

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharias da Mobilidade
Eletrônica Analógica - EMB5116



Eletrônica Analógica - Trabalho 2

Dr. Prof. Milton Evangelista de Oliveira Filhos

André Stein - 22201053
Danilo Machado - 22203056
Pedro Lauxen - 22201064

Joinville
2025

Sumário

1	Introdução	2
2	Transistores de Efeito de Campo	3
3	FET de junção(JFET)	3
3.1	Histórico do Transistor JFET	3
3.2	Princípio de Funcionamento	3
3.2.1	Fluxo de Corrente no Canal	4
3.2.2	Efeito da Polarização do Gate	5
3.2.3	Equação de Shockley	6
3.2.4	Regiões de Operação	6
3.3	Construção e Design do JFET	6
3.3.1	Estrutura Física	6
3.3.2	Considerações de Dopagem e Materiais	7
3.3.3	Geometria do Canal	7
3.3.3.1	Comprimento do Canal (L)	8
3.3.3.2	Largura do Canal (W)	8
3.3.3.3	Espessura e Perfil de Dopagem do Canal	8
3.3.3.4	Relação Largura/Comprimento (W/L)	8
3.4	Aplicações dos Transistores JFET	9
3.4.1	Amplificadores de Baixo Ruído	9
3.4.2	Circuitos de Entrada de Instrumentação	9
3.4.3	Fontes de Corrente Constante e Circuitos de Controle	9
3.4.4	Chaves Eletrônicas e Comutação Analógica	10
3.4.5	Circuitos de Alta Frequência e RF	10
3.4.6	Aplicações em Sensores e Circuitos de Precisão	10
3.4.7	Outras Aplicações Especiais	10
3.5	Comparação entre JFET e Transistor Bipolar (BJT)	11
4	FET de Metal-Óxido-Semicondutor(MOSFET)	11
4.1	Estrutura do MOSFET	13
4.2	Modos de operação do MOSFET	13
4.3	Circuitos práticos	14
5	Transistor Bipolar de Porta Isolada(IGBT)	16
5.1	Tiristor	16
5.2	Estrutura do IGBT	17
5.3	Modelagem matemática e física do IGBT	17
5.4	Design do componente	17
5.5	17
5.6	17
6	Conclusões	17

1 Introdução

Dispositivos transistores são utilizados comumente como meios de amplificar, ou chavear um circuito, de forma que o mesmo opere da maneira desejada no circuito. Dentre os transistores existentes os tipos mais comuns são os bipolares de junção, cujo são componentes formados pela junção de semicondutores, de forma que os agregando em conjuntos do tipo NPN ou PNP, forma-se um dispositivo que opera conforme é configurada sua polarização, porém assim como há a existência de componentes específicos dentro do mundo dos capacitores e resistores, dentro do mundo dos transistores existem os transistores de efeito de campo, que utilizam outra forma de controlar o fluxo de corrente por semicondutores. Neste trabalho serão descritos diferentes transistores de efeito de campo (FET) como, FET de junção (JFET), FET de Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET) e por último o Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT) determinando como funciona cada um desses componentes, assim como será feita a comparação entre os mesmos, e por fim a comparação direta com transistores bipolares de junção.

2 Transistores de Efeito de Campo

3 FET de junção(JFET)

O transistor de efeito de campo de junção, conhecido com JFET, é um dos dispositivos semicondutores mais importantes na eletrônica analógica. Ele opera a partir do controle do fluxo de portadores de carga em um canal semicondutor através de um campo elétrico aplicado a uma junção PN. Ao contrário do transistor bipolar (BJT), o JFET é controlado por tensão, o que confere ao dispositivo alta impedância de entrada e baixo consumo de energia, assim o JFET não carrega o circuito anterior, sendo ideal como estágio de entrada em amplificadores.

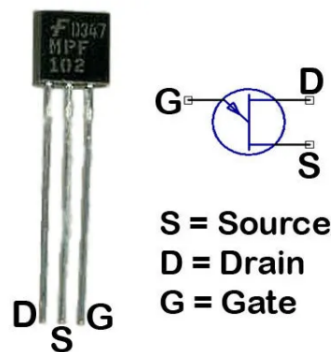


Figura 1: Transistor JFET

3.1 Histórico do Transistor JFET

Sua concepção teórica foi inicialmente proposta em 1928 por Julius Edgar Lilienfeld, que descreveu o princípio de controle de corrente por meio de um campo elétrico aplicado a um semicondutor. No entanto, na época, as limitações tecnológicas relacionadas à pureza dos materiais semicondutores e à ausência de técnicas avançadas de fabricação impediram a implementação prática do dispositivo.

Somente a partir da década de 1950, com o avanço dos processos de dopagem e crescimento controlado de cristais de silício e germânio, tornou-se possível fabricar JFETs funcionais. Empresas como a Bell Labs e a Fairchild Semiconductor tiveram papel fundamental no aperfeiçoamento da tecnologia. O JFET tornou-se, o primeiro tipo de transistor de efeito de campo fabricado, antecedendo os MOSFETs.

3.2 Princípio de Funcionamento

O JFET é um dispositivo semicondutor de três terminais: Gate (G), Source (S) e Drain (D). Seu funcionamento baseia-se no controle do fluxo de portadores de carga através de um canal semicondutor (de tipo N ou P), que é modulado pela tensão aplicada entre o gate e a fonte.

- **Gate (G) — Porta:** É o terminal responsável pelo controle do fluxo de corrente no canal. O gate é formado por uma junção PN polarizada reversamente em relação ao canal, o que faz com que praticamente não haja corrente fluindo pelo gate. A tensão aplicada entre o gate e a fonte (V_{GS}) cria um campo elétrico que modula a

largura efetiva do canal, controlando assim a corrente que circula entre o dreno e a fonte.

- **Source (S) — Fonte:** É o terminal por onde os portadores de carga entram no canal. Para um JFET de canal N, os portadores são elétrons; para um JFET de canal P, são lacunas. A tensão do gate é sempre medida em relação à fonte (V_{GS}), tornando o *source* o terminal de referência para o controle do dispositivo.
- **Drain (D) — Dreno:** É o terminal por onde os portadores de carga saem do canal após percorrê-lo. A corrente que flui do dreno para a fonte (I_D) depende da tensão V_{GS} aplicada ao gate e da tensão V_{DS} aplicada entre o dreno e a fonte. Quando V_{GS} se torna mais negativo (no caso de um JFET de canal N), a região de depleção se expande, estreitando o canal e reduzindo a corrente I_D , até o ponto de corte (pinch-off).

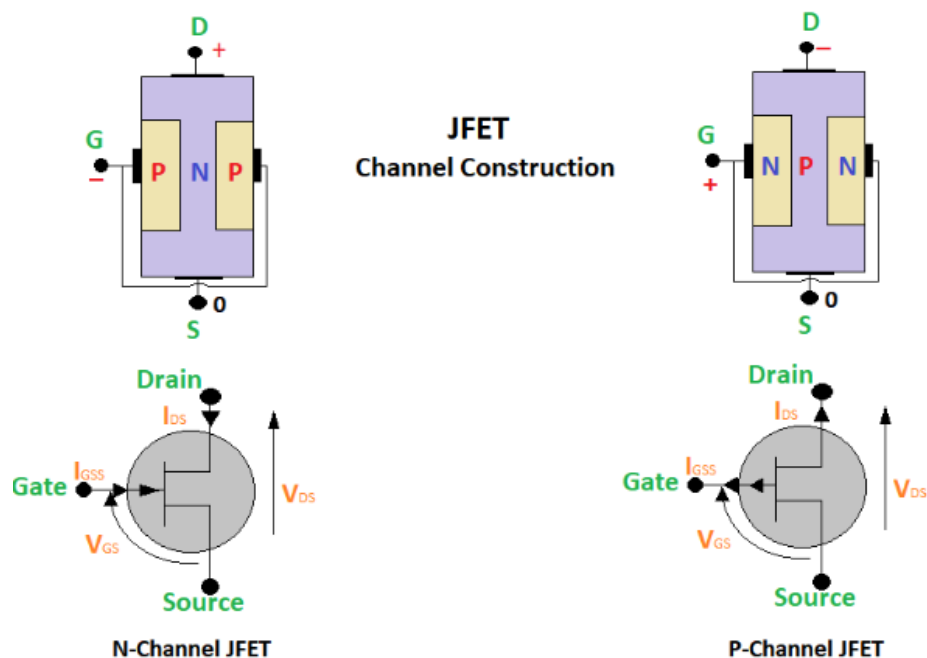


Figura 2: Representação de um JFET

3.2.1 Fluxo de Corrente no Canal

Quando uma tensão V_{DS} é aplicada entre o dreno e a fonte, uma corrente I_D começa a fluir através do canal, composta por elétrons (no JFET de canal N) ou lacunas (no JFET de canal P). A magnitude dessa corrente depende da largura efetiva do canal condutor.

O gate é uma junção PN polarizada reversamente. Isso significa que praticamente não há corrente de gate, pois a barreira de potencial impede o fluxo de portadores. Entretanto, a região de depleção da junção se expande, reduzindo a seção transversal do canal e, consequentemente, controlando a corrente I_D .

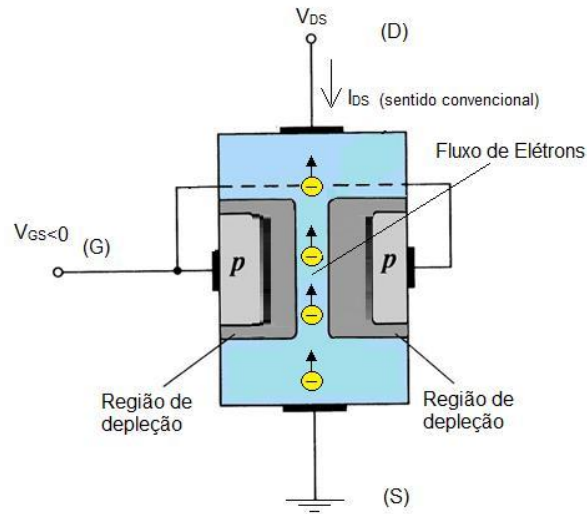


Figura 3: JFET de canal n reversamente polarizado

3.2.2 Efeito da Polarização do Gate

O gate é constituído por uma junção PN polarizada reversamente em relação ao canal. Nessa condição, praticamente não há corrente fluindo pelo gate, pois a barreira de potencial da junção impede o movimento de portadores de carga. Apesar disso, a polarização reversa provoca o alargamento da região de depleção, que se estende lateralmente a partir das junções PN em direção ao interior do canal.

À medida que a tensão V_{GS} (tensão entre gate e source) se torna mais negativa no caso de um JFET de canal N, a região de depleção se expande, reduzindo a largura efetiva do canal condutor. Com a diminuição dessa seção transversal, a resistência do canal aumenta, resultando em uma diminuição da corrente I_D . Esse mecanismo de controle é o que caracteriza o funcionamento do JFET como um dispositivo de efeito de campo, o campo elétrico gerado pela tensão no gate modula a condutância do canal.

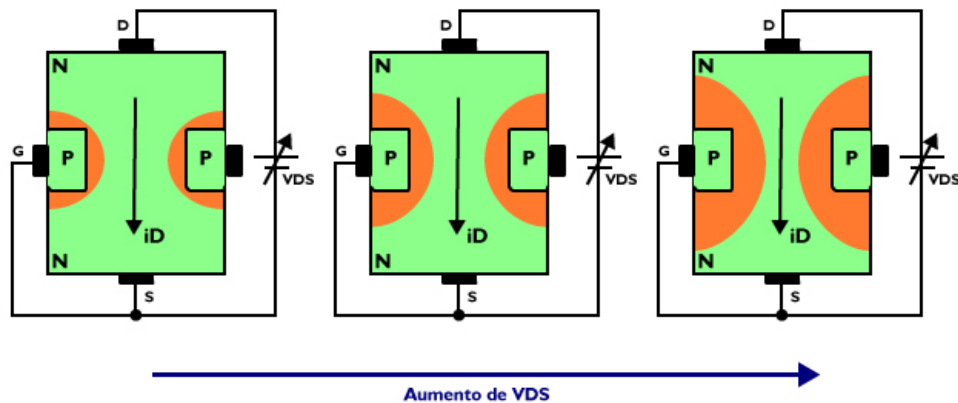


Figura 4: Representação da região de depleção

3.2.3 Equação de Shockley

A característica fundamental do JFET é o controle da corrente do canal por meio do campo elétrico estabelecido pela tensão V_{GS} . Para um JFET de canal N:

- Quando $V_{GS} = 0$, o canal apresenta sua máxima condutividade, e a corrente I_D atinge o valor máximo I_{DSS} .
- À medida que V_{GS} torna-se negativo, as regiões de depleção em torno do gate aumentam, estreitando o canal e reduzindo I_D .
- Quando V_{GS} atinge a tensão de corte V_P , o canal é completamente bloqueado, e $I_D \approx 0$.

Esse comportamento é representado pela Equação de Shockley:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

3.2.4 Regiões de Operação

Para o transistor JFET pode-se distinguir três regiões principais de operação:

1. **Região ôhmica (ou linear):** Quando V_{DS} é pequeno, a corrente I_D é aproximadamente proporcional à tensão V_{DS} , obedecendo uma relação quase linear. O dispositivo atua como um resistor controlado por tensão, e o canal permanece totalmente aberto.
2. **Região de saturação (ou ativa):** À medida que V_{DS} aumenta, a tensão no dreno se torna mais positiva em relação ao gate, fazendo com que a região de depleção se expanda mais próxima ao dreno do que ao source. Em um ponto específico, conhecido como tensão de estrangulamento ou pinch-off (V_P), as regiões de depleção provenientes das laterais do canal se encontram, estrangulando-o. A partir desse ponto, o aumento de V_{DS} não causa um aumento significativo em I_D , e a corrente se torna praticamente constante. O JFET opera, então, como uma fonte de corrente controlada por tensão.
3. **Região de corte:** Quando V_{GS} é suficientemente negativo (em módulo igual ou superior a V_P), o canal é completamente bloqueado pela expansão das regiões de depleção, impedindo o fluxo de corrente. Nessa condição, I_D é aproximadamente 0.

3.3 Construção e Design do JFET

3.3.1 Estrutura Física

O JFET é construído a partir de um cristal semiconductor (geralmente silício) no qual se define um canal condutor de tipo N ou tipo P. O canal é cercado por regiões de dopagem oposta, que formam junções PN com o canal, conhecidas como regiões de gate. Como pode ser notado na figura 3.

Características da estrutura física:

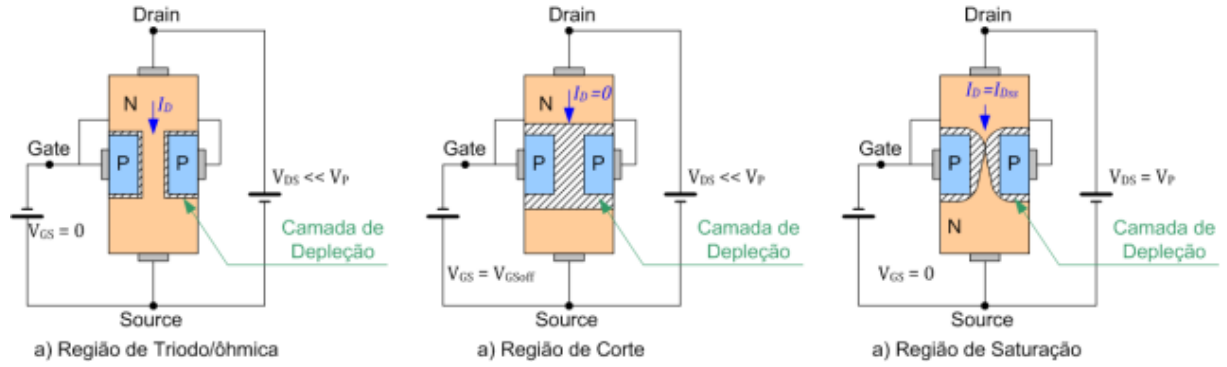


Figura 5: Representação de cada região

- **Canal semiconductor:** É levemente dopado para permitir controle eficaz da corrente, mantendo o valor de I_{DSS} dentro das especificações. O canal é formado longitudinalmente entre os terminais source e drain.
- **Junções Gate-Canal:** As regiões de dopagem do gate são fortemente dopadas para formar junções PN eficientes. A polarização reversa dessas junções controla a largura efetiva do canal.
- **Terminais Source e Drain:** Conectados nas extremidades do canal, permitem a entrada e saída de portadores de carga.
- **Substrato:** Pode estar conectado ao gate (common gate) ou flutuante, dependendo do design. Em alguns casos, o substrato é de tipo oposto ao canal e atua como um dissipador térmico e suporte mecânico.

3.3.2 Considerações de Dopagem e Materiais

O controle da dopagem é crítico no projeto de JFETs, pois determina parâmetros elétricos essenciais:

- Dopagem do canal: Uma dopagem mais leve aumenta a resistência do canal e permite maior controle da corrente pelo gate, mas reduz I_{DSS} .
- Dopagem do gate: Alta dopagem assegura junções PN de baixa resistência e pequena capacitância reversa, fundamental para alta frequência.
- Material semiconductor: Silício é predominante, mas arseneto de gálio (GaAs) é usado em JFETs de RF devido à maior mobilidade de elétrons e menor ruído.

3.3.3 Geometria do Canal

A geometria do canal é um dos fatores mais críticos no projeto de um JFET, influenciando diretamente o comportamento elétrico, térmico e a linearidade do dispositivo. O canal é caracterizado principalmente pelo seu comprimento L , largura W e espessura t , além do perfil de dopagem.

A geometria do canal determina diretamente os parâmetros elétricos fundamentais, como I_{DSS} , V_P , g_m , linearidade, resposta em frequência e dissipação térmica. O projeto exige um equilíbrio cuidadoso entre largura, comprimento, espessura e dopagem para atender às especificações do circuito.

3.3.3.1 Comprimento do Canal (L)

O comprimento do canal, medido entre os terminais source e drain impactam:

- **Resistência do canal:** Um canal mais longo aumenta a resistência ôhmica $R_{DS(on)}$, reduzindo a corrente máxima I_{DSS} . A relação aproximada é $(R \propto L)/W$, considerando dopagem uniforme.
- **Linearidade em pequenos sinais:** Canais longos distribuem melhor o campo elétrico, reduzindo a distorção harmônica em amplificadores de baixa tensão.
- **Controle do pinch-off:** Comprimentos maiores tornam a transição entre a região ôhmica e a saturação mais suave, melhorando o controle da corrente.
- **Efeito de capacitâncias parasitas:** Canais longos podem aumentar a capacitância gate-drain C_{GD} , afetando a resposta em alta frequência.

3.3.3.2 Largura do Canal (W)

A largura do canal afeta:

- **Corrente máxima:** Quanto maior a largura, maior a área condutora disponível, portanto maior I_{DSS} .
- **Distribuição da densidade de corrente:** Canais muito estreitos podem concentrar a densidade de corrente, gerando aquecimento localizado e instabilidade térmica.
- **Sensibilidade à tensão do gate:** Larguras menores tornam o dispositivo mais sensível a variações de V_{GS} , pois a região de depleção ocupa uma fração maior do canal.

3.3.3.3 Espessura e Perfil de Dopagem do Canal

A espessura efetiva do canal e o perfil de dopagem influenciam:

- **Resistência de condução:** Canais mais finos ou menos dopados aumentam a resistência e reduzem I_{DSS} , mas melhoram a linearidade.
- **Uniformidade do campo elétrico:** Perfis de dopagem gradientes permitem uma variação controlada da resistência ao longo do canal, suavizando o efeito de pinch-off.
- **Ruído térmico:** Canais finos geram menos corrente de ruído, essencial em aplicações de instrumentação de precisão.

3.3.3.4 Relação Largura/Comprimento (W/L)

A razão W/L é frequentemente usada como parâmetro de projeto:

- **Alta W/L :** Favorece alta corrente I_{DSS} e menor resistência do canal, mas pode aumentar capacitâncias parasitas e reduzir linearidade.

- **Baixa W/L :** Melhora linearidade e controle de corrente, mas limita I_{DSS} e aumenta a resistência.

Essas técnicas tornam os JFETs adequados para instrumentação, áudio de alta fidelidade e circuitos analógicos de precisão.

3.4 Aplicações dos Transistores JFET

3.4.1 Amplificadores de Baixo Ruído

Devido à sua alta impedância de entrada e baixo ruído térmico, os JFETs são amplamente usados em:

- **Pré-amplificadores de microfone:** Mantêm a integridade do sinal e minimizam a interferência de ruído da fonte de sinal.
- **Amplificadores de instrumentação:** Em sistemas de medição de sinais muito pequenos, como sensores de temperatura ou tensão de strain gauge.
- **Amplificadores de áudio de alta fidelidade:** Garantem mínima distorção e preservação do espectro sonoro.

3.4.2 Circuitos de Entrada de Instrumentação

A elevada impedância de entrada torna o JFET ideal para circuitos onde a carga do sinal deve ser mínima:

- **Osciloscópios e voltímetros de alta impedância:** Evitam carregamento do circuito sob teste.
- **Buffers (source followers):** Isolam estágios sensíveis, mantendo a amplitude e forma do sinal.
- **Amplificadores diferenciais de precisão:** Reduzem o erro devido a correntes de polarização.

3.4.3 Fontes de Corrente Constante e Circuitos de Controle

O JFET, em região de saturação, atua como uma fonte de corrente controlada por tensão:

- **Fontes de corrente constantes:** Usadas em circuitos de polarização de transistores bipolares ou MOSFETs, proporcionando estabilidade térmica.
- **Circuitos de referência de corrente:** Mantêm corrente estável independentemente da tensão de alimentação.
- **Cascodes e espelhos de corrente:** Melhoram a faixa de ganho e a linearidade.

3.4.4 Chaves Eletrônicas e Comutação Analógica

JFETs são excelentes para chaves analógicas devido à baixa resistência de canal em região ôhmica:

- **Multiplexadores analógicos:** Seleccionam sinais sem degradar a amplitude ou forma de onda.
- **Chaves de áudio de alta fidelidade:** Evitam distorção em equipamentos de som profissional.
- **Amostragem de sinais:** Aplicações em conversores A/D e circuitos de medição.

3.4.5 Circuitos de Alta Frequência e RF

Apesar de não serem tão rápidos quanto MOSFETs de efeito de campo de óxido, JFETs são usados em RF devido à baixa capacitância de entrada:

- **Osciladores de RF:** Estabilidade de frequência e baixo ruído.
- **Amplificadores de RF de baixo nível:** Como primeiros estágios em receptores de rádio e TV.
- **Misturadores e moduladores:** Precisão em circuitos de comunicação analógica.

3.4.6 Aplicações em Sensores e Circuitos de Precisão

O JFET é ideal em sensores devido à sua estabilidade e baixa corrente de fuga:

- **Sensores de capacitância ou piezoelétricos:** O JFET não descarrega o sinal detectado.
- **Medidores de carga ou fotodiodos:** Minimiza corrente de polarização de entrada.
- **Amplificadores de instrumentação médica:** Eletrocardiogramas (ECG) e eletroencefalogramas (EEG).

3.4.7 Outras Aplicações Especiais

- **Circuitos de proteção:** Limitadores de corrente em linhas sensíveis.
- **Modulação de sinais:** Em moduladores analógicos de amplitude ou frequência.
- **Pré-amplificadores de imagem e vídeo:** Onde baixa corrente de entrada e alta linearidade são essenciais.
- **Amplificadores operacionais JFET:** Amplificadores integrados com alto ganho e baixa corrente de bias.

3.5 Comparação entre JFET e Transistor Bipolar (BJT)

A seguir, são apresentadas as principais diferenças entre o JFET e o BJT, destacando aspectos de controle, impedância, ruído, estabilidade e faixa de frequência.

- **Tipo de Controle:**

- JFET: Controlado por tensão (V_{GS}), resultando em menor consumo de energia e mínima corrente de entrada.
- BJT: Controlado por corrente (I_B), exigindo corrente de base para operar.

- **Impedância de Entrada:**

- JFET: Impedância de entrada muito alta, da ordem de megaohms ou superior, evitando carregamento do circuito anterior.
- BJT: Impedância de entrada relativamente baixa, limitada pela base, o que pode afetar estágios sensíveis de sinal.

- **Ruído e Estabilidade:**

- JFET: Apresenta menor ruído de entrada e maior estabilidade térmica, ideal para instrumentação e aplicações de precisão.
- BJT: Maior ganho de corrente, mas sensível à variação térmica; preferido em estágios de potência e amplificação de sinais maiores.

- **Faixa de Frequência:**

- JFET: Pode operar em frequências elevadas, adequado para circuitos de RF de baixo nível.
- BJT: Mais eficiente em altas potências de RF, devido à maior mobilidade de portadores e capacidade de conduzir correntes mais elevadas.

4 FET de Metal-Óxido-Semicondutor(MOSFET)

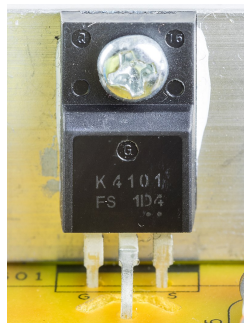


Figura 6: MOSFET de potência.

O transistor MOSFET (acrônimo de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo semicondutor de óxido metálico — TECMOS), é o tipo mais comum de transístores de efeito de campo em circuitos tanto digitais quanto

analógicos. Seu princípio básico foi proposto pela primeira vez por Julius Edgar Lilienfeld, em 1925.

Os transistores de efeito de campo diferentemente dos transistores bipolares comuns são típicos amplificadores de tensão e não de corrente. Enquanto a corrente de coletor de um transistor comum é função da corrente de base, num transistor de efeito de campo, a corrente de dreno é função da tensão de comporta, conforme indica a figura 7.

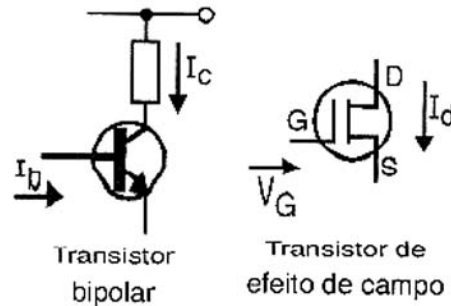


Figura 7: comparação entre transistor bipolar e transistor de efeito de campo.

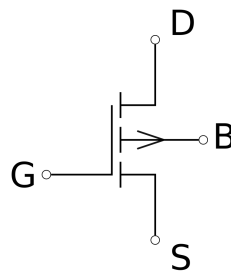


Figura 8: Símbolo de esquema elétrico de um MOSFET.

Uma fina película de óxido de metal isola a região de comporta da região do canal que liga o dreno à fonte. Isso faz com que a impedância de entrada do MOSFET seja muito alta, o que significa que ele consome muito pouca corrente da fonte de sinal que está dirigindo a comporta. Essa característica torna os MOSFETs ideais para circuitos de alta impedância, como amplificadores de áudio e circuitos digitais. Além disso, os MOSFETs são capazes de operar em frequências muito altas, tornando-os adequados para aplicações em rádio frequência (RF) e micro-ondas.

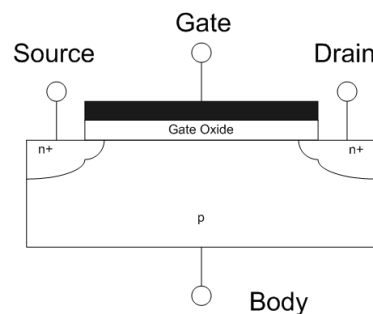


Figura 9: Símbolo de esquema elétrico de um MOSFET.

A palavra "metal" no nome é um anacronismo vindo dos primeiros chips, onde as portas (gates) eram de metal. Os chips modernos usam comportas de polissilício, mas

ainda são chamados de MOSFETs. Um MOSFET é composto de um canal de material semicondutor de tipo N ou de tipo P e é chamado respectivamente de NMOS ou PMOS. Geralmente o semicondutor escolhido é o silício, mas alguns fabricantes, principalmente a IBM, começaram a usar uma mistura de silício e germânio (SiGe) nos canais dos MOSFETs. Infelizmente muitos semicondutores com melhores propriedades elétricas do que o silício, tais como o arsenieto de gálio, não formam bons óxidos nas comportas e portanto não são adequados para os MOSFETs. O IGFET é um termo relacionado que significa Insulated-Gate Field Effect Transistor, e é quase sinônimo de MOSFET, embora ele possa se referir a um FET com comporta isolada por um isolante não óxido.

O terminal de comporta é uma camada de polissilício (silício policristalino) colocada sobre o canal, mas separada do canal por uma fina camada de dióxido de silício isolante. Quando uma tensão é aplicada entre os terminais comporta (gate) e fonte (source), o campo elétrico gerado penetra através do óxido e cria uma espécie de "canal invertido" no canal original abaixo dele. O canal invertido é do mesmo tipo P ou tipo N, como o da fonte ou do dreno, assim, ele cria um condutor através do qual a corrente elétrica possa passar. Variando-se a tensão entre a comporta e a fonte se modula a condutividade dessa camada e torna possível se controlar o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Existem também modelos de Amplificador operacional baseados na tecnologia FET/MOSFET, muito úteis e com grande utilização na indústria eletrônica.

4.1 Estrutura do MOSFET

O MOSFET é um dispositivo de quatro terminais: dreno (drain), fonte (source), porta (gate) e substrato (bulk). Em dispositivos discretos o substrato costuma estar ligado à fonte, de modo que apenas três terminais são acessíveis. Dois parâmetros geométricos importantes são a largura do canal W e o comprimento do canal L . A espessura da camada de óxido da porta, t_{ox} , determina a capacitância por unidade de área C_{ox} ; em geral, quanto menor t_{ox} , maior C_{ox} e maior a influência da tensão de porta sobre o canal.

4.2 Modos de operação do MOSFET

A operação do MOSFET (assumindo NMOS) pode ser dividida em três regimes principais:

- **Região de corte:** quando $V_{GS} < V_{th}$. O canal não está formado e o transistor permanece desligado (apenas corrente de fuga).
- **Região linear (triode):** quando $V_{GS} > V_{th}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$. Nesta região o canal está formado por toda a extensão entre dreno e fonte e o MOSFET se comporta aproximadamente como um resistor controlado por V_{GS} . Uma expressão aproximada da corrente de dreno é

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right),$$

onde μ_n é a mobilidade dos portadores e C_{ox} a capacitância do óxido por unidade de área.

- **Região de saturação:** quando $V_{GS} > V_{th}$ e $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{th}$. O canal sofre "pinch-off" próximo ao dreno e a corrente de dreno aproxima-se de

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2.$$

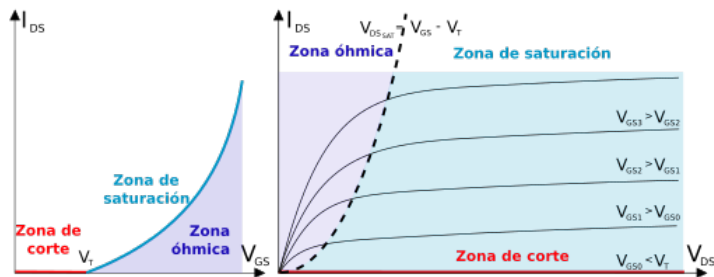


Figura 10: Diagrama das regiões de operação do MOSFET.

Em circuitos digitais, os MOSFETs são usadas preferencialmente as regiões de corte e região ôhmica. Em circuitos analógicos é usado o transistor em modo de saturação, o que costuma fazer confusão com o modo de saturação dos transístores bipolares de junção que são substancialmente diferentes. A saturação nos MOS é análoga a Zona Ativa Direta dos TBJ.

4.3 Circuitos práticos

- **AMPLIFICADOR DE BANDA LARGA:** O circuito mostrado na figura 11 pode amplificar sinais que vão desde a faixa de áudio até 10 MHz.

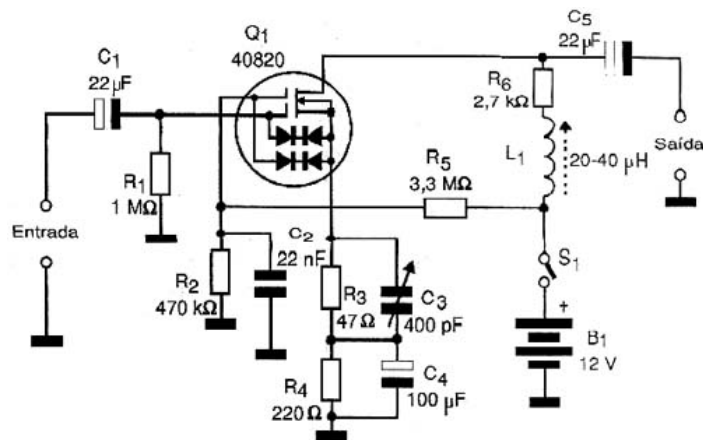


Figura 11: Circuito do amplificador de banda larga.

A faixa muito larga de frequências de operação e sua impedância de entrada da ordem de 1 M Ω o torna ideal como etapa de entrada para instrumentos tais como frequencímetros ou mesmo osciloscópio.

A intensidade máxima do sinal de entrada (a partir do qual temos a saturação) é da ordem de 100 mVrms.

A amplitude máxima do sinal de saída é de 1 Vrms.

O indutor que serve de carga para a saída é ajustado para se obter com o trimmer o ganho máximo do circuito na frequência de 10 MHz, mas dependendo da aplicação estes componentes podem ser alterados.

Observe que uma das portas tem uma polarização fixa dada por R2 e R3 de modo a levar o componente a uma corrente de repouso ideal para a aplicação.

- **SEGUIDOR DE FONTE:** Um seguidor de fonte é um amplificador que tem um ganho de tensão unitário, porém uma elevadíssima impedância de entrada e uma impedância muito baixa de saída. O circuito da figura 12 mostra uma aplicação deste tipo que pode ser considerada equivalente ao seguidor de tensão normalmente feito com amplificadores operacionais.

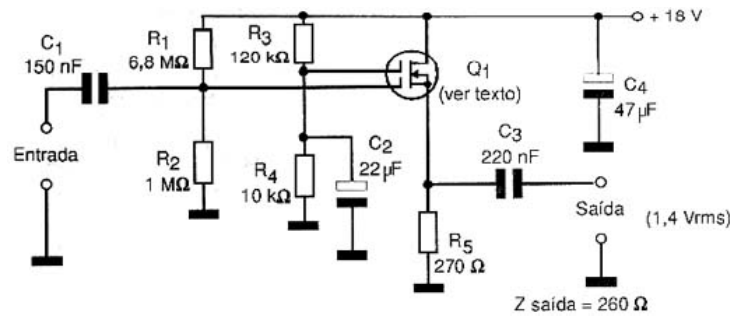


Figura 12: Circuito do seguidor de fonte.

Neste caso a amplitude máxima do sinal de entrada antes do qual se obtém a saturação é da ordem de 2 volts e a amplitude máxima do sinal de saída é da ordem de 1,5 Vrms.

Dentre as aplicações recomendadas para este circuito podemos citar o casamento de impedância de fontes de sinais de áudio como, por exemplo, microfones.

- **PROVADOR DE BOBINAS E CAPACITORES:** O circuito da figura 13 é uma ponte que serve tanto para medida de capacitâncias como indutâncias e faz uso de um transistor de efeito de campo MOS de canal duplo alimentado por uma tensão de 9 V.

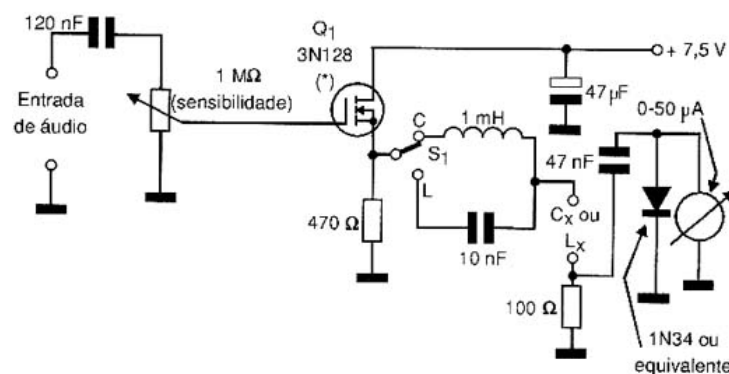


Figura 13: Circuito do provador de bobinas e capacitores.

O princípio de funcionamento é simples: aplica-se o sinal de um gerador de sinais na entrada, a frequência vai depender da ordem de grandeza da indutância ou da capacitância medida - normalmente ela estará entre 20 Hz e 20 kHz para medidas de capacitância entre 50 nF e 50 000 μF e indutâncias entre 5 mH e 6000 Hz com os valores de capacitância e indutância de referência usados.

- **ELETROSCÓPIO:** O circuito mostrado na figura 14 é de um simples eletroscópio eletrônico que pode ser usado com vantagem nas aulas de física substituindo o tradicional eletroscópio de folhas de ouro.

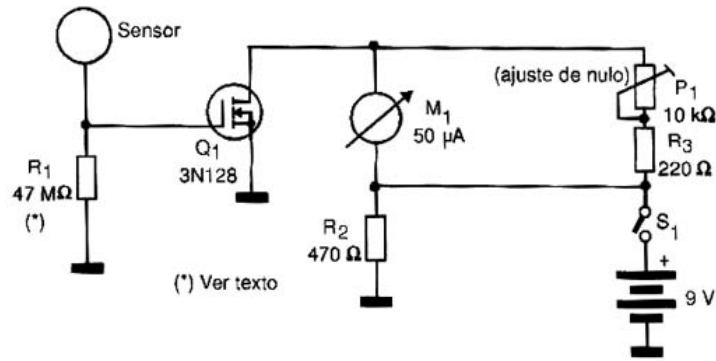


Figura 14: Circuito do eletroscópio.

O circuito é alimentado por uma bateria de 9 V e o eletrodo sensor pode ser uma pequena argola de fio descascado ou ainda uma esfera de metal.

Para testar atrite um pente ou caneta num pedaço de tecido e aproxime-o do sensor. A agulha do instrumento indicador deve oscilar fortemente.

5 Transistor Bipolar de Porta Isolada(IGBT)

O tipo de transistor IGBT, pode ser definido de maneira técnica como um transistor formado com 3 terminais formando uma espécie de chave eletrônica, tendo como principal objetivo combinar alta eficiência com comutação rápida. A sua semelhança com o tiristor pode causar certa confusão pois sua definição também inclui a chave tripla, porém a ação do tiristor é diferente no sentido de, permitir apenas a ação do transistor presente, na faixa de operação do tiristor.

5.1 Tiristor

O tiristor diferente do IGBT, é um componente constituído de camadas que formam uma junção PNPN constituindo 4 camadas de formação tornando assim sua composição uma espécie de junção entre transistores do tipo PNP e NPN, seus terminais possuem ânodo, cátodo, e uma porta que funciona como um interruptor, possuindo como modo de operação bloqueio reverso, direto e condução direta para controlar o fluxo de corrente no circuito. Suas aplicações são voltadas para sistemas de controle como controle de potência, motores e circuito de alarme.

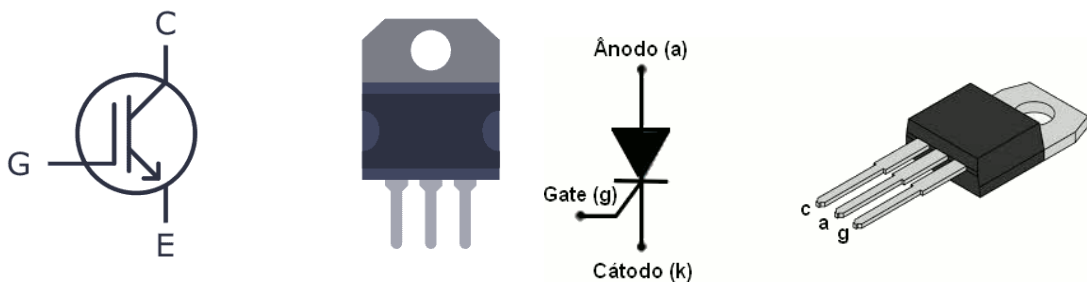


Figura 15: À esquerda: IGBT. À direita: Tiristor.

5.2 Estrutura do IGBT

A célula IGBT é construída semelhante ao MOSFET, porém a mudança está em que a parte n^+ é substituída por uma camada coletora p^+ desse modo forma um transistor PNP vertical, tal região coletora cria uma espécie de conexão do tipo Transistor Bipolar PNP com um MOSFET com a parte n^+ na superfície, juntando assim o "melhor" dos dois dispositivos formando uma estrutura NPNP.

5.3 Modelagem matemática e física do IGBT

5.4 Design do componente

5.5

5.6

6 Conclusões

Com este trabalho foi possível compreender de forma mais clara os tipos e funcionalidades dos resistores e capacitores em diferentes circuitos eletrônicos, abordando desde materiais de fabricação dos componentes a casos especiais de aplicações específicas. Com isso evidenciando que a escolha do tipo adequado de componente é parte fundamental na construção de qualquer tipo de circuito, dependendo diretamente das condições de operação do circuito, sendo necessário considerar a tolerância, dissipação de potência, tensão de trabalho, resistência interna do capacitor e estabilidade térmica necessária para cada caso.

Dessa forma, vemos que os resistores e capacitores não devem ser vistos apenas como elementos básicos em um esquema eletrônico, mas como peças-chave que definem o desempenho, a segurança e a confiabilidade de um projeto. Sua seleção adequada exige não apenas conhecimento técnico, mas também compreensão prática das condições reais de operação.