

MÜHENDİSLER İÇİN YARIİLETKEN FİZİĞİ

FIZ1951

Ders Adı	Kodu	Yerel Kredi	AKTS	Ders (saat/hafta)	Uygulama (saat/hafta)	Laboratuvar (saat/hafta)
Mühendisler için Yarıiletken Fiziği	FIZ1951	3	5	3	0	0

Ara Sınavlar	2	60
Final	1	40
TOPLAM		100

Dersi Veren Öğretim Üyesi
Doç.Dr. Süreyya AYDIN YÜKSEL
Grup.....3.....

İletişim e-mail: fiz1951.2021.say@gmail.com

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYI)

- **Yarıiletken iletkenliği:**

1- Elektron (iletim bandındaki serbest elektronlar) ve boşlukların (valans bandındaki) konsantrasyonuna bağlıdır

2- Yük taşıyıcılarının hareketliliğinin fonksiyonudur. Kristal içinde yük taşıyıcılarının hareketliliğinin ölçüsüne bağlıdır.

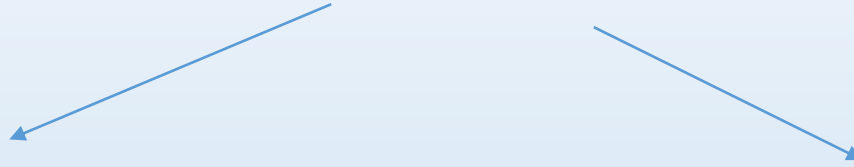
3- Kristaldeki kusurlar bu hareketliliği doğrudan etkiler

4- Kusur atomları ve kristalin ana atomlarının sıcaklık nedeniyle titreşimleri elektron saçılma merkezleri olarak davranır.

- Yarıiletken aygıtlar elektron (iletim bandındaki serbest elektronlar) ve boşlukların (valans bandındaki) taşınımı ile çalışırlar.
- Yarıiletken aygıtlar; diyotlar, transistörler, lazerler, fotodiyotlar, dedektörler elektron ve boşluk taşınım mekanizmalarına dayalı çalışırlar.
- Metallerde sadece elektronlar taşınır.
- Genel olarak katı içerisindeki lokalize yükler denge konumları etrafında titreşirler, taşınmazlar.
- Lokalize yüklerin titreşimleri katı dielektrik ve polarizasyon özelliklerini etkiler

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI

YARIİLETKENLERDE İLETKENLİK MEKANİZMALARI:



1- Sürüklenme iletkenliği:

Elektrik alan etkisiyle yük taşınımı

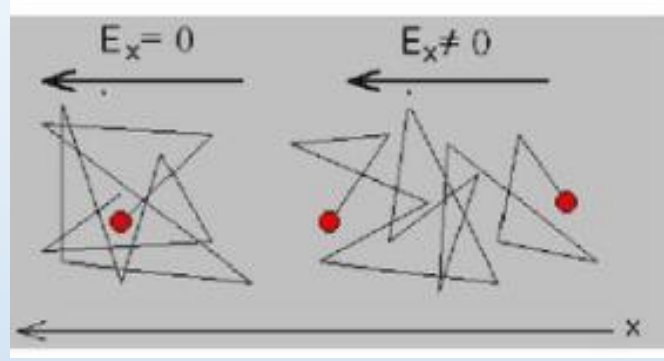
2- Difüzyon iletkenliği:

Yük dağılım homojensizliği nedeniyle yük taşınımı

- **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.

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

1- Sürüklenme iletkenliği: Elektrik alan etkisiyle yük taşınımı



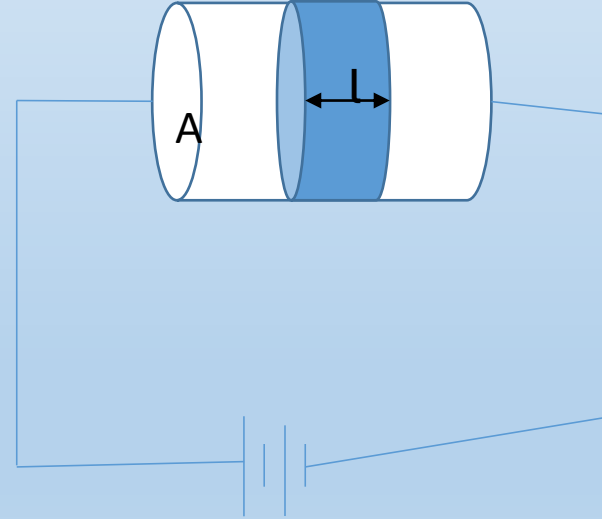
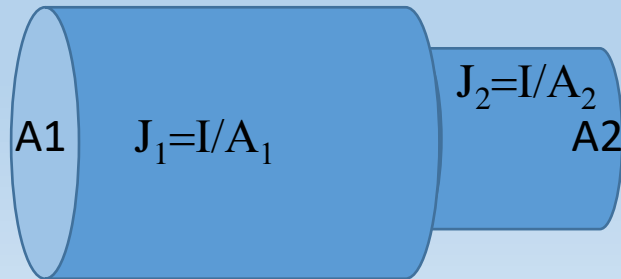
● Elektron -

- Akım tanımı ilk olarak iletken maddeler için yapılmıştır.

Yük taşıyıcıları elektrik alan yokken kendi civarında küçük hareketler yapar. Elektrik alan uygulandığında benzer hareketini sürüklenerek devam ettirirler. Ayrıca ortam kalabalıktır (örneğin $\sim 10^{16} \text{cm}^3$) ve sürüklenme sırasında sürekli çarpışmalar meydana gelir. Bu nedenle bazı fiziksel büyüklüklerde örneğin, zaman ve mesafe için iki çarpışma arasındaki ortalama değerler kullanılır. zaman \bar{t} veya $\bar{\tau}$, yol \bar{l}

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\langle \vec{v} \rangle}{dt} = \frac{m\langle \vec{v} \rangle}{\tau_c}$$

$$\mu = \frac{\Delta |\vec{v}|}{|\vec{E}|} = \frac{q\tau_c}{m}$$



$$I = ne\mu EA$$

$$I = en\mu V(A/l)$$

$$R = V/I$$

$$\rho = 1/ne\mu = 1/\sigma$$

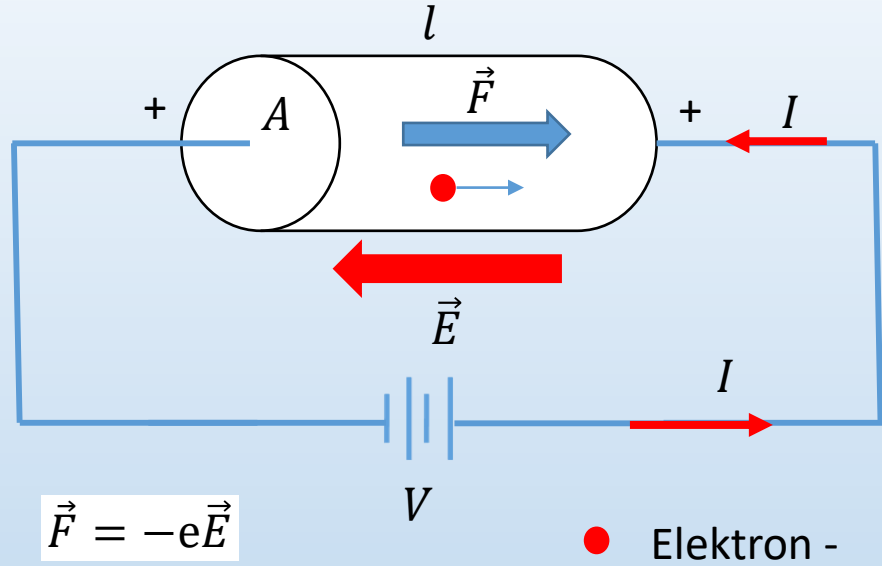
$$J = I/A$$

$$J = \sigma E$$

$$J = ne\mu E$$

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

1- Sürüklenme iletkenliği: Elektrik alan etkisiyle yük taşınımı



$$\vec{F} = -e\vec{E}$$

$$\vec{E} = \frac{V}{l}$$

● Elektron -

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

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

Akımın SI birimi Amper (A) dir.

■ 1 A = 1 C/s

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

Akım ifadesi eksik bir tanımdır. 'Hangi kesit alandan geçen yükün hareketi incelenmelidir' sorusunun cevabı akım yoğunludur.

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

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

- n: taşıyıcı sayısı**
- q: birim yük ($1,6 \cdot 10^{-19} C$)**
- v_s : taşıyıcı sürüklenme hızı**
- μ : mobilite**
- E: elektrik alan**

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

1- Sürüklenme iletkenliği: Elektrik alan etkisiyle yük taşınımı

Yarıiletkene dışardan E alan uygulanmazsa yük taşıyıcıları
...termal..hızla ilerlerler.

$$v_t = \sqrt{\frac{3kT}{m^*}} \dots \text{termal} \dots \text{hız}$$

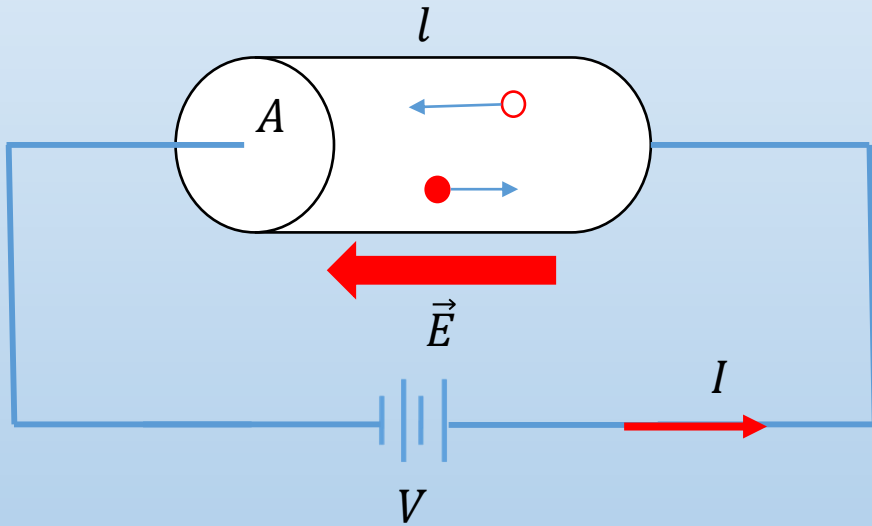
Dışarıdan E alan uygulanırsa
Serbest elektron

$$F = m_o a = eE$$

$$a = \frac{eE}{m_o} \text{ Serbest elektron hareketi}$$

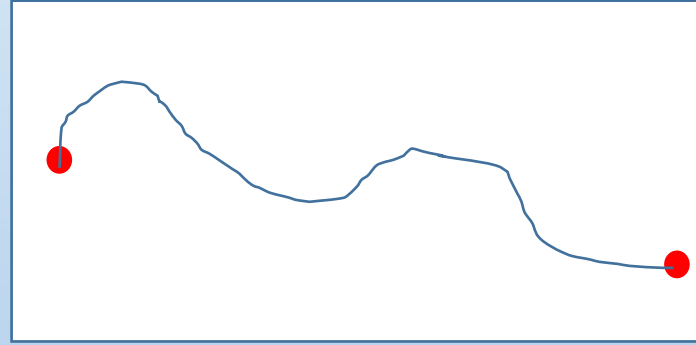
Kristal içinde;

$$F = eE + eE_{Kr} \rightarrow m^* a = eE$$



$$\vec{E} = \frac{V}{l}$$

- Boşuk +
- Elektron -



$$\vec{F} = -e\vec{E}$$

$$\left. \frac{dP}{dt} \right| \Rightarrow -e\vec{E}\Delta t = m_e^* a \Delta t$$

$$N(t) = N_o \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{\text{Saçılma}} = \left. \frac{dP}{dt} \right|_{\text{Sürüklenme}} \Rightarrow -e\vec{E} = \frac{\vec{P}}{\tau}$$

$$\Rightarrow -e\vec{E} = \frac{m_e^* \vec{v}}{\tau}$$

$$\Rightarrow \vec{v} = \frac{-e\vec{E}\tau}{m_e^*} \text{ sürüklenme hızı}$$

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI

1- Sürüklenme iletkenliği: Elektrik alan etkisiyle yük taşınımı

$$\Rightarrow \vec{v} = \frac{-e\vec{E}\tau}{m_e^*} \quad \text{sürüklenme hızı}$$

$$\mu = \frac{\vec{v}}{\vec{E}} = \frac{-e\tau}{m_e^*} \quad (\mu: \text{mobilité} \quad \text{Birimi: } \frac{m^2}{V.s})$$

Yarıiletken	$\mu_n (cm^2/V.s)$
GaAs	8500
Si	1500
InP	4600

$$\Rightarrow \mu_n = \frac{e\tau}{m_e^*} \quad \text{elektronların mobilitesi}$$

$$\Rightarrow \mu_p = \frac{e\tau}{m_p^*} \quad \text{boşlukların mobilitesi}$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m_e^*}$$

\Rightarrow **mobilité yarıiletken aygıtların max. çalışma hızının bir ölçüsüdür.**

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI

1- Sürüklenme iletkenliği: Elektrik alan etkisiyle yük taşınımı

Örnek:

Saf Galyum Arsenik (GaAs) içinde elektronların mobilitesi $8800 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ dir.

a) Çarpışmalar arası ortalama zamanı,

b) İki çarpışma arası alınan ortalama serbest yolu, bulunuz.

(Ortalama hız= 10^7 cm/s , $m_e^* = 0.067m_o$, $m_o = 9.1 \times 10^{-31}(\text{kg})$ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

a)

$$\mu_n = \frac{e\tau}{m_e^*}$$

$$\tau = \frac{\mu_n m_e^*}{e}$$

$$\tau = \frac{0.88 \left(\frac{m^2}{\text{V.s}} \right) 0.067 \times 9.1 \times 10^{-31}(\text{kg})}{1.6 \times 10^{-19} (\text{C})} = 0.34 \times 10^{-12} \text{ s}$$

$$\tau = 0.34 \text{ ps}$$

b)

$$l = v\tau$$

$$l = 10^7 \times 10^{-2} \left(\frac{m}{s} \right) \times 0.34 \times 10^{-12} \text{ s}$$

$$l = 34 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$l = 34 \text{ nm}$$

Asal bir yarıiletkende elektriksel iletkenliğin hem elektron hem de boşluk denilen iki tip yük taşıyıcısı ile sağlanmaktadır. Bu duruma **BİPOLAR İLETKENLİK** denir.

$$\sigma_n = ne\mu_n$$

$$\sigma_p = pe\mu_p$$

Toplam iletkenlik;

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p$$

$$\sigma = e(p\mu_p + n\mu_n)$$

Bipolar iletkenlik genel ifadesi

μ_n : elektronun mobilitesi

μ_p : boşluğun mobilitesi

n : iletim bandındaki serbest elektron konsantrasyonu

p : valans bandındaki boşluk konsantrasyonu

σ : elektriksel iletkenlik

J : Akım yoğunluğu

E : Elektrik alan

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

Elektronlar için akım yoğunluğu

$$J_p = \sigma_p E = p q \mu_p E = p q v_s$$

Boşluklar için akım yoğunluğu

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

Genel akım yoğunluğu

$$J = \sigma E$$

$$J = e(p\mu_p + n\mu_n) E$$

Saf yarıiletkenlerde mobilitayı etkileyen tek faktör örgü saçılmalarıdır, böylece mobilite her zaman sıcaklıkla azalır. Katkılı yarıiletkenlerde iki katkı vardır - örgü (μ_L) ve safsızlıklar (μ_i). Dolayısıyla, toplam hareketlilik, Matthiessen'in kuralı tarafından verilmektedir.

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

2- Difüzyon iletkenliği:

- Sıfır olmayan sıcaklıktaki (Kelvin) taşıyıcıların, serbestlik derecesi başına $kT/2$ 'ye eşit olan ek bir termal enerjiye sahip olduğu temel kavramına dayanmaktadır. Difüzyon sürecini yönlendiren termal enerjidir. **$T = 0$ K'da difüzyon yoktur.**
- daha da basitleştirmek için, taşıyıcıların yalnızca bir yönde hareket edebildiği tek boyutlu bir yarı iletken için difüzyon akımını türeteceğiz.
- Değişkenlerin ortalama değerlerini, alarak işlem yaparız.
- Termal hız (v_{th}), pozitif veya negatif yönde giden taşıyıcıların ortalama hızıdır.
- Çarpışma süresi (τ_C), taşıyıcıların bir atomla veya başka bir taşıyıcıyla çarpışma meydana gelmeden önce aynı hızda hareket edecekleri süredir.
- Ortalama serbest yol (l), bir taşıyıcının çarpışmalar arasında seyahat edeceği ortalama uzunluktur. Bu üç ortalama aşağıdakilerle ilişkilidir:

$$v_{th} = \frac{l}{\tau_C}$$

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

2- Difüzyon iletkenliği:

$$\vartheta_{th} = \frac{l}{\tau_C}$$

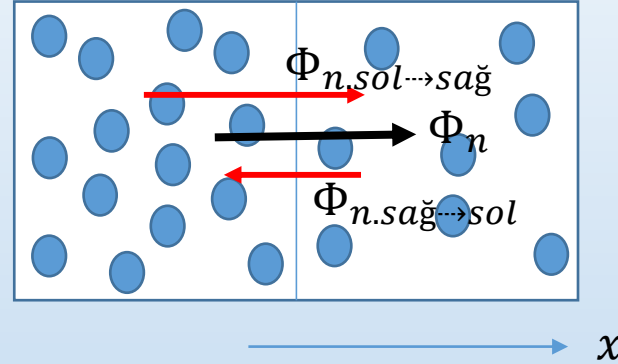
değişken bir taşıyıcı yoğunluğu, $n(x)$.

$x = -l$ 'de başlayan ve soldan sağa hareket eden taşıyıcılar nedeniyle

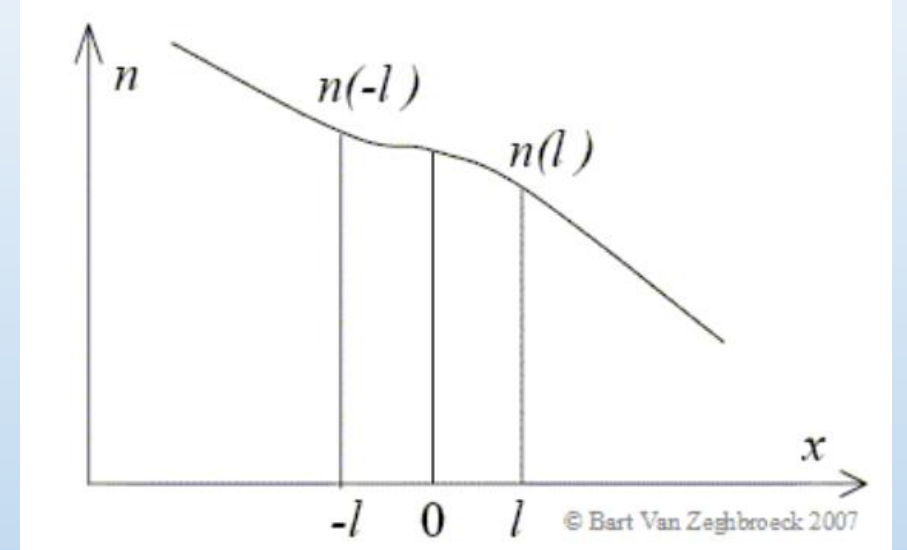
$x = 0$ 'daki akı şuna eşittir:

$$\Phi_{n.sol \rightarrow sağ} = \frac{1}{2} \vartheta_{th} n(x = -l) \quad \Phi_{n.sağ \rightarrow sol} = \frac{1}{2} \vartheta_{th} n(x = l)$$

$$\Phi_n = \frac{1}{2} \vartheta_{th} [n(x = -l) - n(x = l)]$$



Difüzyon akımı ifadesini türetmek için kullanılan taşıyıcı yoğunluk profili



YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

2- Difüzyon iletkenliği:

$$\Phi_n = \frac{1}{2} v_{th} [n(x = -l) - n(x = l)]$$

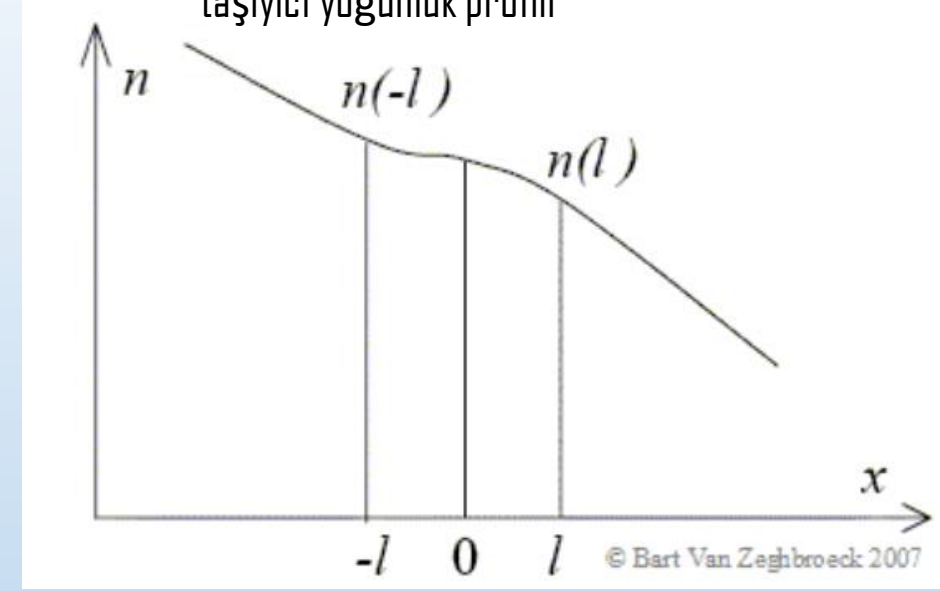
Ortalama serbest yolun küçük olduğu göz önüne alındığında, yoğunluk farkını $x = -l$ ve $x = l$ arasındaki mesafeye bölü taşıyıcı yoğunluğunun türevi olarak yazabiliriz:

$$\Phi_n = -l v_{th} \frac{n(x = l) - n(x = -l)}{2l}$$

$$\Phi_n = -l v_{th} \frac{dn}{dx}$$

Difüzyon akımı yoğunluk gradyentinin zıt yönünde, hareket yönü çok yoğun dan az yoğunadır.

Difüzyon akımı ifadesini türetmek için kullanılan taşıyıcı yoğunluk profili



$$\text{Elektron difüzyon akımı, } \Rightarrow J_n = -q\Phi_n = ql v_{th} \frac{dn}{dx}$$

$$\text{Elektron difüzyon akımı yoğunluğu } \Rightarrow J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

2- Difüzyon iletkenliği:

Difüzyon akımı n parçacık yoğunluğundan öte parçacık yoğunluk gradyenti ile ilgilidir.

$$\text{Elektron difüzyon akımyoğunluğu} \Rightarrow J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$\text{Boşluk(hole)difüzyon akımyoğunluğu} \Rightarrow J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

termodinamiğin sonucu olarak, elektronların her bir serbestlik derecesi için $kT / 2$ 'ye eşit bir termal enerji taşır.

ID

$$\frac{kT}{2} = \frac{m^* v_{th}^2}{2}$$

$$l v_{th} = \frac{m^* v_{th}^2}{2} \frac{q \tau_c}{m^*}$$

$$= \frac{kT}{q} \mu$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \Rightarrow \mu_n \vartheta_t$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \Rightarrow \mu_p \vartheta_t$$

$$D_n, D_p (\text{Difüzyon Katsayıları}) \Rightarrow \text{cm}^2/\text{s}$$

(cm ² /s)	Silisyum	Germanyum
D_n	36	100
D_p	13	50

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

TOPLAM AKIM

Toplam elektron akımı, difüzyondan kaynaklanan akımın sürüklenme akımına eklenmesiyle elde edilir ve sonuçta:

Elektron toplam akım yoğunluğu $\Rightarrow J_T = J_{\text{sürüklenme}} + J_{\text{difüzyon}}$

Elektron toplam akım yoğunluğu $\Rightarrow J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$

Boşluk toplam akım yoğunluğu, $\Rightarrow J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$

toplam akım $\Rightarrow I = A(J_n + J_p)$

$J_{\text{toplam}} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} + qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$

$J_{\text{toplam}} = en\mu_n E + eD_n \frac{dn}{dx} + ep\mu_p E - eD_p \frac{dp}{dx}$

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

TOPLAM AKIM

Taşıyıcı mobilitesi ile difüzyon katsayısı arasında ilişki

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{e}{k_B T}$$

Einstein bağıntıları ile belirlenir.

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

2- Difüzyon iletkenliği:

ÖRNEK: n-tipi silisyumda ($N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) içindeki boşluk yoğunluğu $x = 0$ ile $x = 1 \text{ mm}$ arasında doğrusal olarak 10^{14} cm^{-3} 'ten 10^{13} cm^{-3} 'e azalır. Delik difüzyon akımı yoğunluğunu hesaplayın.

$$\text{Boşluk(hole) difüzyon akımyoğunluğu} \Rightarrow J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} = -qD_p \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

$$\text{Boşluk(hole) difüzyon akımı,} \Rightarrow J_p = -1.6 \times 10^{-19} \times 8.2 \times \frac{10^{14} - 10^{13}}{10^{-4}}$$

$$\text{Boşluk(hole) difüzyon akımı,} \Rightarrow J_p = -1.18 \text{ A/cm}^2$$

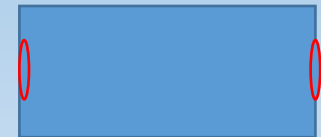
$$D_p = 0.0259 \times 317 \Rightarrow D_p = 8.2 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Gümüş

Silisyum



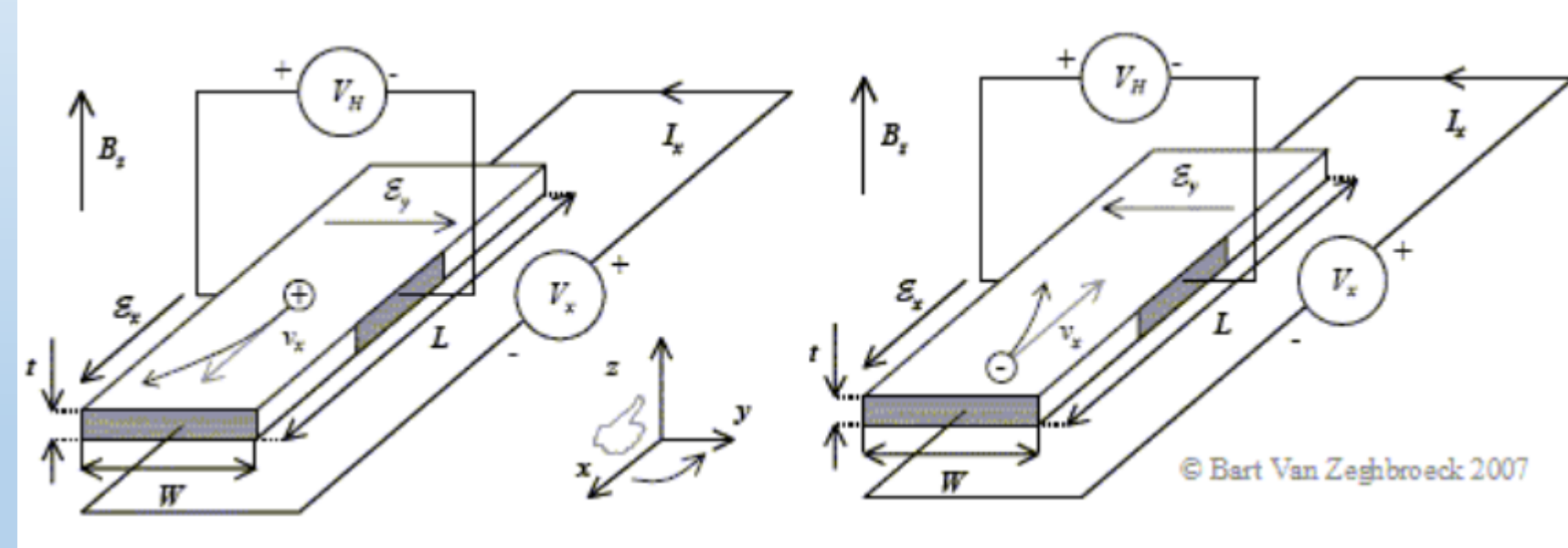
Ohmmetre



YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

HALL OLAYI

Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi Hall etkisi ile belirlenir..



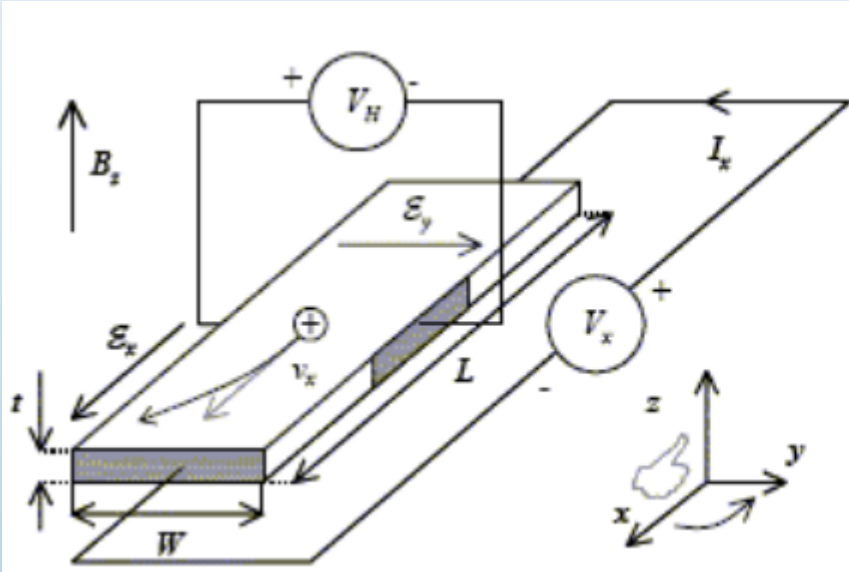
Hall etkisi, bir elektrik ve bir manyetik alan uygularken bir yarı iletkendeki serbest taşıyıcıların davranışını tanımlar. Şekilde gösterilen deney düzeneği, dikdörtgen bir kesite ve L uzunluğuna sahip bir yarı iletken çubuğu göstermektedir. İki kontak arasına bir V_x gerilimi uygulanarak +x-yönü boyunca bir Elektrik alan elde edilir.

Manyetik alan, z yönünde uygulanır.

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

HALL OLAYI

Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi Hall etkisi ile belirlenir..



delikler pozitif x yönünde hareket eder.

Manyetik alan, bir kuvvetin hareketli parçacıklar üzerinde sağ el kuralı ile belirlenen yönde etki etmesine neden olur. Sonuç olarak pozitif y yönü boyunca delikleri sağa hareket ettiren bir kuvvet, F_y vardır.

Kararlı durumda bu kuvvet bir elektrik alanı E_y ile dengelenir, böylece delikler üzerinde net kuvvet sıfır olur.

Sonuç olarak, örnek boyunca yüksek empedanslı bir voltmetre ile ölçülebilen bir voltaj oluşur.

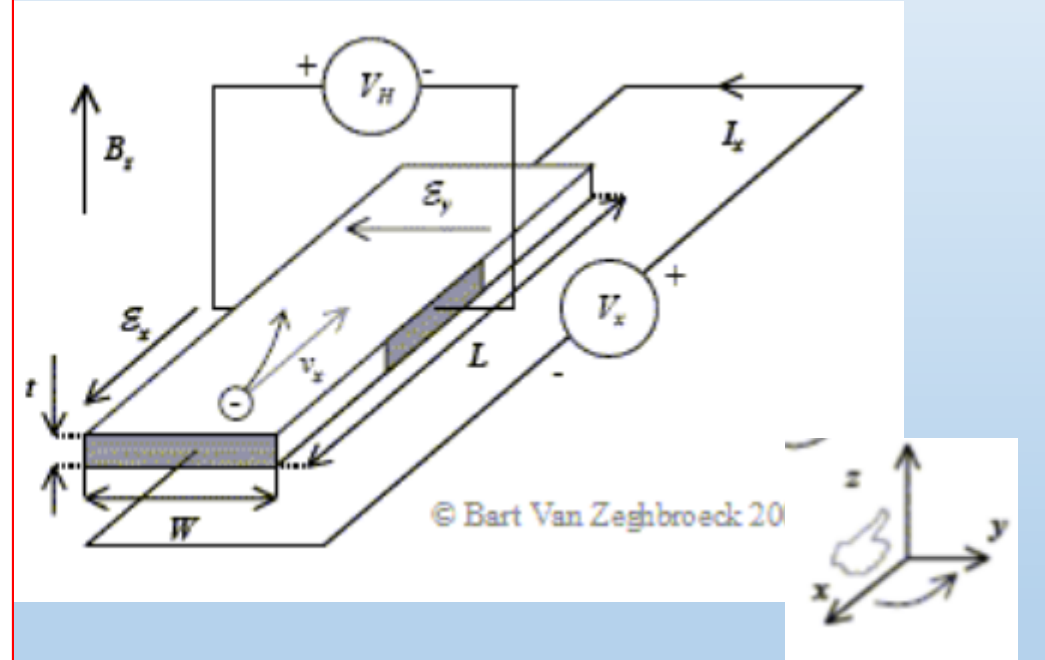
Bu voltaj, V_H , Hall voltajı olarak adlandırılır. şekilde gösterilen işaret kuralı için Hall voltajı delikler için pozitiftir.

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

HALL OLAYI

Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi Hall etkisi ile belirlenir..

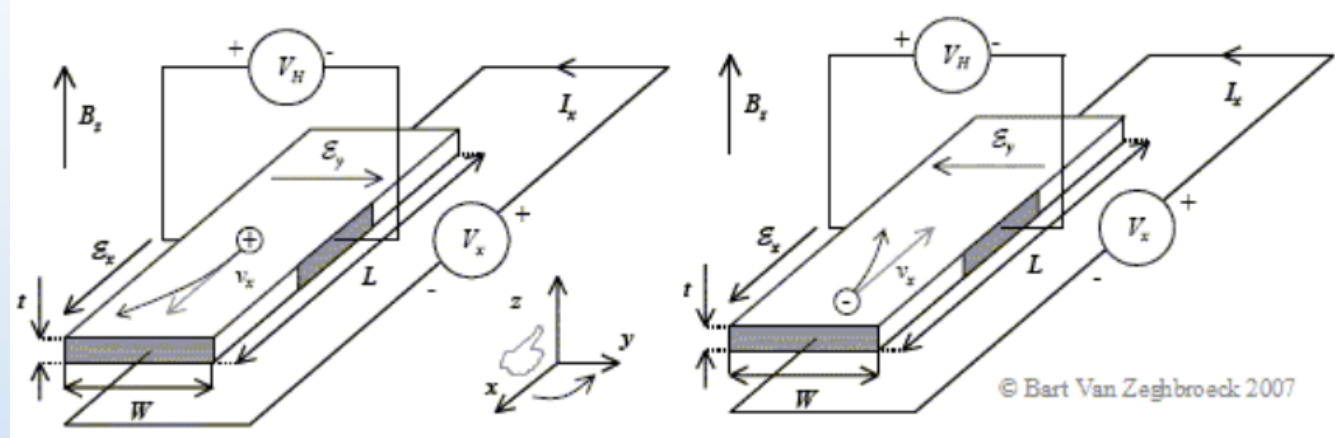
Elektronların davranışı gösterilmektedir.
Elektronlar negatif x yönünde hareket eder.
Bu nedenle, F_y kuvveti, negatif yük nedeniyle pozitif y yönündedir ve elektronlar, tıpkı delikler gibi sağa doğru hareket eder.
Dengeleyici elektrik alanı y, şimdi ters işarete sahiptir, bu da negatif bir Hall voltajıyla sonuçlanır.



YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

HALL OLAYI

Hall alanını hesaplamak için, önce serbest taşıyıcılara etki eden Lorentz kuvvetini hesaplayalım:



$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0$$
$$\vec{F} = q\vec{E} + q \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ v_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{F} = qE_x\hat{i} + qE_y\hat{j} - qv_xB_z\hat{j} + qE_z\hat{k}$$

Taşıyıcılar yalnızca x yönü boyunca aktığı için, y ve z yönünde net kuvvet sıfır olmalıdır. Sonuç olarak, elektrik alanı z yönünde sıfırdır

$$F_y = qE_y - qv_xB_z = 0$$

$$E_y = v_xB_z \Rightarrow \frac{J_x}{qp_{po}} B_z$$

y-yönü boyunca elektrik alan ve uygulanan manyetik alan arasında bir ilişki sağlar. A kım yoğunluğu, J_x 'in bir fonksiyonu olarak yeniden yazılabilir ve sonuç olarak:

$$J_x = qp_{po}v_x$$

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

HALL OLAYI

Bu elektrik alanına Hall alanı denir. Hall katsayısı, R_H , Hall alanının mevcut yoğunluk, J_x ve manyetik alan B_z 'ye bölünmesi olarak tanımlanır:

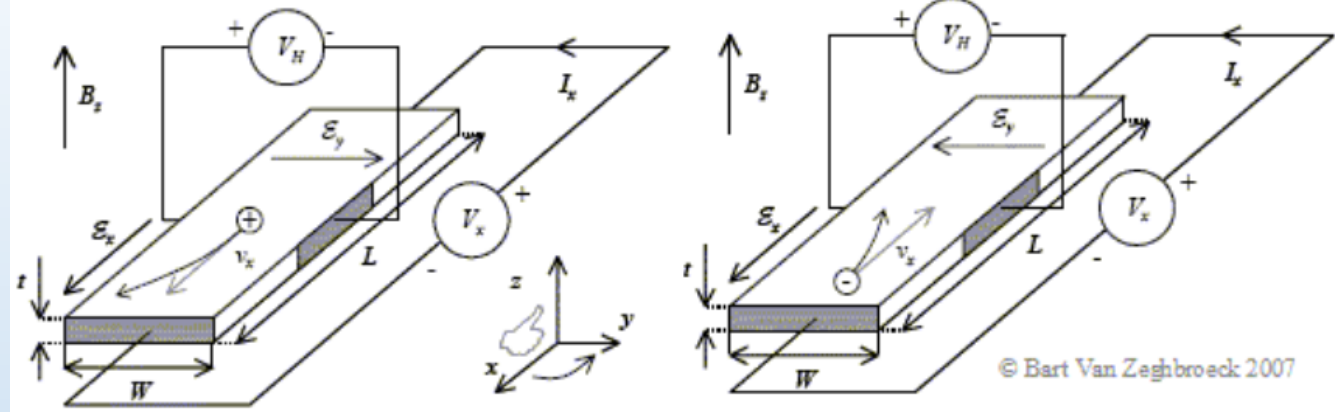
$$E_y = v_x B_z \Rightarrow \frac{J_x}{qp_{po}} B_z$$

$$p_{po} = \frac{1}{qR_H} = \frac{J_x B_z}{qE_y}$$

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qp_{po}}$$

$$\mu_p = \frac{R_H}{\rho} = \frac{J_x}{qp_{po} E_x}$$

$$V_H = R_H \frac{I_x B_z W}{t L}$$



ρ , yarı iletkenin özdirençidir. Alternatif olarak, ölçülen akım, I_x ve ölçülen voltaj, V_H 'den Hall katsayısı hesaplanabilir:

$$R_H = \frac{V_H}{I_x B_z} \frac{tL}{W}$$

R_H negatif (-)..... elektronlar için
 R_H pozitif (+)..... boşluklar için

YARIİLETKENLERDE YÜK TAŞINIMI (KİNETİK OLAYLAR)

HALL OLAYI

- Hall voltajının bir ölçümü genellikle yarı iletken tipini (n tipi veya p tipi) serbest taşıyıcı yoğunluğunu ve taşıyıcı hareketliliğini (mobilité) belirlemek için kullanılır.
- Ölçümün farklı sıcaklıklarda tekrarlanması, serbest taşıyıcı yoğunluğunun yanı sıra sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hareketliliğin ölçülmesini sağlar.
- Bir manyetik alan mevcudiyetinde saçılma mekanizmalarının farklı olduğu ve ölçülen Hall hareketliliğinin sürüklenme hareketliliğinden biraz farklı olabileceği unutulmamalıdır.
- Taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa göre ölçümü, yarı iletkende bulunan donörlerin ve alıcının iyonizasyon enerjilerine ilişkin bilgi sağlar.
- Tek bir katkı maddesi söz konusu olduğunda Hall ölçümünün yorumlanması basit olsa da, birden fazla safsızlık türü ve elektronların ve deliklerin varlığı, yorumu önemsiz hale getirebilir.