

# Yarıiletkenlerde Akım Mekanizmaları (Taşıyıcı İletimi)

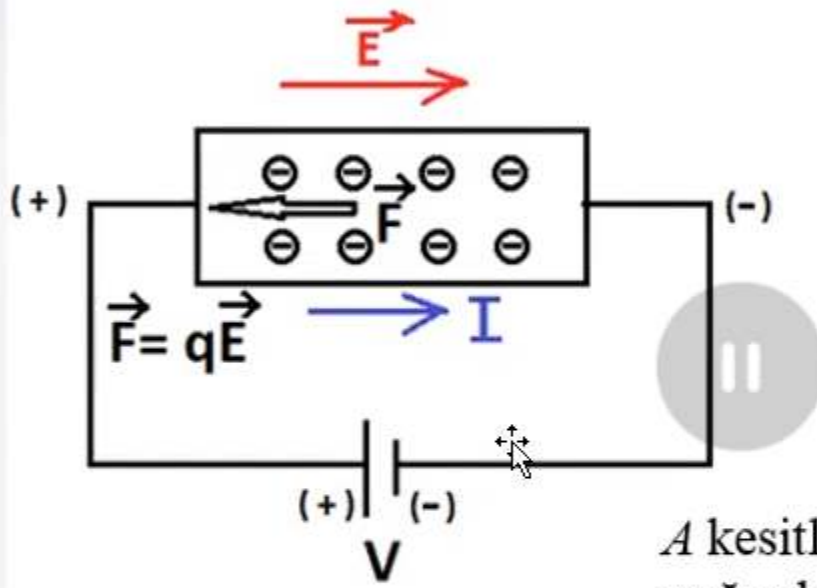
**1- Sürüklenme Akımı:** Yarıiletkenlerdeki serbest taşıyıcıların hareketi akıma neden olur. Bu hareket bir dış elektrik alan etkisi ile sağlanabilir. Bu iletim mekanizmasına taşıyıcı sürüklenmesi (sürüklenme akımı) denir.

**2- Difüzyon Akımı:** Taşıyıcılar, yoğunluğu yüksek olan yerden düşük olan yerlere doğru hareket ederler. Bu mekanizma ısı enerjisi ile sağlanır. Bu iletim mekanizmasına, taşıyıcı difüzyonu (difüzyon akımı) denir.

# Akım

Akım tanımı ilk olarak iletken maddeler için yapılmıştır.

- Bir elektriksel potansiyel altında, iletkenin içindeki elektronlar elektrik alan yardımı ile artı uca doğru çekilirler. İletkende elektron hareketi yönünün tersinde bir elektrik akımı oluşur.



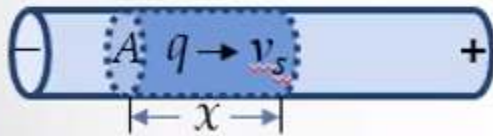
A kesitli silindirik dilimden geçen toplam yük,  $\Delta Q = \text{Yük yoğunluğu} \times \text{Hacim}$

$$\Delta Q = (nq)(xA) = (nq)(v_s \Delta t A) \Rightarrow I = \Delta Q / \Delta t = nqv_s A$$

$I = nqv_s A$  olur. Buradan da akım yoğunluğu  $J = I/A = nqv_s$  bulunur.

$$\vec{J} = nq\vec{v}_s, \quad \vec{v}_s = \mu\vec{E} \text{ dir. } \vec{J} = nq\mu\vec{E}, \text{ burada } \sigma = nq\mu \text{ dir.}$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \text{ olur. } \sigma: \text{öziletkenlik}$$



$$x = v_s \Delta t, \quad v_s \text{ sürüklenme hızı}$$

$n$  : yük taşıyıcı sayı yoğunluğu ( $N/\text{Hacim}$ )

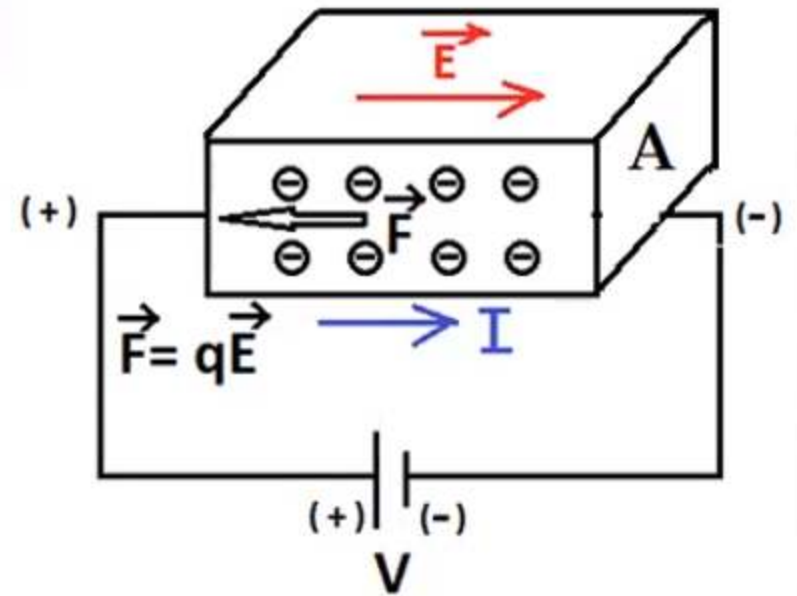
$q$  : taşıyıcının yükü ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

$$I_{ort} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \rightarrow \frac{C}{s}$$

$$I_{ani} = \frac{dq}{dt} \rightarrow A$$

Akımın SI birimi Amper (A) dir.

•  $1 A = 1 C/s$



Akım iletkenler için yeterli bilgi sağlamamaktadır. Mesela farklı kesit alanlarına sahip iletkenlerden geçen akım aynı olmakta ve aradaki farkı yansıtmamaktadır. 'Hangi kesit alandan geçen yükün hareketi incelenmelidir' sorusunun cevabı akım yoğunluğundadır.

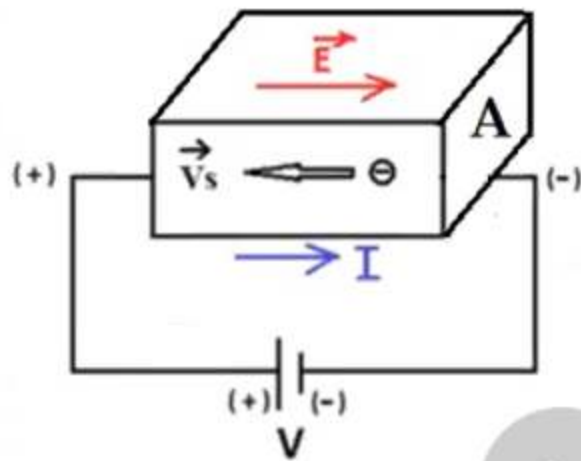
$$\vec{J} = \frac{\vec{I}}{A} = nq\vec{v}_s \quad \text{Birimi } A/m^2$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

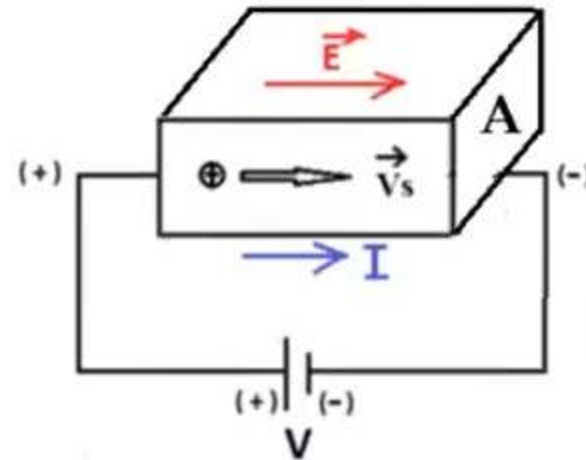
$$\sigma = nq\mu$$



# Yarıiletkenlerde Sürüklenme Akımı



n-tipi yarıiletken



p-tipi yarıiletken

$$I_{ort} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \rightarrow \frac{C}{s}$$

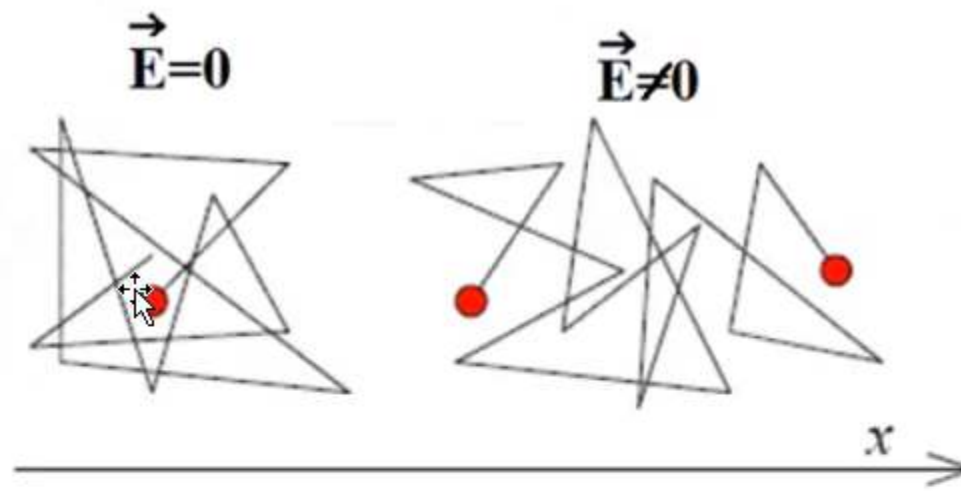
$$I_{ani} = \frac{dq}{dt} \rightarrow A$$

Yarıiletkenlerde de sürüklenme akımı iletkenlere benzerdir. Bir dış elektrik alan etkisi ile taşıyıcılar (elektronlar ya da boşluklar) belli bir yöne doğru hareket ederler (sürüklenirler).

# Sürüklenme hızı ve mobilité

$$\vec{J} = \frac{\vec{I}}{A} = nq\vec{v}_s$$

- Akım yoğunluğunda;
- $n$  = taşıyıcı sayısı
- $q$  = birim yük ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ )
- $v_s$  = taşıyıcı sürüklenme hızı
- $\vec{v}_s = \mu \vec{E}$
- $\mu$  = mobilité
- $E$  = elektrik alan



Yük taşıyıcıları elektrik alan yokken kendi civarında küçük hareketler yapar. Elektrik alan uygulandığında benzer hareketini sürüklenerek devam ettirirler. Ayrıca ortam kalabalıktır (örneğin silikon için  $10^{22}$  atom/ $cm^3$ ) bunun oda sıcaklığında (300 K°) santimetre küp başına  $1.5 \times 10^{10}$  tanesi ancak serbest yük taşıyıcı olur. Sürüklenme sırasında sürekli çarpışmalar meydana gelir. Bu nedenle bazı fiziksel büyüklüklerde örneğin, zaman ve mesafe için iki çarpışma arasındaki ortalama değerler kullanılır.

$$\bar{t}, \bar{l}$$



$$\vec{F} = \vec{F}_e \text{ ise } \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\langle \vec{v} \rangle}{dt} = m \frac{\vec{v}_s}{\tau} = q\vec{E} \quad \langle \vec{v} \rangle = \vec{v}_s \text{ alındı}$$

$$\vec{v}_s = \frac{q\tau}{m} \vec{E} \text{ Burada } \mu = \frac{|\vec{v}_s|}{|\vec{E}|} = \frac{q\tau}{m} \text{ malzemenin mobilitesidir.}$$

$\vec{v}_s = \frac{q\tau}{m} \vec{E}$ , buradan, elektronlar için ( $q = -e$ ) olduğu için, elektronların hareketi elektrik alana zıt olduğu görülür.

Dolayısıyla  $\vec{v}_s = \mu \vec{E}$  dir, elektronlar için  $\vec{v}_s = -\mu \vec{E}$

Holler için  $\vec{v}_s = \mu \vec{E}$

Yarıiletkenlerde atomlar kristalin periyodik potansiyel etkisinde olduğu için serbest yük taşıyıcıları bu potansiyelden etkilenir. Bu yüzden serbest parçacık kütlesi yerine etkin kütle ( $m^*$ ) kullanılır.

Saf Germanyum

$$\mu_n = 3900 \frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}}$$

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

$$\text{Saf silikon için } \mu_n = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}}$$

$$\mu_p = 1900 \frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}}$$

Hollerinki niçin daha küçük bir değer?

$$\mu_p = 480 \frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}}$$

- Örnek:

- Saf galyum arsenik içinde elektronların mobilitesi  $8800 \text{ cm}^2/\text{V-s}$  dir. Çarpışmalar arasındaki ortalama zamanı bulunuz. İki çarpışma arasında alınan yolu (ortalama serbest yol) bulunuz. Ortalama hız olarak  $10^7 \text{ cm/s}$  değerini kullanınız.

- Çözüm:

- Çarpışma zamanı:

$$m^*/m_0 = 0.067$$

$$\tau_c = \frac{\mu_n m_e^*}{q} = \frac{0.88 \times 0.067 \times 9.1 \times 10^{-31}}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.34 \text{ ps}$$

- Ortalama serbest yol ise,

$$l = v_{\text{average}} \tau_c = 10^7 \times 0.34 \times 10^{-12} = 34 \text{ nm}$$



# İletkenlik

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

- $E$  = elektrik alan
- $\sigma$  = öziletkenlik

$\sigma_n = nq\mu_n$  elektronlar için iletkenlik

$\sigma_p = pq\mu_p$  boşluklar için iletkenlik

$$J_n = \sigma_n E = nq\mu_n E = nqv_s$$

Elektronlar için akım yoğunluğu

$$J_p = \sigma_p E = pq\mu_p E = pqv_s$$

Boşluklar için akım yoğunluğu

$$J = J_n + J_p = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

Genel akım yoğunluğu

# Yarıiletkenlerde Difüzyon Akımı

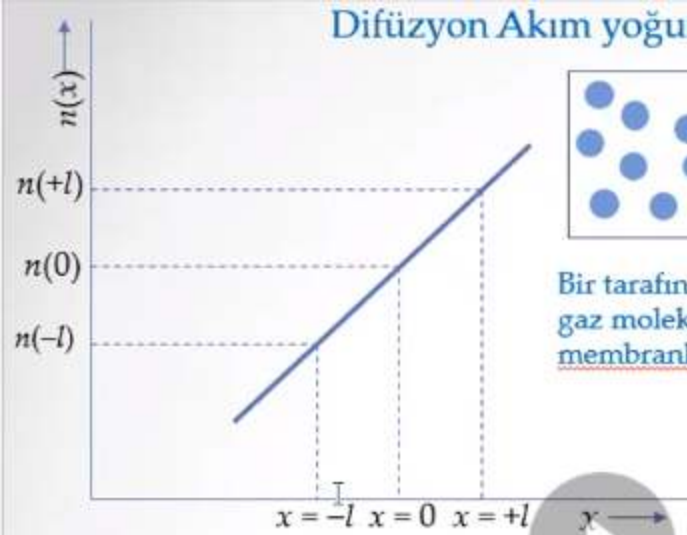
- Taşıyıcı difüzyonu, elektrik alan uygulanmadığı halde bile; taşıyıcıların rastgele hareket etmesine neden olan  $kT$  ısı enerjisinden kaynaklanır.
- $T > 0K$ 'de taşıyıcılar, serbeslik derecesi başına  $kT/2$  kadarlık bir ısı enerjisiye sahip olurlar. Difüzyon prosesini meydana getiren bu enerjidir.  $T = 0K$ 'de difüzyon yoktur.
- Isı enerjisinin rasgele doğasını anlamak için taşıyıcıların istatistik davranışını bilmek gerekir. Bunun yerine burada ortalama değerler kullanılacaktır ki bu da istatistik yaklaşımla hemen hemen aynı sonucu verir. Kolaylık açısından difüzyon akımının tek boyutlu bir yarıiletkende yani taşıyıcıların tek boyutta hareket ettiği durum için olduğunu farz edeceğiz.

- V<sub>th</sub> termal hız,  $\tau$  ortalama serbest süre,  $l$  ortalama serbest yola bağlı olmak üzere, termal hız taşıyıcıların artı ya da eksi yöne doğru gittiği ortalama hızdır; *ortalama serbest süre* taşıyıcıların bir atomla ya da başka bir taşıyıcı ile çarpışana kadar geçen zaman, ortalama serbest yol ise, çarpışmalar arasında taşıyıcının gittiği ortalama mesafedir.
- Bu üç değişken aşağıdaki bağıntı ile birbirine bağlıdır.

$$v_{th} = l / \tau$$



## Difüzyon Akım yoğunluğu



Bir tarafında belli bir sıcaklıkta gaz molekülleri bulunan ve bir membranla bölünmüş bir kab

Membran kırıldığında gaz molekülleri kabın sağ tarafına akacaklar. *Difüzyon*, parçacıkların yüksek konsantrasyon bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine doğru akma sürecidir. Eğer gaz molekülleri elektrik yüklü olsaydı, net bir yük akışı bir difüzyon akımıyla sonuçlanacaktı.

Akımı hesaplamak için,  $x = 0$  da düzlemden dik geçen birim alan başına birim zamanda elektronların net akışını belirleyeceğiz. Yandaki şekilde gösterilen  $l$  mesafesi bir elektronun ortalama serbest yolundan daha az ise, yani, çarpışmalar arasında bir elektronun aldığı ortalama mesafe ( $l < v_{th} \tau$ ), dolayısıyla ortalamada  $x = -l$  de sağa hareket eden elektronlar ve  $x = +l$  de sola hareket eden elektronlar  $x = 0$  daki düzlemi karşıdan karşıya geçecekler.

$x = 0$  da elektron konsantrasyonu, Taylor serisine genişletip sadece ilk iki terim alınırsa

$$F_n = \frac{1}{2} v_{th} [n(-l) - n(+l)] = \frac{1}{2} v_{th} \left( \left[ n(0) - l \frac{dn}{dx} \right] - \left[ n(0) + l \frac{dn}{dx} \right] \right)$$

$$\bullet F_n = -v_{th} l \frac{dn}{dx}, J_n = -e F_n = e v_{th} l \frac{dn}{dx} = e D_n \frac{dn}{dx} \bullet$$

### Uzaklığa karşı elektron konsantrasyonu

Herhangi bir anda  $x = -l$  deki elektronların bir yarısı sağa hareket edecekler ve  $x = +l$  deki elektronların bir yarısı sola hareket edecekler.  $x = 0$  da  $+x$  yönünde elektronun net akış oranı,  $F_n$  aşağıdaki gibi verilir.

- $J_n = -eF_n = ev_{th}l \frac{dn}{dx} = eD_n \frac{dn}{dx}$
- $J_p = -ev_{th}l \frac{dp}{dx} = -eD_p \frac{dp}{dx}$

- **$D_n$  ve  $D_p$  difüzyon katsayılarıdır.**

- Veya

I

- $D_n = \mu_n \frac{kT}{q}$  elektronlar için,

- $D_p = \mu_p \frac{kT}{q}$  boşluklar için,

- **Einstein Katsayısı** olarak da anılır.

**Örnek:** 300 K de  $n$ -tipi galyum arsenid yarıiletkeninde, elektron konsantrasyonu, 0.10 cm'lik bir mesafe üzerinden  $1 \times 10^{18}$  den  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  lik bir konsantrasyona değişmektedir. Elektron difüzyon katsayısı  $225 \text{ cm}^2/\text{s}$  ise difüzyon akım yoğunluğunu bulunuz.

$$J_n = eD_n \frac{dn}{dx} \approx eD_n \frac{\Delta n}{\Delta x} = 1.6 \times 10^{-19} (225) \frac{(1 \times 10^{18} - 7 \times 10^{17})}{0.10} = 108 \text{ A/cm}^2$$

- Yarıiletkenlerde Toplam Akım Yoğunluğu

- Toplam Akım Yoğunluğu = Sürüklenme + Difüzyon

- $J_{Toplam} = (J_n \text{ sürüklenme} + J_n \text{ difüzyon}) + (J_p \text{ sürüklenme} + J_p \text{ difüzyon})$

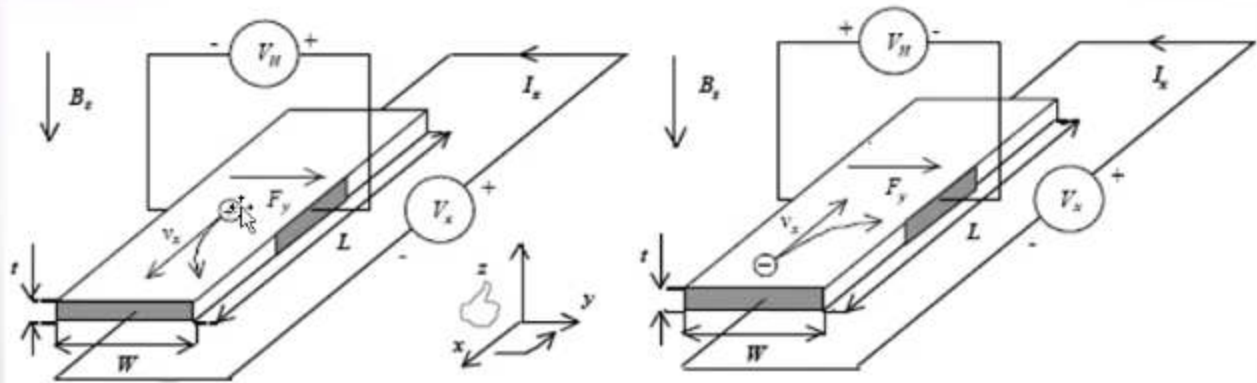
- $J_{Top} = \left( en\mu_n + eD_n \frac{dn}{dx} \right) + \left( ep\mu_p - eD_p \frac{dp}{dx} \right)$

- $I_{Toplam Akım} = A \cdot J_{Toplam Akım Yoğunluğu}$



# Hall Olayı

Hall olayı, bir yarıiletkene elektrik alan ve magnetik alan uygulandığında serbest taşıyıcıların davranışını açıklar. Deney setinde yarıiletkenin dikdörtgen ara kesiti ve  $L$  uzunluğu gösterilmektedir. İki kontak arasına  $V_x$  voltajı uygulanmış ve böylece  $x$ - yönünde elektrik alan oluşmuştur. Manyetik alan ise  $z$  yönüne ters uygulanmıştır. Hall seti ve a) boşluklar ve b) elektronlar için taşıyıcı hareketi



- $F_B = F_E$

- $qv_s B = qE_{Hall}^I$

- $E_{Hall} = v_s B$  ,  $v_s = \frac{I}{nqA}$  ,  $A = t.W$  ,  $R_{Hall} = \frac{1}{nq}$

- $V_{Hall} = E_{Hall}W = v_s BW = \frac{I}{nqtW} BW = \frac{IB}{nqt}$

- $V_{Hall} = R_{Hall} \frac{IB}{t}$

- Benzer denklemler p tipi yarıiletkenler için de türetilebilir.

- Hall voltajının ölçülmesi ile yarıiletkenin tip (n veya p tipi) ,serbest taşıyıcı yoğunluğu, ve taşıyıcı mobilitesi belirlenebilir.
- Ölçümlerin değişik sıcaklıklarda yapılması ile, serbest taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitenin sıcaklığın fonksiyonu olarak belirlenmesi sağlanabilir.
- Taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla değişiminin ölçülmesi ile yarıiletkenlerde bulunan donor ve akseptörlerin iyonizasyon enerjileri belirlenebilir.