

7 TRANSISTORES ESPECIAIS

Até agora foi estudado os transistores bipolares, se baseiam em dois tipos de cargas: lacunas e elétrons, e são utilizados amplamente em circuitos lineares. No entanto existem aplicações nos quais os transistores unipolares com a sua alta impedância de entrada são uma alternativa melhor. Este tipo de transistor depende de um só tipo de carga, daí o nome unipolar. Há dois tipos básicos: os *transistores de efeito de campo de junção* (JFET - Junction Field Effect transistor) e os *transistores de efeito de campo de óxido metálico* (MOSFET).

7.1 JFET

Na Figura 7-1, é mostrada a estrutura e símbolo de um transistor de efeito de campo de junção ou simplesmente JFET.

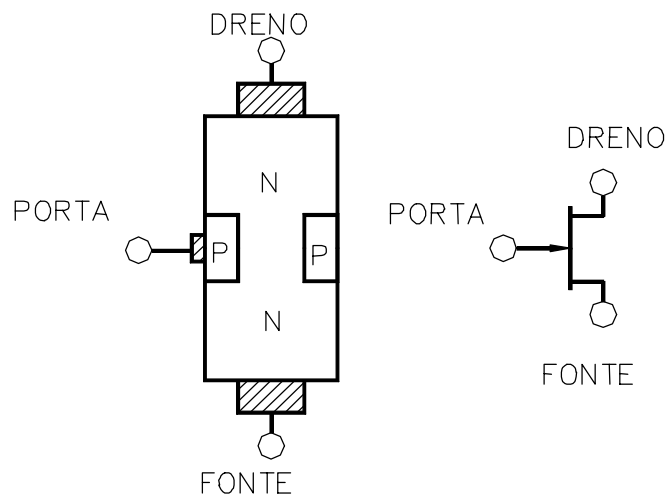


Figura 7-1

a condução se dá pela passagem de portadores de carga da fonte (S - Source) para o dreno (D), através do canal entre os elementos da porta (G - Gate).

O transistor pode ser um dispositivo com canal *n* (condução por elétrons) ou com canal *p* (condução por lacunas). Tudo que for dito sobre o dispositivo com canal *n* se aplica ao com canal *p* com sinais opostos de tensão e corrente.

POLARIZAÇÃO DE UM JFET

A Figura 7-2 mostra a polarização convencional de um JFET com canal *n*. Uma alimentação positiva V_{DD} é ligada entre o dreno e a fonte, estabelecendo um fluxo de corrente através do canal. Esta corrente também depende da largura do canal.

Uma ligação negativa V_{GG} é ligada entre a porta e a fonte. Com isto a porta fica com uma polarização reversa, circulando apenas uma corrente de fuga e, portanto, uma alta impedância entre a porta e a fonte. A polarização reversa cria camadas de depleção em volta das regiões *p* e

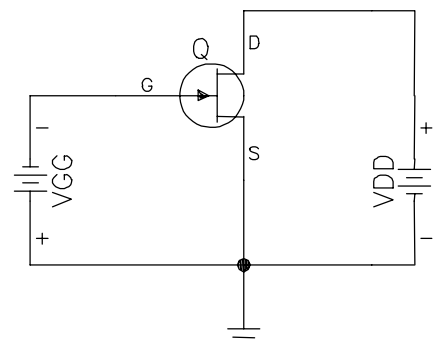


Figura 7-2

isto estreita o canal condutor (D-S). Quanto mais negativa a tensão V_{GG} , mais estreito torna-se o canal.

Para um dado V_{GG} , as camadas de depleção tocam-se e o canal condutor (D-S) desaparece. Neste caso, a corrente de dreno está cortada. A tensão V_{GG} que produz o corte é simbolizada por $V_{GS(Off)}$.

CURVA CARACTERÍSTICA DE DRENO

Para um valor constante de V_{GS} , o JFET age como um dispositivo resistivo linear (na região ôhmica) até atingir a condição de pinçamento ou estrangulamento. Acima da condição de estrangulamento e antes da ruptura por avalanche, a corrente de dreno permanece aproximadamente constante.

Os índices I_{DSS} referem-se a corrente do dreno para a fonte com a porta em curto ($V_{GS}=0V$). I_{DSS} é a corrente de dreno máxima que um JFET pode produzir.

Na Figura 7-3, é mostrado um exemplo de curva para um JFET. Quando o JFET está saturado (na região ôhmica), V_{DS} situa-se entre 0 e 4V, dependendo da reta de carga. A tensão de saturação mais alta (4V) é igual à intensidade da tensão de corte da porta-fonte ($V_{GS(Off)} = -4V$). Esta é uma propriedade inerente a todos os JFET's.

Para polarizar um transistor JFET é necessário saber a função do estágio, isto é, se o mesmo irá trabalhar como *amplificador* ou como *resistor controlado por tensão*. Como amplificador, a região de trabalho é o trecho da curva, na Figura 7-3, após a condição de pinçamento e à esquerda da região de tensão V_{DS} de ruptura. Se for como resistor controlado por tensão a região de trabalho é entre V_{DS} igual a zero e antes de atingir a condição de pinçamento.

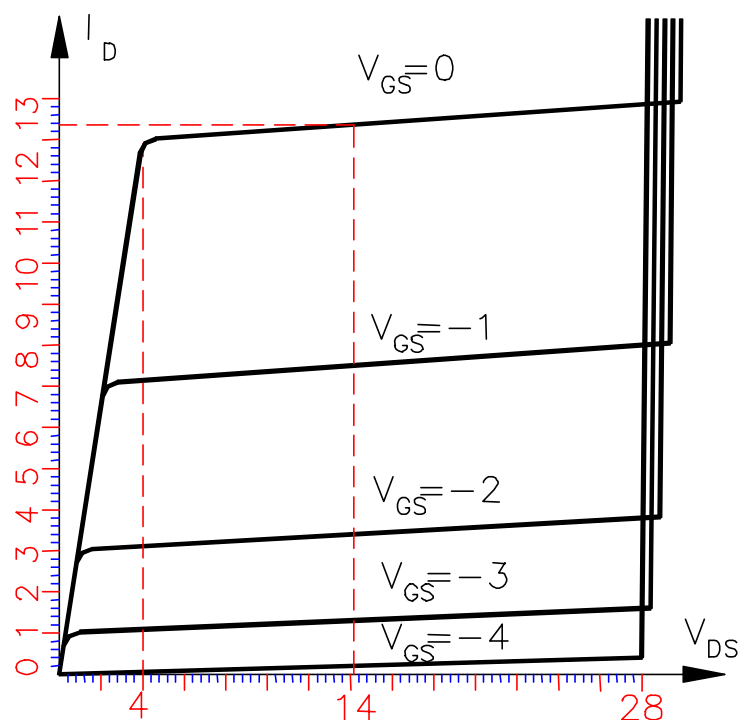


Figura 7-3

CURVA DE TRANSCONDUTÂNCIA

A curva de transcondutância de um JFET é um gráfico da corrente de saída versus a tensão de entrada, I_D em função de V_{GS} . A sua equação é :

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

Eq. 7- 1

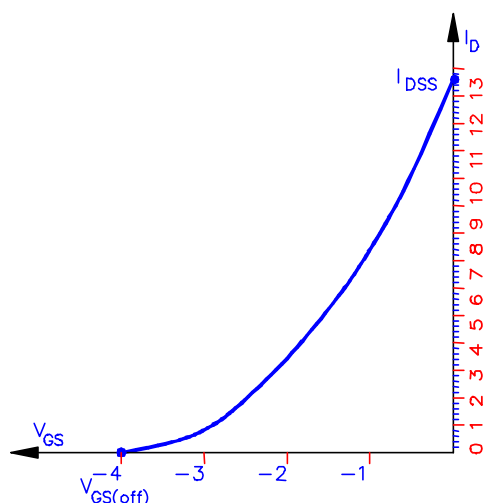


Figura 7-4

AUTOPOLARIZAÇÃO

a polarização de um transistor JFET se faz de maneira semelhante à polarização de transistor bipolar comum. Em outras palavras, usa-se o transistor JFET como se fosse um transistor bipolar.

Para um JFET funcionar corretamente devemos lembrar que, primeiramente, o mesmo deve estar reversamente polarizado entre porta e fonte. Na Figura 7-5 vemos um JFET polarizado, ou seja, com resistores ligados aos terminais para limitar tensões e correntes convenientemente, como visto na polarização de transistores bipolares.

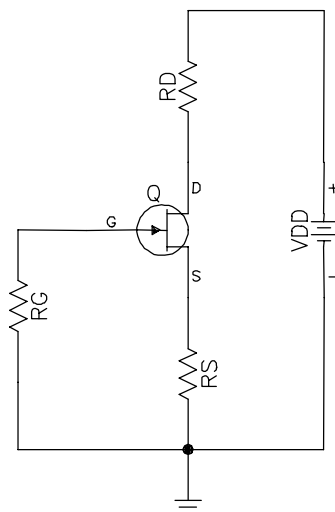


Figura 7-5

Esse é o tipo de polarização mais comum e se *chama autopolarização por derivação de corrente*, pois o V_{GS} aparece devido à corrente de dreno sobre R_S , o que resulta em V_{RS} .

Essa tensão, distribui-se entre R_G e a junção reversa, que, como tal, possui uma alta resistência. Assim aparecem V_{RG} e V_{GS} que somadas perfazem V_{RS} .

$$V_{RG} = V_{RS} + V_{GS} \quad \text{Eq. 7- 2}$$

o diodo porta-fonte está reversamente polarizado e a corrente I_G é uma pequena corrente de fuga aproximadamente igual a zero.

$$V_{RG} = I_G R_G \cong 0 \quad \text{Eq. 7- 3}$$

unindo as Eq. 7-2 e Eq. 7-3

$$V_{RS} = -V_{GS} = R_S I_S \quad \text{Eq. 7- 4}$$

A corrente de fonte é a soma da corrente de dreno e de porta. Naturalmente a corrente de dreno é muito maior que a de porta. Então:

$$I_D \cong I_S \quad \text{Eq. 7- 5}$$

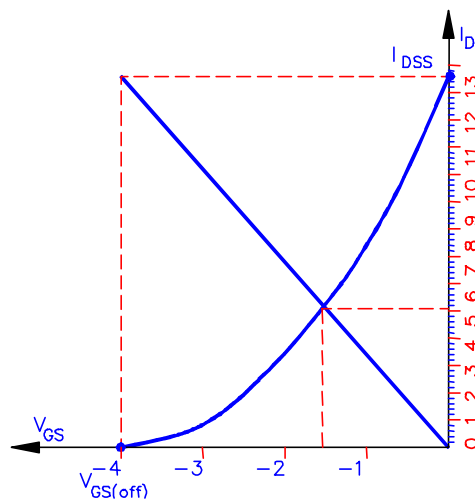
Análise da malha do lado direito do circuito:

$$V_{DD} = I_D (R_D + R_S) + V_{DS} \quad \text{Eq. 7- 6}$$

RETA DE AUTOPOLARIZAÇÃO

Para a polarização do JFET, uma alternativa é o uso da curva de transcondutância para encontrar o ponto Q de operação. Seja a curva da Figura 7-4 a base para encontrar o ponto Q. A corrente de dreno máxima é de 13,5mA, e a tensão de corte da porta-fonte é de -4V. Isso significa que a tensão da porta tem de estar entre 0 e -4V. Para descobrir este valor, pode-se fazer o gráfico da Figura 7-4 e ver onde ela intercepta a curva de transcondutância.

Exemplo 7-1 Se o resistor da fonte de um circuito de autopolarização for de 300Ω. Qual o ponto Q. Usar o gráfico da Figura 7-4.



SOL.: A equação de V_{GS} é

$$V_{GS} = -I_D \cdot 300$$

para traçar a reta basta considerar $I_D = 0$ e $I_D = I_{DSS}$. Para I_D nulo, $V_{GS}=0$ e para o outro valor de I_D , $V_{GS} = 13,5\text{mA} \cdot 300 = -4\text{V}$. Aplicando na curva, o ponto Q é :

$$V_{GS} = -1,5\text{V} \text{ e } I_D = 5\text{mA}$$

SELEÇÃO DO R_S

O ponto Q varia conforme o valor de R_S . O ideal é escolher um R_S em que o ponto Q fique na região central, como o do Exemplo 7-1.

O método mais simples para escolher um valor para R_S é

$$R_S = \frac{V_{GS(off)}}{I_{DSS}} \quad \text{Eq. 7- 7}$$

Este valor de R_S não produz um ponto Q exatamente no centro da curva, mas é aceitável para a maioria dos circuitos.

TRANSCONDUTÂNCIA

Grandeza designada por g_m e é dada por:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{i_d}{v_{gs}} \quad \text{Eq. 7- 8}$$

$$i_d = g_m v_{gs} \quad \text{Eq. 7- 9}$$

g_m é a inclinação da curva de transcondutância (Figura 7-4) para cada pequena variação de V_{GS} . Ou em outras palavras, é uma medida de como a tensão de entrada controla efetivamente a corrente de saída. A unidade é o *mho*, (razão entre a corrente e a tensão - 1/Ohm). O equivalente formal é o *Siemens*.

A Figura 7-6 mostra o circuito equivalente ca simples para um JFET válida para baixas frequências. Há uma resistência R_{GS} muito alta entre a porta e a fonte. Esse valor está na faixa de centenas de $M\Omega$. O dreno do JFET funciona como uma fonte de corrente com um valor de $g_m V_{GS}$.

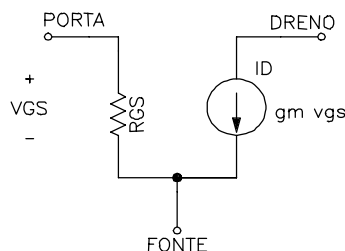


Figura 7-6

A Eq. 7-10 mostra como obter $V_{GS(off)}$ a partir da corrente máxima de dreno e da transcondutância para $V_{GS} = 0V$ (g_{mo}).

$$V_{gs(off)} = -\frac{2I_{DSS}}{g_{mo}} \quad \text{Eq. 7- 10}$$

abaixo o valor de g_m para um dado V_{GS} .

$$g_m = g_{mo} \left(1 - \frac{V_{gs}}{V_{gs(off)}} \right) \quad \text{Eq. 7- 11}$$

TRANSCONDUTÂNCIA DE UM TRANSISTOR BIPOLAR

O conceito de transcondutância pode ser usado em transistores bipolares. Ela é definida como para os JFET's. Com base na Eq. 7-8:

$$g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} = \frac{i_c}{v_{be}}$$

como $r'_e = v_{be}/i_e$

$$g_m = \frac{1}{r'_e} \quad \text{Eq. 7- 12}$$

esta relação ajuda no momento de comparar circuitos bipolares com JFET's.

AMPLIFICADOR FONTE COMUM

A Figura 7-7 mostra um amplificador fonte comum. Ele é similar a um amplificador emissor comum. As regras aplicadas para a análise são as mesmas

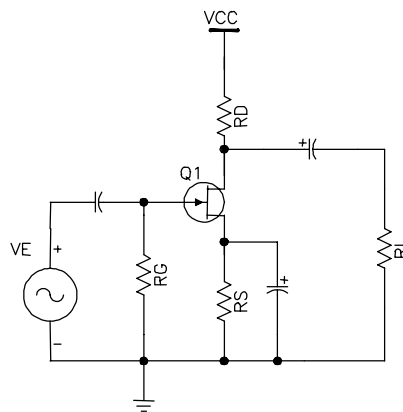


Figura 7-7

Na Figura 7-8 o equivalente ca para a análise do ganho.

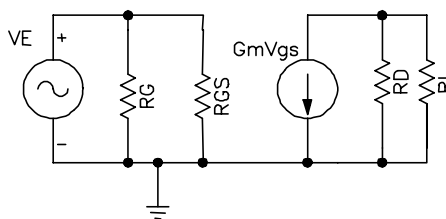


Figura 7-8

o resistor de carga está em paralelo com a resistência de dreno. Simplificando:

$$r_d = R_D // R_L$$

Quando a corrente de saída $g_m v_{ent}$ flui através de r_d ela produz uma tensão de saída

$$v_{saída} = -r_d g_m v_{ent} \quad \text{Eq. 7- 13}$$

dividindo ambos os lados por v_{ent}

$$\frac{V_{saída}}{V_{ent}} = -r_d g_m \frac{V_{ent}}{V_{ent}}$$

finalmente o ganho de tensão ca para fonte comum

$$A_v = -g_m r_d \quad \text{Eq. 7- 14}$$

notar a semelhança com a do amplificador em emissor comum

$$A_v = -\frac{r_c}{r_e} \therefore g_m = \frac{1}{r_e} \Rightarrow A_v = -g_m r_c$$

AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARCIAL

Na Figura 7-9 tem um amplificador com realimentação parcial

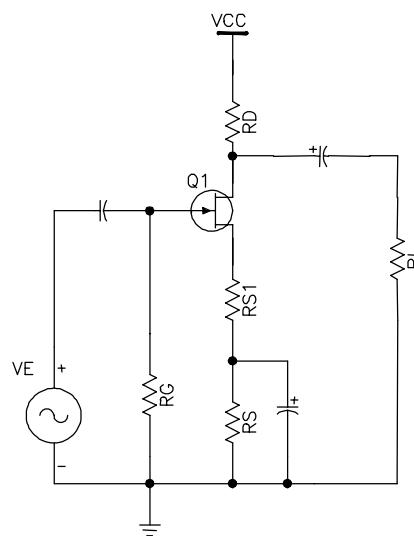


Figura 7-9

o ganho por analogia com o transistor bipolar, considerando $r'_e = 1/g_m$, é:

$$A_v = -\frac{r_d}{r_{s1} + 1/g_m} = -\frac{g_m r_d}{1 + g_m r_{s1}} \quad \text{Eq. 7- 15}$$

AMPLIFICADOR SEGUIDOR DE FONTE

A Figura 7-10 mostra um seguidor de fonte

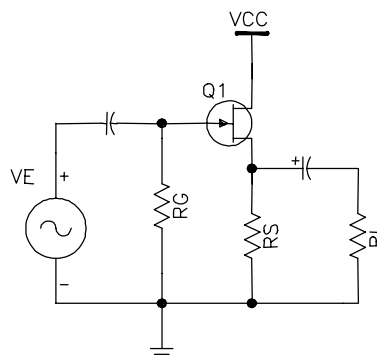


Figura 7-10

Novamente por analogia:

$$A_v = \frac{r_s}{r_s + 1/g_m} = \frac{g_m r_s}{1 + g_m r_s} \quad \text{Eq. 7- 16}$$

7.2 MOSFET

O FET de *óxido de semicondutor e metal*, MOSFET, tem uma fonte, uma porta e um dreno. A diferença básica para o JFET é porta isolada eletricamente do canal. Por isso, a corrente de porta é extremamente pequena, para qualquer tensão positiva ou negativa.

MOSFET DE MODO DEPLEÇÃO

A Figura 7-11 mostra um MOSFET de modo depleção canal *n* e o seu símbolo. O substrato em geral é conectado a fonte (pelo fabricante), Em algumas aplicações usa-se o substrato para controlar também a corrente de dreno. Neste caso o encapsulamento tem quatro terminais.

Os elétrons livres podem fluir da fonte para o dreno através do material *n*. A região *p* é chamada de substrato, e ela cria um estreitamento para a passagem dos elétrons livres da fonte ao dreno.

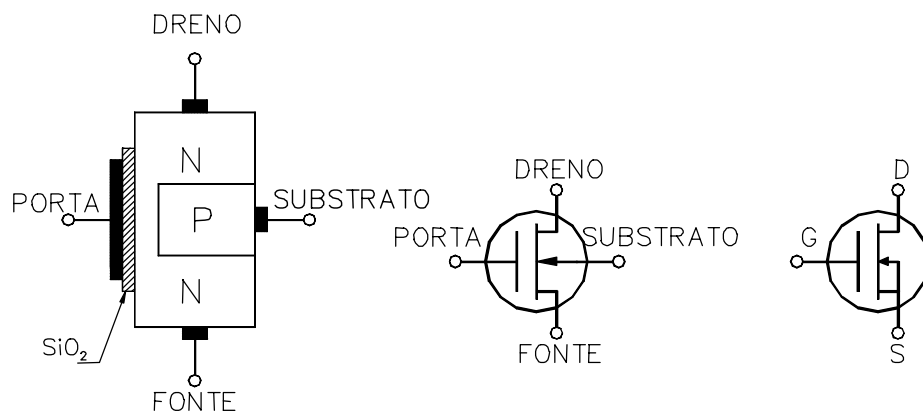


Figura 7-11

A fina camada de dióxido de silício (SiO_2), que é um isolante, impede a passagem de corrente da porta para o material *n*.

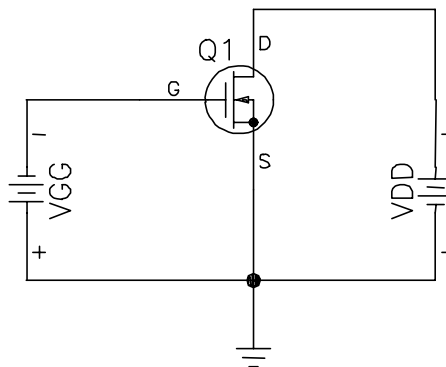


Figura 7-12

A Figura 7-12 mostra o MOSFET de modo depleção com uma tensão de porta negativa. A tensão V_{DD} força os elétrons livres a fluir através do material n . Como no JFET a tensão de porta controla a largura do canal. Quanto mais negativa a tensão, menor a corrente de dreno. Até um momento que a camada de depleção fecha o canal e impede fluxo dos elétrons livres. Com V_{GS} negativo o funcionamento é similar ao JFET.

Como a porta está isolada eletricamente do canal, pode-se aplicar uma tensão positiva na porta (inversão de polaridade bateria V_{GG} do circuito da Figura 7-12). A tensão positiva na porta aumenta o número de elétrons livres que fluem através do canal. Quanto maior a tensão, maior a corrente de dreno. Isto é que a diferença de um JFET.

MOSFET DE MODO CRESCIMENTO OU INTENSIFICAÇÃO

O MOSFET de modo crescimento ou intensificação é uma evolução do MOSFET de modo depleção e de uso generalizado na indústria eletrônica em especial nos circuitos digitais.

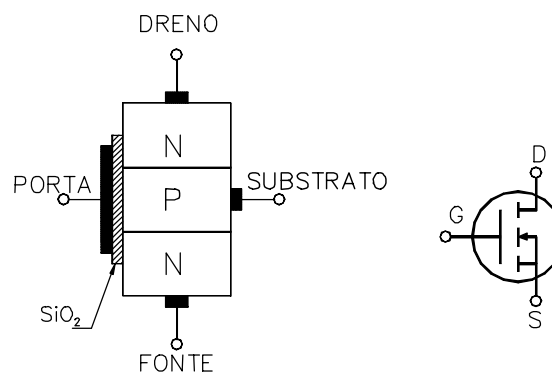


Figura 7-13

A Figura 7-13 mostra um MOSFET de canal n do tipo crescimento e o seu símbolo. O substrato estende-se por todo caminho até o dióxido de silício. Não existe mais um canal n ligando a fonte e o dreno.

Quando a tensão da porta é zero, a alimentação V_{DD} força a ida dos elétrons livres da fonte para o dreno, mas substrato p tem apenas uns poucos elétrons livres produzidos termicamente. Assim, quando a tensão da porta é zero, o MOSFET fica no estado desligado (Off). Isto é totalmente diferente dos dispositivos JFET e MOSFET de modo depleção.

Quando a porta é positiva, ela atrai elétrons livres na região p . Os elétrons livres recombinam-se com as lacunas na região próxima ao dióxido de silício. Quando a tensão é suficientemente positiva, todas as lacunas encostadas a dióxido de silício são preenchidas e elétrons livres começam a fluir da fonte para o dreno. O efeito é o mesmo que a criação de uma fina camada de material tipo n próximo ao dióxido de silício. Essa camada é chamada de camada de inversão tipo n . Quando ela existe o dispositivo, normalmente aberto, de repente conduz e os elétrons livres fluem facilmente da fonte para o dreno.

O V_{GS} mínimo que cria a camada de inversão tipo n é chamado tensão de limiar, simbolizado por $V_{GS(th)}$. Quando V_{GS} é menor que $V_{GS(th)}$, a corrente de dreno é zero. Mas quando V_{GS} é maior $V_{GS(th)}$, uma camada de inversão tipo n conecta a fonte ao dreno e a corrente de dreno é alta. $V_{GS(th)}$ pode variar de menos de 1V até mais de 5V dependendo do MOSFET.

A Figura 7-14 mostra as curvas $I_D \times V_{DS}$ e $I_D \times V_{GS}$ do MOSFET de modo intensificação e reta de carga típica. No gráfico $I_D \times V_{DS}$, a curva mais baixa é para $V_{GS(th)}$. Quando V_{GS} maior que $V_{GS(th)}$, a corrente de dreno é controlada pela tensão da porta. Neste estágio o

MOSFET pode trabalhar tanto quanto um resistor (região ôhmica) quanto uma fonte de corrente. A curva $I_D \times V_{GS}$, é a curva de transcondutância e é uma curva quadrática. O início da parábola está em $V_{GS(th)}$. Ela é

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 \quad \text{Eq. 7- 17}$$

onde k é uma constante que depende do MOSFET em particular.

O fabricante fornece os valores de $I_{D(on)}$ e $V_{GS(on)}$. Então rescrevendo a fórmula:

$$I_D = KI_{D(on)} \quad \text{Eq. 7- 18}$$

onde

$$K = \left(\frac{V_{GS} - V_{GS(th)}}{V_{GS(on)} - V_{GS(th)}} \right)^2 \quad \text{Eq. 7- 19}$$

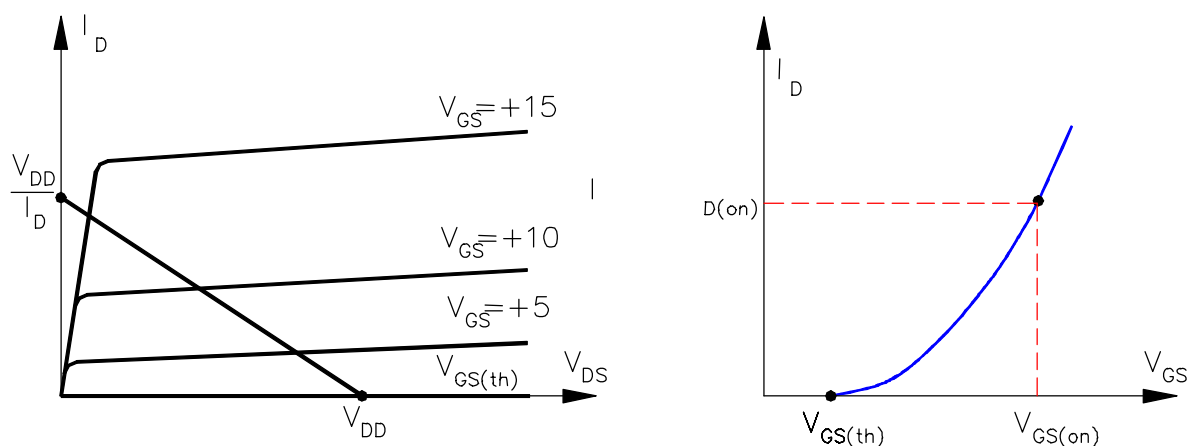


Figura 7-14

TENSÃO PORTA-FONTE MÁXIMA

Os MOSFET têm uma fina camada de dióxido de silício, um isolante que impede a circulação de corrente de porta tanto para tensões positivas como negativas. Essa camada isolante é mantida tão fina quanto possível para dar a porta um melhor controle sobre a corrente de dreno. Como a camada é muito fina, é fácil destruí-la com uma tensão porta fonte excessiva. Além da aplicação direta de tensão excessiva entre a porta fonte, pode-se destruir a camada isolante devido a transientes de tensão causados por retirada/colocação do componente com o sistema ligado. O simples ato de tocar um MOSFET pode depositar cargas estáticas suficiente que exceda a especificação de V_{GS} máximo. Alguns MOSFET são protegidos por diodos zener internos em paralelo com a porta e a fonte. Mas eles tem como inconveniente, diminuir a impedância de entrada.

7.3 FOTOTRANSISTOR E ACOPLADOR ÓPTICO

FOTOTRANSISTOR

Os fototransistores são constituídos basicamente de duas junções, havendo uma janela que permite a incidência de a luz sobre a junção base-emissor, aumentando a condutividade deste diodo emissor, com o conseqüente aumento da corrente de coletor. Na Figura 7-15, um exemplo de curva $I_C \times V_{CE}$.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.