

Na grande maioria dos materiais cristalinos duros, os termos de anisotropia dominam os processos de magnetização, sendo que o termo magnetocristalino, associado a estrutura cristalina e um dos termos dominantes. Materiais que possuem um termo energia magnetocristalina baixo, com certeza são duros. Uma classe de materiais onde a anisotropia cristalina é praticamente inexistente é a dos vidros metálicos, ou materiais metálicos amorfos.

Devido ao arranjo cristalino de curto alcance e a ausência de anisotropia de algumas ligas amorfas, elas podem apresentar comportamento de alta permeabilidade magnética. Essas ligas são formadas por metais de transição e não metais, e também por elementos terras raras e metais de transição. Essa liga apresenta-se como um doador de eletros à banda D do metal de transição, alterando significativamente as propriedades magnéticas tais como magnetização de saturação e temperatura de Curie.

Como nos materiais amorfos a anisotropia magnetocristalina é praticamente inexistente, é possível afirmar que o fator que mais contribui para gerar um eixo de fácil magnetização está relacionado à anisotropia magnetoelástica, que surge devido a tensões internas, grãos em formato colunar, gradientes de concentração, etc. gerados durante o processo de produção das ligas.

A Figura 1 mostra a estrutura da liga amórfica:

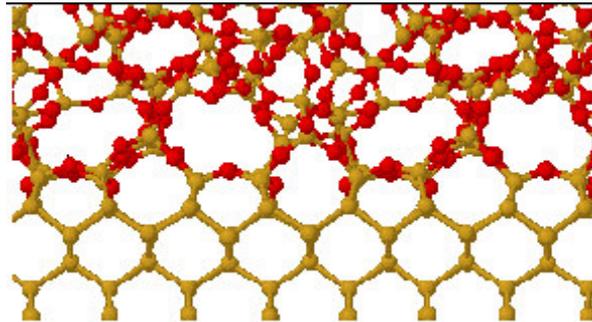


FIGURA 1 – Comparativo entre uma estrutura amorfa (superior) e uma cristalina (inferior)

A figura acima compara um material Si que pode-se observar facilmente a presença de estruturas cristalinas, e o material amorfo SiO_2 , que apresenta estrutura desordenada.

Uma grande desvantagem dos materiais amorfos é a impossibilidade de utilização do mesmo a altas temperaturas, o que faz com que leve esse material a cristalização.

3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS AMORFOS

Os materiais amorfos podem ser caracterizados pelas suas propriedades físicas mais relevantes aplicadas em engenharia. Abaixo estão citadas algumas delas.

3.1 ESPESSURA

Os metais amorfos admitem uma espessura nominal das lâminas do núcleo da ordem de magnitude de aproximadamente 10 vezes menor que os materiais comerciais, como o ferro-silício. Esta é uma das razões pelas quais eles apresentam baixos valores de perdas no núcleo. Entretanto, um maior número de laminações implica em aumento dos custos de produção.

3.2 DUREZA

Os metais amorfos são extremamente duros, da ordem de 4 vezes maior que os aços usados como materiais elétricos convencionais.

3.3 FATOR DE EMPILHAMENTO

A combinação das características de alta dureza, lâminas de espessura muito baixa e variável, com superfície rugosa, contribuem para um fator de empilhamento baixo, da ordem de 80%, comparado com 95% dos aços usados como materiais elétricos convencionais. Conseqüentemente, a área de seção reta do núcleo destes transformadores é cerca de 18% maior que dos transformadores com núcleo de ferrosilício.

3.4 EFEITO DE RECOZIMENTO

Aços elétricos convencionais, por serem magneticamente orientados, têm stress elástico bem menor que metais amorfos. Estes por não serem, a priori, magneticamente orientados e terem elevado stress elástico introduzido durante o processo de fabricação devem ser imperativamente recozidos. O recozimento na presença de um campo magnético longitudinal melhora significativamente suas propriedades magnéticas, tais como indução de saturação, força coerciva, perdas ativas e potência de excitação, promovendo a relaxação estrutural do material.

O alto stress interno das ligas amorfas é resultado da solidificação rápida, não permitindo a formação de cristais no material e deixando-o instável. A relaxação estrutural obtida pelo tratamento térmico e magnético realizado durante o recozimento em temperaturas abaixo da cristalização leva o material a um estado semi-estável. Entretanto, ele reduz a ductibilidade do material, deixando-o mais rígido e quebradiço.

3.5 INDUÇÃO DE SATURAÇÃO

Os materiais amorfos têm em geral uma composição de 80% de ferro e 20% de boro. Esta composição leva estes materiais a terem uma indução de saturação 20% menor quando comparado aos materiais de ferro puro para mesma temperatura. De fato, tanto o aumento da temperatura, quanto o aumento de Boro + Silício na liga amorfa, diminuem sua indução de saturação crescentemente.

3.6 MAGNETO-ESTRICÇÃO

A alteração das dimensões físicas de um material magnético quando magnetizado causa ruído e/ou perdas no núcleo. Ligas amorfas baseadas em ferro exibem uma magneto-estricção linear de saturação comparáveis às do ferro-silício de grão orientado, assim como os níveis de ruído de ambas as ligas são praticamente os mesmos.

3.7 MASSA E VOLUME

Em decorrência do aumento na área de seção reta, consequência do maior fator de empilhamento, o volume dos transformadores com núcleo de material amorfo é maior que os de ferro-silício em mais de 15%. Em função da menor indução de saturação dos materiais amorfos, novamente é necessário aumento da área de seção reta do núcleo para que se tenha o mesmo valor de fluxo magnético, o que implica em maior quantidade de material necessário para sua construção. A consequência direta disso é o aumento da massa do núcleo do transformador (em média 15%).

4. PROCESSO DE PRODUÇÃO

Para a produção de um material amorfo, é necessário uma taxa de resfriamento do material da ordem de 10^5 a 10^6 K/s. Onde as ligas FeNiCo-BSiC, que são as de maior interesse comercial, podem ser processadas no ar, já a liga Be-Ti, que é muito reativa, necessita-se de se realizar o processo no vácuo.

Inicialmente, as técnicas de produção desses materiais, eram feito simplesmente utilizando-se uma gota impulsionada a altas velocidades em um substrato resfriado. Com o avanço das pesquisas nesta área, já é possível produzir fitas de comprimento mais significativo. Onde com as técnicas utilizadas hoje, é possível produzir fitas de 50mm de largura rotineiramente.

5. OUTRAS APLICAÇÕES

Uma das principais aplicações das ligas metálicas amorfas é no núcleo de transformadores de distribuição. Transformadores usando núcleos de materiais amorfos, apresentam perdas de 60 a 70 % menores do que a dos transformadores convencionais.

Com a evolução acelerada de novas tecnologias, o uso da energia elétrica aumentou drasticamente, por isso o uso racional de energia é muito importante.

As perdas associadas com distribuição são de particular interesse para as concessionárias, e o uso de núcleos de metais amorfos nos transformadores de distribuição é uma das alternativas encontradas para a melhoria de eficiência.

6. COMPARAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES DE NÚCLEO AMORFO E NÚCLEO DE AÇO-SILÍCIO

Os transformadores com núcleo de material amorfo apresentam sensíveis vantagens em relação aos de aço-silício, principalmente em relação as suas perdas. Observa-se também significativas reduções na corrente de excitação e no ruído. Entretanto ele é mais pesado, mais volumoso e mais caro do que o convencional.

A tabela abaixo exibe um comparativo entre os transformadores amorfos com os convencionais.

TABELA 1 – Comparativo entre transformador de material amorfo com um aço-silício

Tipo	Amorfo						Aço-Silício				
	KVA	Perdas a vazio (W)	Perdas c/ carga (W)	%I exc.	%Z	Massa (lb)	Perdas a vazio (W)	Perdas c/ carga (W)	%I exc.	%Z	Massa (lb)
1 ϕ	10	12	102	0.31	1.6	318	29	111	0.60	1.8	300
	15	16	141	0.27	1.6	422	41	143	0.70	1.9	321
	25	18	330	0.15	1.9	441	57	314	0.36	2.25	406
	50	29	455	0.13	2.7	719	87	462	0.23	3.2	709
	75	37	715	0.09	3.3	944	122	715	0.38	3.0	821
	100	49	944	0.09	3.0	1131	162	933	0.21	2.6	961
3 ϕ	75	51	925	0.14	4.0	2030	142	956	0.31	4.1	2000
	150	90	1397	0.10	3.9	2870	216	1429	0.24	3.5	2900
	300	165	1847	0.10	3.9	4360	412	2428	0.14	5.1	3600
	500	230	3282	0.10	4.8	6090	610	3589	0.18	4.6	4900
	750	327	4468	0.09	5.75	6600	713	5206	0.15	5.75	6800

Analisando a tabela é possível se observar que, tanto para transformadores amorfos monofásicos (dados superiores da tabela), quanto para transformadores amorfos trifásicos (dados inferiores da tabela), as perdas tanto em KVA quanto em KW são consideravelmente menores do que para os transformadores convencionais,

então cabe ao engenheiro eletricitista analisar o local, a energia a ser entregue e o custo benefício, a fim de se decidir qual transformador utilizar na ocasião.

7. CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

Conforme se observa na curva de magnetização a seguir, os materiais amorfos apresentam ciclo de histerese extremamente estreito, além de apresentar baixa força coerciva.

Como a área interna da curva B-H representa as perdas devidas à magnetização do núcleo, é visível a vantagem dos materiais amorfos a respeito das perdas a vazio e das baixas correntes de magnetização.

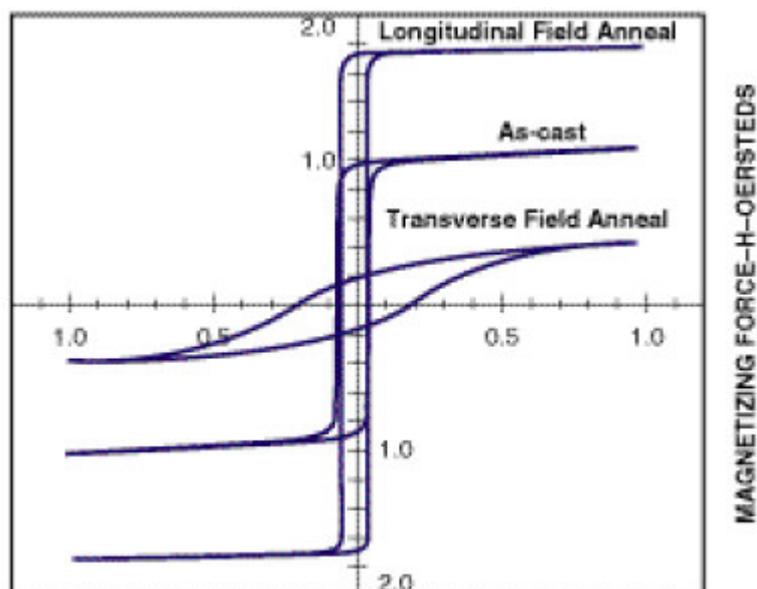


FIGURA 2 – Curvas de Magnetização de um Material Amorfo

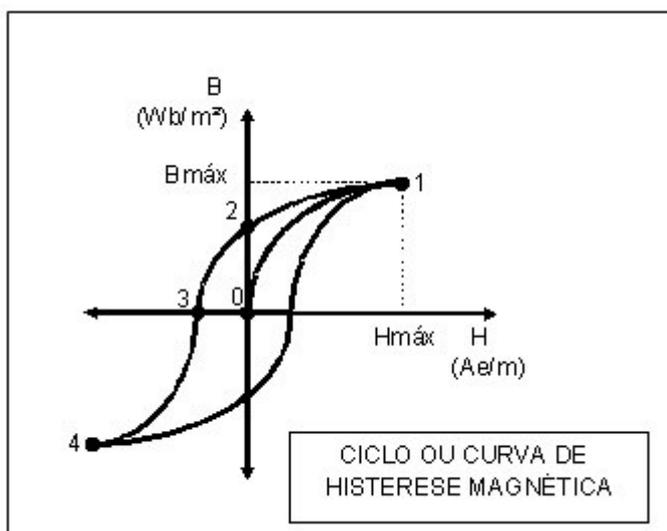


FIGURA 3 – Curva de Magnetização de um Material Magnético Não-Amorfo

Como pode-se observar na figura acima, o ciclo de histerese de um material convencional é bem maior do que a de um material amorfo, e também sua força coerciva é maior.

TABELA 2 – Dados Respectivos ao Material Amorfo da Curva de Magnetização Acima

Eletrônicas	
Indução de saturação (T)	1.80
Máxima permeabilidade DC (μ)	
Recozido (alta frequência)	400000
Não recozido	120000
Magneto-estricção de saturação (ppm)	35
Resistividade elétrica ($\mu\Omega/\text{cm}$)	123
Temperatura Curie ($^{\circ}\text{C}$)	415
Físicas	
Densidade (g/cm^3)	7.56
Força de tensão (Mpa)	1000 a 1700
Módulo elástico (GPa)	100 a 110
Fator de laminação (%)	>75
Expansão térmica ($\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$)	8.6
Temperatura de cristalização ($^{\circ}\text{C}$)	430
Temperatura de serviço contínuo ($^{\circ}\text{C}$)	125

8. VANTAGENS EM SE UTILIZAR UM TRANSFORMADOR AMORFO

Experimentalmente, observou-se que transformadores de metal amorfo são tão duráveis e confiáveis quanto os transformadores com núcleo de ferro-silício. As perdas no núcleo por histerese magnética e corrente de Foucault são entre 50% a 60% menores. As perdas por efeito Joule nos enrolamentos são menores em até 21%, dando uma perda total em relação aos transformadores convencionais de até 60% a menos.

O custo dos transformadores com núcleo de metal amorfo, é de 25% a 50% maior que os transformadores convencionais, mas devido as suas menores perdas e conseqüentemente um menor consumo de potência, estima-se que o investimento seja pago em 2 a 3 anos.

9. OUTRAS APLICAÇÕES

Além das aplicações em transformadores, outras aplicações são bastante favoráveis a utilização de materiais amorfos.

Abaixo estão listadas algumas delas:

- Transformadores de alta frequência;
- Estator de motores AC e rotor de motores DC;

- Sensores piezo magnéticos para carros, máquinas industriais e sonares;
- Fitas magnéticas para dispositivos antifurto;
- Construção de materiais de alta dureza e resistência.

9.1 APLICAÇÕES COM AÇO AMORFO

Cientistas desenvolveram um novo material amorfo não magnético que três vezes mais resistente do que o aço, além de ser mais resistente à corrosão. Com ele será possível, por exemplo, a construção de cascos não magnéticos para submarinos e navios, mais fortes e menos sujeitos à corrosão.

O novo material ultra-resistente poderá vir a ser utilizado para a construção de cascos de navios mais finos, automóveis mais leves, edifícios mais altos, além de ferramentas, instrumentos cirúrgicos e material esportivo não sujeitos à corrosão.

O desenvolvimento deste material foi possível graças à adição de uma pequena dose de ítrio, um elemento de terras raras. Acredita-se que o grande tamanho do átomo de ítrio causa uma desestabilização da estrutura cristalina da liga, gerando a estrutura amorfa. Outra grande vantagem é que, quando totalmente desenvolvido, o aço amorfo poderá tanto ser usinado como o aço comum, quanto ser trabalhado com uma formabilidade muito superior, como se fosse um plástico.

CONCLUSÃO

Os estados magnéticos das ligas amorfas ainda não são totalmente compreendidos. Enquanto as ligas amorfas baseadas em ferro são satisfatoriamente usadas em transformadores de distribuição, melhoramentos no desempenho deste tipo de material podem ser esperados quando for obtido um melhor conhecimento da estrutura atômica e suas propriedades.

Sendo assim, as pesquisas nesta área continuam avançando em busca da melhor utilização deste tipo de material, tendo em vista aperfeiçoar a relação custo-eficiência e possibilitar, no futuro, a utilização em grande escala de metais amorfos em todas suas possíveis aplicações.

O QUARTZO E SEUS CRISTAIS

Roger Frederick Dupont

1. O QUARTZO

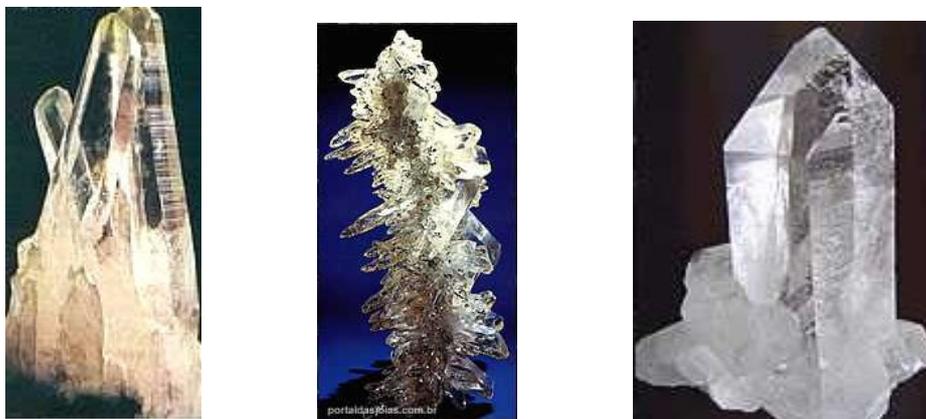


FIGURA 1 – Cristais de Quartzo ou agregado de cristais de rocha.

O cristal-de-rocha é o mais comum de todos os cristais. Pedernal (pederneira) é o quartzo comum, arredondado pelo transporte em águas dos rios...

Como vimos, cristal é um termo genérico. Diz-se de todos os minerais que têm a forma cristalina, ou seja já nasce como cristal, assim como o quartzo que é um cristal.

O quartzo-puro é conhecido como "cristal-de-rocha" ou simplesmente quartzo.

O quartzo-violeta é conhecido como "ametista".

O quartzo-amarelo é conhecido como "citrino".

O quartzo-rosa é conhecido como "quartzo-rosa".

O quartzo-verde é conhecido como "aventurina" e por aí vai...

Quando possui as cores amarela, parda ou avermelhada, provocadas por óxido de ferro, recebe o nome de quartzo-ferrífero. Muitas vezes ele forma cordões, ou filões de preenchimento de cor branca leitosa, em rochas distintas.

"Entre as muitas variedades do quartzo, a mais abundante é o quartzo-incolor, muito conhecido pelos nomes de quartzo-hialino e cristal-de-rocha. Essa segunda denominação é muito infeliz, porque todos os minerais formam cristais e todas as rochas são compostas de minerais... Para piorar ainda mais as coisas, os dicionaristas escrevem cristal de rocha (sem hífen). Quem escreve assim está falando de um cristal qualquer de uma rocha qualquer, não de uma variedade de

quartzo de características bem definidas", diz o geólogo Pércio de Moraes Branco (museugeo@pa.cprm.gov.br).



FIGURA 2 – Quartzo

Quartzo é um mineral formador de rochas, pois o quartzo se encontra em quase todos os tipos de rochas, também uma pedra ornamental e uma gema.

Por causa de suas propriedades, ele é dificilmente atacável, seja por via mecânica, seja por via química. Por esse motivo é o mineral mais abundante na terra. O nome quartzo tem se mantido em sua forma primitiva, não tendo sofrido qualquer alteração posterior.

Quando componente principal das rochas, ele se apresenta na forma de quartzo cristalizado, vítreo, incolor e transparente, ou como quartzo-comum, opaco, quartzo-leitoso ou quartzo-filoniano. As variedades coloridas são pedras ornamentais muito apreciadas.

Brilho: vítreo, traço branco, fratura concóide e estilhaçáveis, não exhibe clivagem, é muito estável, sendo atacado somente pelo ácido fluorídrico. As formas trigonais bem cristalizadas apresentam, usualmente, prismas hexagonais e faces romboédricas nas extremidades.

Além de seu emprego em jóias, o quartzo é muito usado pelos terapeutas que empregam cristais. Importante como matéria-prima na indústria eletrônica, como abrasivo, nas indústrias de vidro e cerâmica.

É utilizado também no campo da técnica para a obtenção de ultra-sons (por causa de suas propriedades piezelétricas) e para o controle de emissores e relógios. Na fabricação de vidros de alta qualidade, esses vidros são chamados de cristal, o que vem aumentar ainda mais a confusão de nomes envolvendo o quartzo...

Copos de cristal, lustres de cristal, entre outros, são feitos de vidro, que não é matéria cristalina. Por isso, quando se fala de quartzo-incolor, deve-se usar o nome correto, cristal-de-rocha, e não apenas cristal...



FIGURA 3 - Na esquerda, quartzo-leitoso, foto do site Companhia das Gemas. Lado direito, cristal-abacaxi ou quartzo-abacaxi, curioso tipo de cristal-de-rocha, foto do Portal das Jóias.

Um elemento importante para o reconhecimento do quartzo são as estrias sobre as faces prismáticas. Encontra-se em geados, filões, cavidades e drusas.

No Cazaquistão, por exemplo, foi encontrado um cristal, em 1958, com a altura de uma casa de dois andares, pesando 70 toneladas. As drusas, agregados de cristais desenvolvidos sobre uma base plana, podem conter, no caso do quartzo-incolor, milhares de cristais, totalizando centenas de quilogramas. A maior já encontrada tinha 784kg!

Fórmula: SiO_2 (anidrido silício, denominado sílica). D: 7. DR.: 2,65.

Localidades: O Brasil é o maior produtor mundial de quartzo, com jazidas principalmente em Minas Gerais, Goiás e Bahia, particularmente na região do Planalto Central, próximo ao Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. Também é encontrado na Espanha, Alemanha, Alpes, Urais, República de Madagascar.

Analogias: Energia: projetiva, receptiva. Planeta: Sol, Lua. Signo Leão. Elemento: fogo, água. Chakra: coronário, todos. Tarô: O Mago.

2. SIGNIFICADO ESOTÉRICO

A pura luz branca emitida através dele, por conter todas as cores, possui qualidades regeneradoras e energizantes. É fonte de força cósmica, ideal para

sessões de cura. Possui uma aura radiante, muito forte, indicada para harmonizar o ambiente.

É o cristal da sabedoria, do misticismo e da clarividência, usado como um amplificador poderoso. Dá proteção contra todos os tipos de radiação. É extremamente eficiente em radiodifusão e armazenamento de formas-pensamento.

O cristal de quartzo, o mais comum de todos os cristais, costuma ser colocado no alto da cabeça, no chakra da coroa, e diz-se que ele estimula a glândula pineal, sensível à luz, e ativa a consciência superior.

Objetivo: cura, psiquismo, poder, equilibra as emoções, excelente para a meditação, desfaz negatividade no campo energético da pessoa e do ambiente.

É a pedra da vitória, auxilia vencer a ansiedade e ajuda a percepção intuitiva. Proporciona um equilíbrio emocional, físico e mental. É uma pedra universal que reflete todas as cores do arco-íris.

É a pedra vocacional, antidispersivo, é muito usado por bruxos preguiçosos. Ele deve ser guardado num saquinho de couro com ramos secos de arruda, avenca, hera e um pouquinho de tabaco.

3. QUARTZO-AZUL

Uma forma muito rara de se encontrar. Usado na Lemúria para abrir o chakra cardíaco, aumentar a longevidade e auto-expressão. Promove paz e tranquilidade, auxilia no desenvolvimento da paciência, tolerância e compaixão. É calmante antiinflamatório e regula os hormônios. Útil contra os desconfortos do período menstrual. Favorece as relações e a expressão, estimulando o comportamento casual e espontâneo.



FIGURA 4 - Quartzo-azul

4. QUARTZO-ENFUMAÇADO OU QUARTZO-FUMÊ

Uma das mais brilhantes de todas as pedras escuras, o quartzo fumê supostamente transforma a energia espiritual do corpo em poder curativo, quando posto sobre o chakra da raiz. Os terapeutas dizem que o quartzo fumê deve ser usado com cuidado. Ligeiramente escuro, com inclusões aciculares de rutilo. Apresenta com freqüência, inclusões de amianto, clorita, turmalina. Localidade: Brasil (Minas Gerais). Inicia o movimento de Kundaline. Excelente para meditação. Alinha os três chakras de baixo. Dá proteção, ensina o caminho da luz, quando se está dentro da escuridão.



FIGURA 5 - Quartzo-fumê, foto do site Companhia das Gemas.

5. QUARTZO-ROSA OU RÓSEO

Freqüentemente com fissuras e ligeiramente transparente, sua cor, pouco resistente à luz, varia entre o vermelho-claro, róseo e violeta-claro. A substância corante é o manganês. Muitos deles encontrados no mercado, foram coloridos artificialmente com óxido de ferro. Localidades: Brasil, República de Malgaxe, EUA, Urais, Áustria. Sua cor suave e calmante, serve para curar mágoas acumuladas pelo coração, dissolve as cargas que reprimem a capacidade de dar e receber amor. Emanam uma energia que substitui as tristezas, temores e ressentimentos, e resolve os problemas emocionais. Diz-se que, no chakra do coração, o quartzo ajuda a obter amor próprio e paz interior, que se acredita serem o primeiro passo no processo de cura. Os terapeutas de cristais aconselham os clientes a usar o quartzo rosa para ajudá-los a conquistar a harmonia consigo mesmos. Usado para estimular o amor e abrir o chakra cardíaco. Aumenta a confiança e o falso orgulho é negado. Ajuda a limpar sentimentos de culpa, medo e ciúme. Chakra: cardíaco. Tarô: A Decisão.

Desfaz pedras dos rins. Signo: Touro. Leva a pessoa para a auto-realização, é indicada para carência afetiva ou problemas de relacionamento.



FIGURA 6 - Girafa em miniatura, lapidada em cristal de quartzo-rosa.

6. QUARTZO-RUTILADO

Transmuta negatividade, excepcionalmente poderoso. Alivia depressão, facilidade para inspiração e aumento da clarividência. Poder de cura muito grande. Chakra: todos.



FIGURA 7 - Quartzo-rutilado, ambas as fotos são do site Companhia das Gemas.

7. QUARTZO-TURMALINIZADO

Contém turmalina preta. Dá projeção astral e é condutor da luz. Nivela polaridade masculina e feminina.

8. QUARTZO-VERDE OU AVENTURINA

É um agregado formado por compactação de finos grãos de quartzo, opaco e compacto. A presença de pequenas lâminas de óxido de ferro inclusa lhe confere

uma cor pardo-avermelhada (pedra-ouro). E a mica de cromo lhe dá uma cor verde (crisoquartzo), conhecido como aventurina e chamado também de aventurina-verde. Posta sobre o chakra do plexo solar, supostamente liga o corpo mental, superior e inferior, ao físico; liberta energia bloqueada e permite uma respiração profunda e curativa. Fortalece a saúde em geral, tem o poder de curar, tonifica e estimula a circulação sanguínea e restabelece as energias do corpo. Dá sorte no amor e no jogo. Manifestando abundância estimula criatividade e facilita a vida. Mantém os pés no chão. É calmante e proporciona autoconfiança, controle e maturidade. Corresponde ao chakra cardíaco. Signo: Câncer. Propriedades físicas como as da ametista. Localidades: Brasil, Urais, Índia, República de Malgaxe.



FIGURA 8 - Quartzo-verde-rutilado, foto do site Companhia das Gemas.

9. DIAMANTE DE HERKIMER

É uma forma de quartzo. Alivia o stress e a tensão, especialmente nos músculos. Similar ao Diamante, irradia energia, armazena informações, tem a habilidade para obter recordações de vidas passadas e estimula clarividência. Objetivo: cura, proteção, psiquismo, poder. Energia: receptiva. Planeta: Sol. Elemento: fogo. Chakras: todos. Tarô: A Justiça. Signo: Leão.



FIGURA 9 - Do lado direito da tela, girafa da coleção "Animais", peça banhada a ouro, com cristal Swarovski, adquirida em São Paulo (1986).

Do lado esquerdo, girafas confeccionadas em **prata**, uma peça com o corpo trabalhado em drusa de **cristal-de-quartzo** (lado esquerdo) e a outra foi trabalhada com pedra de **ametista** (lado direito). Ambas foram adquiridas no Shopping Center Ibirapuera, em São Paulo (1986). Estas são as primeiras peças em prata da coleção.

10. QUARTZO HIALINO

O quartzo é o mais abundante mineral da Terra (aproximadamente 12% vol.). Possui estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO_2), pertencendo ao grupo dos tectossilicatos. O seu hábito cristalino é um prisma de seis lados que termina em pirâmides de seis lados, embora freqüentemente distorcidas e ainda colunar, em agrupamentos paralelos, em formas maciças (compacta, fibrosa, granular, criptocristalina), maclas com diversos pseudomorfos. É classificado como tendo dureza 7 na Escala de Mohs. Apresenta as mais diversas cores conforme as variedades. Peso específico 2.65. Sem clivagem, apresentando fratura concoidal. O nome "quartzo" é de origem incerta, sendo a mais provável a palavra alemã "quarz", que por sua vez será de origem eslava.

Mineradores de rochas contendo quartzo podem sofrer de uma doença denominada silicose. Ocorre geralmente em pegmatitas graníticas e veios

hidrotermais. Cristais bem desenvolvidos podem atingir vários metros de extensão e pesar centenas de quilogramas. A erosão de pegmatitas pode revelar bolsas expansivas de cristais, conhecidas como "catedrais". Pode também ter origem metamórfica ou sedimentar. Geralmente associado aos feldspatos e micas. Faz parte da constituição de granito, arenito, calcários por exemplo. Adicionalmente, pode ocorrer em camada, particularmente em variedades como a ametista; neste caso, os cristais desenvolvem-se a partir de uma matriz e deste modo apenas é visível uma pirâmide terminal. Um geode de quartzo, consiste de uma pedra oca (geralmente de forma aproximadamente esférica), cujo interior é revestido por uma camada de cristais.

11. QUARTZO ARTIFICIAL

Uma vez que o quartzo ocorre muitas vezes sob formas macladas, muito do quartzo utilizado industrialmente é sintetizado. São produzidos grandes e perfeitos cristais não maclados em autoclave por meio do processo hidrotermal.

12. QUARTZO LEITOSO

Areia para moldes de fundição, fabricação de vidro, esmalte, saponáceos, dentifrícos, abrasivos, lixas, fibras ópticas, refratários, cerâmica, produtos eletrônicos, relógios, indústria de ornamentos; fabricação de instrumentos ópticos, de vasilhas químicas etc. É muito utilizado também na construção civil como areia e na confecção de jóias baratas, em objetos ornamentais e enfeites, na confecção de cinzeiros, colares, pulseiras, pequenas esculturas etc.

Algumas estruturas de cristal de quartzo são piezelétricas e usadas como osciladores em aparelhos eletrônicos tais como relógios e rádios.

13. PRODUÇÃO MUNDIAL

País	Produção em 2005
Estados Unidos	30 600
Eslovênia	11 000
Alemanha	8 160
Áustria	6 800
França	6 500

Espanha	6 500
Japão	4 850
Reino Unido	4 500
Austrália	4 000
Brasil	1 600
Portugal	5
Resto do mundo	33 485
Totais	118 000

14. VARIEDADES DE QUARTZO

Sendo um dos minerais mais comuns do mundo, existe um número impressionante de designações diferentes. A distinção mais importante entre tipos de quartzo é entre as variedades macrocristalinas (com cristais individuais visíveis a olho nu) e microcristalinas também chamadas criptocristalinas (neste caso trata-se de agregados de cristais apenas visíveis sob grande ampliação). Calcedônia é um termo genérico para quartzo criptocristalino. As variedades criptocristalinas são opacas ou translúcidas, enquanto que as variedades transparentes são geralmente macrocristalinas. Nem todas as variedades ocorrem na natureza. O Prásio, um material com cor verde-oliva, é produzido por tratamento térmico. Apesar do citrino ocorrer naturalmente, a maior parte é produzido por aquecimento de ametista. A carneliana é largamente tratada por calor por forma a obter uma coloração mais profunda.

Ainda que muitos dos nomes dados às diversas variedades ao longo dos tempos sejam derivados da cor do mineral, os esquemas científicos de nomenclatura referem-se sobretudo à microestrutura do mineral. A cor é um identificador secundário para os minerais criptocristalinos, sendo, no entanto, um identificador primário para as variedades macrocristalinas. Contudo, isto nem sempre é verdadeiro.

Variedades cristalinas:

- Cristal de rocha ou quartzo hialino
- Ametista
- Citrino

- Quartzo fumado
- Quartzo morion
- Quartzo rosa
- Quartzo leitoso
- Quartzo azul
- Quartzo olho-de-falcão
- Quartzo olho-de-tigre
- Quartzo olho-de-gato
- Quartzo sagenítico
- Aventurina

Variedades criptocristalinas fibrosas (calcedônias):

- Calcedônia
- Ágata
- Carneliana ou cornalina
- Sárdio
- Crisoprásio ou crisopraxe
- Heliotropo
- Ônix
- Ágata muscínea
- Madeira petrificada
- Plasma

Variedades criptocristalinas granulares:

- Sílex
- Jaspe
- Prásio

15. MINERAIS DO GRUPO DO QUARTZO

Estes minerais têm a mesma composição química do quartzo (dióxido de silício, SiO_2) mas apresentam estruturas cristalinas diferentes. Por esta razão estes minerais, incluindo o quartzo, denominam-se polimorfos de sílica (SiO_2). O tipo de estrutura cristalina formada depende da temperatura e pressão existentes no momento da cristalização.

- Cristobalita
- Tridimita

- Stishovita
- Coesita
- Beta-cristobalita
- Beta-quartzo
- Beta-tridimita

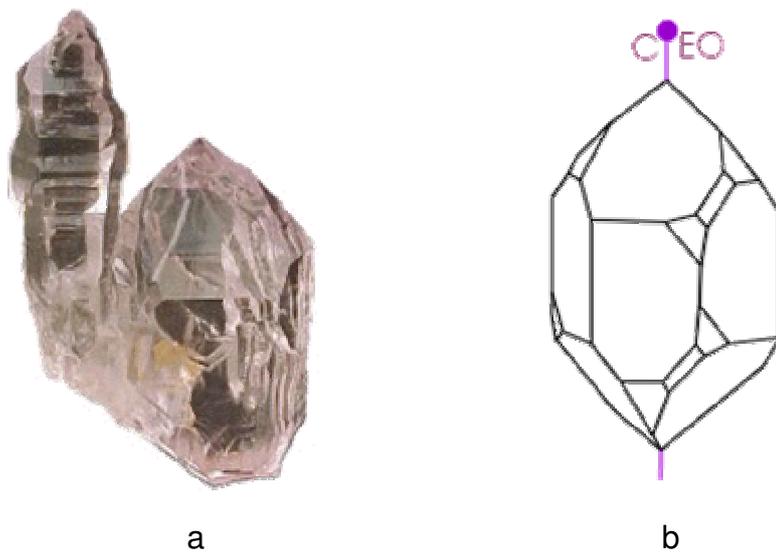


FIGURA 10 – a) Cristais prismáticos de quartzo b) forma cristalográfica.

- Fórmula Química - SiO_2
- Composição - 46.74 % Si, 53.26 % O
- Cristalografia – Trigonal
- Classe – Trapezoédrica
- Propriedades Ópticas - Uniaxial positivo
- Hábito - Granular, prismático, compacto etc.
- Clivagem - Imperfeita segundo $\{1011\}$ ou $\{0111\}$
- Dureza – 7
- Densidade relativa - 2,65
- Fratura – Conchoidal
- Brilho – Vítreo
- Cor - Incolor, branco, púrpura, preto, cinza, leitoso, etc.
- Associação - Feldspato, piroxênios, anfibólios, micas etc.
- Propriedades Diagnósticas - Brilho, fratura conchoidal, forma dos cristais, transparência e propriedades óticas.
- Ocorrência - É gerado por processos metamórficos, magmáticos, diagenéticos e hidrotermais.

- Usos - Areia para moldes de fundição, fabricação de vidro, esmalte, saponáceos, dentifrícios, abrasivos, lixas, fibras óticas, refratários, cerâmica, produtos eletrônicos, relógios, indústria de ornamentos; fabricação de instrumentos óticos, de vasilhas químicas, refratários etc. É muito utilizado também na construção civil como areia e na confecção de jóias baratas, em objetos ornamentais e enfeites, na confecção de cinzeiros, colares, pulseiras, pequenas esculturas etc.

- Variedades - A variedade incolor a levemente colorida chamada cristal de rocha, pode atingir dezenas de quilogramas e é utilizado em aparelhos de óptica, em radiodifusão e como pedra semipreciosa. As variedades incolores a coloridas empregadas como gemas são: ametista [de cor violeta, que muitas vezes possui zonas coloridas de maior refringência]; quartzo enfumaçado (variedade de cor castanho-fumo, às vezes com tons amarelados ou marrons, provavelmente resultante de radioatividade ou da presença de matéria orgânica, sendo que a cor normalmente desaparece pelo aquecimento [sin.: quartzo defumado, quartzo "fumé", topázio-de-escória]); freqüentemente transparente]; morion (variedade de cor negro-acastanhado ou negro-de-piche, que difere do quartzo enfumaçado por não ser passível de transformação em citrino quando aquecido); citrino (de cor amarela, também obtida pelo aquecimento de alguns tipos de ametista); quartzo rosa (tonalidades rosa-clara de intensidade variada, grosseiramente cristalino, turvo, que quase nunca apresenta faces cristalinas, com cor provavelmente devido à presença de Mn ou Ti, que enfraquece sob a ação da luz solar (sin.: canga-rosa)); aventurinino (variedade microcristalina, translúcida, com finas inclusões foliadas, geralmente de fuchsitita ou fengitita, que o tornam cintilante, fenômeno conhecido por aventurescência [também recebe esta denominação quartzo com inclusões de hematita com cor cinza, amarela ou marrom e uma variedade de feldspato com reflexos avermelhados]; quartzo fantasma (variedade formada pelo crescimento através de fases cíclicas, entre as quais houve deposição epitáxica de outras substâncias (sin.: quartzo espectral); quartzo-cabelo-de-vênus (variedade rica em inclusões de amianto ou rutilo); olho-de-tigre (variedade com inclusões aciculares dispostas subparalelamente a uma direção cristalográfica); quartzo rutilado (variedade com inclusões aciculares de rutilo). Existem ainda muitas outras denominações para esse mineral, dentre as quais destacam-se: quartzo filoneano ou quartzo de veio (normalmente turvo, esbranquiçado a leitoso, usado em cerâmica, fabricação de vidro, em ligas ferro-silício e como abrasivo); quartzo fibroso (agregado

de fibras paralelas, às vezes pseudomórfico de asbestos e outros minerais fibrosos); olho-de-tigre (espécie rica em fibras de asbesto, com acatassolamento e bonitos reflexos e cores, apreciadas como gemas lapidadas em cabuchão); quartzo ferrífero (consiste em cristais coloridos em amarelo, castanho ou vermelho, por óxidos de ferro, usado em joalheria); quartzo azul ou quartzo-safira (turvo e com coloração azulada, produzida por fenômenos de difusão luminosa, em defeitos cristalográficos ou em finas agulhas de rutilo, usado em adornos); prásio (verde-musgo, devido inclusões de minerais verdes como actinolita; utilizado em joalheria); quartzo leitoso (turvo, branco-de-leite, devido a inclusões líquidas e gasosas e fraturas cicatrizadas, utilizado na fabricação do vidro, em cerâmica, como abrasivo, etc.); venturina (reflexos e irisações internas, motivadas por minúsculos cristais de micas, como inclusões, empregado como pedra de adorno e gema) ; *quartzo hematóide* (de cor vermelho-opaco; usado também em joalheira).

16. Piezeletricidade

16.1 Princípio de funcionamento

Piezeletricidade é uma propriedade possuída por um pequeno grupo de materiais. Foi descoberta em 1880 por Pierre e Jacques Curie quando estudavam o efeito da pressão na geração de carga elétrica pelos cristais como quartzo, turmalina e sal de Rochelle. Ainda em 1880 publicaram a primeira demonstração experimental de uma ligação entre o fenômeno piezelétrico e a estrutura cristalizada. A sua experiência consistia numa medição das cargas que apareciam na superfície dos cristais preparados, que eram sujeitos a um grande *stress* mecânico.

Nos meios científicos da época, este feito foi considerado uma descoberta espantosa e tal propriedade foi rapidamente apelidada de piezeletricidade, de maneira a distingui-la de outros fenômenos científicos como eletricidade por contacto (eletricidade estática) e piroeletricidade (eletricidade gerada pelo calor dos cristais).

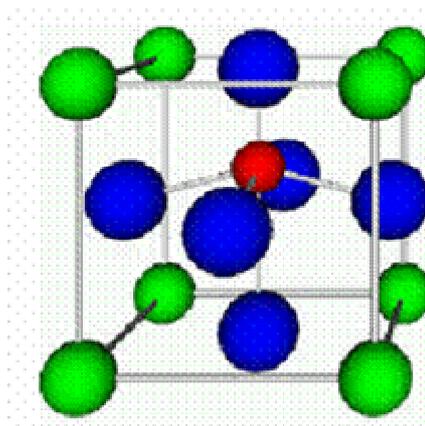


FIGURA 11 - Disposição iônica do titanato de bário (BaTiO_3).

Componentes que operavam sob o efeito piezelétrico eram usados principalmente em osciladores e transdutores diversos em circuitos com válvulas termiônicas, mas as aplicações continuaram e evoluíram tanto que são encontrados nos aparelhos mais atuais, como televisores, computadores e outros.

Assim, a piezeletricidade consiste no aparecimento de uma polarização elétrica quando determinado mineral é submetido a forças de compressão ou tensão. Este fenômeno piezelétrico foi descoberto, como se referiu, no século XIX, mas as suas aplicações práticas só surgiram com o desenvolvimento da eletrônica.

Determinados cristais cerâmicos conservam um centro de simetria mas isto não ocorre quando cristais iônicos estão envolvidos. Os centros das cargas positivas e negativas não coincidem. Como resultado, cada célula unitária atua como um pequeno dipolo elétrico com uma terminação positiva e uma negativa. Isto é exemplificado pelo titanato de bário (BaTiO_3), que é cúbico acima de 120°C . A temperatura para a qual a estrutura do cristal muda de não-simétrica para uma estrutura simétrica, expresso em graus Celsius, recebe a designação de Temperatura de Curie *ou* Ponto Curie. Abaixo dessa temperatura verifica-se um pequeno, mas importante, deslocamento iônico.

Quando um material piezelétrico é estimulado eletricamente por uma tensão como indicado na figura a seguir, as suas dimensões modificam-se.

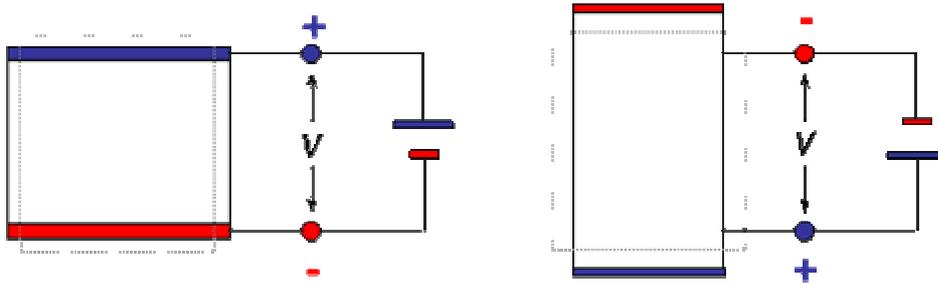


FIGURA 12 - Variação das dimensões quando estimulado eletricamente por uma tensão.

Na figura abaixo, o cristal piezoeletrico tem eletrodos em faces opostas e sofre uma tensão mecânica de compressão. Um potencial elétrico aparece entre os eletrodos e pode ser medido com um instrumento. Se o esforço for de tração, a polaridade será inversa.

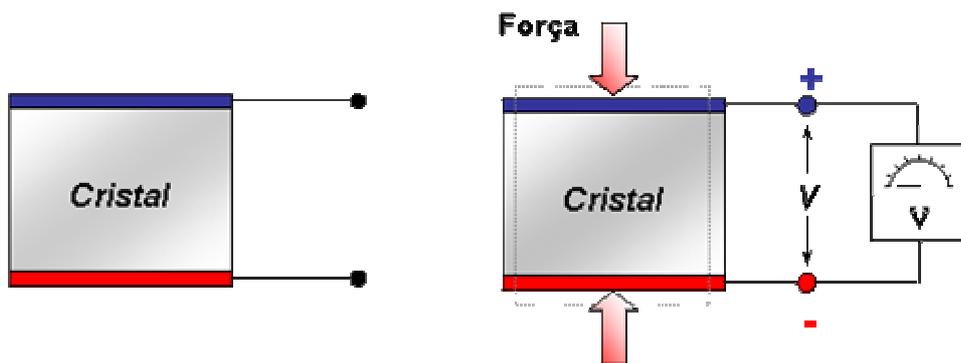


FIGURA 13 - Gera-se uma carga elétrica quando estimulado por uma força.

Se os eletrodos estão em circuito aberto, então gera-se uma tensão associada com a carga. Desta forma, os materiais piezoeletricos são capazes de gerar tensões muito elevadas.

Um material piezoeletrico é conseqüentemente capaz de agir como um elemento detector, atuador, ou ambos tornando-se interessante a sua utilização em dispositivos do estado sólido, compactos, de confiança e eficientes.

Também é válido para sinais não contínuos. Se, por exemplo, o cristal sofrer uma vibração, um sinal elétrico correspondente estará presente entre os eletrodos. Veja-se, então, na figura 3.4 o comportamento do material piezoeletrico na presença de um campo alternado, fenômeno usado, por exemplo, em auscultadores.

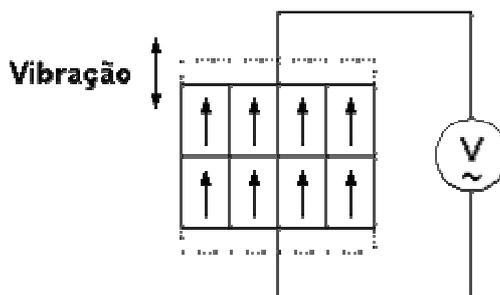


FIGURA 14 - Comportamento do material piezoelectrico num campo alternado.

Outro aspecto importante é a relação da frequência do sinal aplicado com a frequência de ressonância natural do cristal. O efeito tem a máxima intensidade quando ambas as frequências são iguais. Osciladores e filtros operam por este princípio.

17. Relógios de Quartzo

17.1 Antes do quartzo

O relógio é uma tecnologia fantástica. Ele faz parte de um esforço contínuo de pesquisa e desenvolvimento que começou no final do século XIV. Ao longo dos anos, diferentes inovações fizeram com que os relógios ficassem menores, menos espessos, mais confiáveis, mais precisos e até automáticos.

Os componentes encontrados nos relógios de hoje já existem há séculos:

- Uma mola para gerar energia
- Uma espécie de massa oscilatória para oferecer uma referência de tempo
- Dois ou mais ponteiros
- Um mostrador enumerado na superfície do relógio
- Engrenagens para diminuir o ritmo de toque da massa oscilatória e conectá-la, junto com a mola, aos ponteiros do mostrador.

No fim dos anos 60, a empresa de relógios Bulova (em inglês) deu o primeiro passo para se desvencilhar da roda de balanço com movimentos oscilatórios. Ela usou um transistor oscilador que mantinha um diapasão: o relógio da Bulova ressonava a algumas centenas de hertz (Hz - oscilações por segundo), ao invés do costumeiro barulho de "tique-taque". Os dentes da engrenagem e as rodas ainda convertiam o movimento mecânico do diapasão em movimento dos ponteiros, mas dois principais progressos tinham acontecido:

1. A substituição da roda de balanço e da mola por um único material ressonador: o diapásão
2. A substituição da mola para dar corda por uma bateria

Um fabricante de relógios, no final dos anos 60, sentiu-se impelido a dar um passo adiante, ou seja, ele tinha que buscar uma tecnologia que fornecesse um medidor do tempo melhor do que o diapásão. Naquela época, os circuitos integrados eram bastante recentes, mas o preço já estava em rápida queda e o número de transistores em ascensão. Os LEDs também eram novos no cenário. Contudo, havia ainda dois problemas a serem resolvidos: encontrar um marcador do tempo e desenvolver um circuito integrado que utilizasse pouca energia, a fim de que o relógio funcionasse com uma pequena bateria interna.

18. O cristal de quartzo

O problema não era escolher o elemento de marcação do tempo. Possivelmente, o cristal de quartzo seja mil vezes melhor do que o diapásão e já estava no mercado há muitos anos. A questão era escolher o tipo de cristal e a sua frequência. A dificuldade estava em selecionar a tecnologia de circuito integrado que funcionaria a uma potência baixa.

Os cristais de quartzo vêm sendo usados há muito anos para proporcionar a frequência exata para todos os transmissores e receptores de rádio e computadores. A precisão dos cristais deve-se a uma série de coincidências formidáveis: o quartzo, que é um dióxido de silício como quase todas as areias, não é afetado pela maioria dos solventes e permanece no estado cristalino, mesmo quando submetido a temperaturas elevadíssimas. A propriedade que viabiliza isso é o fato de que, quando o quartzo é comprimido ou torcido, ele gera uma tensão ou voltagem na superfície. Esse fenômeno bastante comum é chamado de efeito piezométrico. Da mesma forma, se uma voltagem é aplicada sobre o quartzo, ele se deforma ligeiramente.



FIGURA 15 – Cristais de quartzo utilizados em circuitos eletrônicos.

Se um sino fosse feito a partir de um único cristal de quartzo, quando alguém o batesse, ele continuaria tocando por alguns minutos. O material praticamente não perde energia. Um sino de quartzo, se feito na direção certa do eixo cristalográfico, possui uma voltagem na superfície e a frequência com que ocorre a vibração não é afetada pela temperatura. Se a voltagem da superfície do cristal é disparada por eletrodos de metal e amplificada por um transistor ou um circuito integrado, ela pode ser reaplicada ao sino para que este continue tocando.

Um sino de quartzo até poderia ser criado, mas a sua forma não seria a mais adequada já que muita energia fica concentrada no ar. As melhores formas são: uma barra reta ou um disco. A barra possui a vantagem de manter a mesma frequência fornecida, desde que a razão entre o comprimento e a largura permaneça a mesma. Uma barra de quartzo pode ser pequena e vibrar a uma frequência relativamente baixa. A frequência de 32 kilohertz (KHz) é normalmente escolhida para os relógios, não só devido ao seu tamanho, mas também porque os circuitos, que dividem a frequência do cristal em pulsações por segundo, demandam mais energia para frequências maiores.

A questão da energia representava um grande problema para os relógios mais antigos. Os suíços gastaram milhões tentando introduzir a tecnologia dos circuitos integrados para dividir a frequência de 1 MHz a 2 MHz e encontrar o disco mais estável produzido pelos cristais.

Hoje, os relógios de quartzo modernos utilizam uma barra de baixa frequência ou um cristal na forma de diapásão. Muitas vezes os cristais são feitos de folhas finas de quartzo metálico, assim como um circuito integrado, e talhados na forma desejada através de procedimentos químicos. A principal diferença, entre uma boa

marcação e outra inferior, é a exatidão da freqüência inicial e a precisão com que foi feito o corte do ângulo na folha de quartzo em relação ao eixo cristalográfico. A quantidade de contaminação, que pode atravessar a cápsula e chegar à superfície do cristal dentro do relógio, interfere na precisão.

Os aparatos eletrônicos do relógio amplificam o barulho da freqüência do cristal. Isso provoca uma oscilação, o que faz com que o cristal vibre. A emissão dos osciladores a cristal do relógio é convertida em pulsos ideais para circuitos digitais. Tal mecanismo divide a freqüência do cristal e a converte em um formato adequado para o visor. Em um relógio de quartzo com ponteiros, os divisores criam um pulso de um segundo que aciona um pequeno motor elétrico e esse motor é conectado às engrenagens padrão para movimentar os ponteiros.

19. REFERÊNCIAS

Atlas de Minerais e de Rochas - Museu Heinz Ebert - UNESP
<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/quartzo.html>

Borges, Frederico S., 1994, *Catálogo descritivo do Museu de Mineralogia Prof. Montenegro de Andrade*, FCUP, ISBN 972-96076-1-3

DWYER, Douglas. *Como funcionam os relógios de quartzo*. Traduzido por HowStuffWorks Brasil. Disponível em: <http://eletronicos.hsw.uol.com.br/relogios-de-quartzo2.htm>

Site da Web: <http://www-seme.dee.fct.unl.pt/Piezo/Funcion.htm>

MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Luiz Carlos Baron

1. INTRODUÇÃO

Os materiais piezoelétricos em certas condições de temperatura têm a capacidade de produzir eletricidade quando submetidas a estresse mecânico, ocorrendo o efeito inverso também. Isso é chamado de efeito piezoelétrico.

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 em cristais de quartzo, pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. Esse fenômeno pode ser causado por bater ou torcer o material apenas o suficiente para deformar o seu cristal, sem fraturar ele. O efeito também funciona no modo oposto, o material irá deformar ligeiramente quando uma pequena corrente elétrica é aplicada. Esse material tem motivado inúmeras investigações para o desenvolvimento de sistemas transdutores eletromecânico, geração de ultrassom, dispositivos para produzir energia, entre outros.

Na atualidade materiais piezoelétricos são muito utilizados como elementos sensores e/ou atuadores em aplicações tecnológicas desde baixas (na faixa de Hz) até frequências da ordem de 10^9 Hz.

2. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

A palavra Piezo vem do grego "*piezein*" que significa pressionar.

Piezoelasticidade ("eletricidade de pressão") define-se pela capacidade de alguns materiais se tornarem eletricamente polarizados quando sujeitos a algum tipo de stress. Este nome foi proposto por Hankel em 1881 para nomear o fenômeno descoberto no ano anterior pelos irmãos Curie.

2.1 HISTÓRIA

Em 1880, Pierre e Jacques Curie publicaram a primeira demonstração experimental de uma ligação entre o fenômeno piezoelétrico macroscópico e a estrutura cristalizada.

A sua experiência consistia numa medição conclusiva das cargas que apareciam na superfície de cristais preparados, que eram sujeitos a um grande stress mecânico. Exemplos desses cristais são: quartz, topaz, cana de açúcar,

tourmaline e sal de Rouchelle. Estes resultados foram um incentivo à imaginação e perseverança dos irmãos Curie, considerando que foram obtidos com apenas cola, tinfoil, fios, magnetos permanentes (ímans) e um monóculo de joalheiro.

Nos meios científicos da época, este feito foi considerado uma descoberta espantosa e foi rapidamente apelidada de piezoelectricidade, de maneira a distingui-la de outros fenômenos científicos como eletricidade por contacto (eletricidade estática) e pyroelectricidade (eletricidade gerada pelo calor dos cristais).

Os Curie afirmaram também que havia uma correspondência direta entre os efeitos elétricos da mudança de temperatura e o stress mecânico de um dado cristal, e que usaram essa correspondência não só para escolher os cristais a experimentar, mas também para determinar os limites desses mesmos cristais. Contudo, os irmãos Curie não preveriam que os cristais que exibiam o efeito direto, pudessem também exibir o efeito inverso, ou seja, aplica-se um campo elétrico e obtêm-se stress. Esta propriedade foi deduzida matematicamente a partir dos princípios fundamentais da termodinâmica por Lippman em 1881. Os Curie confirmaram de imediato o “efeito inverso” e continuaram convictos de obter provas da completa reversibilidade das deformações electro-elasto-mecânicas em cristais piezoelétricos.

O efeito piezoelétrico teve sua aplicação prática pela primeira vez por Paul Langevin no desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (inventado o transdutor tipo Langevin) para gerar ultra-som na faixa de algumas dezenas de kHz's. Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo por estes demandarem geradores de alta tensão, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) pelos EUA.

Os estudos de soluções sólidas de PbZrO_3 - PbTiO_3 , por Jaffe nos anos 50, resultaram na obtenção de cerâmicas de titanato zirconato de chumbo (PZT), que passaram a ser objeto de freqüentes investigações para a otimização de suas propriedades ou como motivação para o desenvolvimento de novos compostos

cerâmicos. Atualmente as cerâmicas piezoelétricas tipo PZT são predominantes no mercado.

2.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

A piezoelectricidade descreve o fenômeno de gerar uma carga elétrica num material, quando sujeito a uma tensão mecânica ou uma pressão dinâmica, e inversamente, uma deformação quando sujeito a um campo elétrico.

Quando um material piezoelétrico é estimulado eletricamente por uma tensão como indicado na figura 1, as suas dimensões modificam-se.

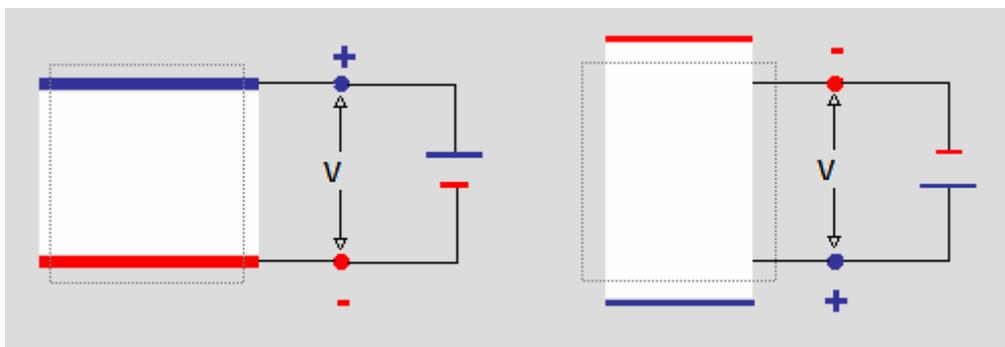


FIGURA 1 - Variação das dimensões quando estimulado eletricamente por uma tensão.

Na figura 2, Duas placas de metal depositadas sobre a superfície são usadas como eletrodos. Numa primeira aproximação os eletrodos estão curto-circuitados através de um amperímetro. Quando é exercida uma pressão sobre o material piezoelétrico, é gerada uma densidade de cargas na superfície do material em contacto com os eletrodos. Esta polarização gera um campo elétrico que causa uma corrente das cargas elétricas livres existentes no condutor. Dependendo do seu sinal, as cargas elétricas do condutor vão se distribuir. Esta corrente de cargas livres se mantém até neutralizar a polarização.

Quando a pressão sobre o cristal é retirada, a polarização desaparece, e a corrente de cargas livres vai ser invertida, voltando à condição inicial. Este processo é registrado no amperímetro que mostra dois picos de corrente contrários. Se fosse inserido um receptor de energia elétrica em vez do amperímetro, e aplicada uma pressão, a corrente iria fluir através da carga, e a energia mecânica seria assim aproveitada.

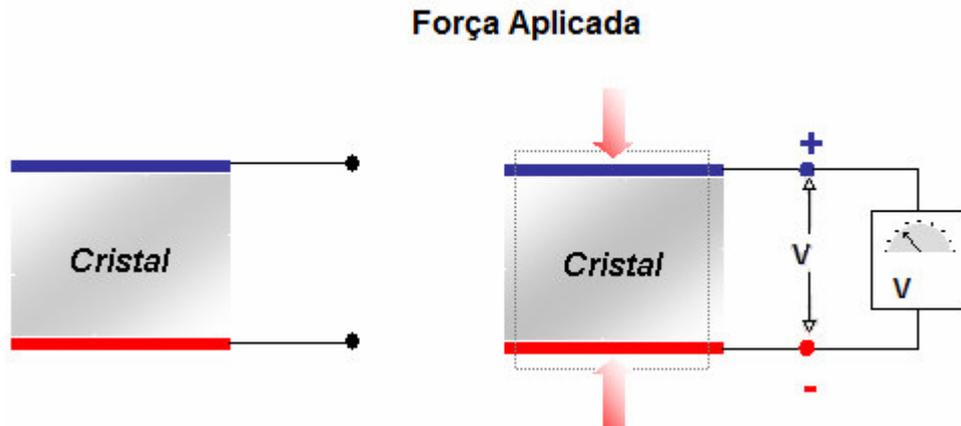


FIGURA 2 - Gera-se uma carga elétrica quando estimulado por uma força.

Se os eletrodos estão em circuito aberto, então gera-se uma tensão associada com a carga. Desta forma, os materiais piezoelétricos são capazes de gerar tensões muito elevadas.

Um material piezoelétrico é conseqüentemente capaz de agir como um elemento detector, atuador, ou ambos tornando-se interessante a sua utilização em dispositivos do estado sólido, compactos, de confiança e eficientes.

Também é válido para sinais não contínuos. Se, por exemplo, o cristal sofrer uma vibração, um sinal elétrico correspondente estará presente entre os eletrodos. Veja na figura 3 o comportamento do material piezoelétrico na presença de um campo alternado, fenômeno usado, por exemplo, em auscultadores.

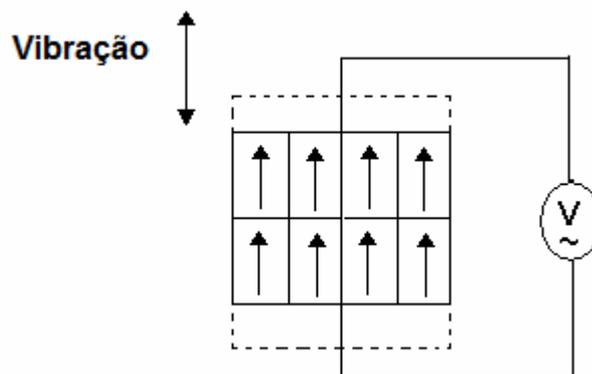


FIGURA 3 - Comportamento do material piezoelétrico num campo alternado.

Outro aspecto importante é a relação da frequência do sinal aplicado com a frequência de ressonância natural do cristal. O efeito tem a máxima intensidade quando ambas as frequências são iguais. Osciladores e filtros operam por este princípio.

2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

2.3.1 CRISTAIS

2.3.1.1 QUARTZO (SiO_2)

Cristais de quartzo apresentam a fase α em temperaturas inferiores a 573°C , que possui simetria trigonal e pertence ao grupo pontual 32. Os coeficientes piezoelétricos são $d_{11}=-d_{12}$, $d_{14}=-d_{25}$, $d_{26}=-2d_{11}$, $e_{11}=-e_{12}$, $e_{14}=-e_{25}$ e $e_{26}=-e_{11}$. Como se pode verificar o quartzo possui somente dois coeficientes piezoelétricos d ou e independentes. Uma análise da matriz dos coeficientes mostra claramente que não há resposta piezoelétrica quando aplicamos um campo elétrico ou tensão mecânica na direção z do cristal.

Em 573°C o quartzo- α sofre uma transformação de fase $\alpha \rightarrow \beta$, que pertence ao grupo pontual 622, na qual o coeficiente $d_{14}=-d_{25}$ praticamente triplica. Para aplicações tecnológicas, em geral, deseja-se ter modos de vibração puros, alto fator de qualidade mecânico Q_m e baixo (ou nulo) coeficiente de temperatura CT . Visando alcançar essas condições, foram encontrados diversos “cortes práticos” para os cristais de quartzo.

Cristais de quartzo são encontrados na natureza (minerais de quartzo, que para crescer naturalmente demoram muitos anos) ou podem ser crescidos artificialmente, por exemplo, por processos hidrotérmicos.

2.3.1.2 NIOBATO DE LÍTIO (LiNbO_3 - LN) E TANTALATO DE LÍTIO (LiTaO_3 -LT)

Niobato e tantalato de lítio são cristais isomorfos que apresentam simetria trigonal e pertencem ao grupo pontual $3m$ na fase ferroelétrica, abaixo de suas temperaturas de Curie T_c ($T_c(\text{LiNbO}_3) \sim 1210^\circ\text{C}$ e $T_c(\text{LiTaO}_3) \sim 660^\circ\text{C}$). Na fase ferroelétrica apresentam a polarização espontânea paralela à direção do eixo c . O niobato de lítio (LN) apresenta os coeficientes piezoelétricos $d_{33}= 16$ e $d_{15}= 74$ pC/N. O tantalato de lítio LT, por sua vez, apresenta menores valores de coeficientes piezoelétricos $d_{33}= 8$ e $d_{15}= 26$ pC/N e de coeficiente de temperatura (CT), por isso é preferido em aplicações onde se deseja alta estabilidade.

LN e LT são largamente utilizados em aplicações com ondas acústicas de superfície, como filtros eletromecânicos e detectores de vibrações.

2.3.2 SEMICONDUTORES

Materiais semicondutores com estrutura do tipo wurzita, simetria 6mm, apresentam o efeito piezoelétrico e valores de coeficientes adequados ou suficientes para aplicações. Entre esses materiais pode-se destacar o óxido de zinco (ZnO), o sulfeto de cádmio (CdS) e o nitreto de alumínio (AlN).

Para suas aplicações mais importantes esses materiais têm sido preparados na forma de filmes finos e servem como geradores ultra-sônicos de alta frequência.

O ZnO é o mais utilizado para aplicações que envolvem geração e/ou detecção de ondas acústicas de superfície (SAW). O AlN, em particular, se destaca por apresentar alta velocidade de propagação do som.

Cristais de ZnO (com “grandes” dimensões) podem ser crescidos por processos hidrotérmicos, enquanto que cristais de AlN são muito difíceis de crescer.

2.3.3 CERÂMICAS

Desde o descobrimento de que cerâmicas de titanato de bário (BaTiO_3) podiam ser polarizadas e apresentar o efeito piezoelétrico, materiais cerâmicos são os mais utilizados, até o presente, como elementos piezoelétricos na maioria das aplicações tecnológicas. O descobrimento de Roberts marca assim o início da era das piezocerâmicas. As piezocerâmicas são materiais ferroelétricos que se obtém através de métodos de preparação de cerâmicas avançadas. Em seu estado não polarizado (e não texturadas) são isotrópicas. Para sua utilização como elementos piezoelétricos precisam ser polarizadas sob a aplicação de um campo elétrico dc da ordem de alguns kilovolts por milímetro (kV/mm). O fato de ser ferroelétricas permite que se reorienta a polarização espontânea, na direção do campo de polarização. Cerâmicas piezoelétricas (ou ferroelétricas polarizadas) apresentam simetria 6mm ou ∞ mm.

Em geral, as piezocerâmicas comerciais possuem mais de um elemento dopante em suas composições básicas, que são incorporados para controlar ou intensificar determinadas propriedades físicas. As cerâmicas mais utilizadas como elementos piezoelétricos possuem estrutura do tipo perovskita.

Os transdutores modernos utilizam o quartzo artificial (sintetizado, SiO_2) ou certos cerâmicos compostos de materiais ferroelétricos (“piezocerâmicos”)

2.3.3.1 PEROVSKITAS

Perovskita é o nome originalmente designado à estrutura do titanato de cálcio (CaTiO_3). A maioria dos materiais piezoelétricos cerâmicos apresentam a estrutura perovskita.

Estudos em cerâmicas da família das perovskitas têm sido centrados essencialmente em algumas composições base como o titanato de bário (BaTiO_3), soluções sólidas de titanato zirconato de chumbo ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ - PZT), ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PMN) e perovskitas complexas $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 (PMN-PT), $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 (PZN-PT), $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PMN-PZT) entre outras. Na estrutura perovskita, generalizada como ABO_3 , os sítios A são ocupados por cátions divalentes (Pb^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} ...) enquanto que os sítios B, no centro do octaedro de oxigênio, são ocupados por cátion Ti^{4+} , Zr^{4+} , Nb^{5+} , Mg^{2+} ou Zn^{2+} . Na Figura 4 apresenta-se uma representação esquemática de uma célula unitária de uma estrutura perovskita.

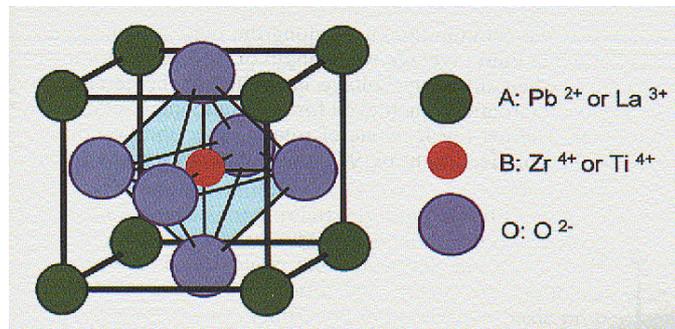


FIGURA 4 - Representação esquemática de uma célula unitária com estrutura perovskita.

Os primeiros intentos para otimizar as propriedades eletromecânicas do titanato de bário (BaTiO_3 - BT) se basearam na substituição do Ba por Pb, Sr ou Ca e de Ti por Zr, ou Sn. À temperatura ambiente o BT apresenta uma estrutura tetragonal ($4mm$) e temperatura de Curie $T_c=120^\circ\text{C}$. Várias soluções sólidas de $(\text{Pb}_x\text{Ba}_{1-x})\text{TiO}_3$ e $(\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x})\text{TiO}_3$ foram desenvolvidas com propriedades adequadas para aplicações tecnológicas.

2.3.4 Polímeros

O descobrimento da piezoelectricidade em polímeros se deve a Kawai, que observou que o polímero Poli(Fluoreto de Vinilideno), (PVDF o PVF₂) tracionado e polarizado em altos campos elétricos ($\sim 300 \text{ kVcm}^{-1}$) apresenta coeficientes piezoelétricos superiores aos do quartzo.

PVDF é um polímero que apresenta una cristalinidade de 40-50% e pode ser obtido nas fases: I ou β (que é piezoelétrica) e II ou α .

2.3.5 Compósitos

Um material compósito é um material que possui dois ou mais componentes e que apresenta propriedades físicas e químicas que resultam da soma, de uma combinação ou do produto das propriedades de seus componentes.

As primeiras investigações com compósitos piezoelétricos foram realizadas para obter hidrofones, para aplicações submarinas . Um hidrofone é um transdutor ou microfone utilizado para detectar ondas acústicas na água. A sensibilidade de um hidrofone é determinada pela voltagem produzida por uma onda de pressão hidrostática, que está associada ao coeficiente de voltagem hidrostático g_h .

As principais vantagens desses compósitos são a baixa impedância acústica (que possibilita um melhor casamento com meios que têm impedância acústica menor que a da cerâmica), alta flexibilidade mecânica e baixo fator de qualidade mecânico (o que permite detecção num largo espectro de frequências). Os compósitos 1-3 possuem alto fator de acoplamento eletromecânico de espessura (k_t), aproximadamente igual ao fator de acoplamento eletromecânico k_{33} da cerâmica.

Na Tabela 1, a seguir, são apresentados alguns resultados característicos obtidos em compósitos piezoelétricos para diferentes conectividades.

TABELA 1 – Coeficientes dielétrico e piezoelétricos de compósitos piezoelétricos cerâmica / polímero com conectividade 1-3

Compósito	\bar{P} (kg/m ³)	\bar{K}_{33}	\bar{d}_{33} (pC/N)	\bar{g}_{33} (10 ⁻³ Vm/N)	\bar{d}_h (pC/N)	\bar{d}_h (10 ⁻³ Vm/N)	$\bar{d}_h \bar{g}_h$ (10 ⁻¹⁵ m ² /N)
PZT palitos - spurrs epoxy [24]	1370	54	150	313	27	56	1536
PZT palitos - Poliuretano [29]	1430	40	170	480	20	56	1120
PZT palitos - Poliuretano [29]	930	41	180	495	73	210	15330

2.3.6 Filmes finos

Filmes finos não constituem propriamente uma classe de materiais piezoelétricos, mas sim outra geometria. Entretanto são apresentados devido a sua crescente importância que têm atualmente os filmes finos para o desenvolvimento de sensores e atuadores.

Na realidade filmes finos piezoelétricos são produzidos com os mesmos materiais que se utilizam na forma de cristais ou cerâmicas piezoelétricas. Na maioria dos casos têm sido preparados com as mesmas composições que os elementos cerâmicos.

Aplicações que envolvem ondas acústicas de superfície são as que apresentam maior potencial para utilização em filmes finos piezoelétricos. As ondas superficiais são ondas de Rayleigh e, conseqüentemente, o transporte de energia encontra-se confinado próximo à superfície. As principais aplicações consistem em ressonadores, filtros ou linhas de atraso.

Filmes finos de materiais cerâmicos como os PZT's, os titanatos de bário (BT) ou de chumbo (PT) vêm despertando grande interesse para aplicações como microatuadores. Para aplicações como filtros esses materiais apresentam as limitações de possuir baixo fator de qualidade mecânico e alto coeficiente de temperatura, quando comparados aos cristais.

2.4 FUNDAMENTOS DA PIEZOELETRICIDADE

Determinados cristais cerâmicos conservam um centro de simetria, mas isto não ocorre quando cristais iônicos estão envolvidos. Os centros das cargas positivas e negativas não coincidem. Como resultado, cada célula unitária atua como um

pequeno dipolo elétrico com uma terminação positiva e uma negativa. Isto é exemplificado pelo titanato de bário (BaTiO_3), que é cúbico acima de 120°C . A temperatura para a qual a estrutura do cristal muda de não-simétrica para uma estrutura simétrica, expresso em graus Celsius, recebe a designação de Temperatura de Curie ou Ponto Curie. Abaixo dessa temperatura verifica-se um pequeno, mas importante, deslocamento iônico. Esta temperatura crítica foi descoberta por Pierre Curie (1859 - 1906) quando efetuava estudos sobre o estado cristalino.

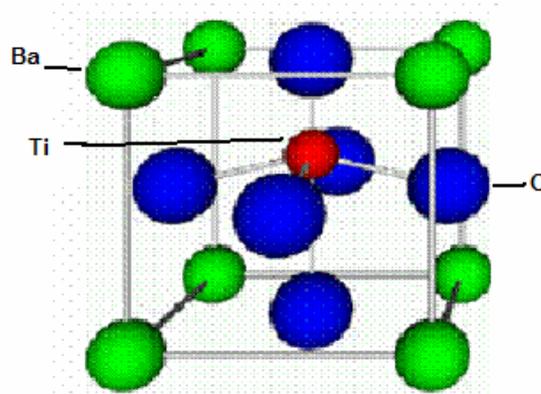


FIGURA 5 - Disposição iônica do titanato de bário O^{2-} , Ba^{2+} , Ti^{4+} (BaTiO_3).

Na figura 5 e 6 os cations ocupam os cantos da célula CFC e os anions os centros das faces. No CaTiO_3 o íon de Ti^{4+} está no centro da célula, sendo rodeado por 6 O^{2-} . Importante para os materiais piezoelétricos.

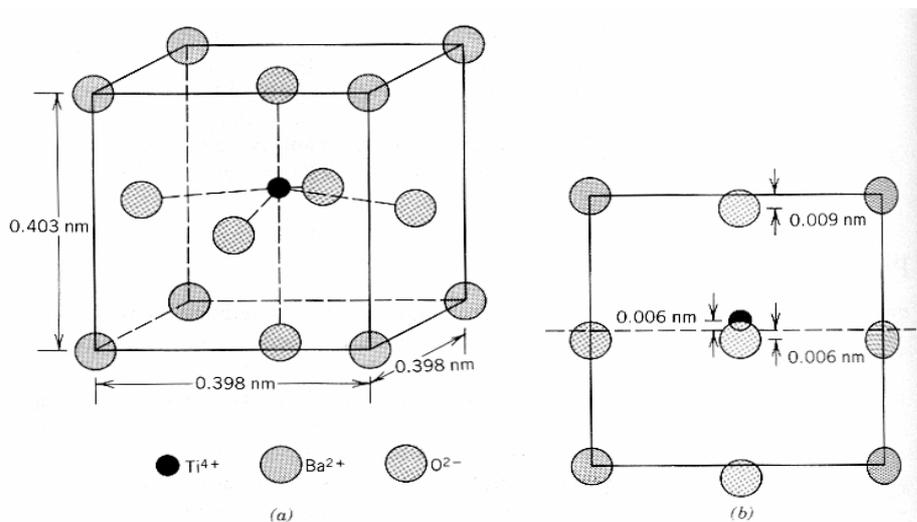


FIGURA 6 - Estrutura Cristalina do titanato de bário (BaTiO_3), a) estrutura em 3-D, b) face frontal.

Na analogia aos materiais ferromagnéticos, a temperatura de Curie é usada também em materiais piezoelétricos, onde o material perde sua polarização espontânea e características piezoelétricas acima da temperatura de Curie. No "Titano-zirconato de chumbo" (PZT), o material é tetraédrico abaixo da temperatura de Curie e passa a ser cúbico acima desta temperatura, além disso, não resta nenhum momento de dipolo líquido e nenhuma polarização espontânea acima da temperatura Curie.

A figura 7a abaixo mostra um modelo molecular simples, explicando a polarização elétrica como resultado de uma força sobre o material. Antes do material ser submetido a uma força externa, o centro de gravidade das cargas positivas e das cargas negativas, em cada molécula coincidem, fazendo com que o efeito das cargas positivas e das cargas negativas seja cancelado mutuamente.

Como resultado, é obtida uma molécula eletricamente neutra. Quando é exercida pressão sobre o material, a estrutura molecular sofre uma deformação, causando a separação dos centros de gravidade das cargas positivas e das cargas negativas gerando pequenos dipolos (Figura 7b). Os pólos internos do material são mutuamente cancelados e uma distribuição de cargas é gerada na superfície do material (Figura 7c). Neste caso o material diz-se polarizado. Esta polarização gera um campo elétrico que pode ser usado na transformação da energia mecânica, através da deformação do material, para energia elétrica.

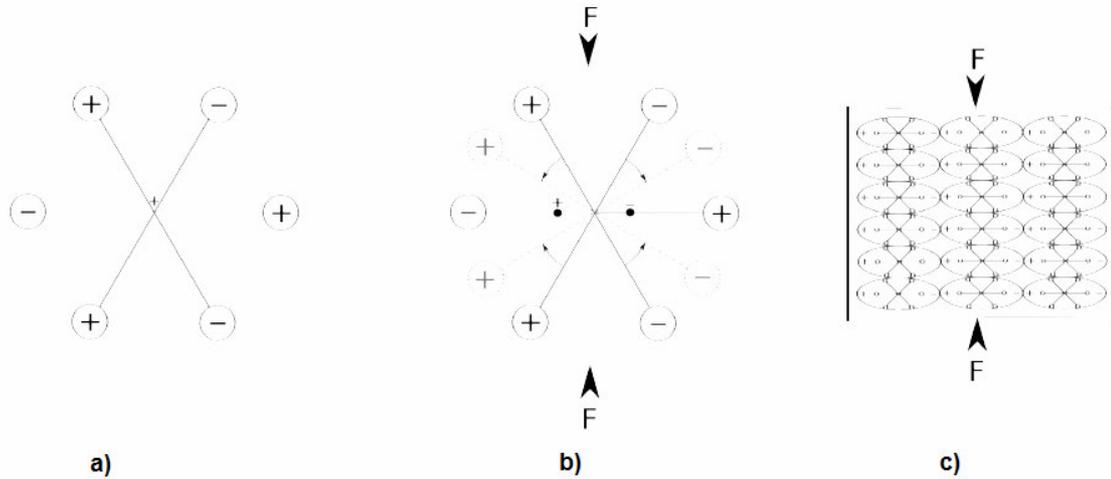


FIGURA 7 - Modelo molecular simples para explicação do efeito piezoelétrico; **a)** Molécula não perturbada; **b)** molécula sujeita a uma força externa, e **c)** Efeito de polarização na superfície do material.

2.5 PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS

De uma forma geral o efeito piezoelétrico pode ser definido como a conversão de energia mecânica em energia elétrica (direto) ou a conversão de energia elétrica em energia mecânica (inverso). Uma representação esquemática é apresentada na Figura 8.

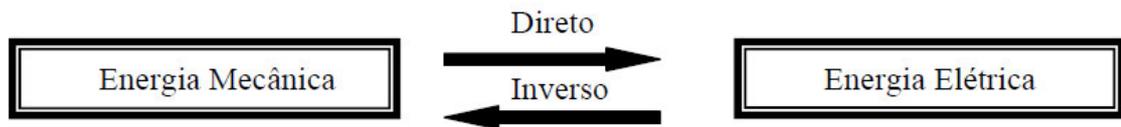


FIGURA 8 - Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico.

O efeito piezoelétrico pode ser descrito de forma simplificada, desconsiderando a simetria do material, pelas seguintes equações:

$$D = dT + \epsilon E \text{ (direto)} \quad (1)$$

$$S = sT + d E \text{ (inverso)} \quad (2)$$

Onde:

D- vetor deslocamento elétrico

T– Tensão mecânica

E - campo elétrico

S– Deformação

ϵ – permissividade dielétrica
 d – coeficiente piezoelétrico

s – coeficiente elástico

2.5.1 COEFICIENTE DE CARGA

O coeficiente de carga piezoelétrico, d , é definido pela razão das cargas elétricas geradas por unidade de área em resposta a força aplicada.

$$d = \frac{\text{deformação desenvolvida}}{\text{campo eléctrico aplicado}} \quad d = \frac{\text{carga desenvolvida (curto-circuito)}}{\text{tensão aplicada}} \quad (3)$$

2.5.2 COEFICIENTE DE DIFERENÇA DE POTENCIAL

O coeficiente de diferença de potencial, g , é definido pela razão da voltagem elétrica desenvolvida quando aplicada uma tensão mecânica.

$$g = \frac{\text{voltagem eléctrica desenvolvida}}{\text{tensão mecânica aplicada}} \quad g = \frac{\text{deformação desenvolvida}}{\text{voltagem eléctrica aplicada}} \quad (4)$$

2.5.3 CONSTANTES ELÁSTICAS

O modulo de Young, Y , descreve a rigidez mecânica de um material e é expresso pela razão da tensão pela deformação. Num material piezoelétrico, a tensão mecânica produz uma resposta elétrica que se opõe a deformação resultante. O valor do modulo de Young depende da direção da tensão aplicada, da deformação e das condições elétricas. O inverso do modulo de Young e a elasticidade do material, s , definido pelas equações 5, 6 e 7.

$$s = \frac{1}{Y} \quad (5)$$

$$s = \frac{\text{deformação}}{\text{tensão mecânica}} \quad (6)$$

$$s = \frac{1}{\rho v^2} \quad (7)$$

2.5.4 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES PIEZOELÉTRICOS DE UM MATERIAL

A determinação dos coeficientes piezoelétricos de um material pode ser realizada através de técnicas estáticas ou quasi-estáticas e dinâmicas (ressonantes).

As técnicas estáticas ou quasi-estáticas consistem em aplicar uma tensão mecânica ou uma voltagem (campo elétrico) a uma amostra do material e medir a carga elétrica em eletrodos, que se depositam nas faces (efeito piezoelétrico direto) ou a deformação do material (efeito piezoelétrico inverso), respectivamente. O elemento piezoelétrico pode ser caracterizado num circuito na forma de um capacitor nesta técnica.

As técnicas ressonantes consistem em excitar a amostra com uma frequência em torno da frequência fundamental de ressonância mecânica, de um de seus modos de vibração característico.

Um elemento piezoelétrico a operar perto da frequência de ressonância pode ser caracterizado pelo circuito equivalente da figura 9.

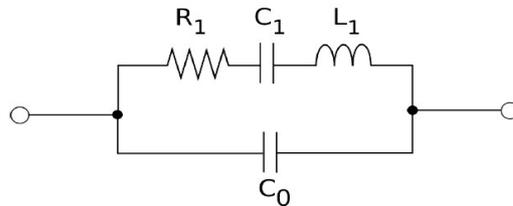


FIGURA 9 - Circuito equivalente de um ressonador piezoelétrico.

As frequências de ressonância em série e em paralelo, F_r e F_a , respectivamente são obtidas pelas equações 8 e 9.

$$F_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad (8)$$

$$F_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_0 C_1}} \quad (9)$$

As frequências podem ser medidas com tensão constante ou corrente constante, como mostra a figura 10.

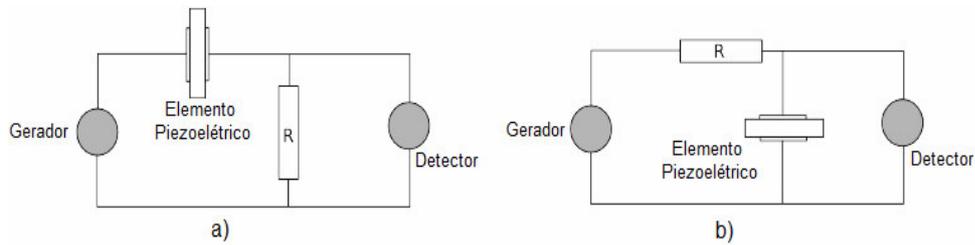


FIGURA 10 - Circuitos para a medição das freqüências de ressonância. **a)** Tensão constante; **b)** Corrente constante.

A variação da impedância do material piezoelétrico em função da freqüência e mostrado na figura 11a. O material piezoelétrico tem um comportamento capacitivo em freqüências inferiores a F_r e superiores a F_a . Entre F_r e F_a tem um comportamento indutivo. O ângulo de fase do material piezoelétrico muda de sinal em F_r e F_a , conforme ilustra a figura 11b.

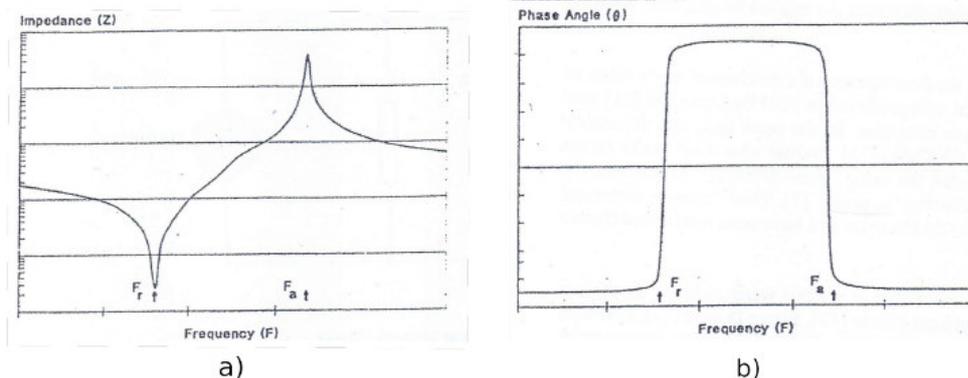


FIGURA 11 - Características de freqüência. **a)** Variação da impedância com a freqüência; **b)** Ângulo de fase.

Se a uma das extremidades de um filme de polímero, figura 12, (neste caso o PVDF, cujas extremidades têm eletrodos de alumínio em ambas as faces, e na parte central não existem eletrodos) aplicar um sinal elétrico (com freqüência, por exemplo, entre 10 e 18 kHz, ou seja, dentro da gama acústica), geram-se ondas acústicas (de freqüência igual à do sinal elétrico) devido ao efeito piezoelétrico inverso. Estas ondas acústicas, ao chegarem à outra extremidade do filme, geram um sinal elétrico devido ao efeito piezoelétrico direto.

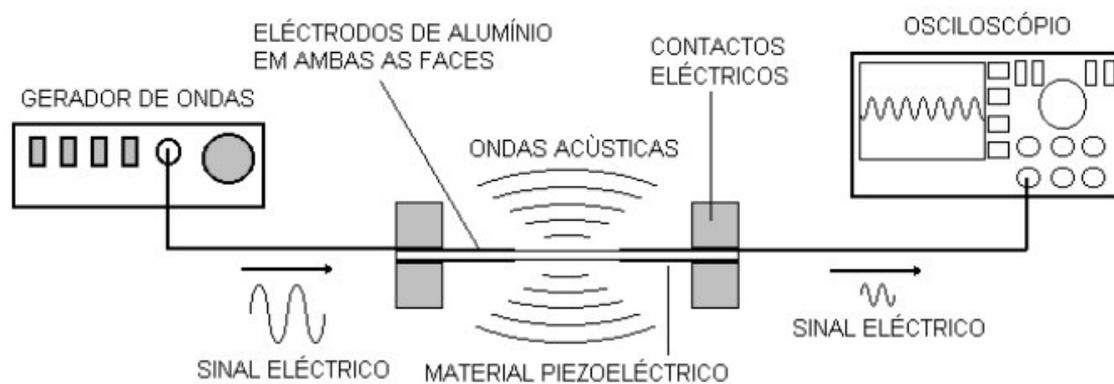
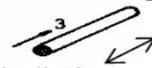
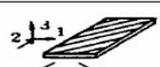


FIGURA 12 – Geração de sinal elétrico no material, e posteriormente captação do sinal mecânico.

TABELA 2 – Modos de vibrações em cerâmicas piezoelétricas.

	Geometria do ressonador	Condição de contorno		Fator de Acoplamento (k^2)	Constante Elástica
		Elástica	Elétrica		
1 (T)	 Transversal	$T_1=T_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_2} = 0$	$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}$	$\frac{1}{s_{11}^E}$
2 (L)	 Longitudinal	$T_1=T_2 \approx 0$	$\frac{\partial D_3}{\partial x_2} = 0$	$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \epsilon_{33}^T}$	$\frac{1}{s_{33}^D}$
3 (T)	 Radial/Extensional	$T_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial r} = 0$	$k_p^2 = \frac{2}{(1-\sigma)} \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}$ (a)	C_{ef}^E (b)
4 (T)	 Radial/Dilatacional	$S_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial r} = 0$	$k_p'^2 = \frac{2}{(1+\sigma')} \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^T}$ (c)	C_{11}^E
5 (T)	 Espessura (1)	$S_2 \approx 0$ $T_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_1} = 0$	$k_{31}''^2 = \frac{e_{31}''^2}{C_{ef}^E \epsilon_{ef}^T}$ (d)	C_{ef}^E (b)
6 (T)	 Espessura (2)	$S_3 \approx 0$ $T_2 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_1} = 0$	$k_{31}''^2 = \frac{e_{31}''^2}{C_{ef}^E \epsilon_{ef}^T}$ (e)	C_{ef}^E (ff)
7 (L)	 Espessura (1)	$S_1 \approx 0$ $S_2 \approx 0$	$\frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0$	$k_t^2 = \frac{e_{33}^2}{C_{33}^D \epsilon_{33}^S}$	C_{33}^D
8 (L)	 Espessura (2)	$S_2 \approx 0$ $S_3 \approx 0$	$\frac{\partial E_3}{\partial x_1} = 0$	$k_{te}^2 = \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E \epsilon_{33}^S}$	C_{11}^E
9 (L)	 Cisalhamento (1)	$S_4 \approx 0$	$\frac{\partial D_1}{\partial x_1} = 0$	$k_{15}^2 = \frac{e_{15}^2}{C_{55}^D \epsilon_{11}^S}$	C_{55}^D
10 (T)	 Cisalhamento (2)	$S_6 \approx 0$	$\frac{\partial E_1}{\partial x_1} = 0$	$k_{15}''^2 = \frac{e_{15}''^2}{C_{55}^E \epsilon_{11}^S}$	C_{55}^E
11	 Hidrostático			$k_h^2 = \frac{d_h^2}{s_h^E \epsilon_{33}^T}$ (g)	

OBS: A piezoeletricidade desaparece quando o cristal é aquecido acima da temperatura de Curie.

A polarização da tensão elétrica induzida depende se o cristal for comprimido ou estendido. O piezoeletrico quando inserido entre dois eletrodos funciona como um capacitor.

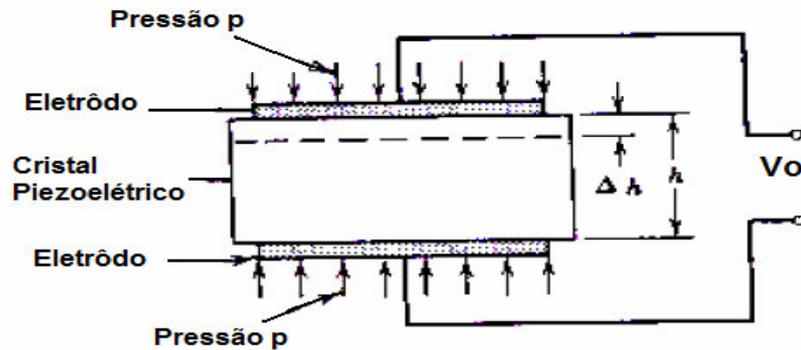


FIGURA 13 - Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico.

Conforme na figura 13, ocorre a geração de uma diferença de potencial entre as duas placas condutoras.

A carga acumulada nas placas é dada por:

$$q = V_0 \cdot C \quad (10)$$

C é a capacitância do cristal piezoelétrico:

$$C = K \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (11)$$

A: área do eletrodo

A carga nas placas é relacionada à pressão p aplicada por:

$$q = S_q \cdot A \cdot p \quad (12)$$

S_q : sensibilidade de carga do cristal piezoelétrico

A tensão elétrica detectada pelo sensor é dada por:

$$V_0 = \left(\frac{S_q}{\epsilon_0 K} \right) h \cdot p \quad (13)$$

$$V_0 = S_V \cdot h \cdot p \quad (14)$$

Onde S_V é a sensibilidade em tensão do sensor:

$$S_V = \frac{S_q}{\epsilon_0 K} \quad (15)$$

S_V depende do material piezoeétrico utilizado como também da orientação do eixo do cristal em relação ao eixo cristalográfico.

Exemplo: o Titanato de Bário ($BaTiO_3$)

- Orientação paralela à polarização: $S_V = 0,011 \text{ V.m/N}$
- Orientação perpendicular à polarização: $S_V = -0,004 \text{ V.m/N}$

2.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Vários trabalhos tem sido desenvolvidos para obter materiais piezoelétricos utilizando o sistema PZT-PMN que possibilitam a obtenção de materiais cerâmicos piezoelétricos com excelentes características.

Um dos problemas encontrado na obtenção de materiais PZT de alta qualidade é o controle da composição e estabilidade porque a altas temperaturas, o PbO , que é um dos componentes básicos, volatiliza de forma incontrolável modificando a composição do produto. Para controlar esta volatilização, alguns autores constataram que a adição de excesso do PbO diminui a temperatura de sinterização e também compensa a volatilidade do PbO durante a sinterização. Segundo alguns autores, a temperatura de sinterização também pode ser reduzida pela adição do óxido de nióbio.

O processamento destas cerâmicas piezoelétricas, principalmente a etapa de sinterização, deve ser bem controlado para que as fases características deste sistema sejam obtidas. Este controle evita a volatilização do PbO e a formação de algumas fases em excesso.

As fabricações dos materiais cerâmicos de alta tecnologia podem diferir muito daqueles das cerâmicas tradicionais. As matérias primas são muito mais caras, porque tem qualidade muito melhor controlada (controle do nível de impurezas é crítico). As aplicações são baseadas em propriedades mais específicas:

- elétricas

- sensores de temperatura (NTC, PTC)
- ferroelétricos (capacitores, piezoelétricos)
- varistores (resistores não lineares)
- dielétricos (isolantes)

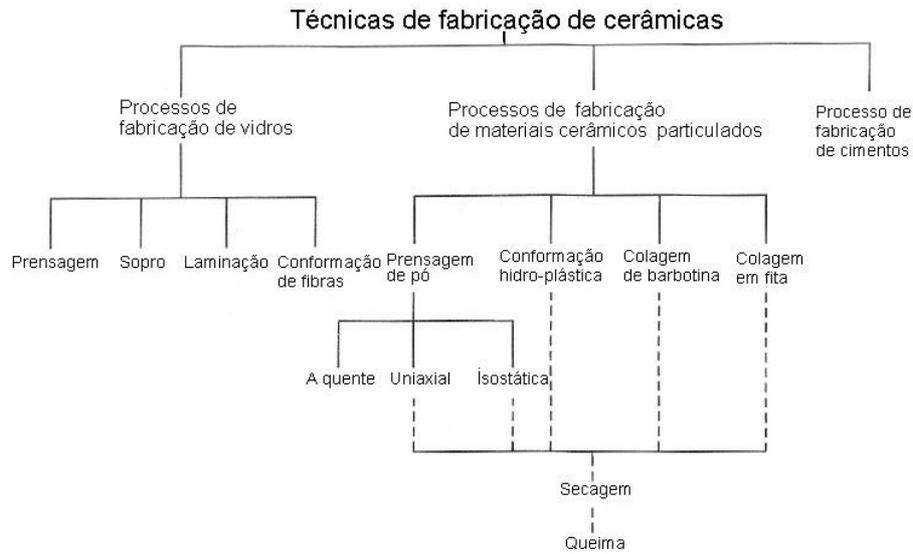


FIGURA 14 – Técnicas de Fabricação

O processo de obtenção de cerâmicas ferroelétricas de metaniobato de chumbo (PN) foi otimizado. Levando-se em consideração a potencialidade do metaniobato de chumbo para diferentes tipos de aplicações, principalmente em altas temperaturas. A adição de Ti^{4+} favorece a densificação das cerâmicas e aumenta a temperatura de Curie. Contudo, a transição de fase ferro-paraelétrica é afetada por um processo de condutividade elétrica que se manifesta tanto em temperaturas inferiores quanto superiores à temperatura de Curie. Por outro lado, o portador de carga responsável por tal processo condutivo são as vacâncias de oxigênio duplamente ionizadas. As cerâmicas de PN, puras e dopadas com Ti^{4+} , apresentaram baixos valores do fator de qualidade mecânico e uma alta anisotropia piezoelétrica. Tais características são desejáveis para a fabricação de transdutores eletro-mecânicos de banda larga, principalmente para operar no modo de espessura.

2.7 APLICAÇÕES E AVANÇOS TECNOLÓGICOS

A aplicação do efeito piezoelétrico que pode ser utilizado para medir vibração, força, pressão ou deformação. Exemplos de mecanismos de medições:

- Transdutores de Pressão, Força ou Aceleração (converte energia mecânica em energia elétrica).

- Atuadores (converte eletricidade em energia mecânica)

- Transmissores e Receptores de Ultrassom

- Medidores de distância (tempo de propagação do som)

- Medidores de fluxo de líquidos e gases (Efeito Doppler)

- Ultrasonografia

- Referência de Frequência

- Transdutor de Temperatura

(a frequência de ressonância é função da temperatura)

- Microfones

- Emissores de Som (atuador)

Na alimentação de dispositivos de baixa tensão e muito baixo consumo a partir da alta tensão da rede de energia, o uso de um transformador piezoelétrico pode ser uma solução interessante em substituição às soluções tradicionais como, por exemplo, aquelas que fazem uso de fontes de transformador.

2.7.1. PROJETOS

2.7.1.1 SONAR

Transdutores aplicam um pulso elétrico de um cristal piezoelétrico para criar uma onda de pressão, e então produzir uma corrente quando a onda refletida deforma o cristal. O tempo entre as duas correntes é utilizado para a elaboração de um objeto como longe dele.

2.7.1.2 SENSOR CONVERTE IMPACTO DA CHUVA EM ENERGIA

A revista britânica de ciência New Scientist publicou um artigo sobre uma nova técnica, desenvolvida por cientistas da Comissão de Energia Atômica (CEA), em Grenoble, na França, capaz de converter a força do impacto criado por pingos de chuva em energia elétrica. Criaram sensores produzidos com materiais piezo-

elétricos - que geram voltagem a partir da força mecânica - para converter o impacto dos pingos em quantidades pequenas de energia.

Os sensores de energia pluvial serão capazes de produzir apenas 1 watt de eletricidade por hora, por ano, por metro quadrado - quantia 1 milhão de vezes menor do que a energia elétrica criada a partir da energia solar na França. A quantidade de energia criada pelos sensores ainda é pequena, mas a pesquisa representa uma idéia inovadora.

2.7.1.3 GERAÇÃO DE ULTRASOM

As ondas ultra-sônicas são geradas por transdutores ultra-sônicos que convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa.

- Propagação de energia através de ondas mecânicas por um Transdutor(Mudam de formato ou vibram quando é aplicada uma corrente elétrica alternada);
- Onda que se propaga em um material;
- Meios muito densos -> refletem alta % energia;
- Captação (por outro transdutor) da onda refletida, transformando em sinal elétrico e posteriormente sendo convertida em imagem;

2.7.1.4 MEDIÇÃO DE MASSA

As balanças eletrônicas encontradas em supermercados ou mesmo as balanças usadas em laboratórios de pesquisa para medir massas pequenas têm seu funcionamento baseado na piezoelectricidade, pois utilizam cristais que se polarizam ao sofrerem uma deformação.

2.7.1.5 MÚSICAS

Materiais Piezoelétricos são usados em violões elétricos e vários outros instrumentos musicais para transformar vibrações mecânicas em sinais elétricos que são então ampliados e convertidos em som através de amplificadores.

2.7.1.6 CARREGAR TELEMÓVEIS ATRAVÉS DOS MOVIMENTOS CORPORAIS

Agora, novas descobertas no campo da nanotecnologia permitiram aos investigadores aproveitar a energia das vibrações de baixa frequência através de nanotubos piezoelétricos.

No nosso corpo essas vibrações são geradas por exemplo pelo batimento cardíaco, pelos movimentos respiratórios ou até mesmo pela corrente sanguínea.

Assim, esta tecnologia tem grande potencial porque futuramente poderemos, por exemplo, carregar o nosso telemóvel apenas aproveitando a energia dos nossos movimentos.

2.7.1.7 TRANSFORMADORES PIEZOELÉTRICOS

Um transformador piezoelétrico ao contrário dos transformadores convencionais, que utilizam o princípio do magnetismo, tem funcionamento baseado na vibração.

Aplica-se uma tensão de entrada num curto espaço de uma barra cerâmica (material piezoelétrico), como por exemplo PZT, e esta tensão por sua vez causa uma vibração na barra através do efeito piezoelétrico inverso. A frequência de vibração da barra é a sua frequência de ressonância que geralmente varia de 100 kilohertz a 1 megahertz. Uma tensão mais elevada é então gerada em outra seção da barra. Taxas de aumento de mais 1000:1 já foram demonstradas

2.7.2 APLICAÇÃO EM MICRO E NANO ESCALAS

A eficácia da geração de energia por materiais piezoelétricos aumenta dramaticamente – em até 100% – quando trabalhando em dimensões entre 20 e 23 nanômetros.

Mas recentes resultados de uma pesquisa conjunta entre duas universidades norte-americanas podem possibilitar o uso desta tecnologia para recarregar telefones celulares, usando apenas a própria vibração da voz humana.

Uma possibilidade seria a aplicação de um finíssimo filme de material piezoelétrico sobre o microfone e alto-falante de um celular, por exemplo. As vibrações da voz humana comprimem o material, que gera minúsculas descargas de energia.

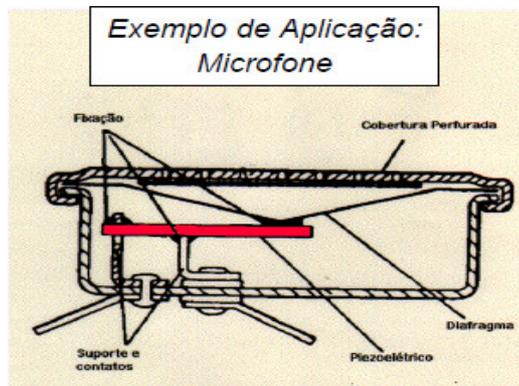


FIGURA 15 – Exemplo de Aplicação

2.7.3 PESQUISA RECENTE

Piezoelasticidade faz papel celofane virar material inteligente. Microrobôs, sensores biodegradáveis e micro-aviões de papel capazes de voar "batendo as asas" - estas são as aplicações do celofane, destacadas pelos pesquisadores em um artigo publicado no jornal *Macromoléculas*.



FIGURA 16 – Microrobôs

2.8. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Quanto ao custo dos materiais piezoelétricos, dependem do processo de fabricação. São utilizados geralmente em produtos de alta tecnologia, exigindo um maior controle no processo de fabricação.

2.8.1 VANTAGENS

- Os polímeros piezoelétricos são relativamente mais fracos como transmissor eletromecânico quando comparado com os cerâmicos, particularmente a frequência de ressonância e em aplicações de baixa frequência.

- Uma outra desvantagem dos polímeros reside na sua baixa temperatura de operação em relação às piezocerâmicas. Não é recomendado ultrapassar os 100°C para o PVDF.

- Sensibilidade alta e unidirecional
- Alta rigidez mecânica
- Larga resposta em frequência
- Alta linearidade
- Alta precisão
- Pequeno tamanho

2.8.1.2 DESVANTAGEM

A saída é na forma de carga, logo não apresenta resposta estática, sendo aplicável apenas para grandezas variantes no tempo.

Em comparação aos cristais, poder-se-ia destacar a maior dependência de suas propriedades eletromecânicas com a temperatura, a formação de fases não desejadas durante sua produção, o que pode alterar suas propriedades, e a variação de suas propriedades com o tempo (envelhecimento – “aging”).

2.9 PROBLEMAS AMBIENTAIS

As cerâmicas piezoelétricas, principalmente, os titanatos zirconatos de chumbo, têm amplas aplicações, destacando-se a possibilidade de acelerar a degradação de compostos orgânicos que contaminam efluentes. Mas este material tem na sua composição o elemento chumbo em grande proporção, isto é, na faixa de 60 a 70% em peso, apresentando uma volatilidade elevada, mesmo em baixa temperatura, já que é o principal componente destas cerâmicas. Entretanto, nos últimos anos tem-se intensificado o estudo de cerâmicas piezoelétricas livres de chumbo, principalmente para prevenir problemas ambientais causados pelo chumbo, como também para a produção de cerâmicas piezoelétricas utilizadas em pesquisas

que necessitam menores frequências de trabalho. Torna-se necessário o desenvolvimento de novas cerâmicas piezoelétricas livres de chumbo. Assim, titanatos de bismuto, bário ou outros cátions bivalentes estão sendo sintetizados adicionando íons monovalentes, como sódio e/ou potássio para viabilizar as reações no estado sólido em temperaturas menores, o que acontece com os métodos químicos de obtenção de pó cerâmico.

3. CONCLUSÃO

O uso de materiais piezoelétricos tem crescido nos últimos anos e está expandindo rapidamente. Sua habilidade de converter a energia mecânica à energia elétrica e reciprocamente, faz seu uso inestimável para transdutores acústicos para o sonar e o ultra-som médico, e para as bombas e os motores minúsculos, para aplicações médicas e outras. Os materiais piezoelétricos são uma das grandes promessas para a obtenção de energia, devido as suas propriedades, que proporcionam as mais variadas formas de obter energia sem degradar muito o meio ambiente.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, William D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais** .2, ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 2006

SMITH, William F. **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**.2, ed. Portugal: McGRAW-HILL, 1998, p. 604-639.

SEMICONdutoRES

Marcos Gabriel Tragueta

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho vamos tratar sobre a aplicação de semicondutores, em primeiro caso explica-se no que consiste um semicondutor e rapidamente alguns processos de dopagem, e enfatizaremos sua utilização em um componente básico, o diodo utilizado em grande escala na área de eletrônica, mais com papel importante também para grandes potências e grandes tensões elétricas. Veremos com detalhes o que acontece intrinsecamente com o semicondutor, e seus portadores de cargas, tanto positiva quanto negativa.

Além do diodo também vamos citar alguns outros componentes que se utiliza de semicondutores para um funcionamento apropriado, como exemplo. os transistores de junção.

2. SEMICONdutoRES

São materiais que possuem uma condutividade intermédia entre a de um isolante e a de um condutor – resistividades mais comuns de 1 a 1000 $\Omega \cdot m$. Nestes materiais a banda de valência é separada da banda de condução por uma diferença energética suficientemente pequena para que alguns elétrons, com agitação térmica suficiente, consigam transitar para a banda de condução e poderem assim conduzir alguma corrente elétrica. Os semicondutores mais comuns são o silício (Si) e o germânio (Ge), que possuem 4 elétrons de valência.

TABELA 1 – Materiais Semicondutores

II	III	IV	V	VI
	B Boro 5	C Carbono 6	N Nitrogênio 7	O Oxigênio 8
	Al Alumínio 13	Si Silício 14	P Fósforo 15	S Enxofre 16
Zn Zinco 30	Ga Gálio 31	Ge Germânio 32	As Arsênio 33	Se Selênio 34
Cd Cádmio 48	In Índio 49	Sn Estanho 50	Sb Antimônio 51	Te Telúrio 52
Hg Mercúrio 80	Tl Tálio 81	Pb Chumbo 82	Bi Bismuto 83	Po Polônio 84

Nos compostos puros, semicondutores, o número médio de elétrons de valência por átomo deve ser quatro (como para o Si e o Ge puros). Assim, combina-se Ga (III) com As (V) ou Cd (II) com Te (VI). Na tabela 5 são apresentadas propriedades de vários semicondutores intrínsecos e extrínsecos.

2.1 DOPAGEM TIPO N E P

Quando são adicionados à sua estrutura outros elementos químicos, os semicondutores adquirem propriedades interessantes. Os elementos adicionados podem ser de dois tipos, doadores e receptores de elétrons. No primeiro caso os semicondutores dopados designam-se do tipo N, e no segundo designam-se tipo P. Na dopagem tipo N usa-se elementos como o fósforo com cinco elétrons de valência: quatro deles são usados na ligação química com o substrato de Si e um fica disponível para conduzir corrente elétrica. Na dopagem tipo P é usado um elemento com três elétrons de valência (como o gálio) e assim vai ser criada uma lacuna que também pode servir para condução de eletricidade.

2.2 JUNÇÃO NP

Quando se une um semicondutor dopado do tipo N a um outro dopado tipo P, forma-se uma junção designada NP. Aplicando-se uma tensão direta (de P para N) aos terminais desta junção, como está indicado na figura abaixo, a corrente fluirá com pouca resistência, pois os elétrons dos elementos doadores irão ser

transferidos para os dopantes receptores (lacunas) que estão no semiconductor do tipo P. No entanto, se a tensão for invertida deixa de ser possível passar corrente e o elemento comporta-se como um bom isolante com uma corrente praticamente nula.

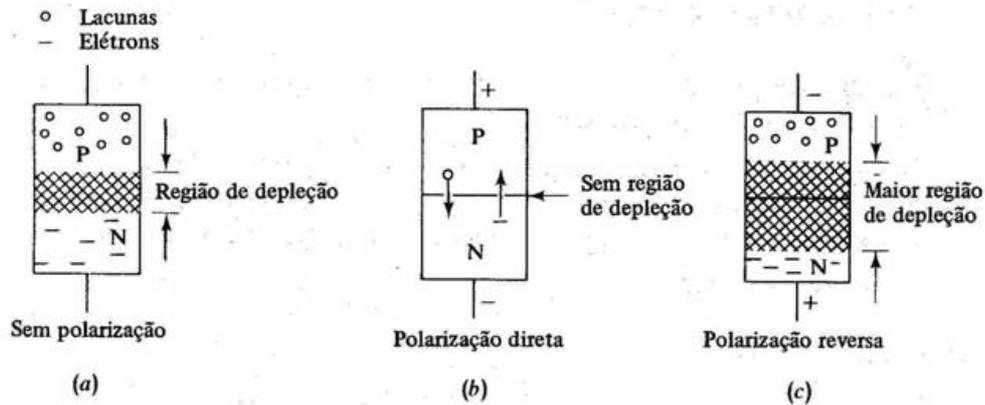


FIGURA 1 – Junção NP

3. COMPONENTES SEMICONDUTORES RÁPIDOS DE POTÊNCIA

Um diodo semiconductor é um componente P-N que permite a passagem de corrente em apenas um sentido, mais para isso devemos respeitar seus limites de tensão e corrente. Os diodos de alta potência são caracterizados por possuírem uma maior área, o que permite uma corrente mais alta atravessando o componente, maior comprimento, que permite uma tensão mais alta, como podemos ver na figura abaixo:

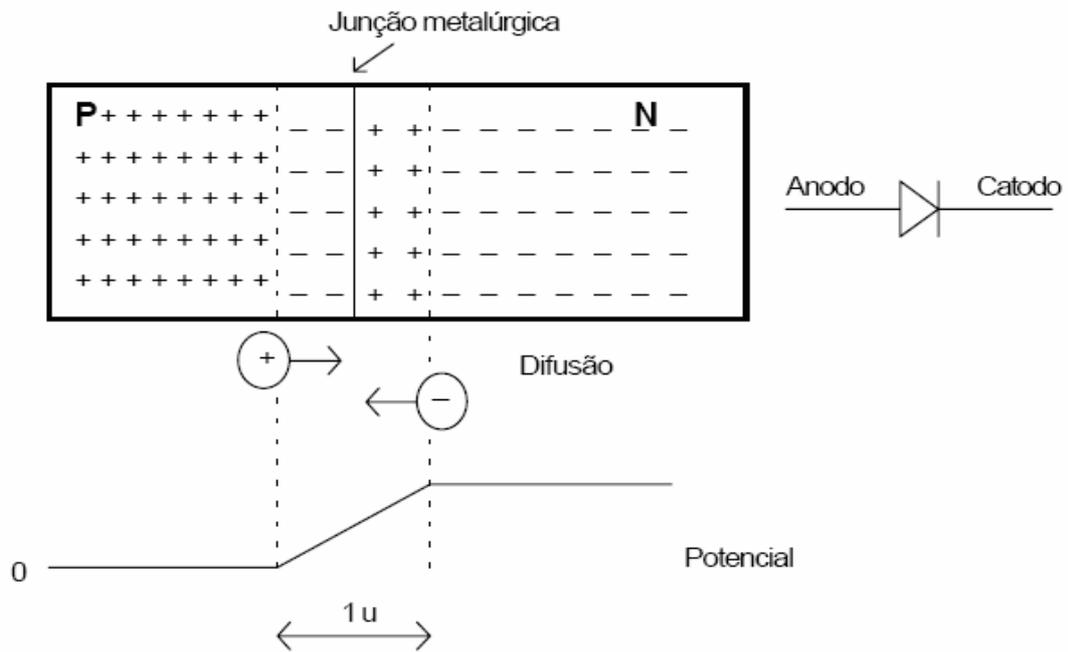


FIGURA 2 – Diodo semiconductor.

Aplicando uma tensão na região P-N a diferença de potencial aparecerá na região de transição, sendo assim a resistência desta região é muito maior que a resistência do restante do componente (devido à concentração de portadores).

Quando se polariza reversamente um diodo, ou seja, se aplica uma tensão negativa no ânodo (região P) e positiva no cátodo (região N), mais portadores positivos (lacunas) migram para o lado N, e vice-versa, de modo que a largura da região de transição aumenta.

Por difusão e efeitos térmicos certa quantidade de portadores migra para região de transição. Se o campo elétrico na região de transição for muito intenso, os portadores em trânsito obterão grande velocidade e, ao se chocarem com átomos da estrutura, produzirão novos portadores, os quais, também acelerados, produzirão um efeito de avalanche.

Quando a tensão aplicada superar o valor natural da barreira, cerca de 0,7V para diodos de Si, os portadores negativos do lado N serão atraídos pelo potencial positivo do anodo e vice-versa, levando o componente à condução.

Para um diodo de potência a estrutura interna é um pouco diferente, possuindo uma região N intermediária com menor dopagem que faz o componente suportar tensões mais altas, por reduzir o campo elétrico na região de transição.

As camadas que fazem os contatos externos são altamente dopadas, a fim de fazer com que se obtenha um contato com característica ôhmica e não semiconductor.

O arredondamento nas pontas do diodo de potencia tem como função criar campos elétricos mais suaves, evitando distorções de bordas.

Na condução devido à alta dopagem da camada P+, por difusão, existe uma penetração de lacunas na região N-. Além disso, à medida que cresce a corrente, mais lacunas são injetadas na região N-, fazendo com que elétrons venham da região N+ para manter a neutralidade de carga.

O comportamento dinâmico de um diodo de potência é, na verdade, muito diferente do de uma chave ideal, como se pode observar na figura abaixo:

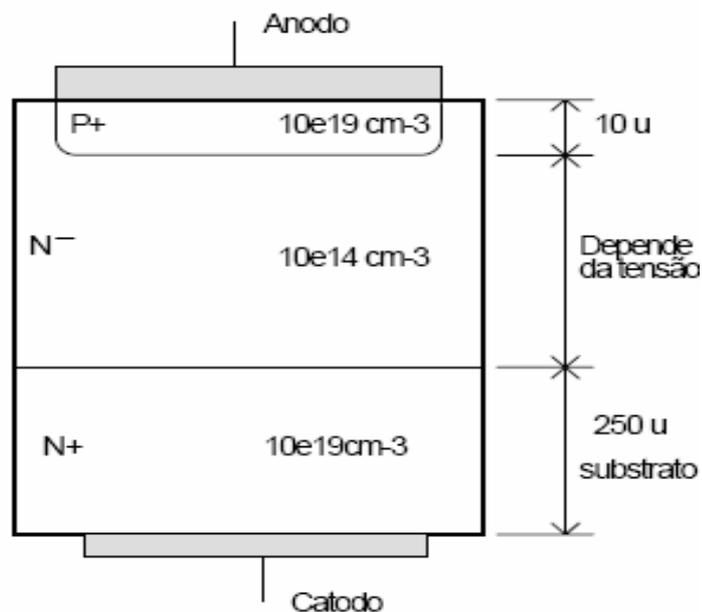


FIGURA 3 – Comportamento em relação a tensão

Aplicando-se uma tensão V_i no diodo, cargas diferentes podem alterar alguns aspectos dos formatos de onda.

Durante t_1 , remove-se a carga acumulada na região de transição. Como ainda não houve significativa injeção de portadores, a resistência da região N- é elevada, produzindo um pico de tensão. Indutâncias parasitas do componente e das conexões também colaboram com a sobre-tensão. Durante t_2 tem-se chegada dos

portadores e a redução da tensão para cerca de 1V. Estes tempos são, tipicamente, da ordem de centenas de ns.

Quando o diodo é desligado, a carga presente na região N- é removida antes da formação da barreira de potencial na junção. Quando a corrente atinge seu pico negativo é que foi retirado o excesso de portadores, iniciando-se, então, o bloqueio do diodo.

O retorno da corrente a zero, após o bloqueio, devido à sua elevada derivada e ao fato de, neste momento, o diodo já estar desligado, é uma fonte importante de sobre tensões produzidas por indutâncias parasitas associadas aos componentes por onde circula tal corrente.

4. DIODO SCHOTTCKY

Quando junta-se um terminal metálico á um material semicondutor, o contato tem, tipicamente, um comportamento ôhmico, ou seja, a resistência do contato governa o fluxo da corrente. Quando este contato é feito entre um metal e uma região semicondutora com densidade de dopagem baixa, o efeito dominante deixa de ser o resistivo, passando a ser também um retificador de onda, completa ou inteira.

Para o diodo schottcky coloca-se um filme metálico em contato com o semicondutor como na figura abaixo:

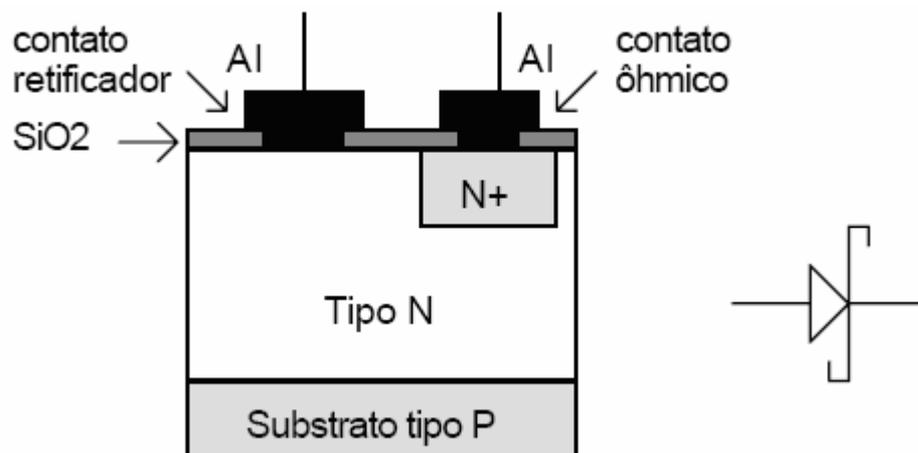


FIGURA 4 – Diodo schottcky

O metal quase sempre é depositado sobre um material tipo N, por causa da maior mobilidade dos portadores neste tipo de material. O metal será o anodo e o semiconductor será o catodo.

Numa deposição de Al ($3 e^-$), os elétrons do material tipo N migrarão para o metal, criando uma região de transição na junção. Note que apenas os portadores majoritários em ambos os materiais estão em trânsito. O seu chaveamento é muito mais rápido do que o dos diodos bipolares, uma vez que não existe carga espacial armazenada no material tipo N, sendo necessário apenas refazer a barreira de potencial (0,3V). A região N tem uma dopagem relativamente alta, a fim de reduzir as perdas de condução, com isso, a máxima tensão suportável por estes diodos é de cerca de 100V.

5. TRANSISTOR BIPOLAR DE POTENCIA

5.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

A operação normal de um transistor é feita com a junção J1 (B-E) diretamente polarizada, e com J2 (B-C) reversamente polarizada, como na figura abaixo:

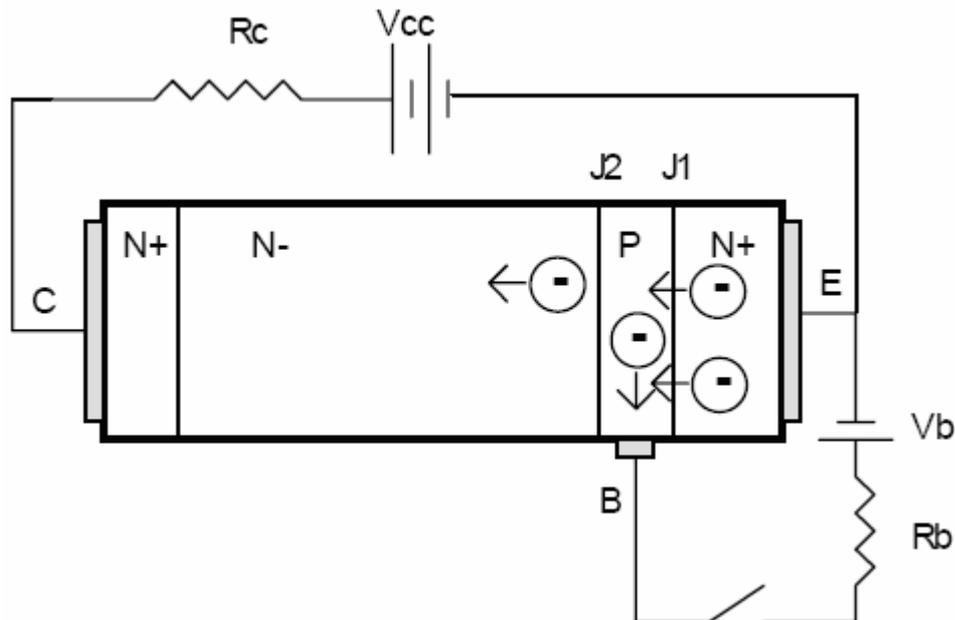


FIGURA 5 – Operação de um transistor.

Para a estrutura NPN, os elétrons são atraídos do emissor pelo potencial positivo da base. Esta camada central é suficientemente fina para que a maior parte dos portadores tenha energia cinética suficiente para atravessá-la, chegando à região de transição de J2, sendo atraídos pelo potencial positivo do coletor.

Na verdade, a estrutura interna dos TBP's é diferente. Para suportar tensões muito altas, existe uma camada intermediária do coletor, com baixa dopagem, a qual define a tensão de bloqueio do componente.

As bordas arredondadas no emissor servem para uma homogeneização do campo elétrico, necessária à manutenção de ligeiras polarizações reversas entre base e emissor. O TBP não sustenta tensão no sentido oposto porque a alta dopagem do emissor provoca a ruptura de J1 em baixas tensões (5 a 20V), na figura abaixo podemos ver a estrutura dos TBP's:

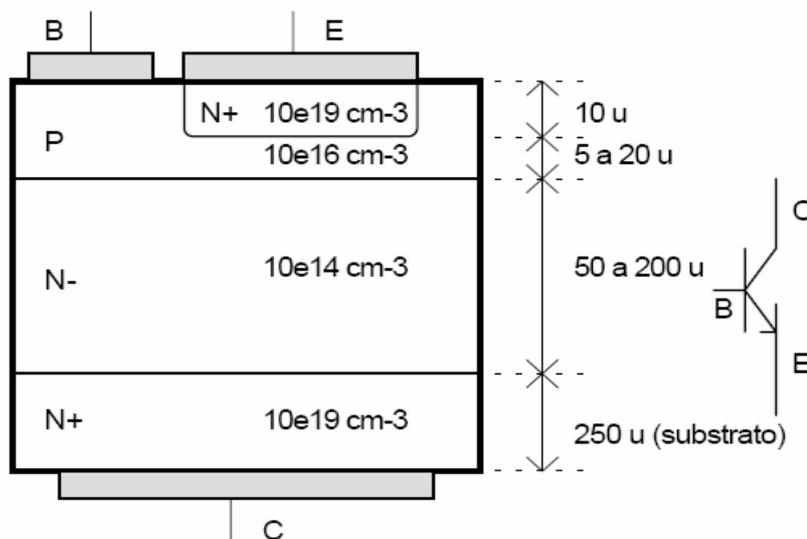


FIGURA 6 – Estrutura dos TPB's

O uso preferencial de TBP tipo NPN se deve porque este apresenta menos perdas do que os PNP, que ocorre por causa da maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas, reduzindo, principalmente, os tempos de comutação do componente.

6. LIMITES DE TENSÃO

A tensão aplicada ao transistor encontra-se praticamente toda sobre a junção J2 a qual, está reversamente polarizada.

O processo de primeira ruptura ocorre quando se eleva a tensão V_{ce} , provocando um fenômeno de avalanche em J2. Este acontecimento não danifica o dispositivo. Se, no entanto, a corrente I_c se concentrar em pequenas áreas, o superaquecimento produzirá ainda mais portadores e destruirá o componente (segunda ruptura). Podemos determinar onde ocorrem essas rupturas pelo gráfico abaixo:

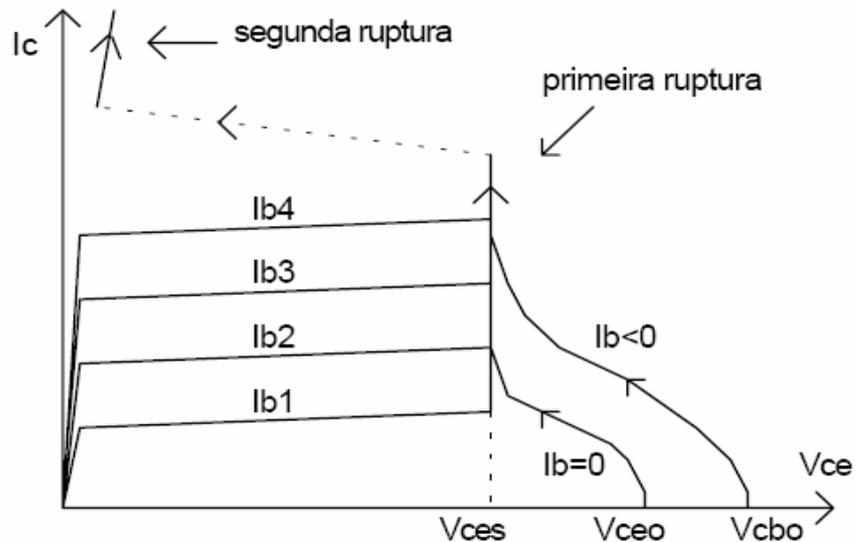


FIGURA 7 - Limites de ruptura.

Com o transistor desligado ($I_b=0$) a tensão que provoca a ruptura da junção J2 é maior, elevando-se ainda mais quanto menor for I_b , ou seja $-I_b$. Isto é uma indicação interessante que, para transistores submetidos a valores elevados de tensão, o estado desligado deve ser acompanhado de uma polarização negativa da base.

A semelhança da carga espacial armazenada nos diodos, nos transistores bipolares também ocorre estocagem de carga. Na figura abaixo podemos ver a distribuição de carga estática no interior do transistor para diferentes áreas de operação.

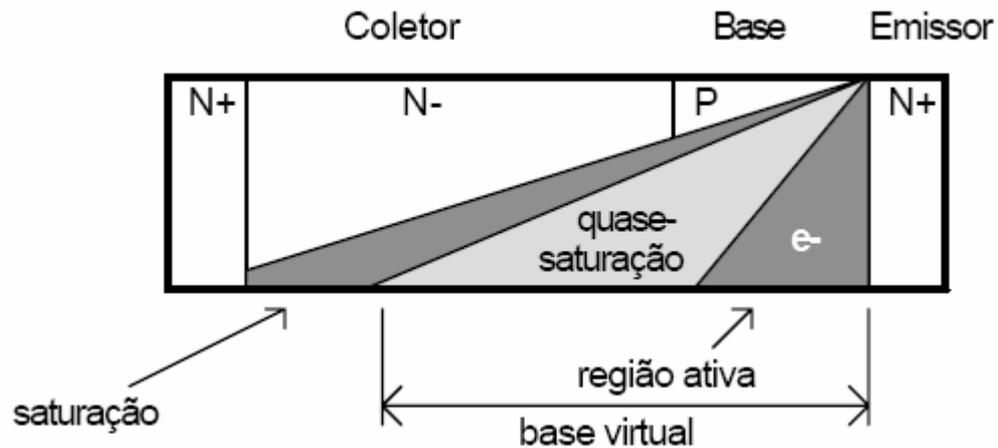


FIGURA 8 – Distribuição de carga no interior do transistor.

Na região ativa, J_2 está reversamente polarizada ocorrendo então uma acumulação de elétrons na região da base. Quando se aproxima da saturação, J_2 fica diretamente polarizada, atraindo lacunas da base para o coletor. Tais lacunas associam-se a elétrons vindos do emissor que estão migrando pelo componente, criando uma carga espacial que penetra a região N^- . Isto representa um "alargamento" da região da base, implicando na redução do ganho do transistor. Tal situação caracteriza a chamada quase-saturação. Quando esta distribuição de carga espacial ocupa toda a região N^- chega-se, efetivamente, à saturação.

7. GANHO DE CORRENTE

O ganho de corrente dos TBP varia com, V_{ce} , I_c ou temperatura, sendo necessário definir adequadamente o ponto de operação. Em baixas correntes, a recombinação dos portadores em trânsito leva a uma redução no ganho, enquanto para altas correntes tem-se o fenômeno da quase-saturação reduzindo o ganho, como explicado anteriormente.

Para uma tensão V_{ce} elevada, a largura da região de transição de J_2 que penetra na camada de base é maior, de modo que reduz a espessura efetiva da base, o que ocasiona a um aumento do ganho.

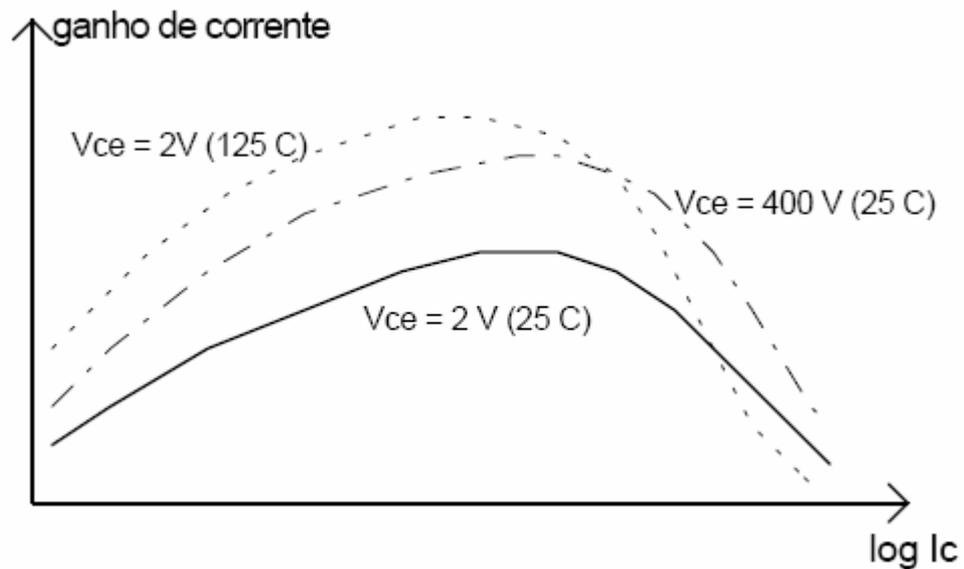


FIGURA 9 - Ganho de corrente em TBP.

8. MOSFET PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CANAL N

Quando uma tensão $V_{gs} > 0$ é aplicada, o potencial positivo no gate repele as lacunas na região P, deixando uma carga negativa, mas sem portadores livres. Quando esta tensão atinge um certo limiar (V_{th}), elétrons livres gerados principalmente por efeito térmico presentes na região P são atraídos e forma um canal N dentro da região P, pelo qual se torna possível a passagem de corrente entre D e S. Elevando V_{gs} , mais portadores são atraídos ampliando o canal, reduzindo sua resistência (R_{ds}), permitindo o aumento de I_d . Este comportamento caracteriza a chamada "região resistiva". Podemos ver a estrutura física do Mosfet na figura abaixo:

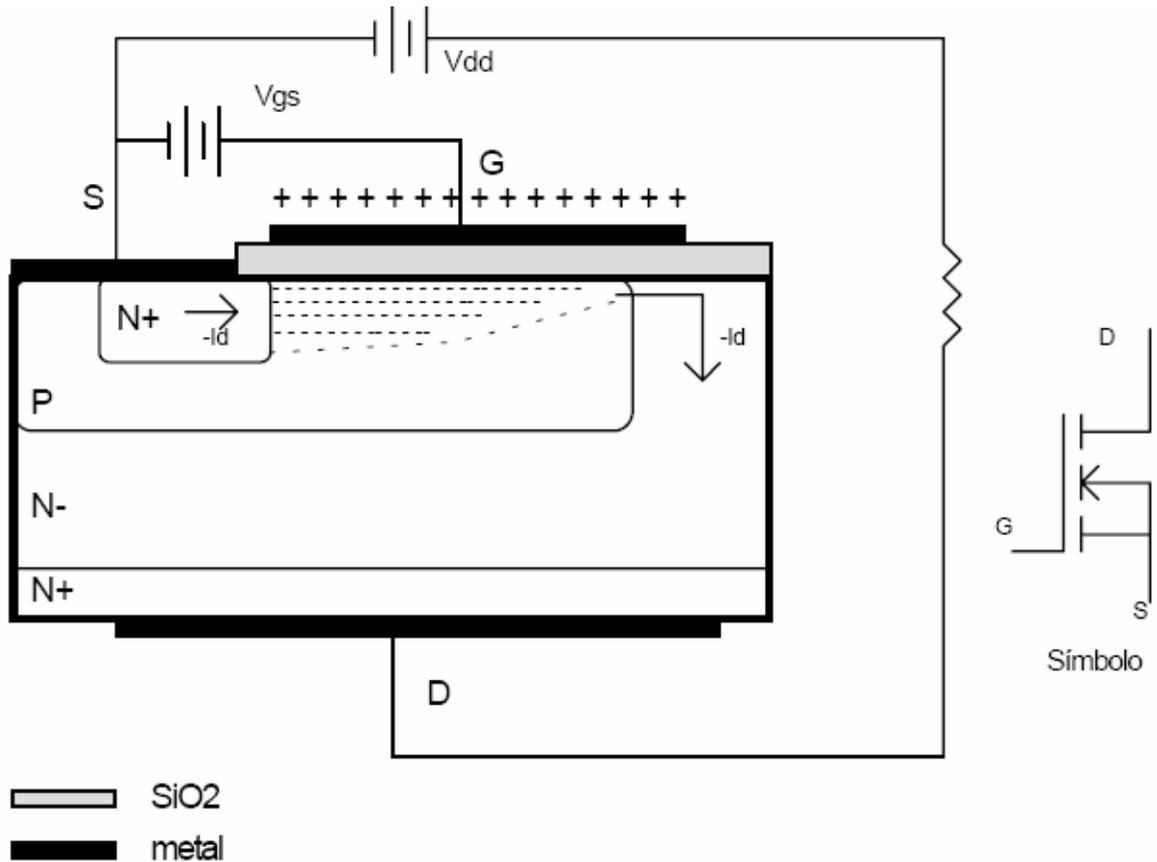


FIGURA 10 – Estrutura física do Mosfet

A passagem de I_d pelo canal produz uma queda de tensão que leva ao seu afunilamento, ou seja, o canal é mais largo na fronteira com a região N⁺ do que quando se liga à região N⁻. Um aumento de I_d leva a uma maior queda de tensão no canal e a um maior afunilamento, o que conduziria ao seu colapso e à extinção da corrente! Obviamente o fenômeno tende a um ponto de equilíbrio, no qual a corrente I_d se mantém constante para qualquer V_{ds} , caracterizando a região ativa do Mosfet.

Estes transistores, na maioria são de canal N por apresentarem menores perdas e maior velocidade de comutação, devido à maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas.

A tensão V_{gs} é limitada a algumas dezenas de volts, por causa da capacidade de isolamento da camada de SiO₂.

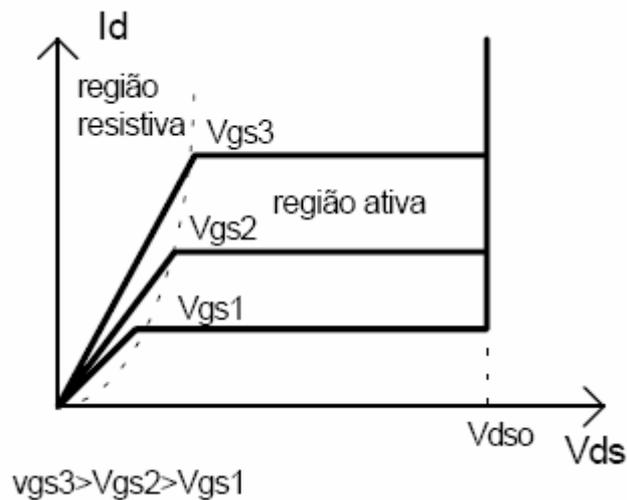


FIGURA 11 - O gráfico acima demonstra o comportamento estático do Mosfet.

8.1 ESTRUTURA IGBT

O IGBT alia a facilidade de acionamento dos MOSFET com as pequenas perdas em condução dos TBP. Sua velocidade de chaveamento é semelhante à dos transistores bipolares.

8.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

Em termos simplificados pode-se analisar o IGBT como um MOSFET no qual a região N- tem sua condutividade modulada pela injeção de portadores minoritários (lacunas), a partir da região P+, uma vez que J1 está diretamente polarizada. Esta maior condutividade produz uma menor queda de tensão em comparação a um MOSFET similar.

A construção do dispositivo deve ser tal que evite o acionamento deste tiristor, especialmente devido às capacitâncias associadas à região P, a qual se relaciona à região do gate do tiristor parasita. Os modernos componentes não apresentam problemas relativos a este elemento indesejado.

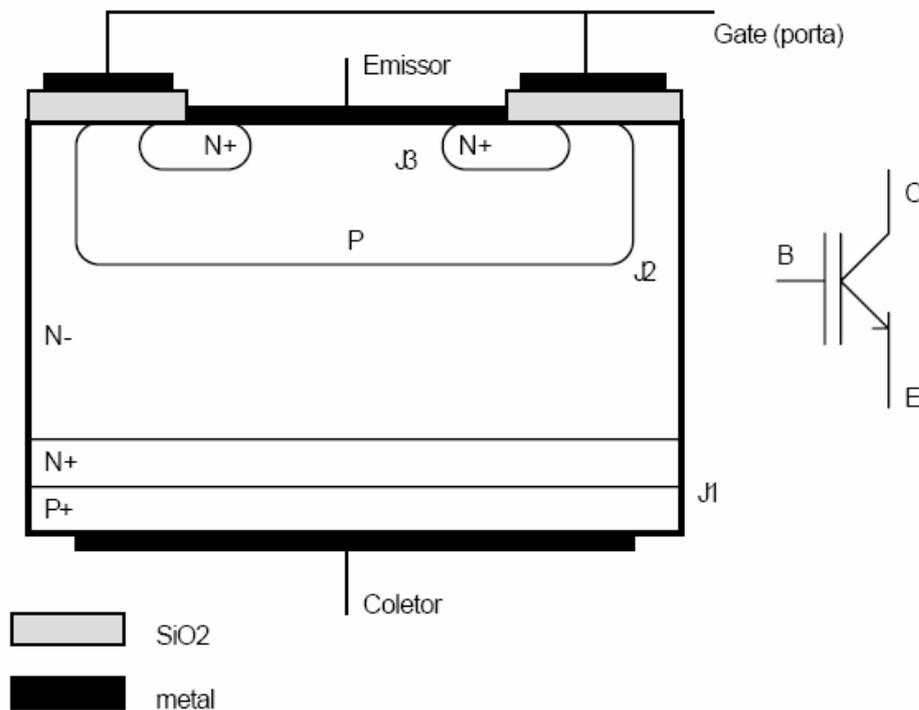


FIGURA 12 – Funcionamento do dispositivo.

9. CONCLUSÃO

Neste trabalho podemos aprender um pouco sobre semicondutores e também algumas de suas principais aplicações em nossa engenharia moderna, além de entender com se comportarão os materiais tipo N e P quando submetidos a tensões elétricas e quando ligados juntos para formação de diodos e transistores. Podemos ver também como se comportam os portadores de carga e o que acontece intrinsecamente nos componentes.

10. BIBLIOGRAFIA

Robert L. Boylestad, Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos

ESTUDO DO ELEMENTO QUÍMICO TÂNTALO E SUAS APLICAÇÕES EM MATERIAIS ELÉTRICOS

Leandro Copetti Walter

1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais novos aplicáveis ao cotidiano é extremamente importante, pois, promove melhoria em obras ou produtos, e reduz custos a longo prazo. Na área elétrica, o Tântalo que é um elemento químico metálico, tem ganhado um espaço muito importante na área tecnológica, especialmente na engenharia, pois, com o avanço da eletrônica, seu uso se tornou mais freqüente em capacitores, lentes de câmeras e em lugares que recebem elevadas temperaturas, além de aplicações cirúrgicas nos seres humanos.

A aplicabilidade na forma de ligas também vem crescendo, o que traz o interesse no estudo de suas características, propriedades e aplicações.

2. HISTÓRIA DO ELEMENTO

O Tântalo (do grego "Tantalus" pai de "Niobe" na mitologia grega) foi descoberto em 1802 por Anders G. Ekeberg em minerais provenientes da Suécia (Ytterby) e da Finlândia (Kimito) e isolado em 1820 por Jons Berzelius. Até 1844 muitos químicos acreditavam que o Nióbio e o Tântalo eram o mesmo elemento. Os pesquisadores Rowe (1944) e Jean Charles Galissard de Marignac (1866) demonstraram que os ácidos Nióbico e Tantálico eram compostos diferentes. Posteriormente os investigadores puderam isolar somente o metal impuro, e o primeiro metal dúctil relativamente puro foi produzido por Werner von Bolton em 1903.

Em 1922, um engenheiro de uma usina de Chicago (Estados Unidos) conseguiu obter industrialmente o tântalo com 99,9% de pureza. Os filamentos feitos com o metal tântalo eram usados em lâmpadas incandescentes até serem substituídos pelo tungstênio.

Seu nome é derivado do caráter de Tântalo que, por desagradar aos deuses, foi condenado a ficar eternamente com fome e sede mergulhado de joelhos com água até o pescoço, sob uma árvore carregada de frutos. Quando se dobrava para beber, a água drenava e, quando levantava as mãos para apanhar frutos, os galhos se moviam para fora do seu alcance. Esta é a similaridade com o comportamento não reativo do tântalo – estar entre reagentes e não ser afetado por eles – foi a origem do seu nome.

3. OCORRÊNCIA

O minério de Tântalo é encontrado principalmente na Austrália, Canadá, Brasil e África Central, com quantidades significativas na Ásia e na China. Existe o interesse pela exploração desse elemento em várias regiões do mundo, como Egito e Arábia Saudita.

O minério de Tântalo possui mais de 70 diferentes compostos químicos identificados. Destes, os de maior importância econômica são a Tantalita*, Microlita e Wodginita. Entretanto, é comum chamar qualquer mineral contendo Tântalo, de 'Tantalita'. Os minerais são concentrados por métodos físicos na própria área de mineração, para aumentar a porcentagem de óxido de Tântalo, e óxido de Nióbio.

As duas maiores fontes de minério de Tântalo ficam no Oeste da Austrália, e são responsáveis por mais de 50% da demanda global, produzindo em torno de 900 toneladas de Ta_2O_5 por ano. No Brasil, o minério é extraído na mina de Pitinga à 350km de Manaus, no rio Paranapanema. E pela mineradora Mibra, localizada em São João Del Rei – MG.

3.1 REFINO

Para separar o Tântalo do Nióbio demanda várias e complexas etapas. Comercialmente o metal pode ser obtido por eletrólise do fluortantalato de potássio fundido, redução do fluortantalato de potássio com sódio ou reação do carboneto de tântalo com o óxido de Tântalo.

4. CARACTERÍSTICAS

O Tântalo é um elemento químico, de símbolo Ta, pertencente ao grupo Vb da tabela periódica. Metal cinzento, muito duro e pesado, está entre os cinco elementos de mais alto ponto de ebulição. Apenas o tungstênio e o rênio têm ponto de fusão mais alto que o do tântalo. Tem excelente resistência à corrosão em temperaturas abaixo de 150°C. É atacado somente pelo ácido fluorídrico, por soluções ácidas contendo o íon fluoreto e por trióxido de enxofre.

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

TABELA 1 – Dados gerais do Tântalo.

Nome: Tântalo	Símbolo: Ta
Número Atômico : 73	Massa atômica: 180.94788g/mol
Estado padrão: Sólido à 298K	Número de Registro (CAS): 7440-25-7
Grupo: Metais de Transição (5)	Período na tabela periódica: 6
Bloco da tabela periódica: D	Cor: Cinza-Azulado
Densidade a 20 °C (293K): 16.6 g/cm ³	Volume atômico: 10.90 cm ³ /mol

4.2 ISOLAÇÃO

A isolação do Tântalo parece ser complicada. O minério de Tântalo geralmente contém ambos Nióbio e Tântalo e por serem quimicamente similares, é mais difícil separá-los. Tântalo pode ser extraído diretamente de rochas através da mistura de um material alcalino com o minério, e então misturado em ácido fluorídrico (HF).

O Nióbio permanece na solução de HF, e o sal de Tântalo pode ser removido usando uma técnica de extração líquido-líquido. Depois da conversão para óxido, o Tântalo metálico é obtido pela método de oxi-redução utilizando sódio ou carbono. A eletrólise de fluoreto fundido também pode ser utilizada.

4.3 ISÓTOPOS

O tântalo possui somente dois isótopos e um deles, o Ta-180, possui uma das menores abundâncias dentre todos os isótopos que ocorrem naturalmente (0.012%). O Ta-180 é produzido em quantidades diminutas e é seu preço bastante elevado. Já o Ta-181 pode ser usado para a produção do W-178, que decai para o Ta-178. Este,

emite raios gama de baixa energia, que podem ser utilizados para gerações de imagens.

Tabela com os principais radioisótopos do Tântalo:

TABELA 2 – Principais radioisótopos do Tântalo.

Símbolo	% Natural	Massa	Meia-vida	Decaimento
^{177}Ta	0	176,9445	2,356 d	CE p/ ^{177}Hf
^{178}Ta	0	177,9458	9,29 m	CE p/ ^{178}Hf
^{179}Ta	0	178,9459	1,8 a	CE p/ ^{179}Hf
^{180}Ta	0	179,9475	8,15 h	CE p/ ^{180}Hf β - p/ ^{180}W
^{180}Ta	0,012	179,9475	$> 1,2 \cdot 10^{15}$ a	CE p/ ^{180}Hf β - p/ ^{180}W
^{181}Ta	99,988	180,9480	Estável	-
^{182}Ta	0	181,9502	114,43 d	β - p/ ^{182}W
^{183}Ta	0	182,9514	5,1 d	β - p/ ^{183}W

A coluna % natural indica o teor encontrado no elemento natural. Valor nulo indica produção artificial. Símbolos para tempos de meia-vida: s (segundo), m (minuto), h (hora), d (dia), a (ano). A tabela acima contém os principais isótopos do elemento. Não são necessariamente todos.

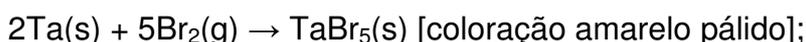
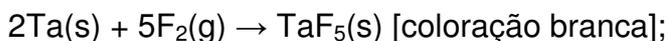
4.4 REAÇÕES

4.4.1 REAÇÃO DO TÂNTALO COM O AR E ÁGUA

Não reage com o ar e nem água sob condições normais. A superfície do tântalo metálico é protegida por uma fina camada de óxido que impede o contato direto e uma possível reação.

4.4.2 REAÇÃO DO TÂNTALO COM ELEMENTOS HALOGÊNIOS

Em condições normais não reage com nenhum elemento halógeno, mas se for aquecido a temperaturas elevadas, irá reagir com flúor, cloro, bromo, iodo:



4.4.3 REAÇÃO DO TÂNTALO COM ÁCIDOS

Não é atacado pela maioria dos ácidos à temperatura ambiente, mas é dissolvido pelo ácido fluorídrico, HF.

4.4.4 REAÇÃO DO TÂNTALO COM BASES

É atacado por bases fundidas.

4.5 TEMPERATURA

O Tântalo possui um elevado ponto de fusão e de ebulição. Aproxima-se muito do Tungstênio. Seu ponto de fusão é de 3290K ou 3017°C e seu ponto de ebulição fica em 5731K ou 5458°C. Atinge supercondutividade à temperatura de 4.47K ou -268.68°C. Possui condutividade térmica de aproximadamente 57.5 Wm⁻¹K⁻¹ à (300K). E um coeficiente de expansão linear térmica de (25°C) 6.3 μm·m⁻¹·K⁻¹. Possui também um calor latente de fusão de 36.57 kJ·mol⁻¹ e um calor de vaporização de 732.8 kJ·mol⁻¹.

4.6 CRISTALOGRAFIA

Possui uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, sendo que apresenta os seguintes parâmetros celulares:

$$a = b = c = 330.13 \text{ pm}$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90.000^\circ$$

A columbita-tantalita (Fe Mn)(Nb Ta)₂O₆ é o minério do qual se extrai o tântalo. Ela possui uma estrutura cristalográfica um pouco diferente. Possui o formato

Ortorrômico da classe Bi piramidal. A columbita tem a propriedade ótica de ser biaxial negativa e a tantalita é biaxial positiva.

4.7 DUREZA

O tântalo é um metal de dureza elevada. Criou-se recentemente um material sintético, feito à base de Tântalo que possuía a dureza próxima ao do diamante. A seguir estão alguns módulos de dureza do material.

- Módulo de Young – 186 GPa
- Módulo de Shear – 69 GPa
- Módulo de Bulk – 200 GPa
- Coeficiente de Poisson – 0.34
- Dureza de Moh – 6.5
- Dureza de Vickers – 873 MPa
- Dureza de Brinell – 800 MPa

5. APLICAÇÕES

O principal uso do tântalo é como óxido, um material dielétrico, para a produção de componentes eletrônicos, principalmente capacitores, que são muito pequenos em relação a sua capacidade. Por causa desta vantagem do tamanho e do peso os principais usos para os capacitores de tântalo incluem telefones celulares, pagers, computadores pessoais, e eletrônicos automotivos.

O tântalo também é usado para produzir uma série de ligas que possuem altos pontos de fusão, alta resistência e boa ductilidade. O tântalo de carbono , um tipo de carbetto muito duro, é usado para produzir ferramentas de cortes, furadeiras e máquinas trefiladoras. O tântalo em superligas é usado para produzir componentes de motores de jatos, equipamentos para processos químicos, peças de mísseis e reatores nucleares. Filamentos de tântalo são usados para a evaporação de outros metais como o alumínio.

Por ser não-irritante e totalmente imune à ação dos fluidos corporais, é usado extensivamente para produzir equipamentos e implantes cirúrgicos em medicina e odontologia. O óxido de tântalo é usado para elevar o índice de refração de vidros

especiais para lentes de câmera. O metal também é usado para produzir peças eletrolíticas de fornalhas de vácuo.

Na engenharia elétrica utiliza-se muito o tântalo no fabrico de capacitores, pois, é compacto, de uso em baixas tensões, podendo atingir até centenas de μF . A sua densidade de energia é muito maior que nos capacitores eletrolíticos de alumínio. Assim como os capacitores eletrolíticos, os capacitores de tântalo possuem polaridade, sendo assim sempre terão um eletrodo anódico, e outro eletrodo catódico.

O cátodo é formado por grãos de tântalo sintetizados, com um dielétrico eletroquimicamente formado por uma fina camada de óxido. A fina camada de óxido e uma grande área de material sintético poroso resultam em uma altíssima capacitância por volume unitário.

O ânodo é formado por um líquido eletrolítico conectado ao invólucro, ou então por uma camada semicondutora quimicamente depositada de dióxido de manganês, a qual é conectada a um fio externo. Atualmente esta camada de dióxido de manganês, está sendo substituída por um polímero plástico condutor, que reduz a resistência interna e evita falhas internas.

Quando comparado ao capacitor eletrolítico de alumínio, os capacitores de tântalo possuem uma capacitância muito mais estável. Pequena corrente de fuga, e uma impedância (X_c) muito baixa em altas frequências. No entanto, ao contrário dos capacitores de alumínio, eles são intolerantes à picos de tensão e acabam sendo destruídos (geralmente explodindo violentamente).

Os capacitores de tântalo* são mais caros que os capacitores à base de alumínio, e geralmente só usados em baixas tensões, mas por causa de sua alta capacitância por unidade de volume e baixa impedância a altas frequências, são muito utilizados em aplicações em miniatura tais como telefones celulares, mp3 players, etc.

TABELA 3 - Principais aplicações do Tântalo.

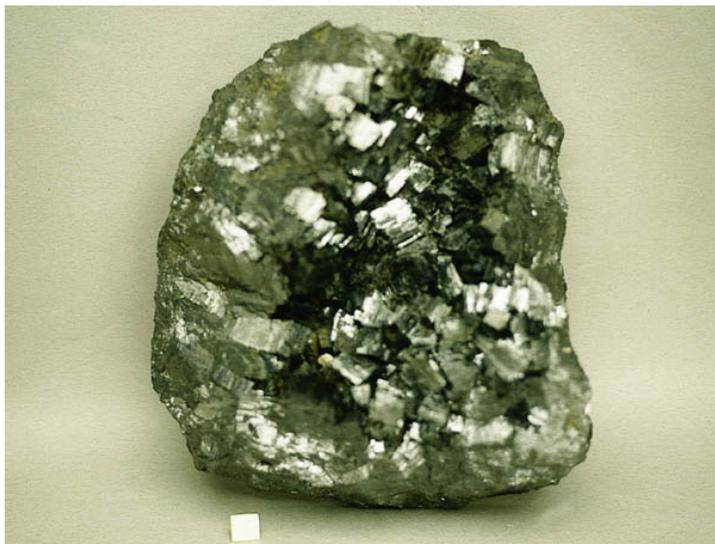
Produtos do Tântalo	Aplicação	Benefícios
Carbeto de Tântalo	Ferramentas de Corte	Aumenta a temperatura de deformação e controla o crescimento de grão.
Óxido de Tântalo	Lentes de Câmera, Filmes de Raios-X e Impressoras Jato de Tinta.	Aumento do índice de refração de lentes; Melhora a qualidade de filmes de Raios-X; Uso em capacitores e Circuitos Integrados
Pó de Tântalo	Marcapassos, Capacitores, Sistemas de Airbags e ABS automotivos, GPS, Celulares, Câmeras fotográficas DSC, Laptops.	Confiabilidade maior dos equipamentos eletrônicos, operação em uma gama maior de temperaturas, suporte a altas vibrações.
Lâmina/ folha de Tântalo	Equip. de processos químicos, cliques de sutura, pinos para ossos humanos, fornos de alta temperatura, protetor catódico para estruturas como pontes e tanques de água.	Imune aos fluidos corpóreos, resistência à corrosão de superfícies comparável ao vidro, elevado ponto de fusão.

6. CONCLUSÃO

O metal tântalo possui diversas e importantes aplicações que vão desde a área médica passando pela área aeronáutica e atingindo a área eletrônica. Apesar

de ser um elemento um tanto raro na superfície terrestre, adquiriu inúmeras aplicações por suas propriedades singulares como o elevado ponto de fusão e baixa reatividade com fluídos orgânicos.

7. ANEXOS



Tantalite Photo from MII, courtesy of the Smithsonian Institution

FIGURA 1 – Minério Tantalita.



FIGURA 2 – Óxido de Tântalo.

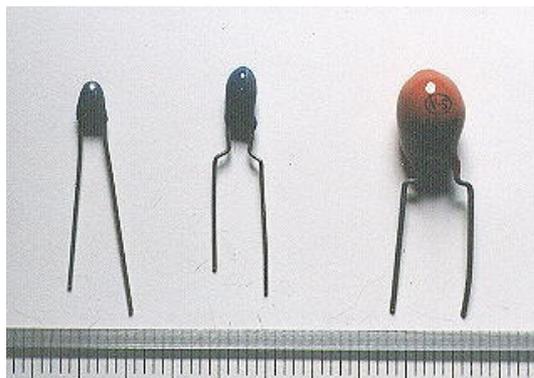


FIGURA 3 - Capacitores de Tântalo.



FIGURA 4 - Capacitor de Tântalo.



FIGURA 5 – Capacitor de Tântalo.

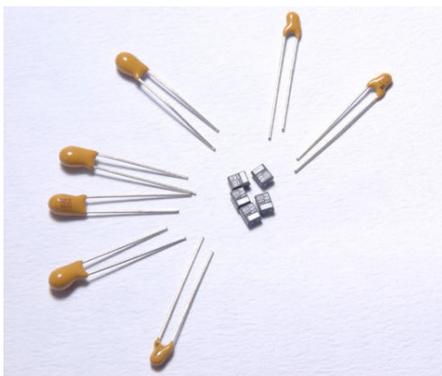


FIGURA 6 – Capacitores de Tântalo.



FIGURA 7 – Minério de Tantalita Refinado.



FIGURA 8 – Pó de Tântalo.

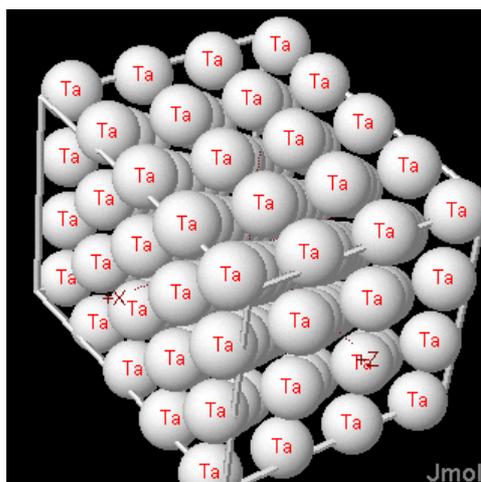


FIGURA 9 – Estrutura atômica do Tântalo.

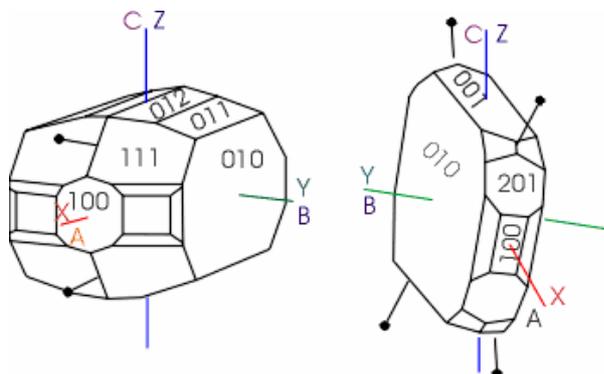


FIGURA 10 – Direções cristalográficas e óticas da columbita e tantalita respectivamente.

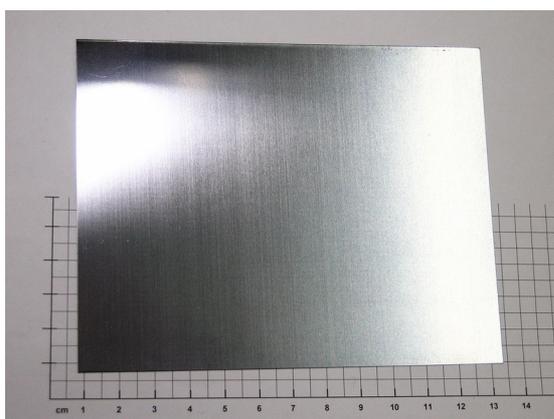


FIGURA 11 – Tântalo na forma de folha.



FIGURA 12 – Tântalo em alta pureza. (99.98%).



FIGURA 13 – Tântalo na forma de fios.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Tântalo (elemento químico) – Disponível em:

<[http://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%A2ntalo_\(elemento_qu%C3%ADmico\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%A2ntalo_(elemento_qu%C3%ADmico))>

Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tântalo – Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1_073.shtml> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tântalo – Disponível em:

<http://www.tabela.oxygenio.com/metais_de_transicao/elemento_quimico_tantalo.htm>

Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum the Essentials – Disponível em: <<http://www.webelements.com/tantalum/>> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum - Raw Materials and Processing - Disponível em:
<<http://www.tanb.org/tantalum1.html>> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Element Tantalum – Ta - Disponível em:
<<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Ta.html>> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum – Disponível em: <<http://periodic.lanl.gov/elements/73.html>> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum Element Facts – Disponível em:
<<http://www.chemcool.com/elements/tantalum.html>> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum Capacitors – Disponível em:
<http://www.rohm.com/products/passive/ta_capacitor/> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum – Disponível em: <<http://www.periodni.com/en/ta.html>> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum properties – Disponível em:
<<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1715>> Acesso em Abril e Maio de 2009.

Tantalum capacitors – Disponível em:
<<http://www.sem.samsung.com/cms/ifweb/en/products/productOverview.jsp?tmp02=app&pcode=A030&pname=Tantalum%20Capacitor&loca=z&navi=overview>> Acesso em Maio de 2009.

Periodic Table Explorer – Programa – Disponível em:
<<http://baixaki.ig.com.br/download/Periodic-Table-Explorer.htm>> Acesso em Maio de 2009.

FOTODIODOS E FOTOTRANSISTORES

Luiz Gustavo Lazzarin

1. INTRODUÇÃO

Esse trabalho tem por objetivo mostrar de uma maneira descomplicada o funcionamento e a constituição física dos fotodiodos e fototransistores, tais como suas utilidades no campo da engenharia elétrica. As fontes de energia luminosa possuem características não encontradas em outras fontes de energia. Esta energia, transmitida na forma de fótons, é diretamente relacionada com a frequência da onda de luz emitida. A optoeletrônica é uma tecnologia que associa a óptica com a eletrônica, baseados na reação da junção pn dos semicondutores. Vamos começar pelo fotodiodo, que possui apenas uma junção pn e em seguida progrediremos para o fototransistor.

2. FOTODIODO

O fotodiodo é um tipo de fotodetector, capaz de converter luz em corrente ou tensão, dependendo do seu modo de operação. Fotodiodos são similares a diodos semicondutores normais, exceto que pode ser exposto (para detectar raios ultravioleta ou raios-X) ou constituído com uma janela ou conexão de fibra ótica para permitir a entrada de luz a uma parte sensível do componente.

A maioria dos fotodiodos é semelhante a um diodo emissor de luz. Ele terá dois fios começando da base, sendo o mais curto o cátodo e o mais longo o ânodo. A corrente irá passar do ânodo para o cátodo, basicamente seguindo a seta como mostrado no esquema abaixo.

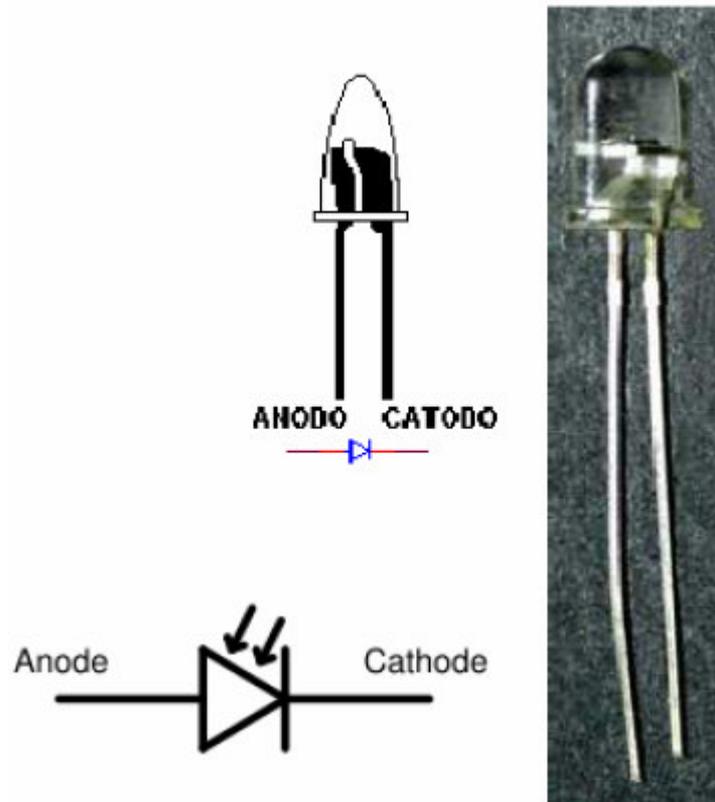


FIGURA 1 - Simbologia e representação do fotodiodo

O fotodiodo é um diodo de junção construído de forma especial, de modo a possibilitar a utilização da luz como fator determinante no controle da corrente elétrica. É um dispositivo de junção PN semicondutor cuja região de operação é limitada pela região de polarização reversa e caracteriza-se por ser sensível à luz. A aplicação de luz à junção resultará em uma transferência de energia das ondas luminosas incidentes (na forma de fótons) para a estrutura atômica, resultando em um aumento do número de portadores minoritários e um aumento do nível da corrente reversa.

Quando um fóton de energia suficiente incide no diodo, excita um elétron que irá criar um elétron móvel e uma cavidade positiva. Se a absorção ocorrer na junção da região de depleção, esses transportadores irão pular da junção para a região de depleção. Estes buracos moverão em direção ao anodo, e os elétrons em direção ao cátodo e uma fotocorrente será produzida. A corrente negra é a corrente que existirá sem nenhuma iluminação aplicada. A corrente retornará a zero somente

se for aplicada uma polarização positiva igual a V_o . Em resumo, podemos dizer então que um fotodiodo é um dispositivo que converte a luz recebida em uma determinada quantidade de corrente elétrica.

A corrente reversa e o fluxo luminoso variam quase que linearmente, ou seja, um aumento na intensidade luminosa resultará em um aumento semelhante na corrente reversa. Podemos admitir que a corrente reversa é essencialmente nula na ausência de luz incidente. Como os tempos de subida e de queda (parâmetros de mudança de estado) são da ordem de nano segundos, o dispositivo pode ser usado na aplicação de contagem ou comutação de alta velocidade.

O germânio é mais adequado para luz incidente na região infravermelha, já que abrange um espectro mais amplo de comprimentos de onda do que o silício, apesar de sua corrente negra ser maior. O nível de corrente gerada pela luz incidente sobre um fotodiodo não é suficiente para que ele possa ser usado em um controle direto, sendo necessário para isto que haja um estágio de amplificação.

2.1 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

Existem duas maneiras de operar um fotodiodo. Ele pode funcionar como uma célula fotovoltaica (a incidência de luz gera tensão) ou como uma célula fotocondutiva (a incidência de luz gera corrente). A figura 2 mostra o gráfico das características dos fotodiodos.

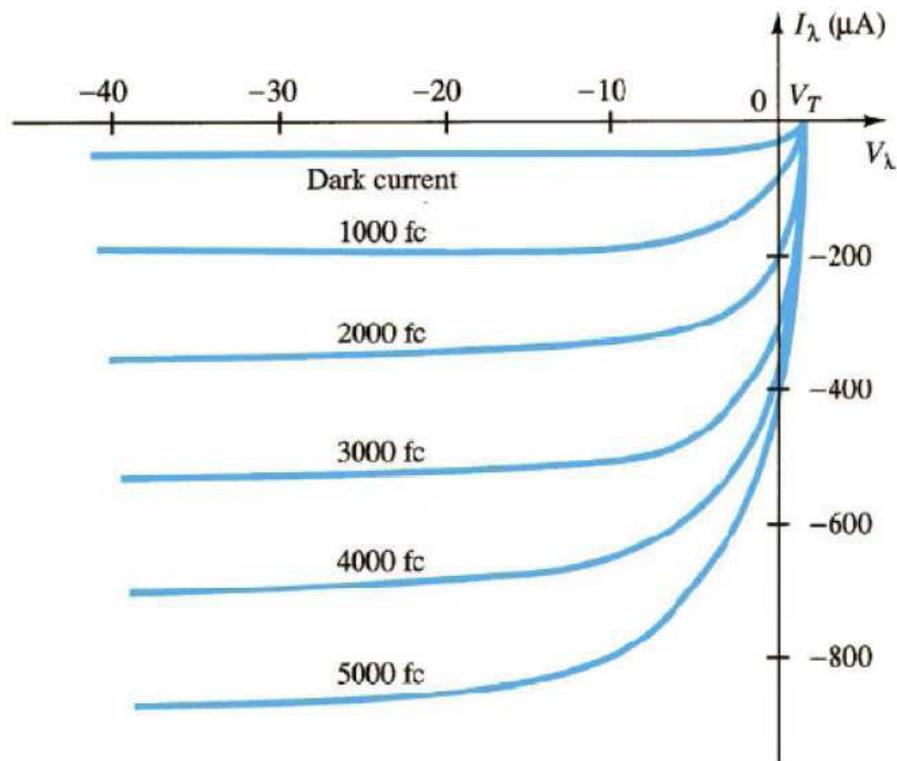


FIGURA 2 - Curvas características dos fotodiodos.

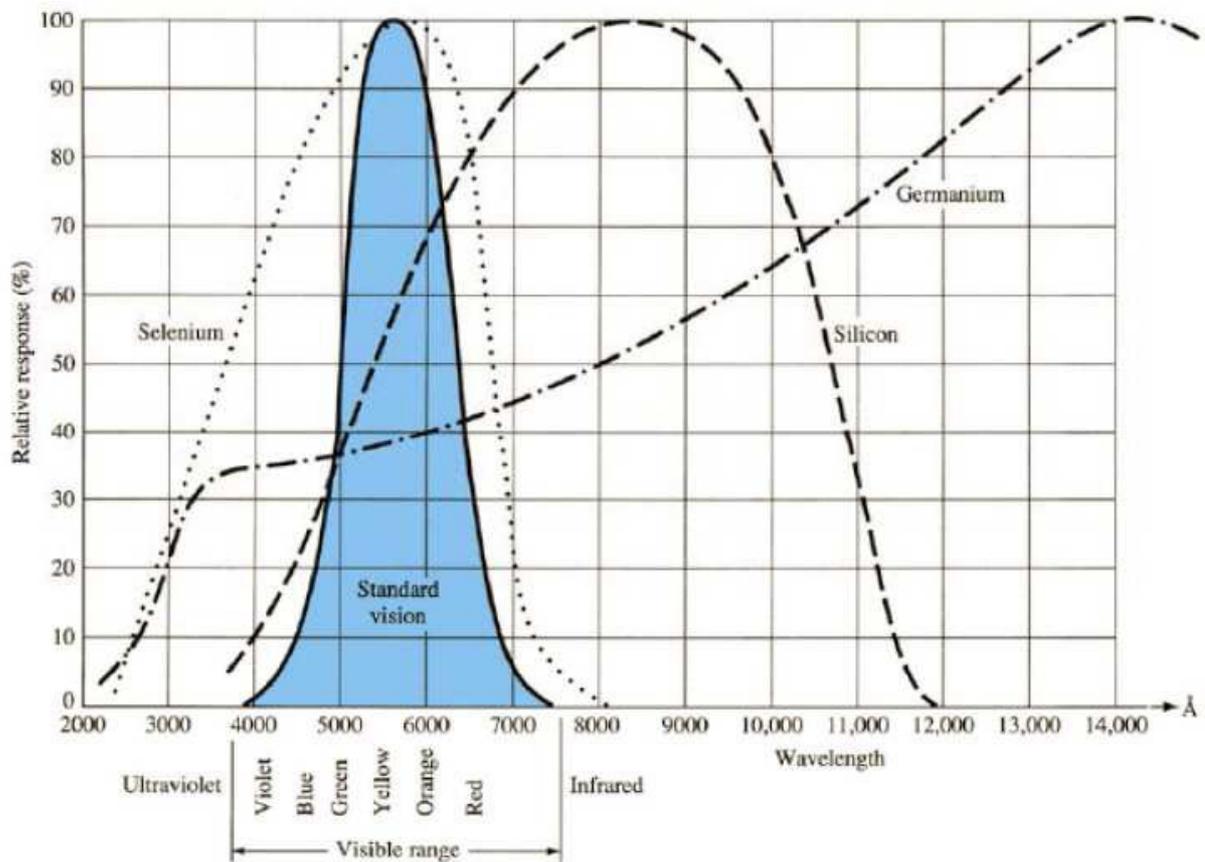


FIGURA 3 - Resposta espectral de fotodiodos

2.2 MODO FOTOVOLTAICO

Quando usado com polarização zero ou em modo fotovoltaico, o fluxo de fotocorrente fora do dispositivo é restrito e a tensão aumenta. O diodo então se polariza e a "corrente negra" começa a fluir através da junção em direção oposta ao da foto corrente. Este modo é responsável pelo efeito fotovoltaico que é base das células solares, de fato a célula solar é somente um largo arranjo de fotodiodos.

2.3 MODO FOTOCONDUTIVO

No modo de fotocondutividade o diodo é muitas vezes (mas não sempre) polarizado reversamente. Isto aumenta a largura da camada de depleção, diminuindo a junção de capacitância resultando em respostas mais rápidas. A polarização reversa induz somente uma pequena quantidade de corrente (conhecida como corrente de saturação ou corrente negra) ao longo dessa direção enquanto a fotocorrente remanescente continua virtualmente a mesma. Embora este modo seja rápido, o modo fotovoltaico tende a exibir menos ruído eletrônico.

2.3 OUTROS MODOS DE OPERAÇÃO

2.3.1 FOTODIODOS DE AVALANCHE

Fotodiodos de avalanche têm uma estrutura similar aos fotodiodos regulares, mas operam com polarização reversa muito maior. Isto permite que cada portador foto-gerado seja multiplicado por esgotamento em avalanche, resultando em um ganho interno como o fotodiodo, isso aumenta a resposta efetiva do dispositivo.

2.3.2 FOTOTRANSÍSTORES

Os fototransistores também consistem em um fotodiodo com ganho interno. Um fototransistor não é essencialmente nada mais do que um transistor bipolar que seja encapsulado em uma carcaça transparente de modo que a luz possa alcançar a junção base-coletor. Os elétrons que são gerados por fótons na junção da base-coletor são injetados na base, e sua corrente é amplificada pela operação do transistor. Note que quando os fototransistores tiverem um ganho mais elevado para

a luz eles não serão hábeis em detectar os níveis mais baixos de luz como os fotodiodos. Os fototransistores têm também tempo de resposta mais lento.

3. FOTOTRANSISTOR

O fototransistor é mais um dispositivo que funciona baseado no fenômeno da fotocondutividade. Ele pode, ao mesmo tempo, detectar a incidência de luz e fornecer um ganho dentro de um único componente. Como o transistor convencional, o fototransistor é uma combinação de dois diodos de junção, porém, associado ao efeito transistor aparece o efeito fotoelétrico. Em geral, possui apenas dois terminais acessíveis, o coletor e o emissor, sendo a base incluída apenas para eventual polarização ou controle elétrico.

Como nas outras células fotocondutivas, a incidência de luz (fótons) provoca o surgimento de lacunas na vizinhança da junção base-coletor. Esta tensão conduzirá as lacunas para o emissor, enquanto os elétrons passam do emissor para a base. Isso provocará um aumento da corrente de base, o que por consequência implicará numa variação da corrente de coletor beta vezes maior (lembrando que, para I_b sendo a corrente da base e I_c a do coletor, temos a relação $I_c = \beta \cdot I_b$, onde β é o ganho do transistor (fornecido pelo fabricante), sendo essa variação proporcional à intensidade da luz incidente. Como a base está normalmente desconectada, a corrente que circula por ela dependerá apenas do fluxo luminoso incidente. Assim, na ausência de luz, a corrente de base será zero e o fototransistor estará cortado, resultando na tensão do coletor igual à tensão de polarização V_{cc} . Quando há luz incidindo, a tensão no coletor irá diminuir devido ao aumento da corrente.

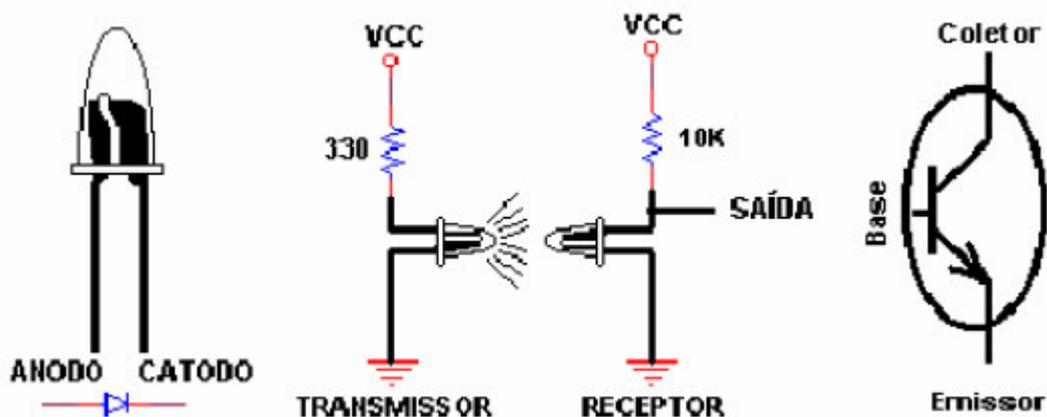


FIGURA 4 - Compensação da corrente I_{ceo} .

O fototransistor possui diversas aplicações, sendo mais encontrado em aplicações on-off, onde a não linearidade do transistor não é um problema. A aplicação mais usual é a de um interruptor. Enquanto não há luz incidindo no fototransistor, não haverá uma corrente no emissor, e a tensão de saída será zero, estando ele em corte. Com a incidência de luz, teremos uma corrente no emissor, provocando uma tensão igual a $I_e \cdot R_e$. Tais como os transistores bipolares, os fototransistores estão sujeitos à variações de temperatura. Com o aumento da temperatura em torno de 8 a 10 graus Celsius, a corrente I_{ceo} (corrente que circula no componente enquanto não existe incidência de luz) dobrará.

Para elevadas temperaturas, essa corrente terá um valor significativo em relação à corrente total. Entretanto, utilizando dois fototransistores, podemos compensar esse erro. Para isso, basta uni-los como na figura 4, fazendo com que essa corrente I_{ceo} em ambos possua os mesmos valores, cancelando uma à outra. Assim, a corrente fornecida pela incidência da luz passará inteiramente pelo resistor R_I .

Os fototransistores são dispositivos sensíveis a luz. A base do fototransistor é sensível a luz, quando há presença da mesma o transistor conduz, entretanto quando não há presença de luminosidade, o transistor fica cortado. Abaixo foi representada uma situação onde a presença de luz (LED) liga ou desliga o circuito acoplado ao receptor (fototransistor). Quando um fecho de luz é apontado para o receptor, este conduz logo a saída estará em nível lógico "0". No entanto, quando não há presença de luz, o receptor não está conduzindo, logo a saída estará em nível lógico "1".

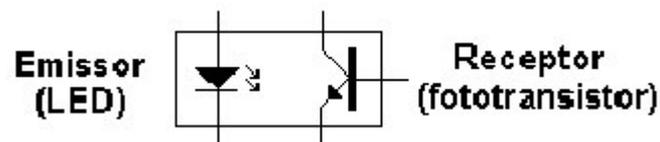


FIGURA 5 - Acoplador Óptico

4. MATERIAS

O material usado para produzir um fotodiodo é difícil de definir por suas propriedades, porque somente fótons com energia suficiente para excitar elétrons através do gap de banda do material irá produzir fotocorrentes significativas. Materiais comumente utilizados para produzir fotodiodos incluem:

TABELA 1 – Materiais utilizados em fotodiodos

Material	Escala do comprimento de onda (nm)
Silício (Si)	190–1100
Germânio (Ge)	400–1700
Arsenieto de índio e gálio (InGaAs)	800–2600
Sulfeto de chumbo (PbS)	<1000-3500

Por causa de sua grande banda de passagem os fotodiodos baseados em silício geram menos ruído do que os fotodiodos baseados em germânio, mas os fotodiodos de germânio devem ser usados para comprimentos de onda maiores que aproximadamente 1 μm .

Desde que transistores e CIs são feitos de semicondutores, e contêm junções PN, quase todos os componentes ativos são potencialmente um fotodiodo. Muitos componentes, especialmente aqueles sensíveis as correntes pequenas, não trabalharão corretamente se iluminados, devido as fotocorrentes induzidas. Na maioria dos componentes isto não é desejado, então eles são colocados em uma carcaça opaca. Desde que as carcaças sejam completamente opacas a raios-X ou à outra radiação de energia elevada, estas podem ainda causar a muitos CIs mau funcionamento devido às fotocorrentes induzidas.

5. APLICAÇÕES

O fotodiodo pode ser aplicado no foco automático de filmadora, na unidade ótica do CD Player e em sistema contador de pulso. Outra aplicação muito usada na rede de iluminação pública é o sensor crepuscular. Nos sistemas de iluminação publica é importante saber em que altura é que está suficientemente escuro, para ativar as luzes. Este controle não pode ser efetuado de forma eficaz utilizando

temporizadores, uma vez que em dias de chuva ou nevoeiro intenso pode ser necessário ativar o sistema de iluminação por razões de segurança. Além disso o horário do próprio nascer e pôr do Sol não é constante, muda todos os dias. Pelas razões apontadas, a solução que reúne maior consenso é aquela que utiliza sensores de luz ambiente também conhecidos como crepusculares. O S7183 é um fotodiodo com amplificador orientado para aplicações de detecção crepuscular. Até agora, muitas das soluções passavam pela utilização de foto resistências, células de CdS e fototransistores, contudo a pouca uniformidade, a não linearidade e o fato de que o Cd é um elemento altamente poluidor desviaram a atenção para a utilização de fotodiodos, cujo principal inconveniente era a da aplicação de um amplificador de sinal. Com este novo fotodiodo, com amplificador já incorporado, permite ultrapassar o inconveniente com simplicidade e alta performance em termos de sensibilidade e linearidade, mantendo sempre um preço competitivo.

Um das principais utilidades do fototransistor é o acoplador óptico. Os acopladores ópticos são componentes muito simples, porém de grande importância para a eletrônica. Estes componentes são capazes de isolar com total segurança dois circuitos eletrônicos, mantendo uma comunicação ou controle entre ambos. O isolamento é garantido porque não há contato elétrico, somente um sinal luminoso. O seu funcionamento é simples: há um emissor de luz (geralmente um LED) e um receptor (fototransistor). Quando o LED está aceso, o fototransistor responde entrando em condução. Com o LED apagado o fototransistor entra em corte. Sabendo que podemos alterar a luminosidade do LED, obtemos assim diferentes níveis na saída. Podemos também controlar o fototransistor através de sua base, como se fosse um transistor normal. Os Acopladores Ópticos possuem diversas vantagens sobre outros tipos de acopladores: alta velocidade de comutação, nenhuma parte mecânica, baixo consumo e isolamento total. Na figura 4 vemos o esquema de um opto acoplador.

6. CONCLUSÃO

Com a pesquisa deste trabalho, concluiu-se que para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos para a utilização prática em engenharia elétrica é necessário o conhecimento da ciência de materiais para conseguir reconhecer e criar métodos

através das propriedades dos diferentes materiais semicondutores já conhecidos e a pesquisa de novas e melhores ligas e substâncias que atendam a crescente necessidade de novas tecnologias.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Malvino, Albert Paul. **Eletrônica, Volume 1**

<http://www.cefetsc.rct-sc.br/vnoll/fotoscondutivos.pdf>

Gowar, John. **Optical Communication Systems**, 2ed., Prentice-Hall, Hempstead UK, 1993.

LDR - LIGHT DEPENDENT RESISTOR: RESISTOR VARIÁVEL DE ACORDO COM INCIDÊNCIA DE LUZ

Guilherme Ghellere

1. INTRODUÇÃO

A descoberta e o emprego dos materiais semicondutores na eletrônica possibilitaram significativos avanços tecnológicos, por causa das suas propriedades específicas: controle das propriedades elétricas por dopagem ou aplicação de um campo elétrico, sensibilidade à luz, possibilidade de emitir luz.

Os elétrons ligados a um átomo, só podem existir em alguns valores discretos de energia de ligação com o núcleo. No entanto, em um sólido cristalino, devido ao grande número de átomos envolvidos, teremos vários desses valores discretos espaçados de valores muito pequenos entre si. Isso forma uma banda, ou seja, pode ser entendido como uma faixa contínua de valores que o elétron pode ter. Isso da origem às bandas de condução e de valência, sendo que a banda de condução é onde estão localizados os elétrons responsáveis pela condução de corrente elétrica, e a banda de valência pode ser entendida aqui, como um “reservatório” de elétrons. À distância em energia entre essas duas bandas, damos o nome de GAP.

Nos materiais condutores, a energia do GAP é nula, ou muito baixa, sendo que elétrons possam facilmente passar para a banda de condução e estabelecer uma corrente. Nos materiais isolantes, essa banda é bastante larga, o que dificulta essa passagem e por conseqüência, a corrente.

Nos materiais semicondutores a distância entre essas bandas tem um valor intermediário. Isso os dá a característica de serem, normalmente isolantes, mas sob alguma ação externa, como temperatura, iluminação ou campo elétrico, passam a conduzir. Isso se deve ao fato de o material ter seu nível de Fermi no GAP, entre uma banda de valência, com muitos elétrons disponíveis, e uma banda de condução, com poucos elétrons. Os agentes externos devem proporcionar aos elétrons energia suficiente para passar da banda de valência à banda de condução.

Outro conceito importante a ser explorado é o fato da luz poder ser descrita como pacotes discretos de energia bem determinadas, os quanta de energia, conforme explicado pelo efeito fotoelétrico. Iluminando um componente fotossensível com diferentes comprimentos de onda, determinaremos qual é a energia que separa a banda de condução da banda de valência do material, o GAP.

1.1 SIMBOLOGIA

O LDR possui os seguintes desenhos para ser representado em projetos de circuitos:

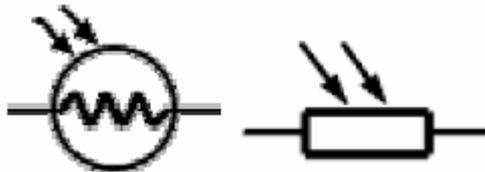


FIGURA 1 – Desenhos que representam o LDR em circuitos

2. FUNCIONAMENTO

2.1 O EFEITO FOTOELÉTRICO

O efeito fotoelétrico é observado, por exemplo, quando uma superfície metálica ou semicondutora é iluminada com luz numa certa faixa de frequências. Neste caso, elétrons ligados aos átomos são promovidos a elétrons livres, capazes de conduzir corrente elétrica. As várias faixas do espectro eletromagnético estão indicados na Figura 2 em escalas de frequência (f) e do comprimento de onda $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz no vácuo, que vale aproximadamente 300.000 km/s.

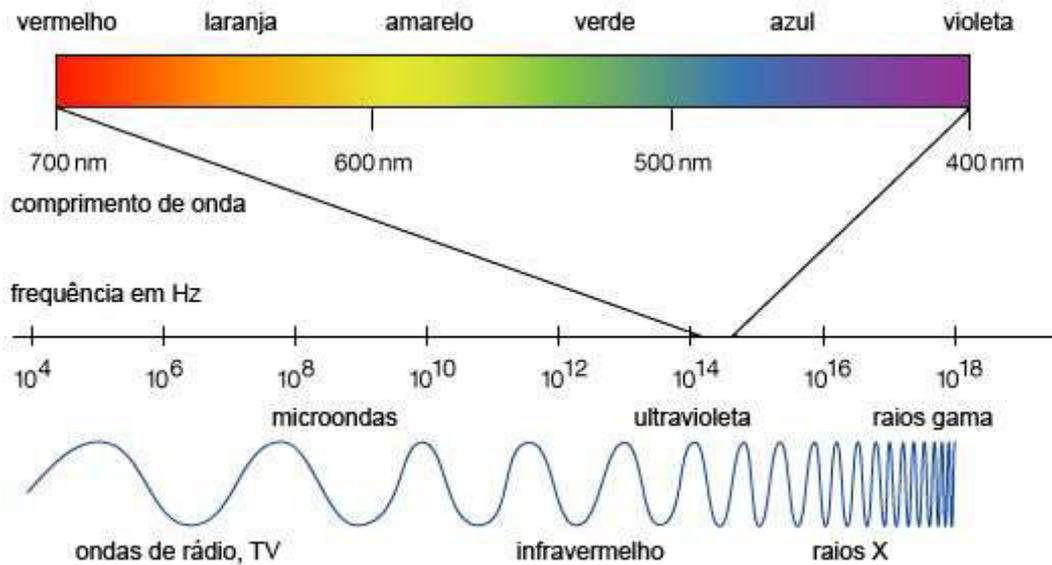


FIGURA 2 – Espectro eletromagnético

Radiação com frequência abaixo de um certo valor mínimo não promove elétrons livre, não importa a intensidade da luz. Essa intensidade corresponde à potência emitida pela fonte luminosa. A luz, além de apresentar um comportamento ondulatório, pode ser pensada como uma forma de energia transmitida por partículas denominadas fótons. A energia E de cada fóton que constitui um feixe de luz é dada pela relação $E = hf$ ou $E = hc/\lambda$, onde h é a constante de Planck, associada aos fenômenos atômicos. Quanto mais intenso for um feixe de luz, maior é o número de fótons nele presente. Quando o feixe incide sobre a superfície, cada elétron preso tem uma certa probabilidade de interagir com um fóton. Se a energia hf do fóton for maior que a energia de ligação do elétron, denominada função trabalho, este pode ser libertado absorvendo toda a energia do fóton incidente. O valor de função trabalho depende do material da superfície. Assim, para cada material, o efeito fotoelétrico ocorrerá apenas a partir de um valor mínimo da frequência f . De nada adiantará aumentar a intensidade do feixe de luz se a frequência do fóton for menor do que este valor mínimo.

2.2 FUNCIONAMENTO DO LDR

A relação (aproximada) entre a resistência e a iluminação pode ser descrita pela seguinte fórmula:

$$R = A \cdot L^{-\alpha}$$

onde que:

R é a resistência, em ohm;

L é a iluminação, em Lux;

A e α constantes.

Essa relação é linear, descrevendo o gráfico abaixo:

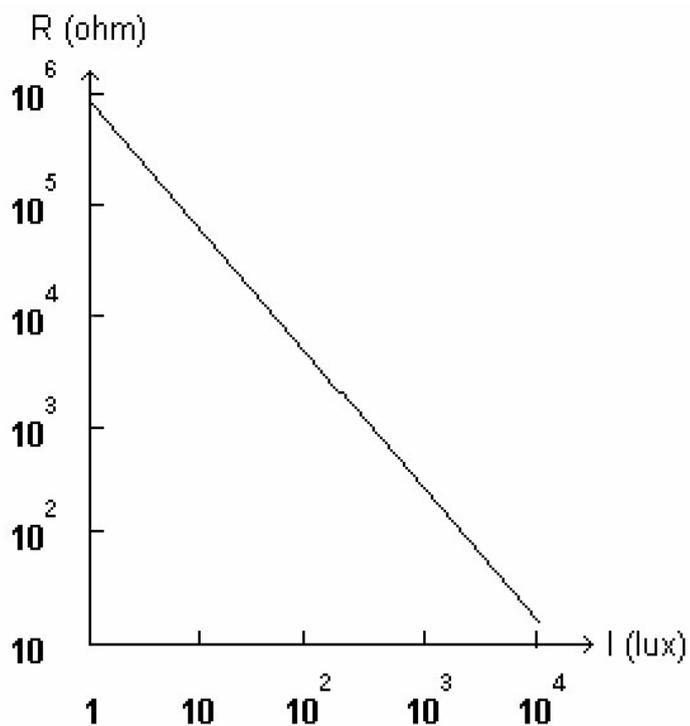


FIGURA 3 – Resistência do LDR em função da iluminação

Na Figura 3 é mostrada a sensibilidade da resistência elétrica (R) de um dispositivo LDR. (resistência dependente da luz) para diferentes valores do comprimento de onda da luz incidente.

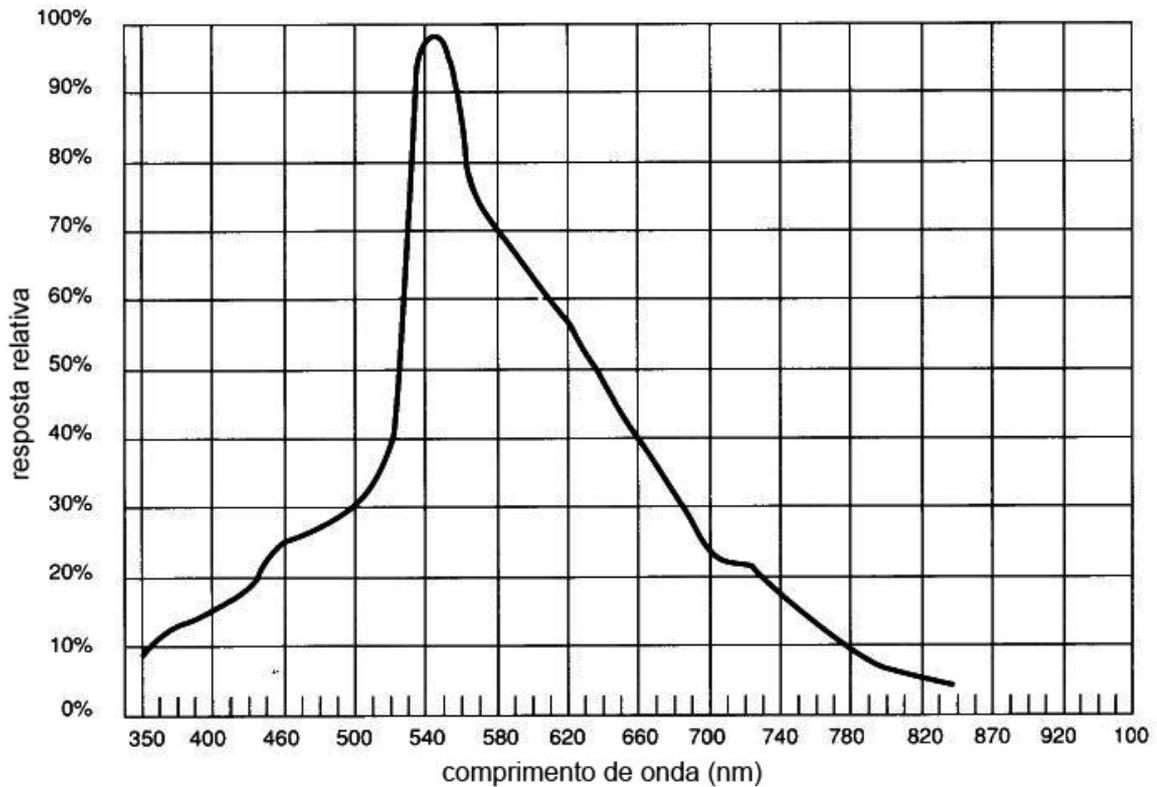


FIGURA 4 – Sensibilidade de um LDR para vários comprimentos de onda da luz incidente

O funcionamento deste dispositivo é baseado no efeito fotoelétrico. Ao ser iluminado, por exemplo quando exposto ao sol, o dispositivo passa a ter uma resistência elétrica menor, uma vez que ele passa a dispor de elétrons livres devido à ação da luz incidente, conforme ilustrado na figura a seguir. A resistência do LDR aumenta enormemente na ausência de luz, por exemplo à noite, uma vez que faltam elétrons livres.

Note que a sensibilidade máxima da resistência do LDR se encontra na faixa da luz visível (400 a 700 nm). Fótons com energia maior que a energia de GAP fazem com que elétrons da banda de valência passem para a banda de condução, aumentando a quantidade de portadores. Macroscopicamente detecta-se uma diminuição na resistência elétrica do componente. Para fótons de energia menor que a do GAP, isso não ocorre, pois os fótons não conseguem fazer com que os elétrons passem para a banda de condução.

Na banda de valência surge uma lacuna em razão da ausência do elétron. Tanto a lacuna quanto o elétron são portadores de carga, e o aumento do fluxo luminoso incidente no LDR aumenta os portadores de carga no semiconductor. Este processo aumenta a condutividade do dispositivo. No caso do LDR, estamos interessados no efeito da luz sobre o semiconductor. Iluminando-o com radiação monocromática, é possível verificar a contribuição que cada comprimento de onda dá para a redução da resistência. Devemos notar uma queda significativa dessa contribuição para comprimentos de onda com energia menor que o GAP. Em outras palavras, devemos verificar que energias menores que o GAP não são capazes de diminuir o valor da resistência. Temos a relação de Plank:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

A partir daí, vamos calcular os comprimentos de onda de “corte” para o CdSe. Lembrando que a seu GAP de energia é igual a 1,7 eV.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,7} = 728,9 \text{ nm}$$

Ou seja, devemos esperar que para comprimentos de onda maiores que esse, a resistência seja grande.

Sendo assim, o LDR é um componente interessante para apresentar conceitos importantes e essenciais da Física moderna, e do Estado Sólido, que são a energia associada aos comprimentos de onda, e também a banda de GAP, que é a distancia em energia da banda de valência para a banda de condução em um semiconductor.

2.3 RESPOSTA DINÂMICA DO LDR

Os fotocondutores são dispositivos com tempo de resposta lento, devido principalmente ao tempo de recombinação dos pares elétron/lacuna. Este tempo é de aproximadamente 100 ms. Os sistemas de controle em projetos devem atuar com sensores rápidos, com tempos de resposta inferiores aos apresentados pelas células fotocondutoras. A baixa linearidade apresentada também pode causar problemas nos dispositivos nos quais são ligados, pois os dados enviados ao

controlador devem ser proporcionais às informações coletadas pelo sensor. Os fotocondutores são elementos descartados como sensores para alguns projetos em específico.

3. COMPOSIÇÃO

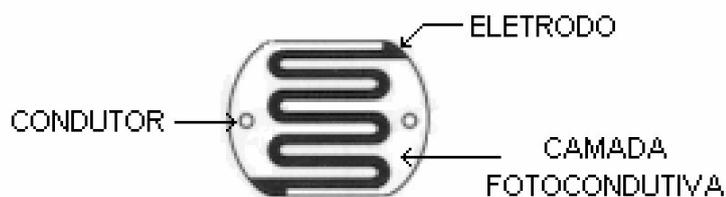


Figura 5 – Superfície fotossensível de um LDR

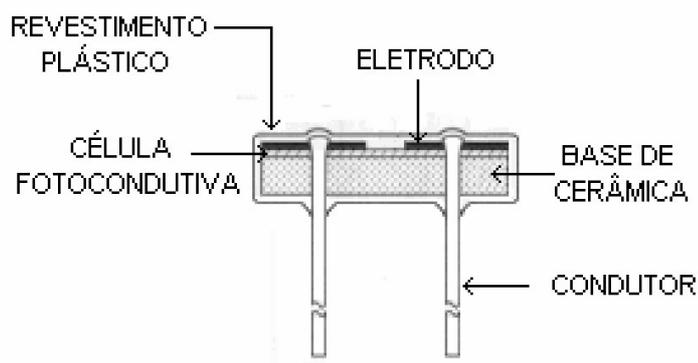


FIGURA 6 – Corte lateral de um LDR



FIGURA 7 – Foto real de um LDR

O material base do LDR é o sulfeto de cádmio (CdS) que é sensível à luz na faixa do espectro visível, mas pode ser construído de diversos materiais diferentes, os quais são mostrados na tabela abaixo:

TABELA 1 – Materiais utilizados para construção do LDR.

Nome do Semicondutor	GAP em eV (300K)
Sulfeto de Cádmio (CdS)	2,4
Fosfeto de Cádmio (CdP)	2,2
Seleneto de Cádmio (CdSe)	1,7
Arseneto de Gálio (GaAs)	1,4
Silício (Si)	1,1
Germanio (Ge)	0,7
Arseneto de Índio (InAs)	0,43
Sulfeto de Chumbo (PbS)	0,37
Telureto de Chumbo (PbTe)	0,29
Seleneto de Chumbo (PbSe)	0,26
Índio Antimonide (InSb)	0,23

O LDR consiste simplesmente do material semicondutor na sua forma pura, protegido por um invólucro transparente a quase todas as cores do espectro visível, de modo que a luz possa ser absorvida por ele. Para outras aplicações (por exemplo na faixa do infravermelho, como no caso do controle remoto de televisão) é necessário utilizar outros materiais (por exemplo o arseneto de gálio).

4. APLICAÇÕES

4.1 DETECTOR DE LUMINOSIDADE

Na figura é mostrado um circuito, baseado num LDR, que acende um LED (Light Emitting Diode) na ausência de luz e apaga o mesmo LED na presença de luz. Para isso utiliza-se um transistor do tipo NPN. Para se entender a funcionalidade do circuito, observe-se o esquema deste ilustrado na figura seguinte. O circuito de base do transistor Q1 é constituído por um divisor resistivo. Quando a tensão VB (VR2) for superior a 0,7 volts o transistor conduz e o LED apaga. Quando a tensão VB for

inferior a 0,7 volt o transistor não conduz e o LED acende. A expressão do divisor resistivo é a seguinte:

$$V_b = \frac{R_2}{(R_2 + R_{LDR})} \cdot V_{(R_2 + R_{LDR})}$$

Na ausência de luz deve garantir-se que $R_{LDR} \gg R_2$, para que a tensão V_{R_2} seja pequena (inferior a 0,7 V). Na presença de luz deve garantir-se que $R_{LDR} \ll R_2$, para que a tensão V_{R_2} seja próxima da tensão de alimentação (superior a 0,7 V). Assim, determina-se a relação entre as resistências R_2 e R_{LDR} .

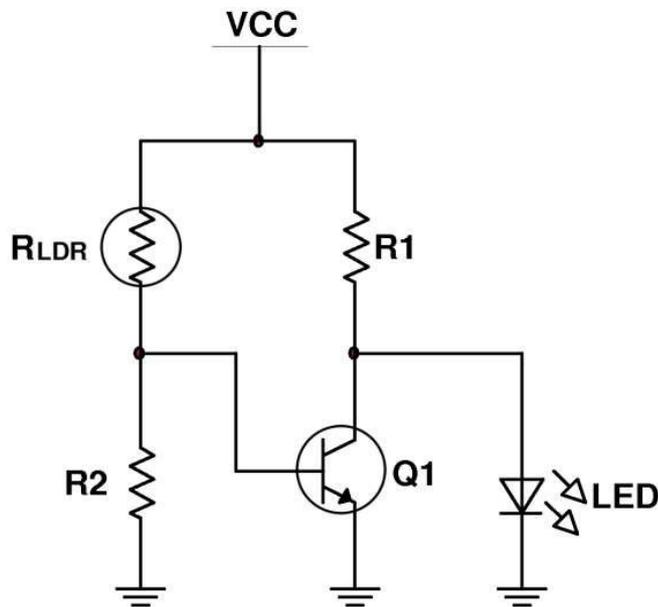


FIGURA 8 – Exemplo de um detector de luminosidade

4.1.1 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Durante o dia a luz solar promove no LDR elétrons ligados a elétrons livres, conforme indicado acima. A resistência elétrica do LDR se torna mais baixa e a corrente elétrica atravessa a bobina, gerando um campo magnético, como se ela fosse um ímã. A chave do relé é então atraída para a posição 2, impedindo que a corrente elétrica passe pelo filamento da lâmpada.

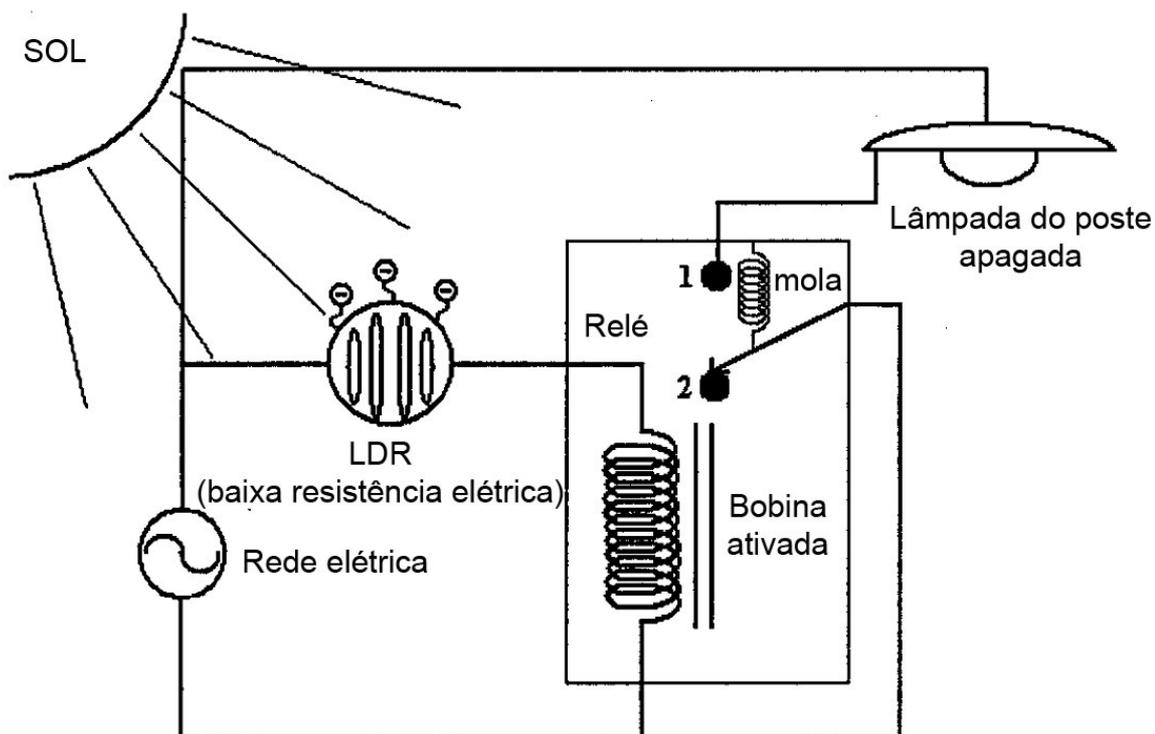


FIGURA 9 – Esquema de como funciona a iluminação pública durante o dia

À noite, a resistência elétrica do LDR é alta pois a luz solar não está presente, impedindo que a corrente elétrica atravesse a bobina, que deixa de atuar como ímã. A mola obriga então a chave do relé a retornar para a posição 1, acionando a lâmpada, que se apagará automaticamente no dia seguinte, uma vez que o circuito volta à situação mostrada na Figura 9.

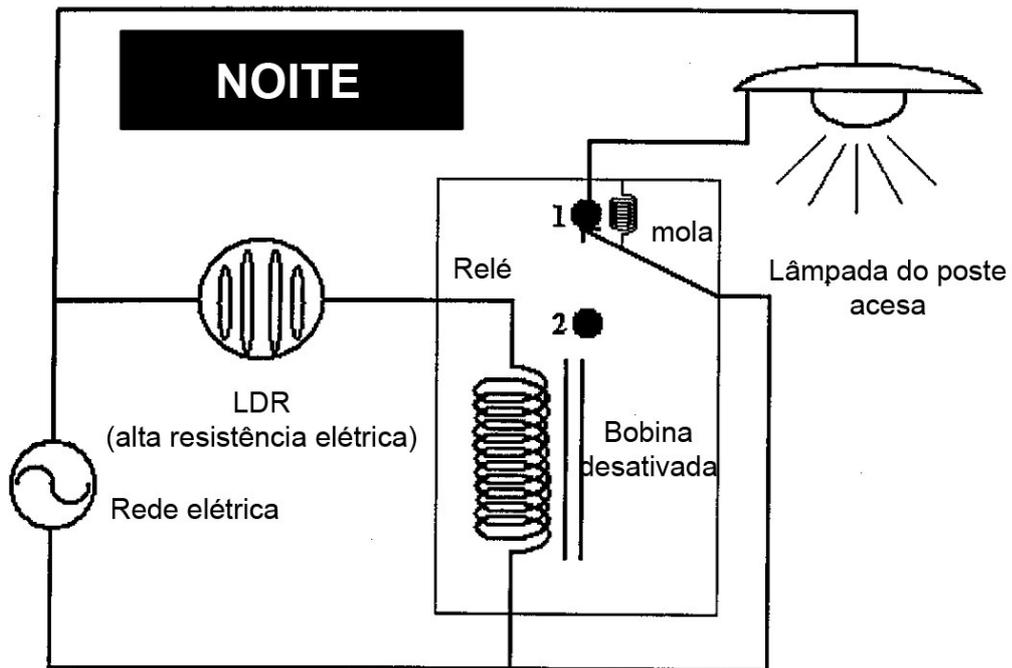


FIGURA 10 – Esquema de como funciona a iluminação pública durante a noite

4.2 ACOPLADOR ÓPTICO

É um sistema que permite a transmissão de sinais elétricos através da luz (visível ou não), entre um circuito de comando e um circuito comandado. Os dois circuitos estão isolados galvanicamente, permitindo a existência de diferenças de tensões extremamente altas entre eles. A figura abaixo mostra um exemplo com um diodo emissor de luz (LED) para radiar a luz modulada em intensidade no circuito de comando e com um LDR no circuito comandado na recepção.

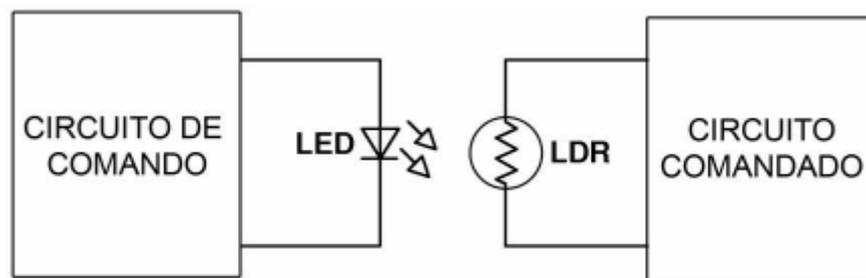


FIGURA 11 – Exemplo de um acoplador óptico

4.3 OUTRAS APLICAÇÕES

Outras aplicações do efeito fotoelétrico: controle automático de portas de elevadores e de esteiras de supermercados. Neste caso um feixe de luz, ao ser interrompido, aciona um sistema automático que abre a porta do elevador ou movimenta a esteira.

5. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado traz em si um conteúdo da Engenharia de Materiais relacionada com a Engenharia Elétrica, o que nos possibilita (futuros engenheiros eletricitistas) entendermos melhor o mundo e a ciência dos materiais, despertando curiosidade e principalmente vontade de aprender exatamente o que acontece nos equipamentos e componentes que utilizamos diariamente sem o menor interesse em saber o seu funcionamento microscópico.

Existem muitos assuntos nos quais os conceitos abordados nesse trabalho se aplicam, destacando o efeito fotoelétrico que faz parte de nossas vidas, e muitas vezes nem ao menos sabemos o que é ou onde encontrá-lo em ação. O conhecimento obtido do assunto durante a realização do trabalho foi de ampla utilidade, principalmente para esclarecimento de dúvidas pendentes em relação ao assunto.

6. REFERÊNCIAS

OLIVEIRA, L. F. L., Estudo da banda de GAP em componentes eletrônicos semicondutores. Disponível em:

http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2003/993963Luis_Tessler_f809_RF09_0.pdf>. Acesso em: 08 jul 2008.

ARDLEY, N., How Things Work, Dorling Kindersley limited, London, 1995.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. e WALKER, J., Fundamentos de Física, vol. 4 (Ótica e Física Moderna), LTC Editora, 4ª. Edição, 1995

VALADARES, E. C., MOREIRA, A. M., Ensinando física moderna no segundo grau: Efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. Disponível em: <
<http://fsc.ufsc.br/ccef/port/15-2/artpdf/a2.pdf> >. Acesso em: 08 jul 2008.

TIPLER, P., Física, vol.4, Editora Guanabara Koogan S.A., 3ª. Edição, 1994.

TELEVISORES E MONITORES

Diego Fernando Borges

1. INTRODUÇÃO

A idéia de trabalhar com imagens está ligada a história da civilização. Já nos tempos primitivos, o homem deixava suas impressões em forma de desenhos para que gerações posteriores pudessem aprender ou os reverenciar. Ainda hoje, é através deles que conseguimos criar teorias sobre como era a vida naquela época. A história da televisão deve-se a grandes matemáticos e físicos, pertencentes às ciências exatas que entregaram para as ciências humanas um grande e poderoso veículo. Dos primitivos televisores de raios catódicos (CRT) aos televisores de plasma e Oled. A área dos televisores e monitores sofreu e vem sofrendo um grande desenvolvimento tecnológico e suas aplicações estão cada vez mais ilimitados.

2. HISTÓRICO

Televisão do grego tele - distante e visione - visão é um sistema eletrônico de recepção de imagens e som de forma instantânea. Funciona a partir da análise e conversão da luz e do som em ondas eletromagnéticas e de sua reconversão em um aparelho. O televisor ou aparelho de televisão, capta as ondas eletromagnéticas através de seus componentes internos e as converte em imagem e som. O primeiro sistema semi-mecânico de televisão analógica foi demonstrado em Fevereiro de 1924 em Londres, e, posteriormente, imagens em movimento em 30 de outubro de 1925. Um sistema eletrônico completo foi demonstrado por John Logie Baird, Philo Farnsworth e Philo Taylor Farnsworth em 1927.

Os primeiros aparelhos de televisão eram rádios com um dispositivo que consistia num tubo de néon com um disco giratório mecânico (disco de Nipkow) que produzia uma imagem vermelha do tamanho de um selo postal. O primeiro serviço de alta definição apareceu na Alemanha em março de 1935, mas estava disponível apenas em 22 salas públicas. Uma das primeiras grandes transmissões de televisão foi a dos Jogos Olímpicos de Berlim de 1936. O uso da televisão aumentou enormemente depois da Segunda Guerra Mundial devido aos avanços tecnológicos

surgidos com as necessidades da guerra e à renda adicional disponível (televisores na década de 1930 custavam o equivalente a 7000 dólares atuais (2001) e havia pouca programação disponível).

No Brasil, a primeira transmissão de televisão deu-se por conta de Olavo Bastos Frias, que construiu os equipamentos necessários e transmitiu uma partida de futebol em 28 de setembro de 1948, na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais. A TV a cores apareceu nos Estados Unidos apenas em 1953. Para se ter uma idéia da precariedade tecnológica da época, o sistema de cor adotado pelos Estados Unidos (NTSC) foi chamado de Never Twice the Same Color, cuja tradução é Nunca a Mesma Cor Duas Vezes Seguidas.

Com o desenvolvimento dos computadores, diante da necessidade de um periférico de saída, surgiram os monitores, pois sem ele não conseguiríamos ver o que estávamos fazendo. São a principal porta de comunicação entre o microcomputador e o ser humano. Em meados dos anos 50 exibir os dados processados em uma tela era algo digno de ficção científica. Na verdade, a própria televisão ainda era uma novidade que começava a se tornar popular. Os primeiros computadores, aqueles que ocupavam vários metros cúbicos e centenas de metros de cabos, tinham a incrível capacidade de 2MB de RAM, usavam unidades de fita para gravar e ler os dados, as memórias eram de núcleo de ferrite. Utilizavam cartões perfurados como entrada e muitas páginas de impressão de dados como monitoramento.



FIGURA 1 - Computador Eniac.

Através do mesmo cabo amarelo do vídeo utilizado por videogames, boa parte dos computadores da década de 70 ainda utilizava o televisor doméstico como interface gráfica a exemplo do ZX Spectrum, Comodore 64 e Commodore Amiga. Embora fosse como uma ótima maneira de baratear os custos, os televisores possuíam uma resolução limitada e não apresentavam um aspecto muito profissional.

No começo havia o televisor, era o sonho de consumo de 10 entre 10 famílias, e que, naturalmente, se tornou o primeiro monitor. No ano de 1970 foi lançado o VT05 da Dec com seu incrível teleimpressor embutido. Pela primeira vez um computador pessoal utilizava um monitor para exibir os dados em tempo real. Apenas uma cor se encarregava de imprimir suas incríveis 20 linhas e 72 colunas de caracteres alfanuméricos.

A exemplo do famoso IBM PC, os primeiros monitores de computador eram monocromáticos. Os caracteres eram exibidos de maneira mais nítida do que nas

TVs e o fato de possuírem uma única cor pouco importava, uma vez que os computadores não possuíam capacidade de gerar imagens coloridas.



FIGURA 2 - Ilustração mostrando cor verde padrão.

Embora o verde tenha sido a cor predominante nestes modelos, o laranja também foi utilizado para este fim. O fósforo excitado por uma corrente elétrica brilhava, mas demorava alguns instantes para se apagar por completo. Em jogos e outros aplicativos gráficos, as cores eram simuladas através de tons diferentes da mesma cor.

Não demorou para que os mesmos tubos de raios catódicos utilizados nas TVs dessem origem aos monitores coloridos de CRT. Os primeiros modelos não passavam de meras adaptações feitas em aparelhos de televisão, mas que logo foram aperfeiçoados para aproveitar o potencial do computador.

Embora na década de 80 os micros já possuíssem uma tela capaz de exibir cores, atribuir um padrão diferente de cor para cada pixel exigia uma quantidade absurda de memória, para os padrões da época. O vazamento de cor era uma prática comum pelos programadores e consistia em utilizar a mesma cor em diversos pixels próximos.

Já explorados há algum tempo em dispositivos menores, no início da década de 80 as telas de cristal líquido começam a ser incorporadas aos computadores assim como no HX-20 da Epson (1982). Os primeiros modelos eram tão coloridos quanto o visor de uma calculadora e eram utilizados apenas em notebooks por conta do seu alto custo e baixa eficiência.

Bastaram apenas alguns anos para que os monitores de cristal líquido ganhassem uma retro iluminação para aumentar seu brilho e uma década para que apresentassem cores com uma boa qualidade de imagem. Nos anos 90 foi a vez dos LCDs começarem a ocupar seu reduzido espaço nas mesas dos usuários e a incentivar o surgimento de modelos compactos.

Os anos passaram e a qualidade dos CRTs evoluiu bastante, um bom exemplo disto é que mesmo perante a tecnologia LCD, a definição de um monitor de tubo se mantém superior. Suas dimensões e seu peso colocam o grandalhão em desvantagem, no entanto, seu custo reduzido ainda o fazem presentes em vários computadores pessoais.

3. TIPOS DE MONITORES

Os monitores são classificados de acordo com a tecnologia de amostragem de vídeo utilizada na formação da imagem. Atualmente, essas principais tecnologias são: CRT, LCD, PLASMA e OLED.

4. FUNCIONAMENTO DOS MONITORES

As diversas categorias, cada qual com sua tecnologia aplicada, tem seu princípio de funcionamento. Podemos explicar o funcionamento dos monitores segundo sua tecnologia aplicada.



FIGURA 3 - Telas primitivas de cristal líquido.

4.1 MONITORES CRT

Os monitores de vídeo CRTs têm sua tela baseada em um tubo. A tela deste tubo é composta por camadas de fósforo, que é atingida por elétrons através de "disparos" feitos por um canhão localizado no início do tubo. Quando o elétron encontra o fósforo, uma luz é gerada naquele ponto. Basicamente, é isso que faz com que a imagem apareça na tela do monitor. Observe a figura a seguir para entender melhor. A imagem representa a visão interna de um monitor, onde é possível verificar a existência do tubo.

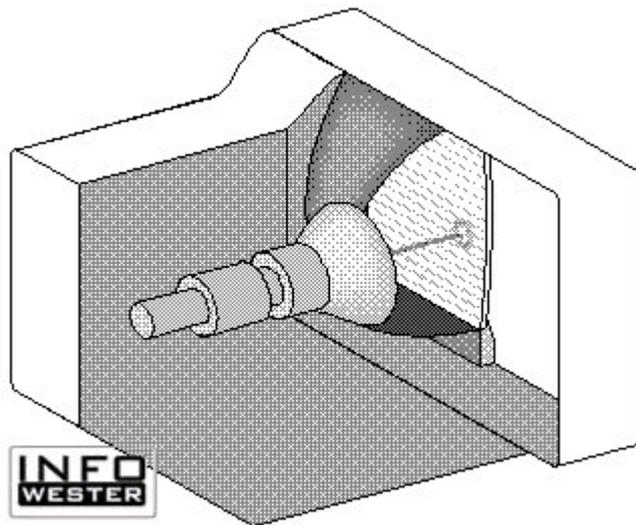


FIGURA 4 - Tubo do monitor CRT.

Para gerar as imagens, o canhão percorre toda a extensão da tela, ponto por ponto, linha por linha. Como cada ponto de luz tem duração curta e a imagem precisa ser constantemente atualizada, esse processo, conhecido como varredura, é repetido a todo instante.

4.2 FREQUÊNCIA HORIZONTAL

Chamamos de frequência horizontal o número de linhas que o canhão do monitor consegue percorrer por segundo. Assim, se um monitor consegue varrer 35 mil linhas, dizemos que sua frequência horizontal é de 35 kHz.

O canhão citado acima, possui 3 feixes de cores, que trabalham em conjunto e ao mesmo tempo: um feixe verde, um feixe vermelho e um feixe azul (a combinação destas cores geram as outras). A intensidade deste canhão é medida

em MHz. Geralmente, os monitores possuem essa intensidade (também conhecida por largura de banda, banda passante ou dot rate) entre 100 MHz e 200 MHz. O canhão percorre a tela do monitor com esses três feixes e realiza esse processo constantemente, da seguinte forma: o canhão percorre a tela em forma de linhas (daí o nome de horizontal), começando de cima para baixo e da esquerda para direita. Quando uma linha é terminada, o canhão parte para a outra. Quando todas as linhas tiverem sido percorridas, ele volta para o início e repete o processo. É claro que você não percebe que o monitor faz isso, pois esse processo ocorre de maneira extremamente rápida.

4.3 FREQUÊNCIA VERTICAL

Você pode ter imaginado que se existe uma frequência horizontal, existe uma vertical. E, de fato, existe. Esta frequência consiste no tempo em que o canhão leva para ir do canto superior esquerdo para o canto inferior direito da tela. Assim, se a frequência horizontal indica a quantidade de vezes que o canhão consegue varrer linhas por segundo, a frequência vertical indica a quantidade de vezes que a tela toda é percorrida pelo canhão por segundo. Se é percorrida, por exemplo, 56 vezes por segundo, dizemos que a frequência vertical do monitor é de 56 Hz.

4.4 RESOLUÇÃO DOS MONITORES CRTS

Você já sabe que a imagem do monitor é formada pela varredura do canhão sobre as linhas com pontos (também chamado de pixels) do monitor. Mas quantas linhas o monitor tem? Bem, para saber isso, você pode consultar seu computador para conhecer a resolução. Caso a resolução seja, de por exemplo, 800x600, significa que a tela possui 800 linhas na vertical e 600 linhas na horizontal. É como se fosse uma matriz. Atualmente, as resoluções mais encontradas são: 640x480, 800x600, 1024x768 e 1280x1024. É claro que existem outras resoluções. Elas são aplicadas conforme a necessidade. Por exemplo, uma jogo pode requerer uma resolução menor, como 320x200. Quanto maior for a resolução, maior será o espaço visível na tela, pois o tamanho dos pontos diminui.

4.5 MONITORES LCD

Eles saltaram dos computadores portáteis que possuem limitações em espaço, peso e consumo de energia e ganharam independência ao lado dos computadores de mesa. Ao contrário dos CRT, que trabalham à alta voltagem para alimentar e controlar o canhão de elétrons e por esse motivo, têm um limite para redução de seu tamanho, os monitores de cristal líquido puderam dar uma resposta às aplicações que necessitam de equipamentos mais compactos e de maior eficiência no consumo de energia.

As telas LCD se baseiam em uma tecnologia que produz imagens sobre uma superfície plana composta por cristal líquido e filtros coloridos. Descoberto em 1888, o cristal líquido é uma substância cujas moléculas podem ser alinhadas quando sujeitas a campos elétricos, algo parecido com o que acontece com fragmentos de metal quando se aproximam de um ímã. No caso dos monitores, quando alinhado apropriadamente, o cristal líquido permite a passagem da luz, para que a imagem seja gerada.

De forma simplificada, a ausência de voltagem nos monitores LCD é sinônimo de passagem de luz, enquanto voltagem significa bloqueio da luz. Duas superfícies com filtros polarizados, que podem ser encarados com um conjunto de fios finíssimos paralelos, controlam os raios de luz que passam através das moléculas de cristal líquido.

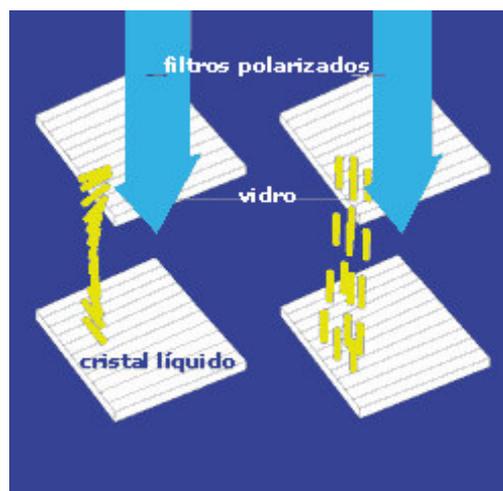


FIGURA 5 - Ilustração dos filtros.

As linhas de um dos filtros são dispostas perpendicularmente às linhas do outro filtro, e as moléculas entre as duas superfícies são forçadas a um estado torcido, direcionando os raios de luz da mesma forma.

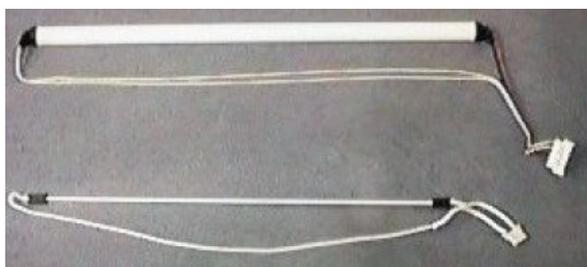
Assim, quando não há nenhum campo elétrico aplicado às moléculas, a direção do raio de luz vai sendo alterada à medida que passa pelo cristal até encontrar a segunda superfície, cuja direção das ranhuras coincidirá com a do raio de luz.

Se um campo for aplicado ao cristal, as moléculas se reorganizam verticalmente, fazendo com que os raios de luz percorram o intervalo sem alterar sua direção até encontrar a segunda superfície que bloqueará os raios.

Uma fonte de luz fluorescente, identificada geralmente pelo termo “back-light” ou também por Lâmpada Fluorescente de Catodo Frio (CCFL - Cold Cathode Fluorescent Lamp), é responsável pela emissão dos raios que são alinhados pelos filtros polarizados.

A luz direcionada passa então, pela camada contendo milhares de bolhas de cristais líquido organizadas em pequenas células, que por sua vez, estão dispostas em linhas na tela. Uma ou mais células formam um pixel no monitor.

É realmente muito importante que a lâmpada emita uma luz o mais branca possível, caso contrário irá comprometer a qualidade das cores, sendo que para que as cores sejam perfeitas, é necessário que o branco perfeito exista. Também é importante que a luz permita que seu brilho seja alterado sem causar cintilações quando sofrem variações de tensões. A frequência de operação é alta, em torno de 20 a 100 kHz e tensões de 400 a 1000V.



**Lâmpada Fluorescente de Catodo Frio
(CCFL - Cold Cathode Fluorescent Lamp)**

Sem essa lâmpada não existiria brilho no painel LCD, pois ele não possui brilho por si só. Essa lâmpada então recebe o nome de “back-light”, justamente por causa da iluminação que vem por trás do painel.

FIGURA 6 - Lâmpada Fluorescente de Cátodo Frio.

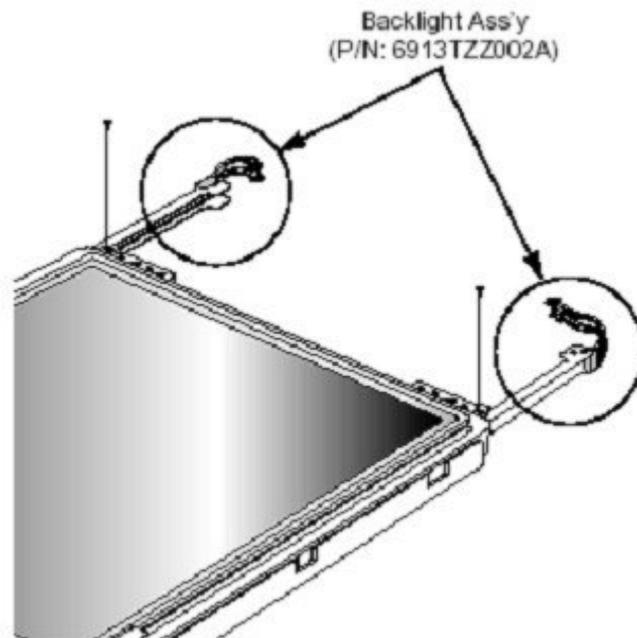


FIGURA 7 - Encaixe da CCFL.

4.5.1 CORES NO LCD

Para usar cores no LCD, é necessário utilizar filtros no sistema RGB (Red, Green, Blue - vermelho, verde, azul) sobre cada uma das minúsculas unidades gráficas (TN). Ao colocarmos 3 (três) unidades TN com filtros de cores diferentes, conseguimos formar um pixel, que varia sua tonalidade de acordo com a tensão aplicada a uma das unidades, a luz então produz as cores que são vistas nas telas LCD.

4.5.2 PRINCIPAIS CORREÇÕES FEITAS NO LCD

O modo como o brilho dos pixels é controlado divide as telas de cristal líquido em duas categorias. A forma mais simples e barata para endereçar os elementos da imagem ficou conhecida como tecnologia de matriz passiva. Nesse esquema, a tela consiste de uma grade de fios horizontais e verticais. A intersecção dos fios define um pixel, e a corrente que controla os pixels é enviada através desses fios.

Para determinar o nível de brilho de cada pixel, aplica-se uma carga elétrica para que o cristal se realinhe e altere a direção do raio de luz. O processo é repetido

seqüencialmente por linha, da parte superior da tela até a inferior. Para cada linha da grade de pixels, a corrente apropriada flui pelas colunas até a linha selecionada, para que o cristal seja alinhado à direção desejada.

Apesar de também produzirem imagens bem definidas, as telas de matriz passiva são suscetíveis a flicker (uma espécie de “cintilação” que a tela apresenta, como se o monitor estivesse “piscando”). Para reduzir esse efeito, o cristal líquido usado nessa solução apresenta baixo tempo de resposta, ou seja, depois que as moléculas são orientadas pela carga elétrica, demoram a retornar ao seu estado anterior, desalinhado.

Essa característica pode ser associada à persistência do fósforo usado em monitores de tubo de raios catódicos. A resposta lenta do cristal faz com que cenas em movimento não sejam muito nítidas, fato que desaconselha o uso da matriz passiva, por exemplo, em situações de conteúdo dinâmico, como em jogos e filmes ou na movimentação do cursor do mouse na tela.

Além disso, o endereçamento usado pelos monitores de matriz passiva também é responsável por um outro efeito indesejável. Quando um pixel é ativado, pode haver alguma influência sobre os pixels vizinhos na mesma linha e coluna. Esse efeito é conhecido por crosstalk (um distúrbio causado por campos elétricos que afetam circuitos ou sinais adjacentes, afetando diretamente a aparência dos pixels próximos). Uma solução encontrada pelos fabricantes para reduzir esse sintoma foi dividir a tela em uma metade inferior e outra superior, de modo a fazer a varredura em cada uma delas independentemente. Esse tipo de tela é chamado de “Dual Scan Twisted Nematic” (DSTN). Alguns modelos ainda contam com um recurso extra, que faz um endereçamento simultâneo de duas linhas.

As telas de matriz passiva ainda são usadas hoje em pagers e telefones celulares. A maioria das telas LCD usadas em notebooks e em monitores adotam uma outra tecnologia de matriz ativa, que reserva um transistor, chamado “Thin-Film Transistor” (TFT) para alimentar cada pixel separadamente, podendo ativar ou desativá-lo de modo independente. Esse método permite que a corrente que alimenta os pixels seja menor, portanto, possa ser gerada ou interrompida mais rapidamente, afastando os problemas com imagens dinâmicas. Assim, quando o

ponteiro do mouse se move pela tela, os monitores LCD de matriz ativa conseguem refletir o movimento de modo mais rápido.

Por outro lado, por serem capazes de endereçar cada pixel individualmente, as telas LCD de matriz ativa não apresentam problemas de “crosstalk”. Esse é um dos motivos pelo qual o texto nessa categoria de monitores é mais bem definido do que nos CRT que, quando apresentando problemas de foco no canhão de elétrons, podem excitar pixels vizinhos, prejudicando a qualidade do texto.

Outro benefício alcançado pelo fato de cada pixel nas telas LCD de matriz ativa ser alimentado separadamente e poder ser ativado ou desativado de modo independente é a eliminação do efeito “flicker”, responsável por uma cintilação da imagem exibida na tela.

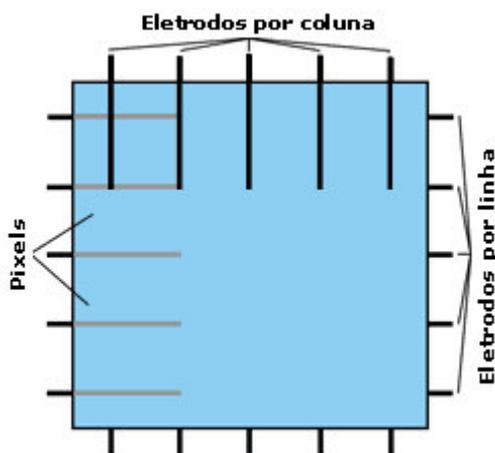


FIGURA 8 – Pixels.

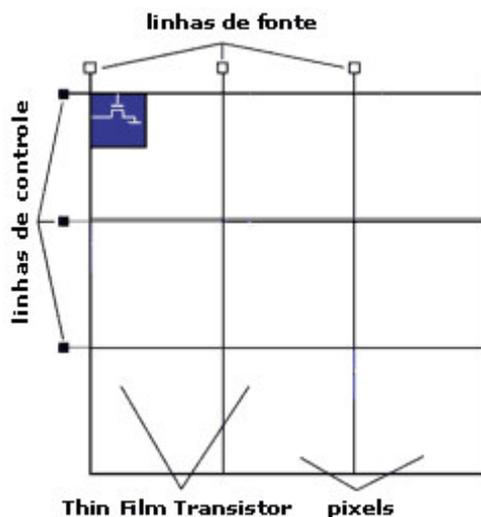


FIGURA 9 – Transistor.

A tecnologia de matriz ativa também permitiu que se produzissem telas LCD maiores do que 10 polegadas, que pudessem reproduzir imagens com qualidade comparável à dos monitores CRT.

A principal desvantagem dos monitores de cristal líquido TFT é a complexidade extra no processo de fabricação; o substrato de vidro onde os transistores são montados é, na verdade, um único chip, com 10 a 20 polegadas na diagonal. Como o LCD é geralmente construído sobre um único substrato, por razões de custo, o grau de atenção no processo de fabricação deve ser muito alto. Apenas para efeito de comparação, um substrato com quatro painéis de resolução de 800x600 pontos, usa cerca de 5,8 milhões de transistores, mais do que o volume usado pelo processador Pentium.

Essa enorme quantidade de componentes é outro fator que dificulta a produção de monitores TFT perfeitos. Pequenos problemas de fabricação podem fazer com que alguns pixels fiquem permanentemente claros ou escuros. Cada fabricante tinha seu próprio índice aceitável de qualidade, que reflete o número de pixels defeituosos por monitor, porém, hoje já existem normas que regulamentam esses pequenos defeitos. Pode-se verificar a existência de defeitos na tela, preenchendo-a com um fundo branco ou preto uniforme; procure pontos que se destacam dos demais.

4.6 MONITORES DE PLASMA

Os monitores de plasma têm uma estrutura que lembra um pouco a dos monitores LCD. Também temos duas placas de vidro e eletrodos que aplicam tensões elétricas nas células que geram a imagem. A grande diferença está justamente nas células. Ao invés de cristais líquidos, os monitores de plasma são formados por estruturas com o mesmo princípio de funcionamento das lâmpadas fluorescentes. A grosso modo, dá para dizer que num monitor de plasma a imagem é formada por alguns milhões de minúsculas lâmpadas fluorescentes verdes, azuis e vermelhas.

As próximas figuras, mostram bem esta estrutura. Temos pequenas cavidades feitas na placa de vidro inferior, onde é depositada uma camada de fósforo colorido. Além do fósforo a cavidade contém gases como néon, xenônio e

hélio, que ao receberem uma descarga elétrica liberam radiação ultravioleta que acende a camada de fósforo, gerando a imagem.

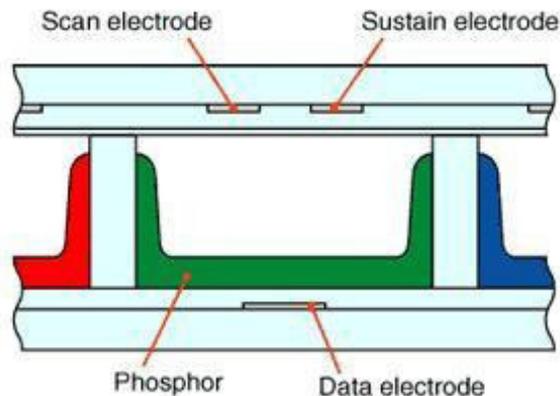


FIGURA 10 - Estrutura básica, mostrando as lâmpadas fluorescentes.

Estas cavidades não podem ser muito pequenas, por isso os monitores de plasma costumam ter um “dot-pitch” em torno de 1 milímetro, quase 30 vezes maior do que em um bom monitor CRT.

A princípio, esta é uma grande desvantagem que não permite que os monitores de plasma suportem altas resoluções, mas por outro lado permite que as telas sejam muito grandes. Já existem monitores de plasma de 30, 35, ou até 42 polegadas. A NEC anunciou que lançará até um monitor de nada menos que 61 polegadas. Apesar de tudo, o telão tem resolução de apenas 1385 x 768 Pixels, ou seja, a resolução não é o forte dos monitores de plasma.

4.7 MONITORES OLED

Diodo Orgânico Emissor de Luz (OLED - Organic Light Emitting Diode), esta tecnologia promete telas planas muito mais finas, leves e baratas que as atuais telas de LCD. A idéia é usar diodos orgânicos, compostos por moléculas de carbono que emitem luz ao receberem uma carga elétrica.

A vantagem é que ao contrário dos diodos tradicionais, estas moléculas podem ser diretamente aplicadas sobre a superfície da tela, usando algum método de impressão, acrescentando os filamentos metálicos que conduzem os impulsos elétricos a cada célula, está pronta assim a tela a um custo bastante baixo.

Este tipo de display pode ser produzido até mesmo usando uma impressora jato de tinta, equipada com as “tintas” corretas. É uma técnica muito barata, que combina bem com displays de baixa densidade, como os usados nos aparelhos de som automotivos e nos celulares mais populares.

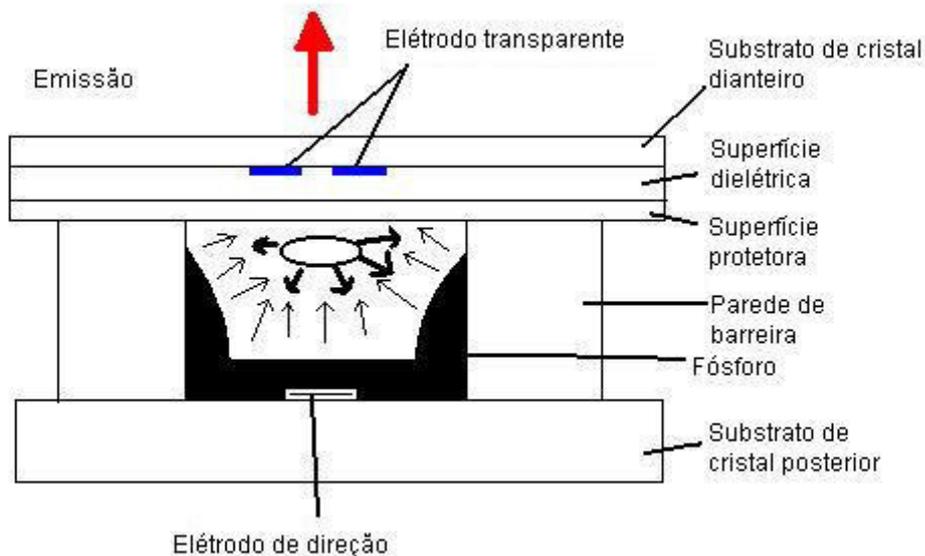


FIGURA 11 – Cavidade.

Como estas telas são muito simples, esta tecnologia apresenta um custo bem inferior ao cristal líquido. Outro possível uso seria o tão aguardado e-paper, um tipo de tela flexível, barata o suficiente para ser usada em livros digitais ou leitores descartável para jornais e outras publicações que seriam vendidas em formato digital. Outra possibilidade é a construção de telas mais elaboradas, capazes de bater de frente com os monitores LCD. Os OLED podem ser utilizados tanto em telas de matriz passiva, quanto de matriz ativa, onde o que muda nas duas técnicas é basicamente o uso ou não de um transistor por célula, e não o material em si.

A Kodak, junto com outras companhias, vem trabalhando em telas semelhantes à do diagrama abaixo, onde temos OLED de três cores, prensados entre um catodo emissor de cargas negativas e um anodo, carregado com cargas positivas. A combinação das duas camadas faz com que as cargas elétricas passem pelos OLED, produzindo luz.

Esta tecnologia, bem mais revolucionária, pode ser usada em microdisplays, telas de duas ou três polegadas de diâmetro, mas com alta resolução, que podem ser usadas em várias áreas, como projetores, onde uma fonte de luz instalada atrás da tela se encarrega de projetar a imagem na tela, ou mesmo em aparelhos mais avançados, como por exemplo, óculos onde são mostradas imagens geradas por um computador portátil, que serão comuns quando os computadores de vestir começarem a se tornar populares, isso tudo sem falar na próxima geração de celulares, que serão capazes de exibir vídeos.

Não está descartado o uso em monitores no futuro, mas o grande problema é construir monitores de matriz ativa, com uma qualidade de imagem semelhante à dos monitores LCD, neste caso o baixo custo dos monitores OLED fica comprometido, pois é necessário construir toda a estrutura da tela, incluindo o transistor para cada pixel, os circuitos de controle entre outros. É mais prováveis que no futuro os OLED sejam mais utilizados em telas de palmtops, celulares e outros tipos de aparelhos portáteis, com telas de baixa densidade.

5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DE ALGUNS MONITORES

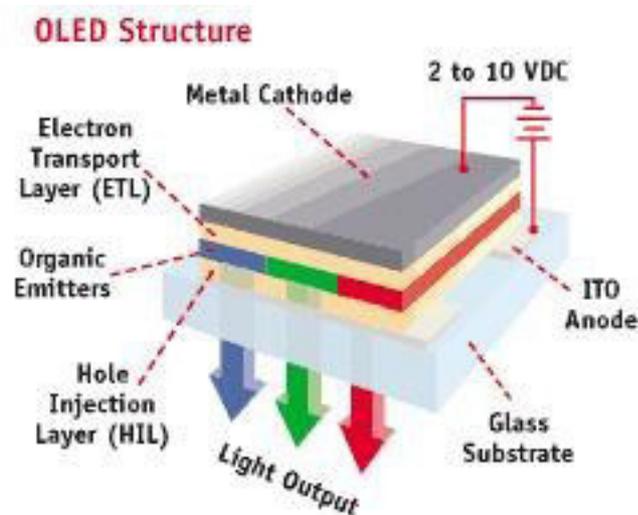


FIGURA 12 - Telas de OLED de 3 cores.

5.1 ALGUMAS VANTAGENS DOS MONITORES LCDs

- Os monitores de cristal são muito mais finos que os tradicionais, o que explica seu uso em computadores portáteis. No caso de um computador de mesa a vantagem neste caso não é tão evidente, mas de qualquer modo, há economia de espaço sobre a mesa;

- Os monitores LCD possuem uma tela realmente plana, o que elimina as distorções de imagem causadas pelas telas curvas dos monitores CRT, e aumenta a área útil do monitor, já que não há espaço desperdiçado nos cantos da imagem. Um monitor LCD de 14 polegadas possui uma área de exibição maior do que um CRT de 15 polegadas, enquanto que um LCD de 15 polegadas, possui a área quase equivalente a um monitor tradicional de 17 polegadas;

- Os monitores de cristal líquido, também gastam menos eletricidade. Enquanto um monitor tradicional de 14 polegadas consome por volta de 90 W, um LCD dificilmente ultrapassa a marca dos 40W.

5.2 ALGUMAS DESVANTAGEM DOS MONITORES LCDs

- Enquanto nos monitores tradicionais podemos ver a imagem exibida praticamente de qualquer ângulo, nos LCD o ângulo de visão é limitado a 90° (45° para a esquerda e 45° para a direita). Acima disso, a imagem aparecerá com as cores distorcidas ou mesmo desaparecerá. Mas isso também tem um lado positivo; se esse tipo de monitor for implantado num caixa eletrônico bancário e alguém malintencionado ao seu lado quiser ver a tela, terá dificuldades;

- Alto custo.

5.3 ALGUMAS VANTAGENS DOS MONITORES DE PLASMA

- Cores mais vibrantes;
- Ângulo de visão mais amplo;
- Contraste aprimorado, melhor inclusive que nas telas LCD;
- Tamanhos de tela a partir de 42 polegadas, modelos de até 103 polegadas;

- Ideal para DVD e sinal digital em widescreen 16:9.

5.4 ALGUMAS DESVANTAGENS DOS MONITORES DE PLASMA

- Alto consumo de energia;
- Ao ficar muito próximo da tela, é gerado um efeito flicker que cansa a vista mais rápido.
- Imagens estáticas e tarjas pretas nas laterais queimam a tela.

6. CONCLUSÃO

O futuro nos reserva Aparelhos cada vez melhores, buscando sempre atender a 3 quesitos:

- Pixel Perfeito: Evoluir a Técnica de Produção de Cores
- Qualidade de Imagem: Buscando Maiores Resoluções e Fidelidade
- Custo de Produção: Viabilizar a Comercialização da Tecnologia Criada

Devido ao grande desenvolvimento tecnológico e implementação de novos materiais, como por exemplo o Oled, diodo orgânico, estamos prestes a ter monitores flexíveis em nossas casas, ou até mesmo monitores transparentes, com imagens em 3D. Enfim, essa nova era dos Monitores e Televisores esta sem limites de aplicações, e sua aquisição é apenas uma questão de tempo para que novas técnicas de fabricação e processamentos de matéria prima estejam acessíveis de forma a viabilizar sua compra.

7. REFERÊNCIAS

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Televis%C3%A3o>

Guia do hardware. Disponível em <http://www.guiadohardware.net/tutoriais/010/>. Acesso em 10 Jul 09.

Guia do hardware. Disponível em <http://www.guiadohardware.net/tutoriais/monitores-1/>. Acesso em 10 Jul 09.

<http://www.tudosobretv.com.br/histortv/histormundi.htm>

<http://www.infowester.com/monitores.php>

http://www.escom.ensino.eb.br/cursos/s49/pi/pi_mon_lcd_plasma.pdf

TRANSISTORES

Marcos Vinícius Santos

1. INTRODUÇÃO

Já se passaram mais de 50 anos desde a introdução do primeiro transistor em 23 de dezembro de 1947. Para quem presenciou a transição das válvulas termoiônicas para a era dos dispositivos de estado sólido (semicondutores) parece que se passaram apenas alguns anos.

A miniaturização resultante nos leva a questionar seus limites. Atualmente sistemas completos são implementados em chips que são centenas de vezes menores que um único componente utilizado em circuitos anteriores. Os circuitos integrados (CIs) atuais possuem mais de dez milhões de transistores em uma área menor que a de uma unha. Novos projetos e sistemas surgem semanalmente. O engenheiro encontra-se cada vez mais limitado em seu conhecimento em função da extensa abrangência dos avanços – é difícil o suficiente estar a par das mudanças em apenas uma das áreas de pesquisa ou desenvolvimento. Atingiu-se um ponto em que o propósito básico do encapsulamento é simplesmente oferecer maneiras de manusear o dispositivo ou sistema e prover um mecanismo para conexão com o restante do circuito. A miniaturização parece estar limitada a três fatores: à qualidade do material semicondutor, à técnica de projeto do circuito e aos limites dos equipamentos de fabricação e processamento.

Dentro deste contexto, é importante estudar a fundo a função dos transistores, tanto no âmbito de circuitos elétricos, quanto no enfoque de materiais, já que este importante elemento foi a base para a manipulação de elementos semicondutores no ramo da eletrônica. Sendo utilizado o seu princípio de funcionamento em milhares de elementos de circuitos presentes atualmente.

2. MATERIAIS SEMICONDUTORES EM TRANSISTORES

Um material semicondutor é o material que tem um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e de um condutor.

Geralmente, os transistores, assim como os diodos, são formados pela junção metalúrgica de dois cristais, comumente Silício (Si) e (atualmente menos comum) Germânio (Ge), de natureza extrínseca P e N, segundo sua composição a nível atômico. Estes dois tipos de cristais são obtidos ao se dopar cristais de metal puro intencionalmente com impurezas, normalmente algum outro metal ou composto químico.

O Ge e o Si recebem tanta atenção por várias razões. Um aspecto muito importante é o fato de eles poderem ser fabricados com um alto nível de pureza. Na verdade, avanços recentes tem reduzido os níveis de impureza do material puro para uma parte em 10 bilhões (1:10.000.000.000). Podese perguntar se esses níveis reduzidos de impureza são realmente necessários. Certamente são, se considerarmos que a adição de uma parte de impureza (do tipo adequado) por milhão em uma bolacha de material de silício pode transformar um condutor relativamente inferior em um bom condutor de eletricidade. Estamos tratando, obviamente, de uma variedade totalmente nova de níveis de comparação ao lidarmos com o meio semiconductor. A capacidade de alteração radical das características do material por meio desse processo, conhecido como “dopagem”, é outra razão para o Ge e o Si receberem tanta atenção. Além disso, suas características podem ser significativamente alteradas pela aplicação de calor ou luz – um aspecto importante no desenvolvimento de dispositivos sensíveis ao calor e à luz.

Algumas das qualidades únicas do Ge e do Si devem-se a suas estruturas atômicas. Os átomos de ambos os materiais formam um modelo bem preciso e periódico (isto é, que se repete continuamente) por natureza.

2.1 MATERIAL DO TIPO N

O material do tipo n e o do tipo p são formados pela adição de um número predeterminado de átomos de impureza em uma base de germânio ou silício.

O material do tipo n é criado com a introdução dos elementos de impureza que tem cinco elétrons de valência (pentavalente), como o antimônio, o arsênio e o fósforo. O efeito deles é indicado na figura 1.1 (utilizando-se antimônio como impureza em uma base de silício). Note que as quatro ligações covalentes ainda

estão presentes. No entanto, existe um quinto elétron adicional devido a existência do átomo de impureza dissociado de qualquer ligação covalente específica. Esse elétron adicional, tenuemente ligado a seu átomo de origem (antimônio), está relativamente livre para se mover dentro do recémformado material do tipo n.

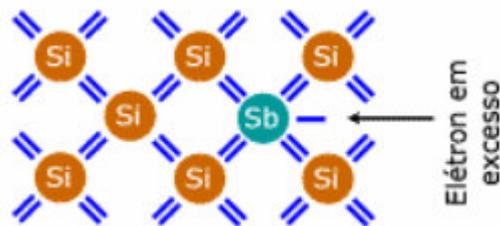


FIGURA 1

Em termos de níveis de energia, o efeito desse processo de dopagem na condutividade relativa pode ser mais bem descrito por meio do diagrama de banda de energia da figura 1.2.

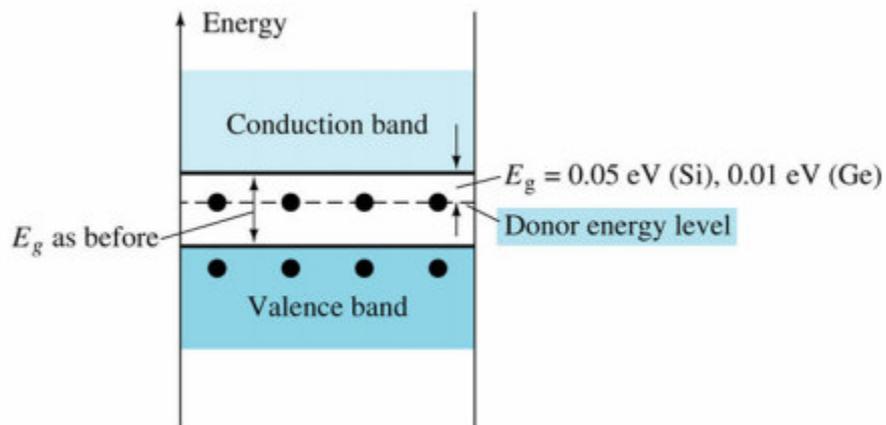


Figura 2 – Efeito de impurezas doadoras na estrutura da banda de energia.

Note que um nível discreto de energia (chamado nível doador) aparece na banda proibida com um E_g bem menor do que o material intrínseco. Esses elétrons, que são “livres” devido à impureza adicionada, se estabelecem nesse nível de energia a tem menos dificuldade para absolver uma quantidade suficiente de energia térmica para mover-se em direção à banda de condução à temperatura ambiente. O

resultado é que, a essa temperatura, há um grande número de portadores (elétrons) no nível de condução, e a condutividade do material aumenta significativamente.

2.2 MATERIAL DO TIPO P

O material do tipo p é obtido dopando-se um cristal de germânio ou silício puro com átomos de impureza que possuam três elétrons de valência. Os elementos mais comumente utilizados para esse propósito são o boro, o gálio e o índio. O efeito do Alumínio sobre uma base de silício é mostrado na figura 1.3.

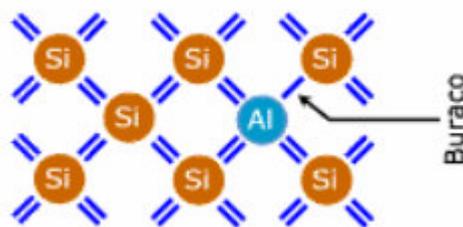


FIGURA 3 – Impureza de boro

Note que há agora um número insuficiente de elétrons para completar as ligações covalentes da rede recém-formada. O espaço vazio resultante é chamado de lacuna e é representado por um pequeno círculo ou sinal positivo devido à ausência de uma carga negativa.

No estado intrínseco, o número de elétrons livres no Ge ou no Si deve-se apenas aos poucos elétrons na banda de valência que adquiriram de fontes térmicas ou luminosas energia suficiente para quebrar a ligação covalente ou às poucas impurezas que não puderam ser removidas. Os espaços vazios deixados para trás na estrutura de ligação covalente representam nossa fonte limitada de lacunas. Os materiais dos tipos p e n representam os blocos básicos de construção dos dispositivos semicondutores como os diodos e os transistores.

3. O TRANSISTOR

O transistor é um componente eletrônico que começou a se popularizar na década de 1950 tendo sido o principal responsável pela revolução da eletrônica na década de 1960, e cujas funções principais são amplificar e chavear sinais elétricos.

O termo vem de transfer resistor (resistor de transferência), como era conhecido pelos seus inventores.

O processo de transferência de resistência, no caso de um circuito analógico, significa que a impedância característica do componente varia para cima ou para baixo da polarização pré-estabelecida. Graças à esta função, a corrente elétrica que passa entre coletor e emissor do transistor varia dentro de determinados parâmetros pré-estabelecidos pelo projetista do circuito eletrônico; esta variação é feita através da variação de corrente num dos terminais chamado base, que conseqüentemente ocasiona o processo de amplificação de sinal.

Entende-se por "amplificar" o procedimento de tornar um sinal elétrico mais fraco em mais forte. Um sinal elétrico de baixa intensidade, como os sinais gerados por um microfone, é injetado em um circuito eletrônico (transistorizado, por exemplo), cuja função principal é transformar este sinal fraco gerado pelo microfone em sinais elétricos com as mesmas características, mas com potência suficiente para excitar os alto-falantes, a este processo todo se dá o nome de ganho de sinal.

3.1 INVENÇÃO DO TRANSISTOR

Entre os anos de 1904 e 1947 a válvula indubitavelmente foi o dispositivo eletrônico de maior interesse e desenvolvimento. Em 1904, o diodo a válvula foi criado por J.A. Fleming. Logo depois, em 1906, Lee De Forest adicionou um terceiro elemento chamado de grade de controle ao diodo a válvula eletrônica, resultando no primeiro amplificador, o triodo. Nos anos seguintes, o rádio e a televisão proporcionaram um grande estímulo à indústria de válvulas. A produção subiu de aproximadamente um milhão de válvulas em 1922 para cerca de cem milhões em 1937. No início da década de 30, o tetrodo de quatro elementos e o pentodo de cinco elementos ganharam proeminência na indústria de válvulas eletrônicas. Com o passar dos anos, essa indústria tornou-se uma das mais importantes, obtendo rápidos avanços em termos de projeto, técnicas de fabricação, aplicações de alta potência, alta freqüência e miniaturização.

No entanto, em dezembro de 1947, a indústria eletrônica estava prestes a experimentar um redirecionamento de interesse e desenvolvimento. O transistor foi inventado nos Laboratórios da Bell Telephone por Bardeen e Brattain, e inicialmente

demonstrado em 23 de Dezembro de 1947 por John Bardeen, Walter Houser Brattain, e William Bradford Shockley, que foram laureados com o prêmio Nobel da Física em 1956. Ironicamente, eles pretendiam fabricar um transistor de efeito de campo (FET) idealizado por Julius Edgar Lilienfeld antes de 1925, mas acabaram por descobrir uma amplificação da corrente no ponto de contacto do transistor, isso evoluiu posteriormente para converter-se no transistor de junção bipolar (BJT). O objetivo do projeto era criar um dispositivo compacto e barato para substituir as válvulas termoiônicas usadas nos sistemas telefônicos da época.

Consistia de um pequeno bloco de germânio (que na época era junto com o silício o semicondutor mais pesquisado) e três filamentos de ouro. Um filamento era o pólo positivo, o outro, o pólo negativo, enquanto o terceiro tinha a função de controle.

Tendo apenas uma carga elétrica no pólo positivo, nada acontecia: o germânio atuava como um isolante, bloqueando a corrente. Porém, quando uma certa tensão elétrica era aplicada usando o filamento de controle, um fenômeno acontecia e a carga elétrica passava a fluir para o pólo negativo. Haviam criado um dispositivo que substituía a válvula, que não possuía partes móveis, gastava uma fração da eletricidade e, ao mesmo tempo, era muito mais rápido.

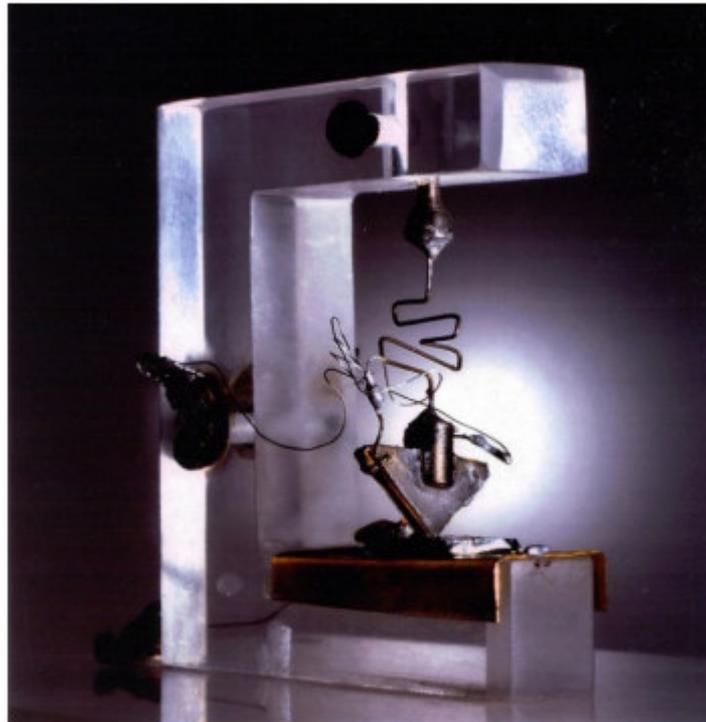


FIGURA 4 - O primeiro transistor

O primeiro transistor era muito grande, mas não demorou muito para que esse modelo inicial fosse aperfeiçoado. Durante a década de 1950, o transistor foi aperfeiçoado e passou a gradualmente dominar a indústria, substituindo rapidamente as problemáticas válvulas. Os modelos foram diminuindo de tamanho, caindo de preço e tornando-se mais rápidos. Alguns transistores da época podiam operar a até 100 MHz. Claro que essa era a frequência que podia ser alcançada por um transistor sozinho, nos computadores da época, a frequência de operação era muito menor, já que em cada ciclo de processamento o sinal precisa passar por vários transistores.

Mas, o grande salto foi a substituição do germânio pelo silício. Isso permitiu miniaturizar ainda mais os transistores e baixar seu custo de produção. Os primeiros transistores de junção comerciais (já similares aos atuais) foram produzidos a partir de 1960 pela Crystalonics, decretando o final da era das válvulas.

A idéia central no uso do silício para construir transistores é que, adicionando certas substâncias em pequenas quantidades, é possível alterar as propriedades elétricas do silício. As primeiras experiências usavam fósforo e boro,

que transformavam o silício em condutor por cargas negativas ou em condutor por cargas positivas, dependendo de qual dos dois materiais fosse usado. Essas substâncias adicionadas ao silício são chamadas de impurezas, e o silício "contaminado" por elas é chamado de silício dopado.

Os transistores bipolares passaram, então, a serem incorporados a diversas aplicações, tais como: aparelhos auditivos, seguidos rapidamente por rádios transistorizados. Mas a indústria norte-americana não adotou imediatamente o transistor nos equipamentos eletrônicos de consumo, preferindo continuar a usar as válvulas termoiônicas, cuja tecnologia era amplamente dominada. Foi através de produtos japoneses, notadamente os rádios portáteis fabricados pela Sony, que o transistor passou a ser adotado em escala mundial.

Nessa época, o MOSFET (Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor- Transistor de Efeito de Campo formado por Metal / Óxido / Silício) ficou em segundo plano, quase esquecido. Problemas de interface inviabilizavam a construção dos MOSFET's. Contudo, em 1959, Atalla e Kahng da Bell Labs fabricam e conseguem a operação de um transistor MOS. Nessa época, os transistores MOS são tidos como curiosidade, devido ao desempenho bastante inferior aos bipolares.

A grande vantagem dos transistores em relação às válvulas foi demonstrada em 1958, quando J. Kilby da Texas Instruments desenvolveu o primeiro circuito integrado, consistindo de 1 transistor, 3 resistores e 1 capacitor, implementando um oscilador simples. A partir daí, via-se a possibilidade de criação de circuitos mais complexos, utilizando integração de componentes. Isso marcou uma transição na história dos transistores, que deixaram de ser vistos como substituto das válvulas e passaram a ser encarados como dispositivos que possibilitam a criação de circuitos complexos, integrados.

Em 1960, devido a sua estrutura mais simples, o MOS passou a ser encarado como um dispositivo viável para circuitos digitais integrados. Nessa época, havia muitos problemas com estados de impurezas, o que mantém o uso do MOS restrito até o fim da década de 60. Entre 1964 - 1969 identificam o Sódio Na como o principal causador dos problemas de estado de superfície, e começam a surgir soluções para esse problema.

No início da tecnologia MOS, os transistores PMOS foram mais utilizados, apesar do conceito de Complementary MOS (CMOS) já estivesse sido introduzido por Weimer. O problema ainda é a dificuldade de eliminação de estados de superfície nos transistores NMOS.

Em 1970, a Intel anuncia a primeira DRAM, fabricada com tecnologia PMOS. Em 1971, a Intel lança o primeiro microprocessador do mundo, o 4004, baseado em tecnologia PMOS. Ele foi projetado para ser usado em calculadoras. Ainda em 1971, resolve-se os problemas de estado de superfície e emerge a tecnologia NMOS, que permite maior velocidade e poder de integração.

O domínio da tecnologia MOS dura até o final dos anos 70. Nessa época, o NMOS passou a ser um problema, pois com o aumento da densidade dos CI's, a tecnologia demonstrou-se insuficiente pois surgem grandes problemas com consumo de potência (que é alto nesse tipo de tecnologia). Com isso, a tecnologia CMOS começa a ganhar espaço

A partir da década de 80, o uso de CMOS foi intensificado, levando a tecnologia a ser usada em 75% de toda a fabricação de circuitos, por volta do ano 2000.

3.2 IMPORTÂNCIA DOS TRANSISTORES

O transistor é considerado por muitos uma das maiores descobertas ou invenções da história moderna, tendo tornado possível a revolução dos computadores e equipamentos eletrônicos. A chave da importância do transistor na sociedade moderna é a sua habilidade de ser produzido em enormes quantidades usando técnicas simples, resultando em preços irrisórios. É conveniente salientar que é praticamente impossível encontrarmos circuitos integrados que não possuam internamente centenas, milhares ou mesmo milhões de transistores, juntamente com outros componentes como resistências e condensadores. Por exemplo o microprocessador Cell do console PlayStation 3 tem aproximadamente 234 milhões de transistores, usando uma arquitetura de fabricação de 45 nanômetros, ou seja cada transistor fica distanciado dos outros 45 milionésimos de um milímetro.

O seu baixo custo permitiu que se transformasse num componente quase universal para tarefas não mecânicas. Visto que um dispositivo comum, como um

refrigerador, usaria um dispositivo mecânico para o controle, hoje é freqüente e muito mais barato usar um microprocessador contendo alguns milhões de transistores e um programa de computador apropriado e realizar a mesma tarefa. Os transistores hoje em dia têm substituído quase todos os dispositivos eletromecânicos, a maioria dos sistemas de controle, e aparecem em grandes quantidades em tudo que envolva eletrônica desde os computadores aos carros.

O seu custo tem sido crucial no crescente movimento para digitalizar toda a informação. Com os computadores transistorizados a oferecer a habilidade de encontrar e ordenar rapidamente informação digital, mais e mais esforço foi posto em tornar toda a informação digital. Hoje quase todos os meios na sociedade moderna são fornecidos em formato digital, convertidos e apresentados por computadores. Formas análogas comuns de informação, tais como a televisão ou os jornais, gastam a maioria do seu tempo com informação digital, sendo convertida no formato tradicional apenas numa pequena fração de tempo.

3.3 FABRICAÇÃO

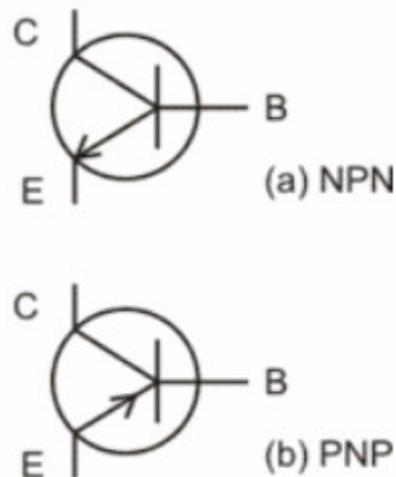


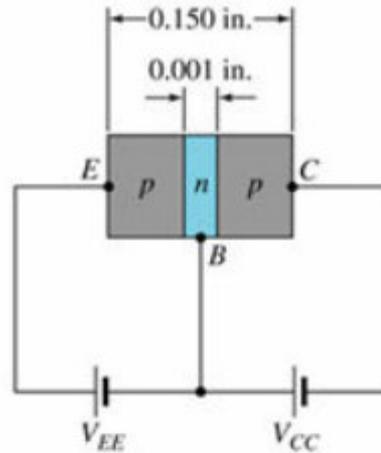
FIGURA 5 - Símbolos dos transistores bipolares

Os materiais utilizados na fabricação do transistor são principalmente o Silício (Si), o Germânio (Ge), o Gálio (Ga) e alguns óxidos. Na natureza, o silício é um material isolante elétrico, devido conformação das ligações eletrônicas de seus átomos, gerando uma rede eletrônica altamente estável. Atualmente, o transistor de

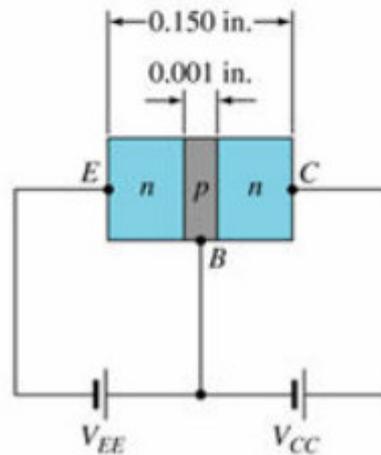
germânio não é mais usado, tendo sido substituído pelo de silício, que possui características muito melhores.

O silício é purificado e passa por um processo que forma uma estrutura cristalina em seus átomos. O material é cortado em finos discos, que a seguir vão para um processo chamado de dopagem, onde são introduzidas quantidades rigorosamente controladas de materiais selecionados (conhecidos como impurezas) que transformam a estrutura eletrônica, introduzindo-se entre as ligações dos átomos de silício, roubando ou doando elétrons dos átomos, gerando o silício P ou N, conforme ele seja positivo (tenha falta de elétrons) ou negativo (tenha excesso de elétrons). Se a impureza tiver um elétron a mais, um elétron fica sobrando na estrutura cristalina. Se tiver um elétron a menos, fica faltando um elétron, o que produz uma lacuna (que funciona como se fosse um buraco móvel na estrutura cristalina). Como resultado, temos ao fim do processo um semicondutor.

O transistor é um dispositivo semicondutor que consiste em duas camadas de material do tipo n e uma camada do tipo p ou duas camadas do tipo p e uma camada do tipo n. O primeiro é denominado transistor npn e o outro, transistor pnp. Os dois são mostrados na figura 2.3, com a polarização apropriada. A camada emissora é fortemente dopada, a base é menos dopada e a coletora possui dopagem bem leve. As camadas externas possuem larguras muito maiores do que a camada interna de material do tipo p ou n. A dopagem da camada interna também é consideravelmente menor do que a das camadas externas (normalmente 10:1 ou menos). Esse nível de dopagem menor reduz a condutividade (aumenta a resistência) desse material, limitando o número de portadores “livres”.



(a)



(b)

FIGURA 6 – Tipos de transistores: (a) pnp; (b) npn

3.4 FUNCIONAMENTO

O funcionamento de um transistor é bastante simples, quase elementar. É como naquele velho ditado "as melhores invenções são as mais simples". As válvulas eram muito mais complexas que os transistores e, mesmo assim, foram rapidamente substituídas por eles. Um transistor é composto basicamente por três filamentos, chamados de base, emissor e coletor. O emissor é o pólo positivo, o coletor, o pólo negativo, enquanto a base é quem controla o estado do transistor, que como vimos, pode estar ligado ou desligado. Veja como esses três componentes são agrupados num transistor moderno:

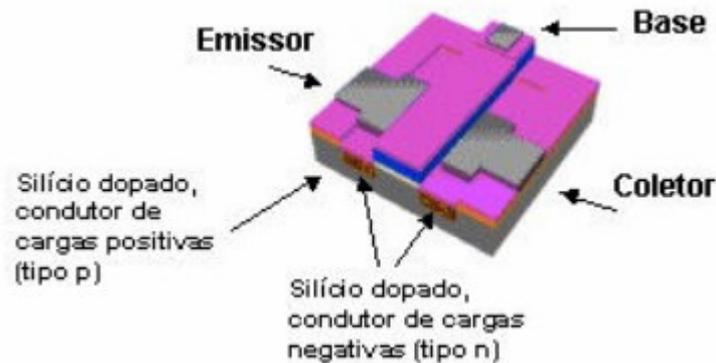


FIGURA 7 – Transistor moderno

Quando o transistor está desligado, não existe carga elétrica na base, por isso, não existe corrente elétrica entre o emissor e o coletor. Quando é aplicada uma certa tensão na base, o circuito é fechado e é estabelecida a corrente entre o emissor e o receptor. Cada transistor funciona como uma espécie de interruptor, que pode estar ligado ou desligado, como uma torneira que pode estar aberta ou fechada, ou mesmo como uma válvula. A diferença é que o transistor não tem partes móveis como uma torneira e é muito menor, mais barato, mais durável e muito mais rápido que uma válvula.

A mudança de estado de um transistor é feita através de uma corrente elétrica. Cada mudança de estado pode então comandar a mudança de estado de vários outros transistores ligados ao primeiro, permitindo o processamento de dados. Num transistor essa mudança de estado pode ser feita bilhões de vezes por segundo, porém, a cada mudança de estado é consumida uma certa quantidade de eletricidade, que é transformada em calor. É por isso que quanto mais rápidos tornam-se os processadores, mais eles se aquecem e mais energia consomem.

4. TIPOS DE TRANSISTORES

4.1 TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO - TBJ

O Transistor bipolar de junção (TBJ) foi o primeiro tipo de transistor a ser produzido em larga escala. A abreviação TBJ. Transistor bipolar de junção (em inglês, BJT – bipolar junction transistor), é normalmente aplicada a esse dispositivo de três terminais. O termo bipolar vem do fato de que lacunas e elétrons participam

do processo de injeção no material com polarização oposta. Se apenas um portador é empregado (elétron ou lacuna), o dispositivo é considerado unipolar, como o diodo Schottky.

O transistor é montado justapondo-se uma camada P, uma N e outra P, criando-se um transistor do tipo PNP. O transistor do tipo NPN é obtido de modo similar. A camada do centro é denominada base, e as outras duas são o emissor e o coletor. No símbolo do componente, o emissor é indicado por uma seta, que aponta para dentro do transistor se o componente for PNP, ou para fora se for NPN.

4.1.1 OPERAÇÃO DO TRANSISTOR TBJ

A operação básica do transistor agora será descrita utilizando-se o transistor pnp da Figura 2.3 (a). Na figura 3.1, o transistor pnp foi redesenhado sem a polarização base-coletor. A região de depleção teve a largura reduzida devido a tensão aplicada resultando em um fluxo denso de portadores majoritários do material do tipo p para o material do tipo n.

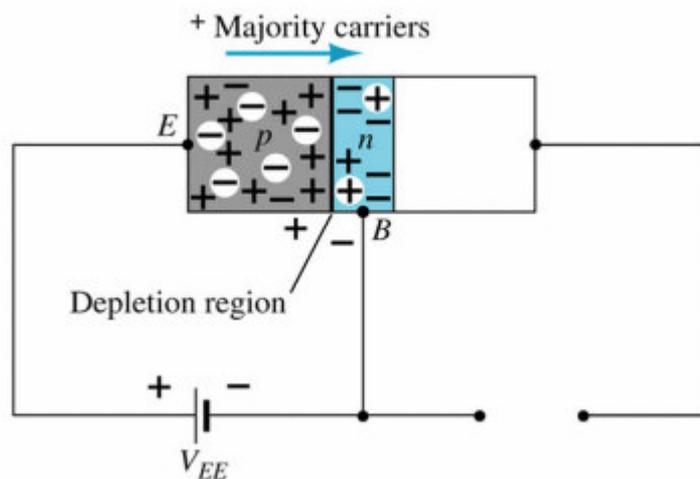


FIGURA 8 – Junção polarizada diretamente para pnp.

Removeremos agora a polarização base-emissor do transistor pnp da figura 6(a), com mostrado na Figura 9. Note que o diodo coletor-base está polarizado reversamente, portanto o fluxo de portadores majoritários é zero, o que resulta em apenas um fluxo de portadores minoritários como mostra a Figura 9.

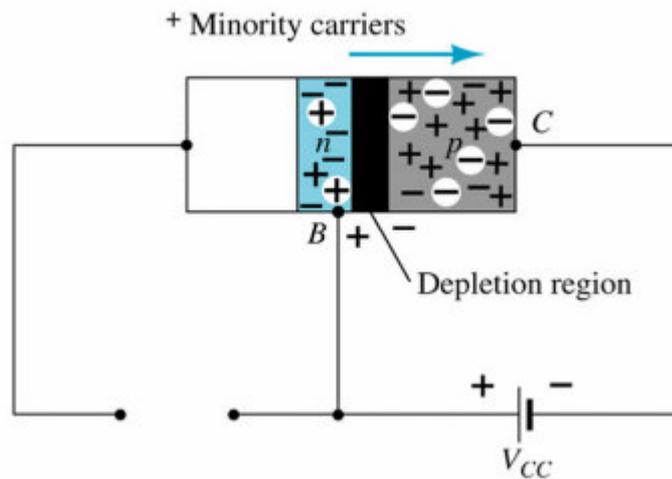


FIGURA 9 – Junção reversamente polarizada de um transistor pnp

Na Figura 10, os dois potenciais de polarização foram aplicados a um transistor pnp, com o fluxo de portadores majoritários e minoritários resultante indicado. Observe na Figura 10 a largura das regiões de depleção indicando claramente qual junção está polarizada diretamente e qual está polarizada reversamente. Como indica a Figura 10, muitos portadores majoritários vão se difundir no material do tipo n através da junção p-n polarizada diretamente. A questão é, então, se esses portadores contribuirão diretamente para a corrente de base I_b ou se passarão diretamente para o material do tipo p. Como o material do tipo n interno é muito fino e tem baixa condutividade, um número muito baixo de tais portadores seguirá esse caminho de alta resistência para o terminal da base. O valor da corrente de fase é da ordem de microampères. A maior parte desses portadores majoritários entrará através da junção polarizada reversamente no material do tipo p conectado ao terminal do coletor como indica a Figura 10. O motivo da relativa facilidade com que portadores majoritários podem atravessar a junção polarizada reversamente pode ser facilmente compreendida se considerarmos que para o diodo polarizado reversamente os portadores majoritários serão como portadores minoritários no material do tipo n.

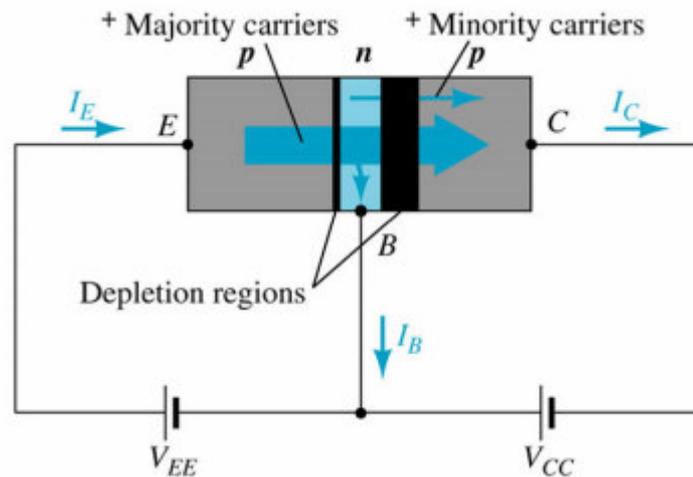


FIGURA 10 – Fluxo de portadores majoritários e minoritários de um transistor pnp.

4.2 TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO – FET

O transistor de efeito de campo (FET, Field-effect transistor) é um dispositivo de três terminais utilizado em várias aplicações que em muito se assemelham às funções do transistor TBJ descritas anteriormente. Embora existam diferenças importantes entre os dois tipos de dispositivos, existem também muitas semelhanças.

A principal diferença entre os dois tipos de transistores é fato de o TBJ ser um dispositivo controlado por corrente, enquanto o FET é um dispositivo controlado por tensão.

Assim como há transistores bipolares npn e pnp, também há transistores de efeito de campo de canal n e de canal p. No entanto, é importante termos em mente que o TBJ é um dispositivo bipolar – o prefixo bi- revela que o nível de condução é função de dois portadores de carga, elétrons e lacunas. O FET é um dispositivo unipolar que depende unicamente da condução de elétrons (canal n) ou de lacunas (canal p).

O termo efeito de campo merece uma explicação. É conhecida a capacidade de um ímã permanente de atrair limalhas de ferro sem a necessidade de contato. O campo magnético do ímã permanente envolve as limalhas e as atrai com pouco esforço por meio das linhas de fluxo magnéticas. Para o FET, é estabelecido um campo elétrico pelas cargas presentes que controlarão o caminho de condução do

circuito de saída sem a necessidade de um contato entre as quantidades controladoras e controladas.

Uma das principais características do FET é sua alta impedância de entrada. Com valores que variam de um a várias centenas de mega-ohms, sua impedância de entrada é bem maior do que a de configurações de transistores TBJ, uma característica muito importante em projetos de sistemas de amplificação linear. Por outro lado, o transistor TBJ tem sensibilidade muito maior às variações do sinal aplicado. Em outras palavras, a variação da corrente de saída é geralmente maior para os TBJs do que para os FETs para a mesma variação da tensão aplicada. Por essa razão, os ganhos de tensão dos amplificadores TBJ são geralmente maiores do que aqueles dos amplificadores com FET. Em geral, os FETs são mais estáveis, em termos de temperatura, do que os TBJs e normalmente apresentam menor tamanho, o que os torna particularmente úteis na construção de chips de circuitos integrados (CIs). No entanto, as características de construção de alguns FETs podem torná-los mais sensíveis ao manuseio do que os TBJs.

4.2.1 TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO DE JUNÇÃO – JFET

O JFET é um dispositivo de três terminais, sendo que um deles controla a corrente entre os outros dois. Na figura 3.4 é mostrada a construção básica do JFET de canal n. Observe que a maior parte da estrutura é do material do tipo n que forma o canal entre as camadas imersas de material do tipo p. A parte superior do canal do tipo n está conectada por meio de um contato ôhmico ao terminal chamado dreno (D, drain), enquanto a extremidade inferior do mesmo material está ligada por meio de um contato ôhmico a um terminal chamado de fonte (S, source). Os dois materiais do tipo p estão conectados entre si e também ao terminal porta (G, gate). Em suma, portanto, o dreno e a fonte estão conectados aos extremos do canal do tipo n e a porta está conectada às duas camadas do material do tipo p.

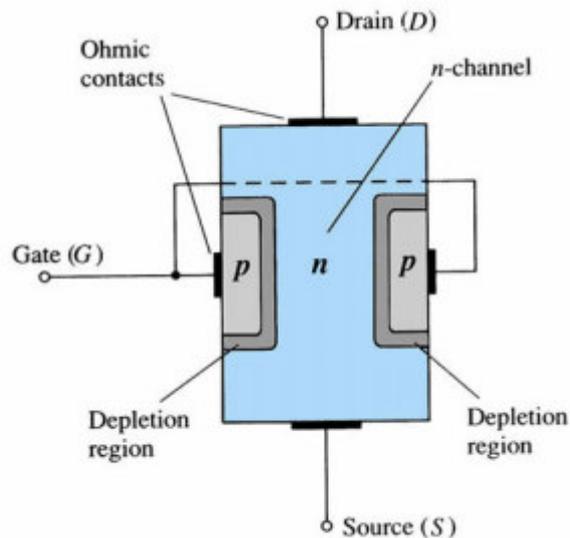


FIGURA 11 – Transistor de efeito de campo de junção (JFET)

4.2.2 MOSFET TIPO DEPLEÇÃO

O MOSFET representa o transistor de efeito de campo de metal-óxido-semicondutor e o termo depleção representa o modo de operação do transistor.

Na figura 3.5 é mostrada a construção básica do MOSFET tipo depleção de canal n. Uma camada grossa de material do tipo p é formada a partir de uma base de silício e é chamada de *substrato*. Ela representa a base sobre a qual o dispositivo será construído. Em alguns casos, o substrato está internamente conectado ao terminal de fonte. No entanto, muitos dispositivos discretos oferecem um terminal adicional, denominado SS, resultando em um dispositivo com quatro terminais, como o que é mostrado na figura 3.5. Os terminais de fonte e dreno são conectados por meio de contatos metálicos às regiões n-dopadas tipo n, as quais são ligadas entre si por um canal n, como mostra a figura. A porta também é conectada à superfície metálica de contato, mas permanece isolada do canal n por uma camada muito fina de dióxido de silício (SiO_2). O SiO_2 é um tipo particular de isolante, denominado dielétrico, que estabelece campos elétricos opostos (por isso o prefixo di-) quando submetido a um campo externo aplicado. O fato de a camada de SiO_2 representar uma camada isolante revela que não há conexão elétrica direta entre o terminal de porta e o canal de um MOSFET.

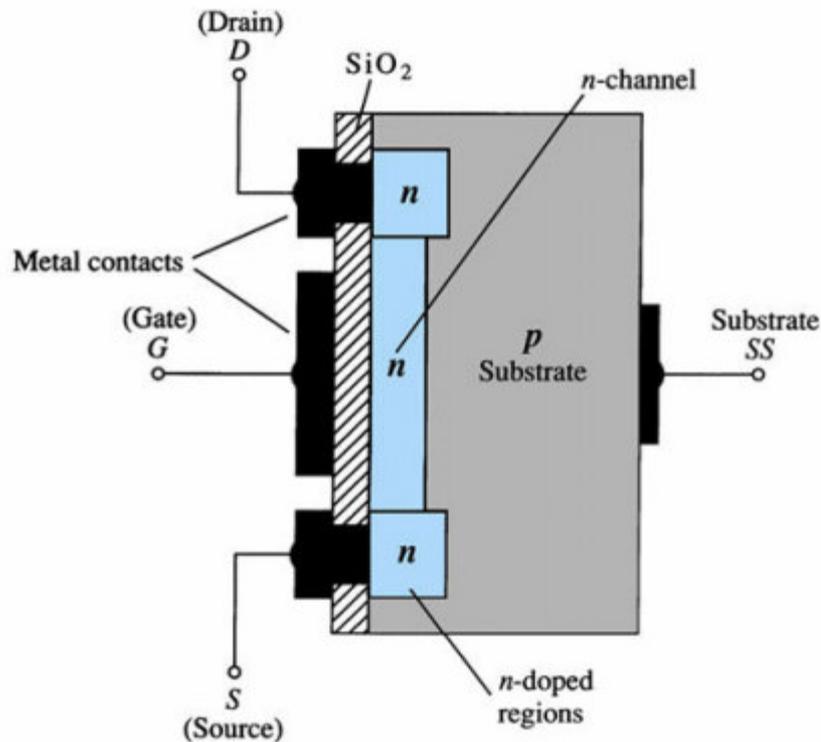


FIGURA 12 – MOSFET tipo depleção de canal n.

4.2.3 MOSFET TIPO INTENSIFICAÇÃO

Assim como o MOSFET tipo depleção, o termo intensificação representa o modo de operação do transistor.

Na Figura 3.6 é mostrada a construção básica de um MOSFET tipo intensificação de canal n. Uma camada grossa de material do tipo p é formada a partir de uma base de silício e é chamada de substrato. Como no MOSFET tipo depleção, às vezes o substrato está conectado internamente ao terminal de fonte e, em outras, temos um quarto terminal disponível para o controle do potencial do substrato. Os terminais de fonte e de dreno estão novamente conectados às regiões dopadas tipo n, por meio de contatos metálicos. No entanto, observe na Figura 3.6 que não existe um canal entre as duas regiões dopadas tipo n. Essa é a diferença principal que existe entre a construção do MOSFET tipo depleção e a do MOSFET tipo intensificação.

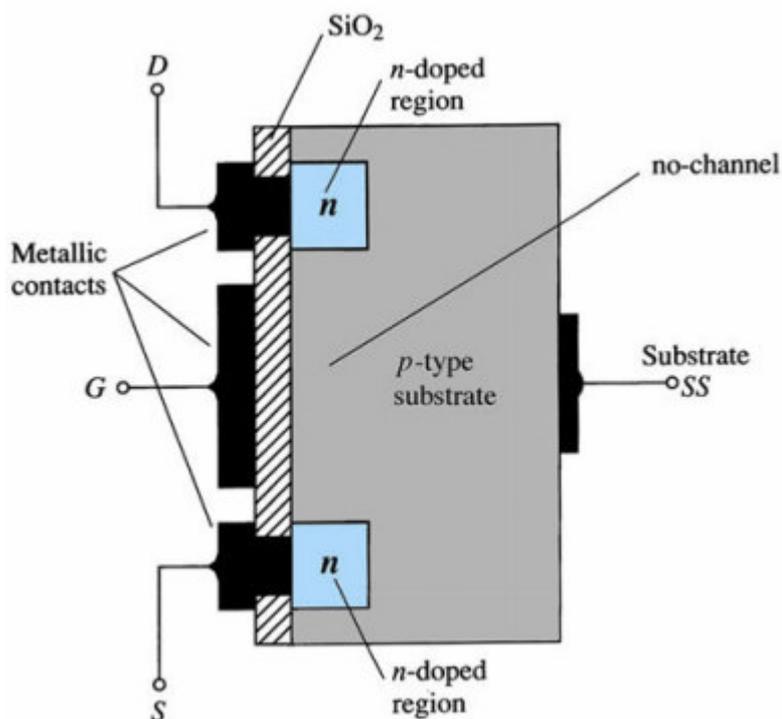


FIGURA 13 – MOSFET tipo intensificação de canal n.

4.3 CMOS

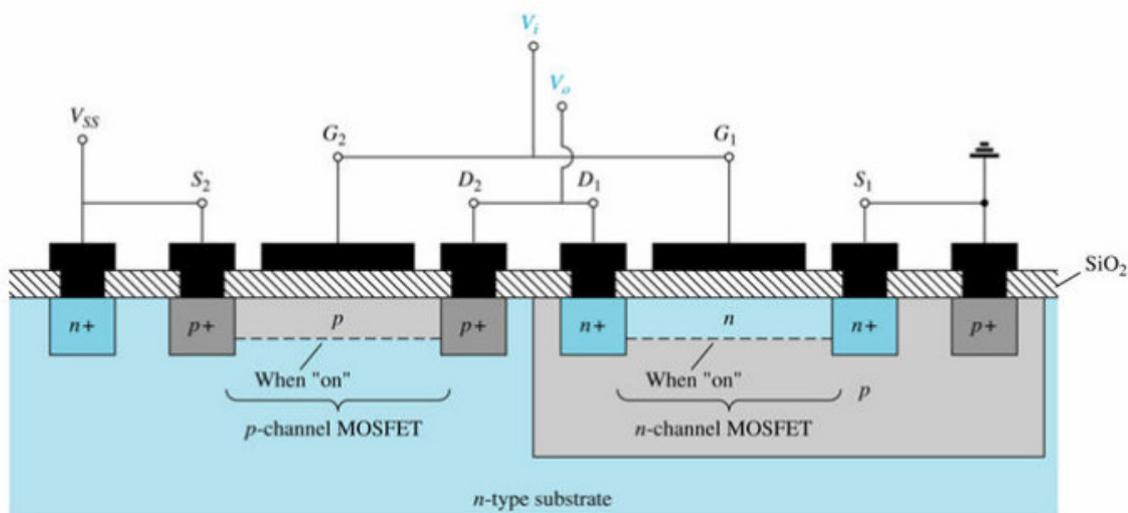


FIGURA 14 – Esquema interno de um CMOS

O CMOS (pronunciase "Cê-Mós") é uma sigla para complementary metal-oxide-semiconductor, i.e., semiconductor metalóxido complementar. É um tipo de circuito integrado onde se incluem elementos de lógica digital (portas lógicas,

flipflops, contadores, decodificadores, etc.), microprocessadores, microcontroladores, memórias RAM, etc. Esta tecnologia é complementar à tecnologia de fabricação de transistores MOSFET. Em particular na tecnologia CMOS o circuito é composto de um transistor MOSFET canal N e um transistor MOSFET canal P, tal como um inversor lógico CMOS.

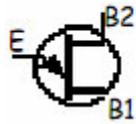
A principal vantagem dos circuitos integrados CMOS é o baixíssimo consumo de energia, embora não sejam capazes de operar tão velozmente quanto circuitos integrados de outras tecnologias. Por causa disso, são largamente utilizados em calculadoras, relógios digitais, e outros dispositivos alimentados por pequenas baterias. No jargão dos computadores, é comum usar o termo "CMOS" para se referir a uma determinada área de memória, onde ficam guardadas informações sobre os periféricos instalados e a configuração inicial do computador, além do relógio e calendário. Como a memória e o relógio precisam ser preservados mesmo com o computador desligado, são alimentados por uma pequena bateria de lítio, e somente a tecnologia CMOS pode produzir dispositivos com um consumo baixo o suficiente para este propósito. A memória e relógio estão embutidos em um circuito integrado fabricado com tecnologia CMOS, levando ao uso equivocado do nome.

Um sensor CMOS, em particular, é um tipo de sensor de imagem usado comumente em câmeras digitais feito na mesma tecnologia, e que tem sido utilizado como uma alternativa mais barata aos sensores do tipo CCD.

3.4 UJT

Os UJT (Unijunction Transistor) podem ser utilizados em osciladores de baixa frequência, disparadores, estabilizadores, geradores de sinais dente de serra e em sistemas temporizados.

3.4.1 SÍMBOLO



E – Emissor

B1 – Base 1

B2 – Base 2

3.4.2 CONSTITUIÇÃO INTERNA



FIGURA 14 - UJT

Basicamente o transistor de unijunção é constituído por uma barra de material semiconductor do tipo N (de alta resistividade) com terminais nos extremos. Tais contactos não constituem junções semicondutoras, e assim, entre B2 (base 2) e B1 (base 1) temos, na prática uma resistência, formada pelo material semiconductor N. O material do tipo P como material do tipo N formam a única junção PN semicondutora interna.

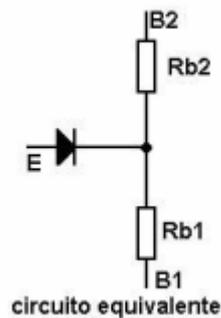


FIGURA 15 – Circuito equivalente de um UJT

Tudo se passa como se o bloco do tipo N fosse formado por duas simples resistências (R_{b2} e R_{b1}), em série, tendo ligado no seu ponto central um diodo

(terminal E ou Emissor). O terminal do emissor (E) está mais próximo da base 2 (B2).

3.5 FOTOTRANSISTOR

O fototransistor é mais um dispositivo que funciona baseado no fenômeno da fotocondutividade. Ele pode, ao mesmo tempo, detectar a incidência de luz e fornecer um ganho dentro de um único componente. Como o transistor convencional, o fototransistor é uma combinação de dois diodos de junção, porém, associado ao efeito transistor aparece o efeito fotoelétrico. Em geral, possui apenas dois terminais acessíveis, o coletor o emissor, sendo a base incluída apenas para eventual polarização ou controle elétrico. Como nas outras células fotocondutivas, a incidência de luz (fótons) provoca o surgimento de buracos na vizinhança da junção basecoletor. Esta tensão conduzirá os buracos para o emissor, enquanto os elétrons passam do emissor para a base. Isso provocará um aumento da corrente de base, o que por consequência implicará numa variação da corrente de coletor beta vezes maior (lembrando que, para I_b sendo a corrente da base e I_c a do coletor, temos a relação $I_c = \beta I_b$, onde β é um valor fornecido pelo fabricante, variando para cada transistor), sendo essa variação proporcional à intensidade da luz incidente.

Como a base está normalmente desconectada, a corrente que circula por ela dependerá apenas do fluxo luminoso incidente. Assim, na ausência de luz, a corrente de base será zero e o fototransistor estará cortado, resultando na tensão do coletor igual à tensão de polarização V_{cc} . Quando há luz incidindo, a tensão no coletor irá diminuir devido ao aumento da corrente.

O fototransistor possui diversas aplicações, sendo mais encontrado em aplicações on/off, onde a não linearidade do transistor não é um problema. A aplicação mais usual é a de um interruptor. Enquanto não há luz incidindo no fototransistor, não haverá uma corrente no emissor, e tensão de saída será zero, estando ele em corte. Com a incidência de luz, teremos uma corrente no emissor, provocando uma tensão igual a $I_e R_e$.

Podemos usar esse fotointerruptor junto à uma barra perfurada, para medição de movimentos lineares, ou junto à uma engrenagem, para medição angular.

3.6 TRANSISTOR DARLINGTON

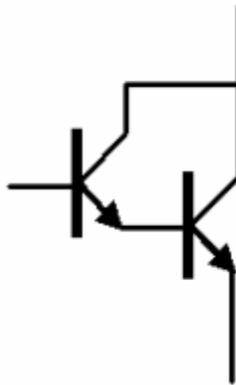


FIGURA 16 – Modelo de um Transistor Darlington

Na eletrônica, o Transistor Darlington é um dispositivo semicondutor que combina dois transistores bipolares no mesmo encapsulamento (às vezes chamado por Darlington).

A configuração (originalmente realizada com dois transistores separados) foi inventada pelo engenheiro Sidney Darlington dos Laboratórios Bell. A ideia de por dois ou três transistores em um mesmo chip foi patentada por ele, mas não a ideia de por um número arbitrário de transistores, o que originaria o conceito moderno de circuitos integrados.

Esta configuração serve para que o dispositivo seja capaz de proporcionar um grande ganho de corrente (h_{FE} ou parâmetro β do transistor) e, por estar todo integrado, requer menos espaço do que o dos transistores normais na mesma configuração. O Ganho total do Darlington é produto do ganho dos transistores individuais. Um dispositivo típico tem um ganho de corrente de 1000 ou superior. Comparado a um transistor comum, apresenta uma maior defasagem em altas frequências, por isso pode se tornar facilmente instável. A tensão base-emissora também é maior, consiste da soma das tensões bases-emissoras, e para transistores de silício é superior a 1.2V.

3.7 TRANSISTOR DE UNIJUNÇÃO PROGRAMÁVEL

O PUT (Programable Unijunction Transistor ou transistor de unijunção programável) é um dispositivo de quatro camadas, semelhante ao SCR. A diferença é que no PUT, o terminal de gatilho situase na região N, próxima ao anodo.

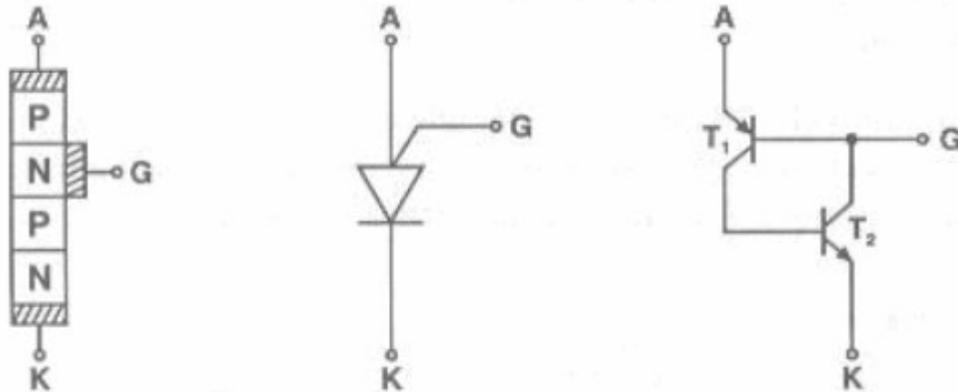


FIGURA 17 – Transistor de Unijunção Programável

Apesar de sua semelhança física com o SCR, o PUT é chamado transistor de unijunção, por ser utilizado em circuitos, onde poderiam ser utilizados UJT's convencionais. As características elétricas do PUT e do UJT são semelhantes, mas a tensão de disparo do PUT é programável. Além disso, o PUT é mais rápido e mais sensível do que o UJT. O PUT é chamado de programável, pois, enquanto no UJT o parâmetro h (divisor resistivo) é uma característica construtiva, no PUT ele é fixado por resistores externos.

4. CONCLUSÃO

Assim como diversos outros elementos de circuitos que utilizam a teoria de semicondutores, os transistores demonstram a grande aplicação destes tipos de materiais que se baseiam completamente na manipulação de semicondutores, utilizando materiais dopados negativamente ou positivamente (por elétrons livres ou por lacunas, respectivamente).

Conclui-se assim que os transistores, de grande importância nos diversos ramos de engenharia elétrica, possuem características materiais de semicondutores

que merecem ser estudadas de modo aprofundado, para assim, se entender melhor o funcionamento interno deste dispositivo, podendo assim, ser utilizado em circuitos sem maiores dificuldades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TRANSISTOR. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em:<

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Trans%C3%ADstor>> Acesso em: 1 jul. 2008.

BOYLESTAD, Robert L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

MALVINO, Albert Paul. Eletrônica. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2001. v.1.