

ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER (JFET)

Konular:

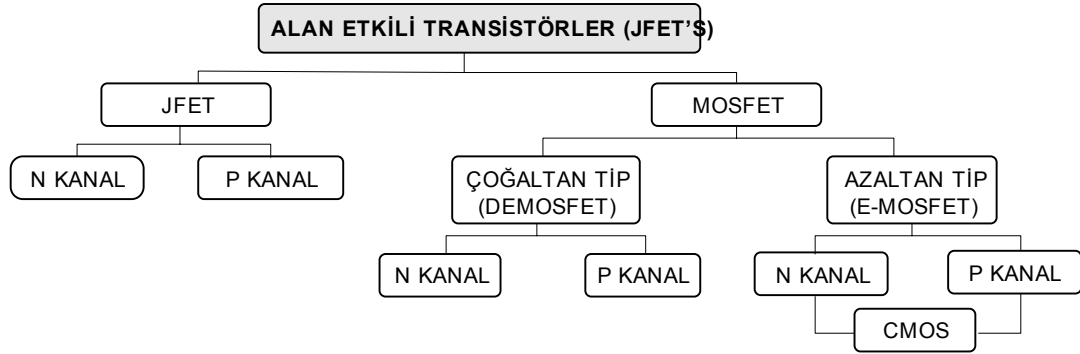
- 8.1 Alan Etkili Jonksiyon Transistör (JFET)
- 8.2 JFET Karakteristikleri ve Parametreleri
- 8.3 JFET'in Polarmalandırılması
- 8.4 MOSFET
- 8.5 MOSFET'in Karakteristikleri ve Parametreleri
- 8.6 MOSFET'in Polarmalandırılması

8.1 ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR (JFET)

Alan Etkili Transistör (Field-Effect Transistor); Bipolar İonksiyon transistörün tüm işlevlerini yerine getirebilen fakat farklı yapı ve karakteristiklere sahip bir devre elemanıdır. Çoğunlukla JFET veya FET olarak tanımlanır veya isimlendirilirler. JFET'ler gerilim kontrollü devre elemanlarıdır.

Çeşitli alt gruplara da ayrılan alan etkili transistörler, kanal tiplerine göre n kanal ve p kanal olmak üzere iki tipte üretilirler. Bu Bölümde; JFET'in temel yapısını, sembolünü, özelliklerini ve temel çalışma prensiplerini inceleyeceğiz.

Alan Etkili Transistör (JFET), 3 uçlu bir grup yarıiletken devre elemanının genel adıdır. Bu gruptaki transistörler kendi aralarında bir takım kategorilere ayrılır ve isimlendirilirler. Alan etkili transistörlerin üretim tipleri ve çeşitleri şekil-8.1'de tablo halinde verilmiştir. İlerleyen bölümlerde her bir tip ayrıntıları olarak incelenecektir.



Şekil-8.1 Alan etkili transistörlerin (JFET) Tipleri

Alan etkili transistör; Jonksiyon FET (JFET) veya metal oksitli yarı iletken JFET (MOSFET) olarak yapılır ve isimlendirilir. Her iki tip transistörün de n kanallı ve p kanallı olmak üzere iki tipte üretimi yapılır. N kanallı JFET'lerde iletim elektronlarla, P kanallı JFET'lerde ise oyuklarla sağlanır. FET'lerin yapımları basit ve ekonomik olduklarından dolayı oldukça çok kullanım alanı bulmuşlardır. JFET'lerin bipolar transistörlere göre önemli farklılıkları vardır.

JFET ile BJT'lerin Karşılaştırılmaları

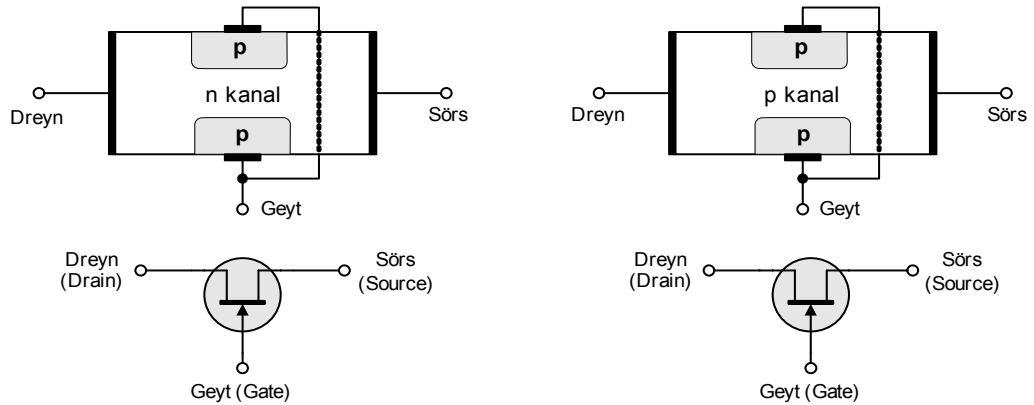
- JFET'in giriş ve çıkış empedansı çok yüksektir. Bu empedansın değeri birkaç mega ohm'dan yüzlerce mega ohma'a kadar çıkabilir. Fakat çalışma frekansları yükseldikçe empedansları azalır. MOSFET'in giriş empedansı JFET'e nazaran daha büyüktür. BJT'nin giriş ve çıkış empedansı JFET'ten küçüktür. Bu farklılık BJT yerine JFET'in, JFET yerine de BJT'nin kullanılamayacağını gösterir.
- JFET'in çalışması sadece çoğunluk akım taşıyıcılarının akışına bağlıdır. Tek tip taşıyıcılı bu elemana unipolar transistör adı da verilir.

- JFET'in gürültü seviyesi bipolar transistörlere nazaran azdır. Bu nedenle FET, alçak ve yüksek frekanslarda kullanılabilir. JFET, iyi bir sinyal kırpıcı olarak çalışır.
- JFET'in sıcaklık kararlılığı daha iyidir. Sıcaklık değişimlerinden pek etkilenmez. JFET'in radyasyon etkisi yoktur ve radyasyondan az etkilenir.
- JFET'in BJT'ye göre sakıncası; kazanç-bant genişliği çarpımının (geçiş frekansı-kazancın bire düştüğü frekans) bipolar transistörle elde edilebilene kıyasla küçük olmasıdır.

JFET'in Yapısı ve Sembolü

JFET'ler; N kanallı ve P kanallı olmak üzere iki tipte üretilirler. JFET'in fiziksel yapısı ve elektriksel sembolü şekil-8.2'de gösterilmiştir. JFET üç uca sahiptir. Uçlarına işlevlerinden ötürü; Geyt (Gate), Sörs (Source), Dreyin (Drain) isimleri verilmiştir. JFET'in fiziksel yapısına bakıldığında sörs ve dreyin uçlarının aynı olabileceği ve hatta uçlarının değiştirilerek sörs yerine dreyin'in, dreyin yerine sörs'ün kullanılabileceği düşünülebilir. Ancak JFET'in yapısı, sörs ve dreyin bölgeleri için bu eşitliği sağlamaz.

JFET sembolünde, geyt ucunda bulunan okun yönü kanal tipini ifade eder. Ok yönü içeri doğru ise N kanal JFET, ok yönü dışarıya doğru ise P kanal JFET olduğu anlaşılır. Bu durum şekil-8.2.a ve b'de gösterilmiştir.

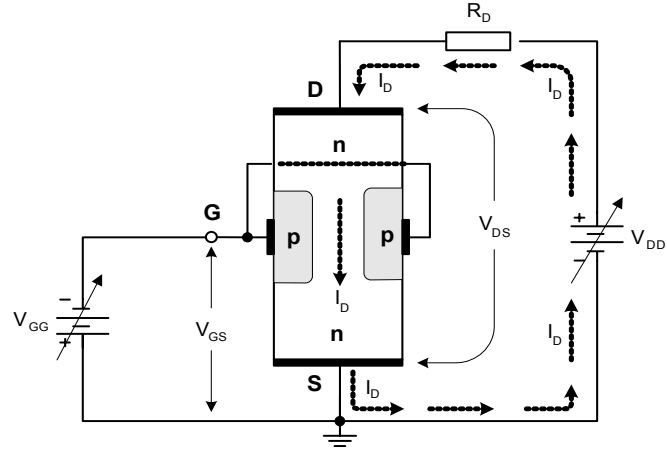


Şekil-8.2.a ve b N Kanallı ve P Kanallı JFET'in Yapısı ve Sembolü

JFET'in Çalışması

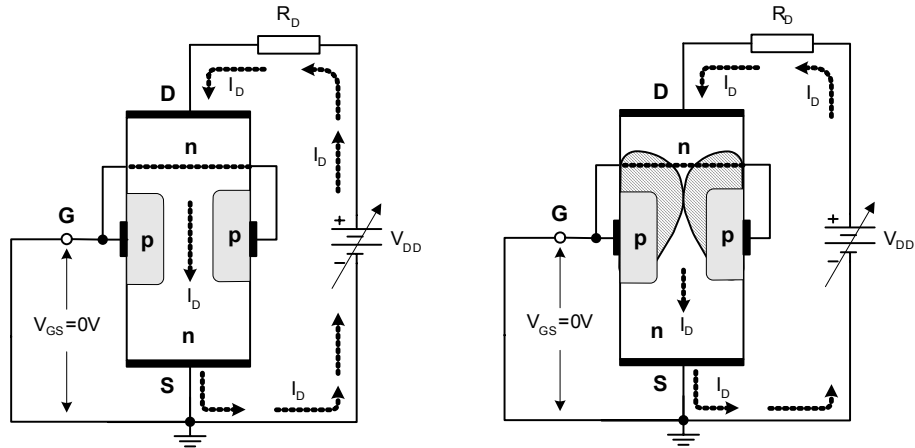
JFET'in elektriksel karakteristiklerini anlayabilmek için elemanın çalışmasını incelememiz gerekmektedir. JFET'e polarma gerilimleri uygulandığında meydana gelen akım ve gerilimler şekil-8.3 üzerinde gösterilmiştir.

Dreyin-sörs arasına uygulanan besleme gerilimi, dreyin ucu ile şase arasına bağlanır. Bu gerilim, dreyin devresindeki besleme gerilimi olarak tanımlanır ve V_{DD} ile sembolize edilir. V_{DD} gerilimi, n kanal içerisindeki elektronların hareket etmesini sağlar. Bu elektronlar, sörs'den dreyin'e oradan da V_{DD} kaynağının pozitif kutbuna giderler. V_{DD} kaynağının içinden sörs'e geri dönerler. Sörs ve dreyin üzerinden geçen bu akıma "**dreyin akımı**" denir ve " I_D " ile sembolize edilir.



Şekil-8.3 JFET'in Çalışması

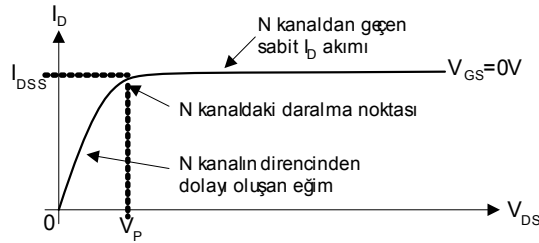
JFET'in geyt terminali kontrol ucudur. JFET'in iletkenliğini kontrol eder. Önce geyt terminali kullanmadan JFET'in çalışmasını analiz edelim. Bu amaçla şekil-8.4'den yararlanacağız. Şekil-8.4'de verilen devrede, V_{GS} gerilimi 0V (şase) yapılırsa ve V_{DD} besleme kaynağı da 0V'dan başlayarak yükseltilirse kanal içerisinde geçen akım miktarı da artar. Ancak n tipi kanalın jonksiyon direnci maksimum akım değerini sınırlar. V_{DD} daha fazla artırıldığında JFET'de bir ters polarma bölgesi oluşur. Bu polarma bölgesine, azalma bölgesi (deplation) denir. Azalma bölgesi, kanal akımının n maddesinin dar bir kesidi içinden geçmesini gerektirir. Bu durum kanal direncinin artmasına sebep olur. Dolayısı ile I_D akımında artık bir azalma söz konusudur.



Şekil-8.4.a ve b JFET'in Çalışması

V_{DD} kaynağının daha fazla artırılması sonucu kanalın tamamen daraldığı (kanal direncinin maksimuma yükseldiği) bir duruma erişilir. Bu değerden sonra daha fazla akım akışı meydana gelmez. Kısaca kanal akımında artış artık mümkün olmaz. Çünkü kanal kapanma moduna girmiş ve dreyn akımı doyuma ulaşmıştır. Bu durum şekil-8.4.b' de resimlenmiştir.

Sonuçta, kanal direncinden dolayı dreyn-sörs arasında bir gerilim düşümü meydana gelir. Bu gerilim, V_{DS} gerilimi olarak adlandırılır. Görüldüğü gibi, V_{DD} artarken dreyn ve sörs uçlarında V_{DS} gerilim düşümü meydana gelir. Bu gerilim düşümüne ise I_D akımı sebep olur. Şekil-8.5'de görüldüğü gibi V_P noktasında, V_{DS} artarken I_D sabit bir değerde kalır. I_D maksimum değerine ulaşmıştır. I_{Dmax} değerine ise I_{DSS} denir. I_{DSS} kanalın doyum akımıdır. Bu anda yani I_{DSS} akımı, V_P değerine ulaştığında geyt-sörs arası gerilim de sıfırdır ($V_{GS}=0V$). I_{DSS} değeri, elemanın yapısına göre belli bir değerde bulunur. Bu değer imalatçılar tarafından verilir veya ölçülebilir.



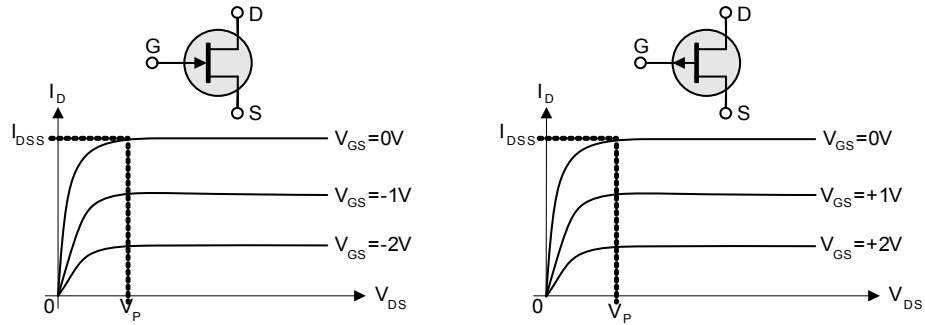
Şekil-10.5 Kanal Akımının Neden Olduğu Daralmanın Grafiği

8.2 JFET KARAKTERİSTİKLERİ

Bu bölümde; JFET'in iletim ve kesim bölgelerinde nasıl çalıştığını öğreneceksiniz. JFET'in; iletim, kesim veya aktif bölgelerde çalıştırılması için gerekli parametreleri ve karakteristikleri tanıyacaksınız.

Bölüm sonunda JFET'in önemli iki parametresini tanıyacaksınız. Bu parametreler; transfer karakteristiği ve daralma gerilimi (pinch-off voltage) olarak adlandırılmaktadır.

JFET'lerde; geyt ucu, kanal bölgesini (azalma bölgesi) kontrol etmek için kullanılır. Örneğin; n kanallı bir JFET'te, geyt ile sörs arasına uygulanan negatif polariteli bir gerilim, gerilim azalma bölgesini büyültür. Bu durum, kanal akımının daha düşük değerlerinde kanalın kapanmasına sebep olur. Eğer; V_{GS} gerilimi arttırılırsa (n kanal için daha negatif yapılırsa) kanalın azalma bölgesi daha da büyür. Neticede dreyn akımı şekil-8.6.a ve b'de gösterildiği gibi daha düşük akım seviyelerinde doyuma ulaşır. Şekil-8.6.a ve b'de p ve n kanal JFET'ler için V_{DS} - I_D grafiği çizilmiştir. Karakteristikte sabit V_{GS} geriliminin çeşitli değerlerinde I_D ve V_{DS} değerleri gösterilmiştir. Örnek eğriler; $V_{GS}=0V$, $-1V$ ve $-2V$ için çizilmiştir.



Şekil-8.6.a.b N ve P Kanallı JFET'in Dren Karakteristikleri

Sonuç olarak, n kanal bir JFET’de geyt-sörs arasına uygulanan ters polarma büyürken, kanal akımı azalır. Geyt-sörs arasına uygulanan ters polarma gerilimi yeterli büyüklüğe ulaşırsa kanal tamamen kapanabilir ve I_D akımı sıfıra düşebilir.

Kanalın tamamen kapanıp akım geçirmemesine neden olan ters gerilim değerine “**geyt-sörs daralma gerilimi (pinch-off)**” adı verilir: Bu değer “ V_P ” ile ifade edilir. Yukarıdaki şekiller ve grafik iyi incelendiğinde V_{DS} ’nin küçük değeri için, I_D akımının lineer olarak arttığı görülür (şekil-8.6). V_{DS} gerilimi artarken, kanalın daraldığı görülür.

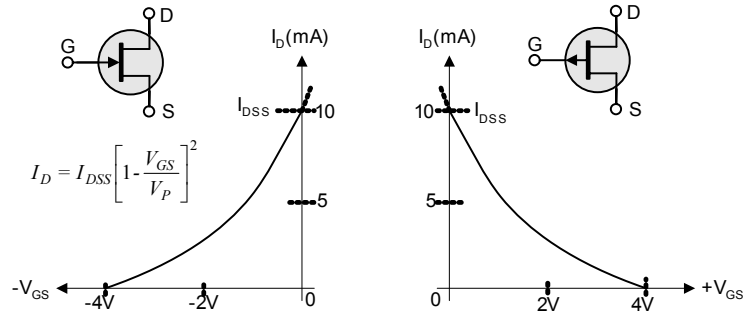
FET’in bir diğer önemli karakteristiği ise, “**Transfer Karakteristiği**” olarak adlandırılır. Transfer karakteristiği eğrisi; sabit bir dren-sörs (V_{DS}) geriliminde, geyt-sörs (V_{GS}) geriliminin fonksiyonu olarak elde edilen dren akımının (I_D) eğrisini gösterir. Transfer karakteristiği şekil-8.7.a ve b’de gösterildiği gibi elemanın iki önemli parametresi olan V_P ve I_{DSS} değerlerini verir. Transfer karakteristiği eğrisi matematiksel olarak;

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

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlik veya bu eşitlikten çizilen transfer karakteristiği V_P ve I_{DSS} değerlerine bağlıdır ve JFET’in çalışmasını oldukça iyi tanımlar. V_P değeri, n kanallı fetler için negatif, p kanallı fetler için pozitif bir değerdir.

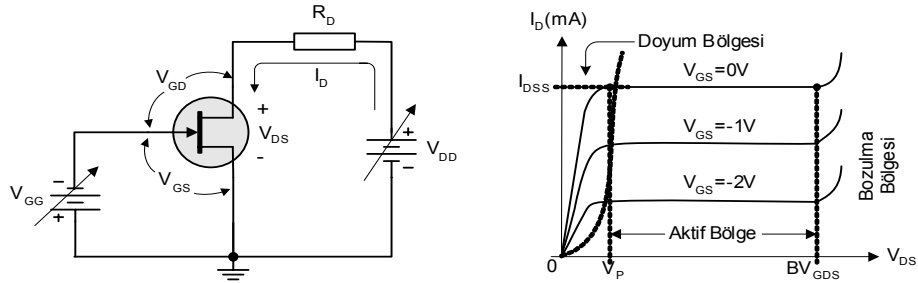
Transfer karakteristiği eşitliği ile, şekil-8.7’deki transfer karakteristiği karşılaştırılırsa; $V_{GS}=0$ olduğunda, eşitliğin $I_D=I_{DSS}$ durumunu sağladığı ve eğrinin dikey eksen I_D ’yi, I_{DSS} değerinde kestiği görülür.

Diğer taraftan $I_D=0$ için, eşitlik $V_{GS}=V_P$ durumunu sağlar. I_{DSS} ve V_P değerleri imalatçı kataloglarında verilir. Bu değerlerden yararlanılarak transfer karakteristiği çizilebilir. Transfer karakteristiği eğrisinden ve değerlerden faydalanarak I_D değerleri de hesaplanabilir.



Şekil-8.7 N ve P Kanallı JFET'in Transfer Karakteristikleri

JFET'in çalışması grafiksel olarak şekil-8.8'deki dreyn çıkış karakteristiği yardımı ile görülebilir. I_{DSS} değeri, $V_{GS}=0$ durumunda elde edilen akım seviyelerinin meydana getirdiği eğriden okunur. V_P değeri ise açık bir şekilde görülmez. Ancak V_P değeri en alttaki V_{GS} eğrisinin değerinden biraz daha büyüktür. Karakteristikteki kesik çizgi, doyum akımının aktığı noktalardan geçmektedir. Buna göre, kesik çizgi $V_{DS}=V_P-V_{GS}$ durumunu göstermektedir. Bu çizgi genellikle dreyn karakteristiğinin bir parçası değildir, ama eğrinin yatay eksene (V_{DS}) değdiği noktanın değerini verir.



Şekil-8.8 JFET'in Dreyn Karakteristikleri

Karakteristikten görüldüğü gibi aktif bölgede I_D akımı sabittir. Ancak belli bir V_{DS} değerinden sonra JFET bozulur, dreyn akımının artışı JFET tarafından artık sınırlanamaz. Ancak JFET devresine bir harici eleman bağlanarak, JFET korunur. JFET'in bozulma gerilimi değeri BV_{GDS} olarak işaretlenmiştir. BV_{GDS} değeri, küçük geyt-sörs polarma gerilimleri için daha büyüktür. Üretici firmalar tek bir V_{GS} değeri için genellikle 0V, BV_{GDS} değerini kataloglarında belirtirler.

JFET'in dreyn karakteristiğinde kesik çizgi ile belirtilen bölge ile, bozulma eğrileri arasında kalan bölge JFET için aktif çalışma bölgesidir.

JFET'ler sinyal yükseltmek amacı ile kullanıldıklarında aktif bölgede çalıştırılırlar. Aktif bölgede çalışma ise büyük ölçüde dc polarma gerilimleri ile sağlanır. JFET'ler sayısal devrelerde ve anahtarlama devrelerinde de çok sık kullanılırlar. Bu tip çalışmada JFET'lerin Kesim veya doyum bölgelerinde çalışmalarından faydalanılır ve bu bölgelerde çalıştırılırlar.

8.3 JFET'İN POLARMALANDIRILMASI

Önceki bölümlerden JFET'in çalışma şartlarını ve genel V-I karakteristiklerini inceledik. JFET'in özelliklerini ve karakteristiklerini kullanarak devre tasarımı yapabilmemiz için gerekli dc polarma şartlarını sağlamamız gerekmektedir.

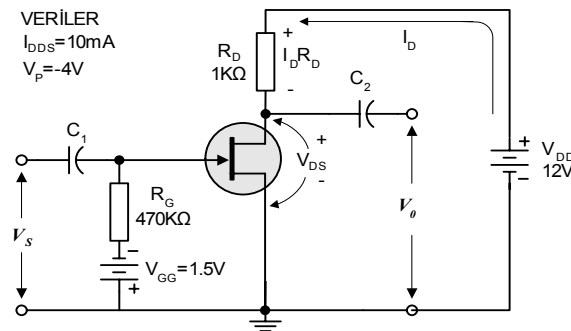
Bu bölümde, JFET için gerekli dc polarma şartlarını analizini yapıp dc polarma yöntemlerini göreceğiz.

JFET'ler için uygulanan polarma yöntemlerini sıra ile; sabit polarma, self polarma ve gerilim bölücülü polarma olarak sıralayabiliriz. Bu bölümü bitirdiğinizde JFET için gerekli dc polarma yöntemlerini öğrenip, JFET'i kullanarak devre ve cihaz tasarlamaya hazır hale geleceksiniz.

Belli bir dreyn akımı ve dreyn-sörs gerilimi etrafında JFET'in çalışabilmesi için çoğunlukla polarmalandırılması gerekir. Eleman bir yükselteç olarak çalıştırılacaksa aktif bölgede çalışacak şekilde polarma gerilim ve akımları seçilir. JFET polarmalarında bir çok polarma tipi kullanılabilir. Biz bu bölümde çok kullanılan bir kaç polarma tipini inceleyeceğiz.

Sabit Polarma Devresi

Sabit polarmalı bir JFET yükselteç devresi şekil-8.9'da verilmiştir. Devreyi incelediğimizde polarmanın iki adet dc besleme kaynağından sağlandığı görülmektedir. Gerçekte uygulamalarda tek bir dc besleme kaynağı kullanılır. Fakat konunun daha iyi anlaşılabilmesi için bu devrede çift besleme kaynağı kullanılmıştır. Şimdi şekildeki sabit polarmalı yükselteç devresini inceleyelim.



Şekil-8.9 Sabit polarmalı JFET'li yükselteç devresi

Yükseltilecek işaret, geyt-sörs arasına V_s giriş işareti olarak uygulanır. Uygulanan bu işaret yükseltilmiş olarak Dreyn-sörs arasından alınır (V_o). R_G direnci AC işaret için bir yol görevi görür. Fakat ters olarak polarmalandırılan geyt-sörs bölgesinden dc akım geçmez. Dolayısıyla R_G üzerinde dc gerilim düşümü olmaz. Bu nedenle geyt-sörs arasındaki gerilim besleme gerilimine eşittir. Yani $V_{GG}=V_{GS}=-1.5\text{V}$ 'dur. Buradan dreyn akımını bulabiliriz.

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right]^2 = 10mA \cdot \left[1 - \frac{-1.5V}{-4} \right]^2 = 3.9mA$$

Yukarıdaki eşitlikten görüldüğü gibi, geyt-sörs gerilimi (V_{GS}), dreyn akımı I_D 'nin değerini ayarlar. Bu akım 12V'luk besleme kaynağından, R_D direncinden dreyn-sörs kanalından şaseye doğru geçer. JFET aktif bölgede çalıştığı sürece; I_D akımı V_{GS} gerilimine bağlıdır. Fakat R_D direyn direnci değerine bağlı değildir. Şekil-8.9 da görüldüğü gibi, dreyn akımından dolayı R_D uçlarında bir gerilim düşümü meydana gelir.

Buna göre JFET'in çalışma bölgesi yada V_{DS} gerilimi bulunabilir. Devreden;

$$V_{DD} = I_D \cdot R_D + V_{DS}$$

olduğu görülür. Buradan;

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot R_D$$

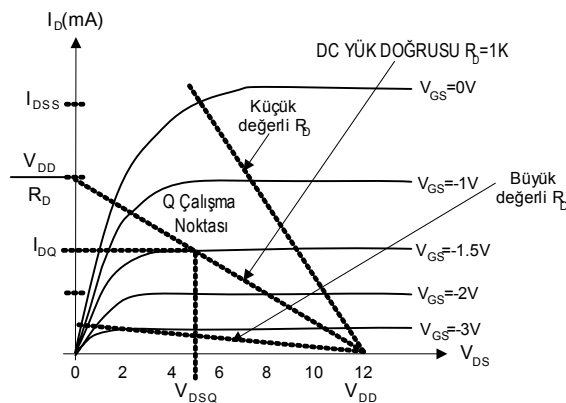
$$V_{DS} = 12 - (3.9mA \cdot 1.8K\Omega) = 4.98V$$

bulunur. Bulunan bu değer yardımı ile JFET'in çalışma noktası belirlenmiştir.

JFET'li sabit polarma devresinde karşılaşılan pratik bazı sınırlamalar vardır. Bu sınırlamalar, Şekil-8.10'da JFET'in V-I karakteristikleri üzerinde ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Örneğin yüksek kazanç elde edebilmek için V_{GS} 'nin sıfır volta polarmalandırılması, giriş geriliminin değişim miktarını sınırlar. Söz konusu polarma ile büyük genlikli giriş sinyali kullanılırsa V_{GS} 'nin pozitif alternansında geyt pozitive kayar ve kanal akımı kontrol edilemez. Bu nedenle çok küçük giriş sinyalleri için sıfır volta yakın polarma kullanmak mümkün olur. Büyük giriş sinyaliyle çalışırken çalışma geriliminin iyi seçilmesi gerekir. Karakteristikte görüldüğü gibi sıfır voltta farklı V_{GS} değerleri daha küçük g_m değerleri verirler. Yine çok büyük R_D değerleri de elemanı doyuma götürebilecek gerilim değerlerini vereceğinden aktif bölgenin dışında bir çalışma noktası meydana getirirler.

Sonuç olarak; istenilen miktardaki herhangi bir kazanç sadece büyük R_D değerleri seçilerek gerçekleştirilemez.



Şekil-8.10 JFET'in Çalışması ve Polarmalandırılması

Self Polarma Devresi

Pratik uygulamada JFET'li yükselteçler genellikle tek bir dc besleme kaynağı ile polarlamandırılır. Böyle bir polarma devresi şekil-8.11' de gösterilmiştir. Bu devrede geyt-sörs polarma gerilimi elde etmek için bir self polarma direnci R_s kullanılmıştır. R_s direnci uçlarında $I_D R_s$ gerilim düşümü nedeniyle pozitif bir V_s gerilimi meydana gelir. Geyt veya R_G geyt direncinden dc akımı hiç geçmediğinden geyt gerilimi sıfır voltur. Geyt gerilimi sıfır volt olduğundan, geyt (0V) ile sörs (+ V_s) arasında ölçülen net gerilim negatif gerilimdir. (Bu gerilim, referans noktası sörs alındığında negatif değerde ölçülür.) Ölçülen bu negatif gerilim geyt-sörs arası polarma gerilimi V_{GS} 'dir. Geyt-sörs arası polarma bağlantısı;

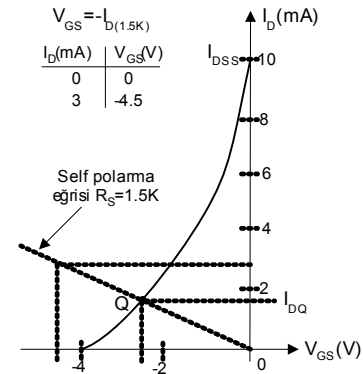
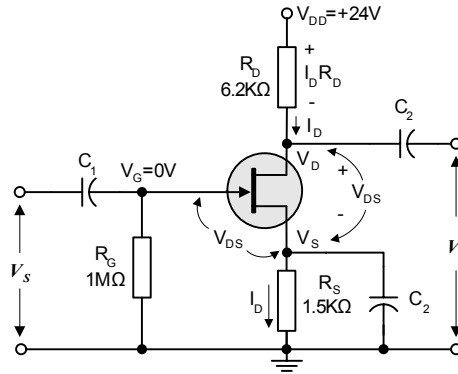
$$V_{GS} = 0 - I_D \cdot R_s = I_D \cdot R_s$$

olduğu devreden görülmektedir. Bu bağıntı transfer karakteristiği üzerinde gösterilir. Bunun için iki I_D değeri seçilir. JFET kesimde iken,

$$I_D = 0$$

olur. JFET iletimde iken I_D ;

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D + R_s}$$



Şekil-8.12.a ve b Self polarmalı JFET devresi ve transfer karakteristiği

Bulunan bu değerler ile transfer karakteristiği üzerinde yük çizgisi çizilir. Bu değerlere karşılık gelen V_{GS} değerleri bulunur. Bu değerler şekil-8.12.b'deki tabloda verilmiştir. Tablodaki I_D ve V_{GS} değerleri ilgili eksenlerde işaretlenir. İşaretlenen bu noktalardan bir düz çizgi çizilir. Bu düz çizgiye "self polarma çizgisi" denir. Düz çizginin transfer karakteristiği eğrisini kestiği nokta, devrenin çalışma noktasıdır (Q). Polarma noktasından eksenlere dikler inerek bu noktanın çalışma şartları;

$$I_{DQ} = 1.6mA \quad \text{ve} \quad V_{GSQ} = -2.4V$$

olarak bulunur. R_s değeri artırılırsa, R_s yük doğrusu yatay eksene doğru yaklaşır. Çalışma bölgesi kayar I_D değeri küçülür. V_{GS} değeri büyür. R_s değeri azaltılırsa bu kez çalışma noktasında I_D büyür, V_{GS} küçülür.

**Örnek:
8.1**

Şekil-8.12.a'da verilen self polarmalı yükselteç devresinde çalışma noktasını $R_S=1K\Omega$ kabul ederek bulunuz?

Cözüm

Şekil-8.12.b'deki karakteristik eğri üzerine sıfırdan yani $V_{GS}=0$, $I_D=0$ noktasından başlayan ve seçilen I_D değeri örneğin 4 mA ile buna karşılık bulunan V_{GS} gerilimi;

$$V_{GS} = -I_D \cdot R_S = -(4mA) \cdot (1K\Omega) = -4V$$

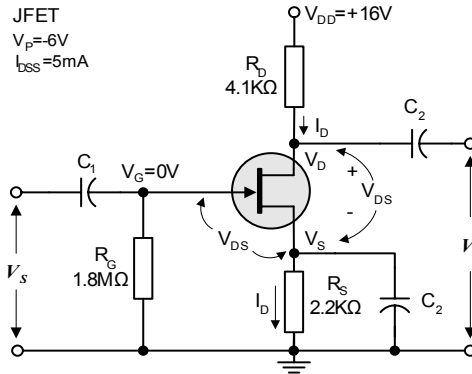
olarak bulunur. Bu değerlerin belirledikleri kesişme noktasından geçen self-polarma çizgisi çizilir. Bu çizgi ile elemanın transfer karakteristiğinin kesiştiği nokta çalışma noktası olarak bulunur. Çalışma noktası sükunet anında (girişte AC işaret yokken), dreyn akımı I_{DQ} ve geyt-sörs gerilimi V_{GSQ} değerini verir. Çalışma noktası için çizim yapılarak ;

$$I_{DQ} = 2.2mA \quad ve \quad V_{GSQ} = -2.2V$$

değerleri tespit edilir. Tespit edilen bu değerlerden yararlanarak aynı noktadaki dreyn-sörs gerilimi;

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} \cdot R_S = 24V - (2.2mA \cdot 6.2K\Omega) = 24V - 15.8V = 8.2V$$

olarak hesaplanır.

**Örnek:
8.2**


Şekil-8.13'de verilen self polarmalı yükselteç devresinin çalışma noktasını bulunuz ve transfer karakteristiğini çiziniz?

$$V_P = -6V, \\ I_{DSS} = 5mA$$

Cözüm

Şekil-8.13 n kanallı JFET'li self polarmalı yükselteç devresi

Belirlenmesi istenen polarma noktasını bulmak için gerekli transfer karakteristiği çizilmemiş ancak V_P ve I_{DSS} değerleri verilmiştir. Karakteristik eğrinin çizimi de istenmiştir. O zaman transfer eğrisi formülü ;

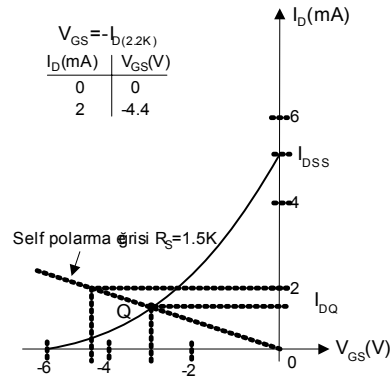
$$I_D = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2$$

ile verilen V_P ve I_{DSS} değerlerini kullanarak transfer karakteristiği eğrisini çizmek oldukça kolay olur. Seçilen birkaç V_{GS} noktası ve bunlara karşılık hesaplanan I_D değerlerine göre grafik kağıdına taslak eğri çizilebilir. Örneğin; şekil-8.13'deki JFET x ekseninde $V_P=-6$ volttan başlayıp;

$$V_{GS} = -4V \text{ için } I_D \Rightarrow I_D = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2 = 5mA \cdot \left[1 - \frac{-4V}{-6mA} \right]^2 = 0.55mA$$

$$V_{GS} = -2V \text{ için } I_D \Rightarrow I_D = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2 = 5mA \cdot \left[1 - \frac{-2V}{-6mA} \right]^2 = 2.2mA$$

noktaların içine alan y ekseninde $I_D=I_{DSS}=5mA$ noktasına kadar uzanan taslak transfer eğrisi oluşturulur. Bu transfer eğrisi üzerine (şekil-8.14), $R_S=2.2K\Omega$ için self polarma çizgisi çizilir.



Şekil-8.14 Transfer eğrisi

Örneğin; $I_D=2mA$ 'lık bir dreyn akımı seçilerek geyt-sörs gerilimi;

$$V_{GS} = -I_D \cdot R_S = -(2mA)(2.2K\Omega) = -4.4V$$

volt bulunur. Self polarma çizgisi transfer eğrisini yaklaşık;

$$V_{GSQ} = -2.95V$$

$$I_{DQ} = 1.35mA$$

noktalarını birleştiği yerde keser. Süknet anındaki bu değerlerden yine aynı andaki dreyn-sörs gerilimi;

$$V_{GSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_S + R_D)$$

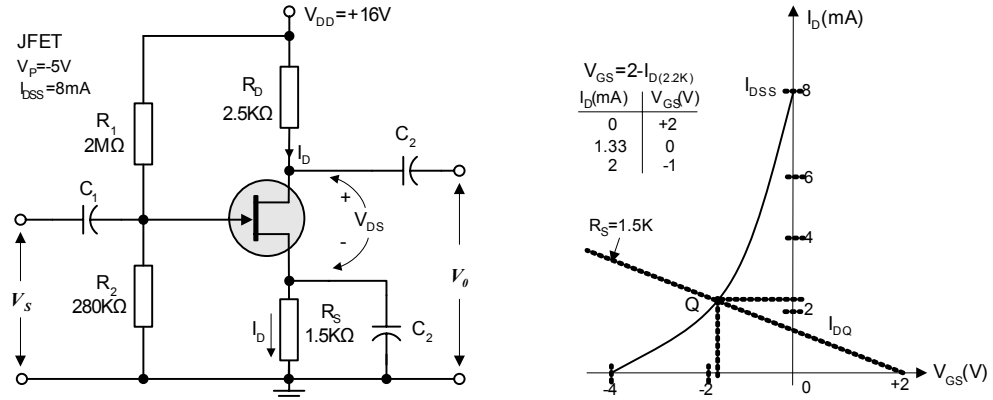
$$V_{GSQ} = 16V - 1.35mA(2.2K\Omega + 4.1K\Omega)$$

$$V_{GSQ} = 7.5 \text{ volt.}$$

olarak bulunur.

Gerilim Bölücülü Polarma

JFET için kullanılan diğer bir dc polarma devresi ve transfer karakteristiği şekil-8.15'de verilmiştir. Bu polarma şekli, gerilim bölücülü geyt polarma olarak bilinir. Bu polarma tipinde, polarma gerilimi ve akımının belirlenmesi diğer polarma devrelerindeki gibidir. Sadece geyt geriliminin 0 volttan farklı bir değerde tutulmasında durum değişir.



Şekil-8.15 Gerilim bölücülü geyt polarması ve transfer karakteristiği

Gerilim bölücülü polarma devresinde, diğer polarma tiplerine nazaran daha iyi bir kararlılık söz konusudur. Gerilim bölücü devreden elde edilen V_G geriliminin değeri;

$$V_G = V_{GG} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD}$$

olarak bulunur. Bu durumda sükunetteki geyt-sörs polarma gerilimi;

$$V_{GSQ} = V_{GG} - (I_D \cdot R_S)$$

olur.

Örnek: 8.3

Cözüm

Şekil-8.15'de görülen gerilim bölücülü polarma devresinde JFET'in DC polarma gerilimlerini bulunuz ?

JFET'in geyt gerilimi;

$$V_G = V_{GG} = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{DD} = \left[\frac{280K\Omega}{2M\Omega + 280K\Omega} \right] \cdot 16V = 2V$$

olur. $I_D \cdot R_S$ gerilim düşümünün sonucunda geyt-sörs gerilimi ;

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

$$V_{GS} = 2 - (I_D \cdot R_S)$$

olur. Burada belli bir R_S değeri için, I_D 'ye bir kaç değişik değer verilerek bunun karşılığı olan V_{GS} değerleri bulunur. Transfer karakteristiği eğrisi önceden olduğu gibi;

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2$$

formülünden belirlenir. O zaman $V_P = -4$ volt ve $I_{DS} = 8$ mA değerlerine sahip olur. JFET için transfer karakteristiği yukarıdaki gibi çizilir. Self polarma çizgisi ile transfer karakteristiğinin kesiştiği nokta, dc polarma (çalışma) noktasını verir.

Bu noktadan çalışma şartları da;

$$I_{DQ}=2.5mA, \quad V_{GSQ}=-1.75 \text{ Volt}$$

olarak saptanır. Buradan;

$$V_{DQ}=V_{DD}-I_{DQ}.R_D=16V-2.5mA(2.5K\Omega)=9.75 \text{ volt}$$

$$V_{SQ}=I_{DQ}.R_D=2.5mA(1.5K\Omega)=3.75 \text{ volt}$$

Dreyn-sörs gerilimi ise;

$$V_{DSQ}=V_{DQ}-V_{SQ}=9.75-3.75=6 \text{ volt}$$

Olarak hesaplanır. Hesaplanan değerlerden yararlanarak polarma noktasındaki geyt-sörs gerilimi kontrol edilirse, sonuç;

$$V_{GSQ}=V_{GQ}-V_{SQ}$$

$$V_{GSQ}=2V-3.75V$$

$$V_{GSQ}=-1.75 \text{ volt}$$

bulunur. Sonucun grafiksel metot kullanılarak elde edilen değerle aynı olduğu görülür.

8.4 MOSFET'LERİN TANITIMI VE KARAKTERİSTİKLERİ

MOSFET (MetalOksit Semiconductor FET). Alan etkili transistörlerden geliştirilmiş bir grup transistörün genel adıdır. MOSFET'lerde geyt terminali, kanaldan izole edilmiştir. Bu tür alan etkili transistörlere, Metal oksitli yarıiletken FET veya kısaca MOSFET denilmektedir. Ayrıca kimi kaynaklarda İzole edilmiş geytli FET veya IGFET adı da verilmektedir.

Mosfet'ler, Azaltan tip (Depletion) ve Coğaltan tip (Enhancement) olmak üzere iki tip de üretilirler. Bu tür mosfet'ler; kısaca D-MOSFET ve E-MOSFET olarak adlandırılır.

Bu bölümde mosfet tiplerini, temel yapılarını, sematik sembollerini ve temel çalışma prensiplerini göreceksiniz.

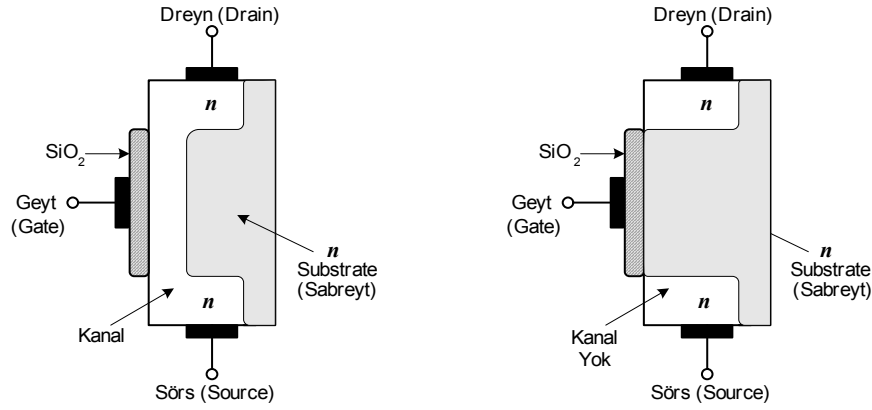
MOSFET'in Temel Yapısı

Alan etkili transistörlerin bazı tiplerinde geyt terminali kanaldan izole edilmiş (yalıtılmış) biçimde yapılır. Bu tür alan etkili transistörlere, metal oksitli yarı iletken FET (Metal-Oxide Semiconductor FET) veya kısaca "MOSFET" denir. Mosfet'ler, izole edilmiş geytli FET veya kısaca IGFET olarak da adlandırılmaktadırlar.

MOSFET'ler; ya azaltan tip MOSFET (Deplation-MOSFET) yada çoğaltan tip MOSFET (Enhancement MOSFET) olarak imal edilirler. Azaltan tip Mosfet'lere kısaca D-MOSFET, Çoğaltan tip Mosfet'lere ise E-MOSFET denilmektedir. Her iki tip MOSFET'inde; P kanal ve N kanal olmak iki tipi vardır. N kanallı D ve E-MOSFET'in temel yapıları şekil-8.16'da verilmiştir.

MOSFET'lerde tıpkı JFET'ler gibi 3 uçlu aktif devre elamanları grubundandır. Uçlarına işlevlerinden ötürü; Geyt (Gate), Dreyne (Drain) ve Sörs (Source) isimleri verilmektedir. Şekil-8.16'da verilen temel yapıda Sabstreyt (Substrate) terminali, dördüncü uç gibi görünse de genellikle sörsle bağlanır veya şase potansiyelinde tutulur.

D-MOSFET'in yapısında kanal fiziksel olarak yapılmış haldedir. D-MOSFET'in, dreyn-sörs uçlarına bir dc gerilim kaynağı bağlandığında dreyn ile sörs arasında bir akım meydana gelir. E-MOSFET'in yapısında ise, imalat sırasında şekillendirilmiş veya oluşturulmuş bir kanal yoktur. E-MOSFET'in; dreyn-sörs uçlarına gerilim uygulandığında akım meydana gelebilmesi için, şarj taşıyıcılarının kanalı oluşturması gerekir. Bunun içinde geyt ucuna gerilim uygulanması gereklidir.

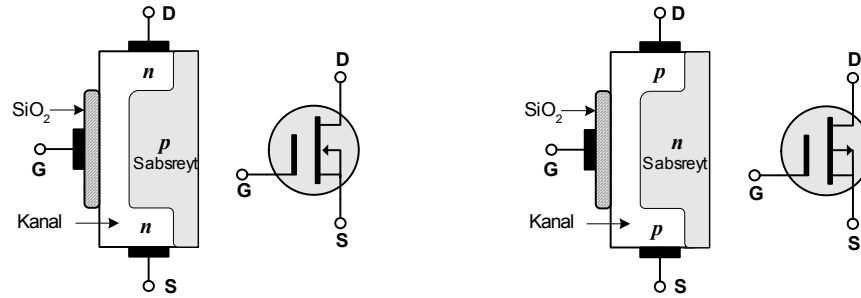


Şekil-8.16 Azaltan ve Çoğaltan Tip N Kanal MOSFET'lerin Yapıları

Azaltan Tip MOSFET (D-MOSFET)

D-MOSFET'lerin, n-kanal ve p-kanal olmak üzere başlıca iki tipde üretimi yapılır. Şekil-8.17.a'da n-kanal D-MOSFET'in yapısı ve şematik sembolü görülmektedir. Şekil-8.17.b'de ise p-kanal D-MOSFET'in yapısı ve şematik sembolü görülmektedir. N kanallı D-MOSFET, p tipi gövde (substrate-sabstreyt) üzerine yerleştirilmiştir. N tipi yarı iletken maddeden yapılan sörs ve dreyn bölgelerine, sörs ve dreyn terminalleri bir metalle (alimünyum) bağlanmışlardır. Ayrıca sörs ve dreyn bölgeleri içten N tipi kanal bölgesiyle birbirine bağlanırlar. N kanalın üstünde bulunan ve kanal ile geyt arasındaki izolasyonu sağlayan ince silikon dioksit (SiO_2) tabakasının üzerine ince bir metal tabaka konur. Bu bileşimi D-MOSFET'i oluşturur.

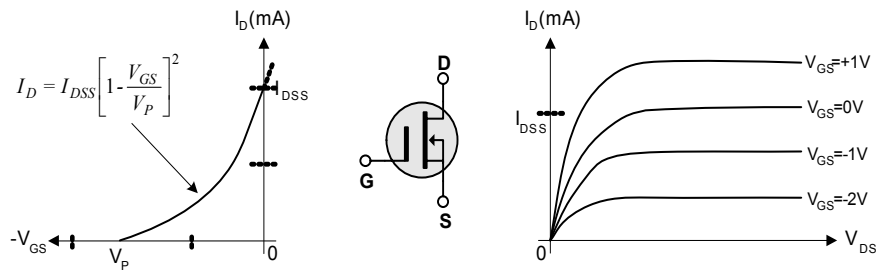
Şematik sembol'de elemanın geyt, sörs ve dreyn uçları gösterilir. Sabstreyt ucu ise çoğunlukla sörs'e bağlı olarak gösterilir. Şematik gösterimde elemanın kanal tipi sabstreyt ucundaki ok yönü ile belirtilir. Şekil-8.17'de görüldüğü gibi ok yönü elemanın içine doğru ise n-kanal D-MOSFET, ok yönü dışarı doğru ise p-kanal D-MOSFET tanımlanır.



Şekil-8.17.a ve b N Kanal ve P Kanal DE-MOSFET'in Yapısı ve Sembolü

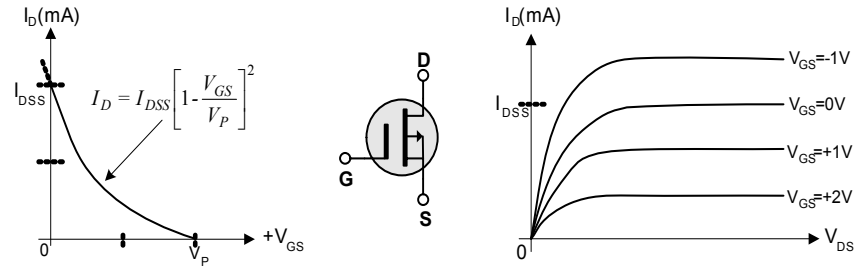
N-kanallı D-MOSFET'in geyt-sörs arasına negatif bir gerilim (V_{GS}) uygulanırsa elektronlar kanal bölgesinin ortasına doğru itilirler ve kanalda daralma olur. Yeterli büyüklükte geyt-sörs gerilimi kanalı tamamen daraltarak kapatır. Diğer taraftan; pozitif geyt-sörs geriliminin uygulanması halinde, p tipi taşıyıcılar itildiklerinden kanal büyüklüğünde bir artış olur. Bu durum daha çok şarj taşıyıcısının oluşumuna izin verdiğinden daha büyük bir kanal akımı meydana gelir.

N kanallı D-MOSFET'in transfer ve dreyn karakteristikleri ise şekil-8.18'de görülmektedir. Karakteristik eğriler; elemanın gerek pozitif, gerekse negatif geyt-sörs geriliminde çalışmasını göstermektedir. Negatif V_{GS} değerleri, daraltma gerilimine (pinch-off) kadar dreyn akımını azaltırlar. Bu gerilimden sonra dreyn akımı hiç akmaz. N kanallı D-MOSFET'in transfer karakteristiği, negatif geyt-sörs gerilimleri için JFET karakteristiği ile aynıdır ve pozitif V_{GS} değerleri için de bu özellik korunur. Negatif ve pozitif her iki V_{GS} değerinde de geyt kanaldan izole edildiğinden MOSFET, V_{GS} 'nin her iki polarite durumunda çalıştırılabilir. Söz konusu iki polarite durumun da da geyt akımı meydana gelmektedir.



Şekil-8.18.a ve b N Kanal DE-MOSFET'in Transfer ve V-I karakteristikleri

P kanallı D-MOSFET'in yapısı ve şematik sembolü şekil-8.18.b'de verilmiştir. Bu tip MOSFET'in kanalı P tipi, sabsreyti ise N tipi yarıiletken yapıdır. P ve N kanallı D-MOSFET'ler çalışma esası bakımından birbirinin benzeridir. Ancak P kanallı D-MOSFET'te polarite kaynaklarının yönü terstir. Akım taşıyıcıları oyuklardır. Geyt-sörs gerilimi negatif olduğunda dreyn akımı artarken, pozitif olduğunda azalır. Bu nedenle daraltma gerilimi V_P pozitif değerlidir. Şekil-8.19'da P kanal D-MOSFET'in transfer ve dreyn V-I (Akım-Gerilim) karakteristikleri görülmektedir.

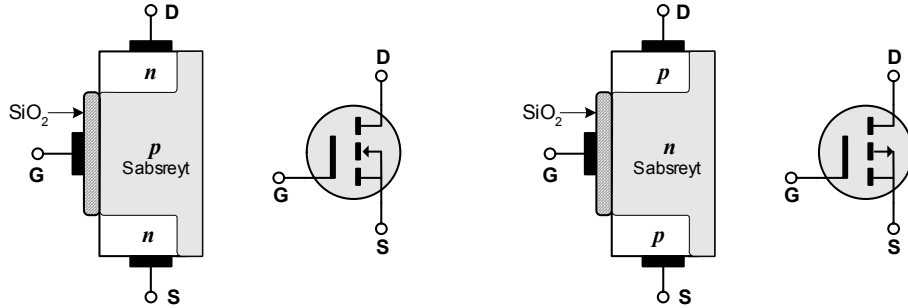


Şekil-8.19 P Kanallı DE-MOSFET'in Transfer ve V-I Karakteristikleri

Çoğaltan Tip MOSFET (E-MOSFET)

Çoğaltan tip MOSFET'in (E-MOSFET) temel yapısı ve şematik sembolü şekil-8.20'de verilmiştir. E-MOSFET'ler, n-kanallı ve p-kanallı olmak üzere iki tip de üretilirler. Şekildeki yapıdan da görüldüğü gibi E-MOSFET'in temel yapısında fiziksel olarak oluşturulmuş bir kanal yoktur. Kısaca E-MOSFET, dreyn ile sörs arasında fiziksel bir kanala sahip değildir.

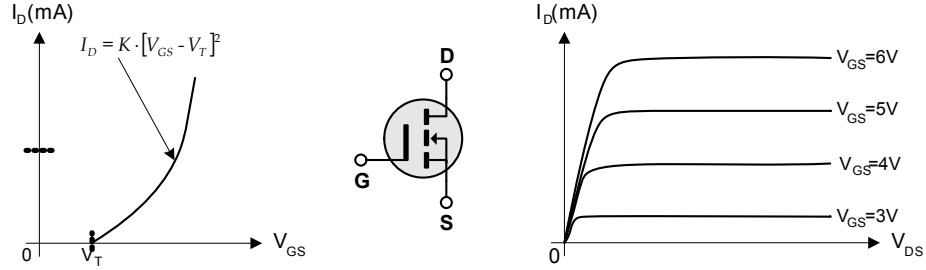
E-MOSFET'in şematik sembolünde dreyn ile sörs arası kesik çizgilerle gösterilir. Bu durum başlangıçta E-MOSFET'de kanal olmadığını belirtmek içindir. Şematik sembolde sabstreit ucundaki ok'un yönü E-MOSFET'in kanal tipini belirtir. Ok yönü içeri doğru ise, N tipi kanalı gösterir. Ok yönü dışarı doğru ise P tipi kanalı gösterir. E-MOSFET'lerde kanal tipi ile sabstreit'te kullanılan yarıiletken malzemelerin tipleri terstir.



Şekil-8.20.a ve b N Kanallı ve P kanallı E-MOSFET'in Yapısı ve Sembolü

E-MOSFET'lerde kanal, geyt terminaline uygulanan harici bir besleme ile oluşturulur. Geyt-sörs uçları arasına pozitif bir geriliminin uygulanması, geyt altında sabstreit bölgesinde bulunan oyukları (boşlukları) iter ve orada bir azalma (deplasyon) bölgesi yaratır. Geyt gerilimi yeterince pozitif değere çıkarıldığında; elektronlar, pozitif gerilim tarafından bu azalma bölgesine çekilirler. Böylece, dreyn ile sörs arasındaki bu bölge N kanalı gibi hareket eder.

Pozitif geyt gerilimiyle oluşturulan ve şekillendirilen N kanallı E-MOSFET'in transfer ve V-I Karakteristiği şekil-8.21'de gösterilmiştir.



Şekil-8.21 N Kanallı E-MOSFET'in V-I Karakteristikleri

Elemanın transfer karakteristiğinden de görüldüğü gibi, geyt-sörs gerilimi eşik (threshold-başlangıç) değeri V_T 'yi aşınca kadar dreyn akımı hiç akmaz. Bu eşik gerilimi değerinin üzerindeki pozitif gerilimlerde, artan değerli bir dreyn akımı meydana gelir. Bu akımın Transfer karakteristiği de,

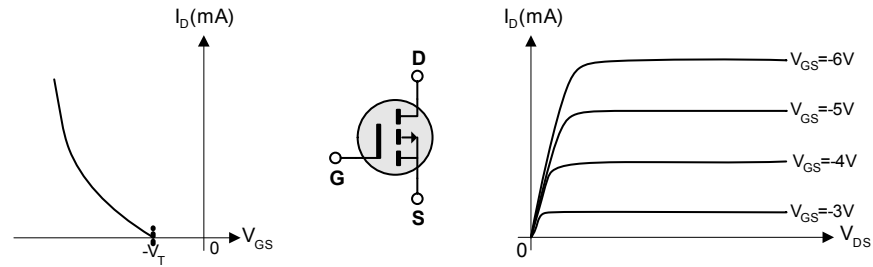
$$I_D = K \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

Eşitliği yardımıyla tanımlanabilir. Eşitlik yukarıdaki formülde yalnız $V_{GS} > V_T$ şartı için geçerlidir. Eşitlikte K sabitesi tipik olarak 0.3 mA/V^2 değerinde olup elemanın yapısına bağlı olan bir özelliktir.

$V_{GS}=0$ volt durumunda dreyn akımı akmadığı için E- MOSFET'lerde I_{DS} değerinden söz edilebilir. E-MOSFET'lerin çalışma sahası; D-MOSFET'lerden daha sınırlı olmasına rağmen, E-MOSFET'ler, büyük-ölçekli entegre devreler için çok kullanışlıdır. Çünkü E-MOSFET'ler basit yapılı ve küçük boyutlu elemanlardır. E-MOSFET'in şematik sembolünde dreyn ile sörs arası kesik çizgilerle gösterilir. Bu çoğaltan tip elemanda başlangıçta kanalın olmayışını belirtmek içindir. Bundan başka sabstreyt ucundaki ok P tipi sabstreyti ve N kanalı gösterir.

P kanallı E-MOSFET'ler şekil-8.20.b'de gösterilen yapıda imal edilir. Şematik sembolü ise aynı şekilde gösterilmiştir. E-MOSFET'in sabstreyti, N tipi yarı iletken yapıdır. P-kanallı E-MOSFET'in çalışma prensibi N kanallı gibidir. Ancak, P kanallı da polarma kaynaklarının yönü terstir. Akım taşıyıcıları oyuklardır. Negatif değerli eşik gerilimi aşıncaya kadar dreyn akımı yoktur. Daha büyük değerli negatif geyt gerilimlerinde artan bir dreyn akımı vardır.

P Kanallı E-MOSFET (Enhancement-MOSFET)'in transfer ve V-I Karakteristiği şekil-8.22'de gösterilmiştir. Karakteristikleri inceleyerek bu elemanın çalışması kolayca irdelenebilir. Karakteristikte görüldüğü gibi P kanallı E-MOSFET'de polarma akım ve gerilimlerinin yönü N kanal E-MOSFET'e göre terstir.



Şekil-8.22. a ve b P Kanallı E-MOSFET'in Transfer ve V-I Karakteristikleri

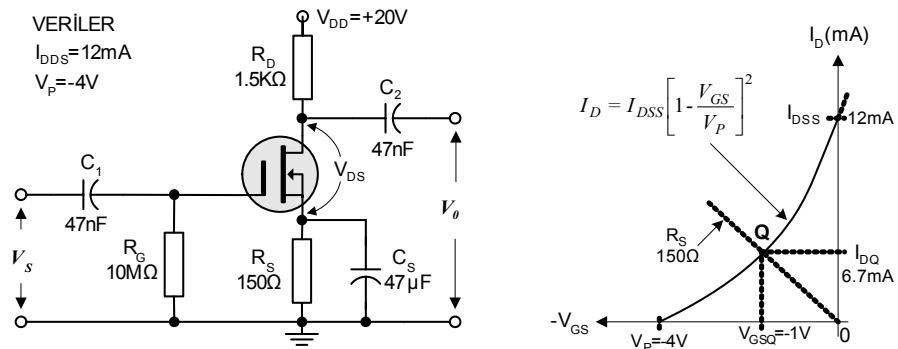
8.5 MOSFET'LERİN POLARMALANDIRILMASI

Bu bölümde MOSFET'lerin nasıl polarmalandırılacağını göreceksiniz. Özellikle MOSFET'lerle gerçekleştirilen yükselteç devrelerinde dc polarmanın önemi büyüktür.

Bu bölümde; sırası ile D-MOSFET ve E-MOSFET için polarma yöntemlerini ve dc analizlerini göreceksiniz.

D-MOSFET'in Polarmalandırılması

Tipik bir n-kanallı D-MOSFET'li yükselteç devresi şekil-8.23.a'da ve D-MOSFET'in transfer karakteristiği ise şekil-8.23.b'de verilmiştir. Bu yükselteç devresi, çok büyük değerli geyt direnci R_G hariç, JFET'li yükselteçle benzerdir. Bu devrede geyt-sörs gerilimi pozitif gidebildiğinden, elamanı küçük negatif geyt-sörs geriliminde polarmalandırmak mümkündür.



Şekil-8.23.a ve b N-kanallı D-MOSFET'li yükselteç ve transfer karakteristiği

Devrenin DC polarma değerleri aşağıda gösterilen işlemler takip edilerek bulunur. JFET’de olduğu gibi, D-MOSFET’inde transfer karakteristiği; transfer karakteristiği eşitliği yardımıyla bulunur ve self polarma yük çizgisi şekil-8.23.b’de verilen transfer karakteristiği üzerine çizilir.

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2 = 12mA \cdot \left[1 - \frac{-1V}{-4V} \right]^2 = 6.75mA$$

$$V_{GS} = 0 - (I_D \cdot R_S) = 6.75mA \cdot (150\Omega) = -1V$$

$I_{DSS}=12\text{ mA}$ ve $V_P=4\text{ volta}$ göre çizilen transfer karakteristiği ile $R_S=150\text{ ohm}$ için çizilen self-polarma yük çizgisinin kesiştiği yer sükunetteki polarma noktasını verir. Şekil-8.23.b’de çizim yapılarak polarma noktasının şartları;

$$V_{GSQ} = -1V \quad \text{ve} \quad I_{DQ} = 6.75mA$$

olarak belirlenir. Bu durumda dreyn gerilimi,

$$V_{DQ} = V_{DD} - (I_{DQ} \cdot R_D) = 20V - (6.75mA \cdot 1.5K\Omega) = 9.88V$$

ve dreyn-sörs gerilimi ise;

$$V_{DSQ} = V_{DQ} - V_{SQ} = 9.88V - 1 = 8.88V$$

olarak bulunur.

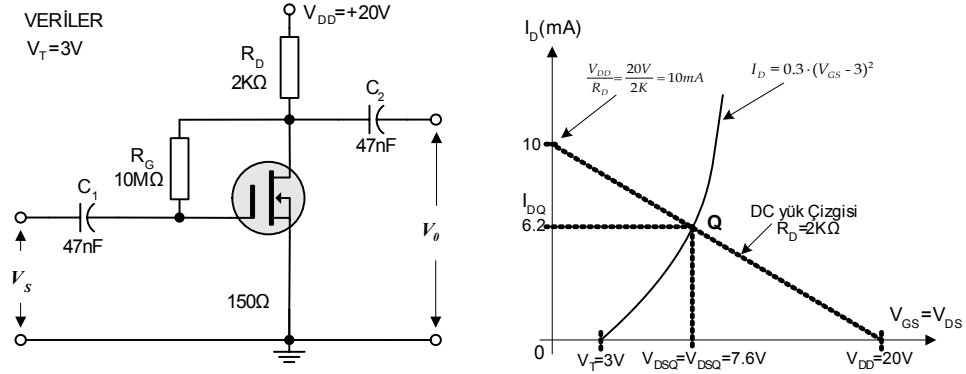
E-MOSFET'in Polarmalandırılması

E-MOSFET'in dc polarmalandırılması için çok kullanılan bir devre düzeni şekil-8.24'de görülmektedir. Devrede dreyn-sörs gerilimi (V_{DD}), geyt-sörs polarma gerilimi olarak kullanılmıştır. Bu işlem, dreyn-sörs arasına $R_G=10M\Omega$ 'luk bir direnç bağlamak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Geyt akımı olmadığından R_G direnci uçlarında bir gerilim düşümü olmaz. Dolayısıyla dreyn gerilimi aynen geytte görülür. Dolayısıyla $V_{DS}=V_{GS}$ olur. Diğer bir deyimle dreyn-sörs arasındaki V_{DS} gerilimi, geyt-sörs arasındaki V_{GS} gerilimine eşittir. Belli bir R_D değeri için uygun polarma noktası elemanın transfer karakteristiği kullanılarak bulunabilir.

Şekil-8.24.b’de $R_D=2K\Omega$ ve $V_{DD}=20V$ değerleri için polarma noktasının, elemanın transfer karakteristiğinden faydalanılarak nasıl bulunduğu görülmektedir. Elemanın transfer karakteristiği,

$$I_D = K \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

eşitliği kullanılarak grafik kağıdına çizilebilir. Örnek olarak verilen n-kanallı E-MOSFET'in eleman yapısına bağlı sabitesi $K=0.3mA/V^2$ ve eşik gerilimi $V_T=3\text{ V}$ olduğuna göre transfer karakteristiği eşitliği,



Şekil-8.24.a ve b N Kanal E-MOSFET Polarizma devresi ve Transfer Karakteristiği

$$I_D = K \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_D = 0.3 \cdot (V_{GS} - 3)^2$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte V_{GS} 'ye birkaç değer (3V ve daha büyük) verilerek bunlara karşılık olan I_D değerleri hesaplanır. Elde edilen sonuçlardan yararlanarak transfer karakteristiği eğrisi çizilir. Aynı grafik üzerine devrenin DC yük çizgisi de çizilebilir. DC yük çizgisi eşitliği,

$$V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot R_D$$

olur. Verilen örnekte $R_D = 2\text{K}\Omega$ ve $V_{DD} = 20\text{ Volt}$ 'dur. Bu taktirde DC yük çizgisi eşitliği,

$$V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot R_D = 20\text{V} - (I_D) \cdot (2\text{K}\Omega)$$

olur.

Bu çizginin $V_{DS} = V_{GS} = 0\text{V}$ ve $I_D = 0\text{ mA}$ şartları için sırasıyla dikey ve yatay eksenlerdeki iki noktası belirlenir. Dikey ve yatay eksenlerde belirlenen iki nokta bir doğru vasıtasıyla birleştirildiğinde $R_D = 2\text{K}\Omega$ için DC yük çizgisi çizilmiş olur. Yük çizgisiyle elemanın transfer karakteristiği eğrisinin kesiştiği yer çalışma noktasını gösterir. Şekil-8.24.b'de görülen çalışma noktasının şartları çizim yardımıyla,

$$V_{GSQ} = V_{DSQ} = 7.6\text{ V} \quad I_{DQ} = 6.2\text{ mA}$$

olarak bulunur.