

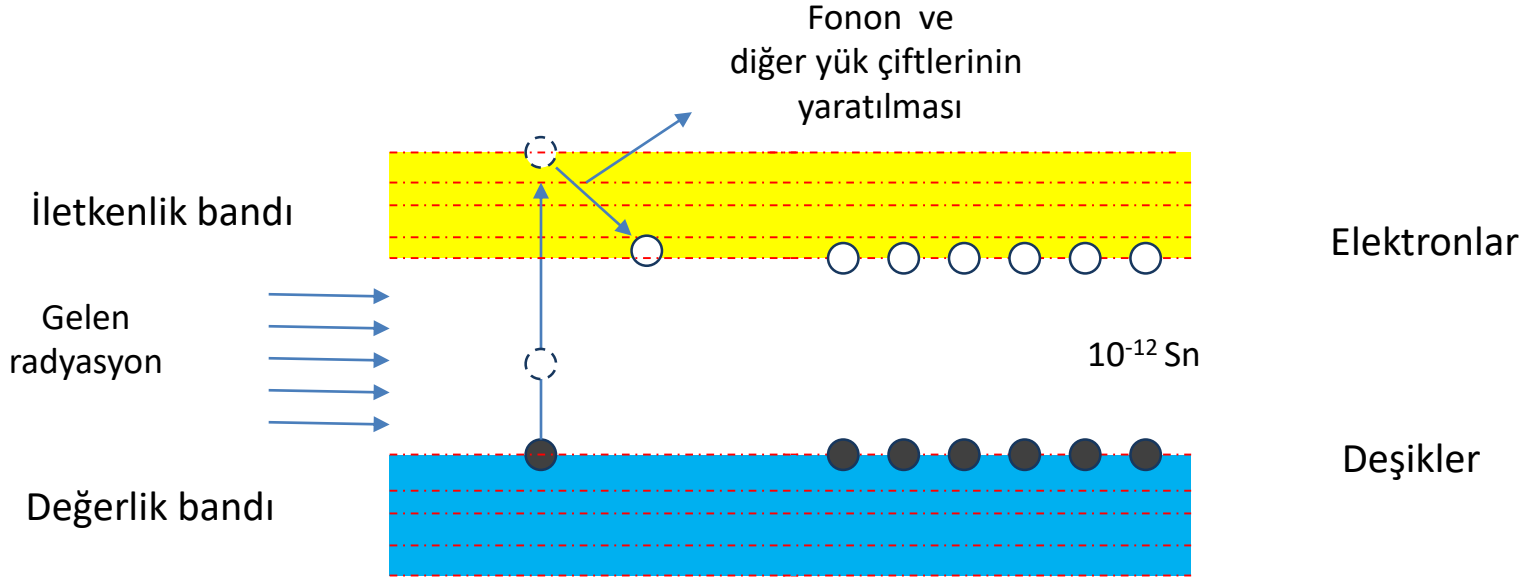
RADYASYON ÖLÇÜM DEDEKTÖRLERİ

Prof. Dr. Dođan BOR

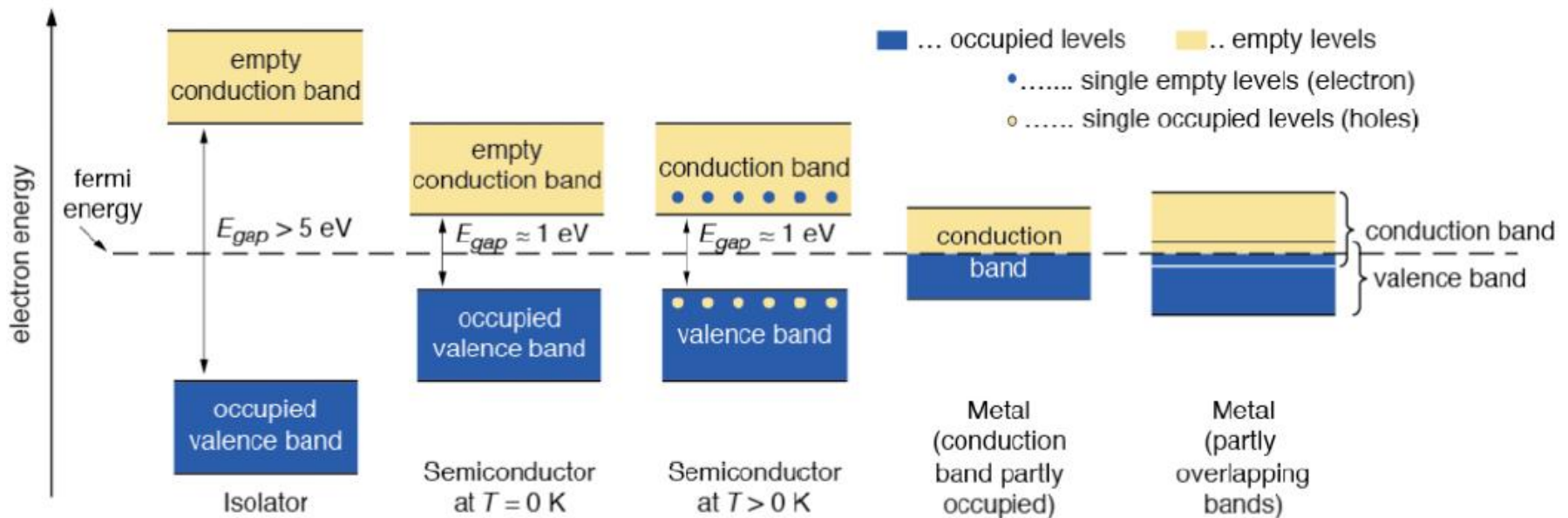
DERS 5

YARI İLETKEN RADYASYON DEDEKTÖRLERİ

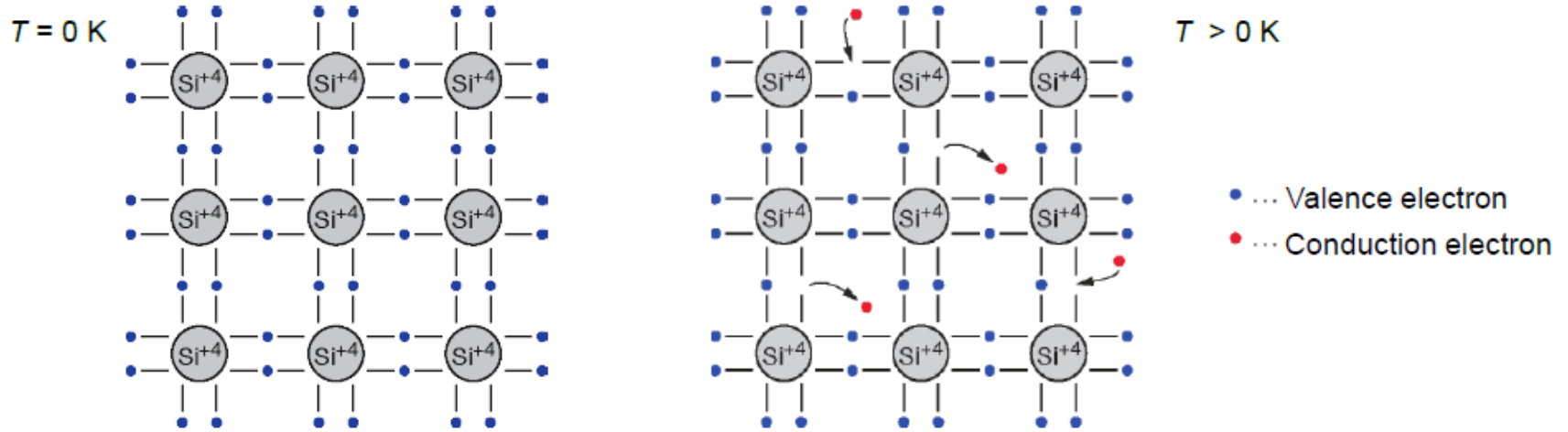
BİR YARIİLETKENDE ELEKTRON VE DEŞİK ÇİFTLERİNİN GELEN RADYASYON İLE OLUŞUMU



ENERJİ BANTLARI



YARI İLETKENLER İÇİN BANT MODELLERİ



Her atomun 4 komşu atomu var, dış yörüngelerdeki 4 elektron atomlar arasında Paylaşılarak kovalent bağ oluştururlar

Birim zamanda termal etki ile bir elektron-deşik çiftinin yaratılma olasılığı,

$$P(t) = C T^{3/2} \exp \left[- E_g / 2KT \right]$$

T = mutlak sıcaklık

E_g = Bant genişliğinin enerjisi

K = Boltzmann katsayısı

C = Maddeye bağlı orantı katsayısı

FARKLI YARIİLETKENLER

Silikon(1.12 eV), Germanyum (0.66 eV) Elmas (5.5 eV)

Özgün (intrinsic) yarıiletkenler katıksız maddelerdir ($N_A \approx N_D \rightarrow n \approx n_i \quad p \approx p_i$). Elektron ve deşikler eşitlik halindedirler.

Ancak pratikte yapılarında düşük miktarda safsızlık bulundurlar. İlave safsızlıklar katılarak farklı dedektör özellikleri elde edilir;

Grup V elementlerinin katkısı ile n tipi yarıiletkenler,

Grup III elementlerinin katkısı ile p tipi yarıiletkenler,

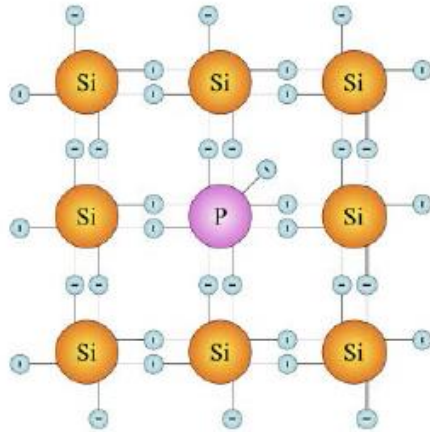
Katkı maddelerinin yüksek konsantrasyonda verilmesi durumunda elektriksel kontak olarak kullanılacak p+ and n+ yarıiletkenleri elde edilir

13 IIIA	14 IVA	15 VA
5 $2P_{1/2}$ B Boron 10.811 $1s^2 2s^2 2p$ 8.2980	6 $3P_0$ C Carbon 12.0107 $1s^2 2s^2 2p^2$ 11.2603	7 $4S_{3/2}$ N Nitrogen 14.0067 $1s^2 2s^2 2p^3$ 14.5341
13 $2P_{1/2}$ Al Aluminum 26.981538 $[Ne]3s^2 3p$ 5.9858	14 $3P_0$ Si Silicon 28.0855 $[Ne]3s^2 3p^2$ 8.1517	15 $4S_{3/2}$ P Phosphorus 30.973761 $[Ne]3s^2 3p^3$ 10.4867
31 $2P_{1/2}$ Ga Gallium 69.723 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p$ 8.9993	32 $3P_0$ Ge Germanium 72.64 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^2$ 7.8994	33 $4S_{3/2}$ As Arsenic 74.92160 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^3$ 9.7886

n ve p TİPİ DEDEKTÖRLER

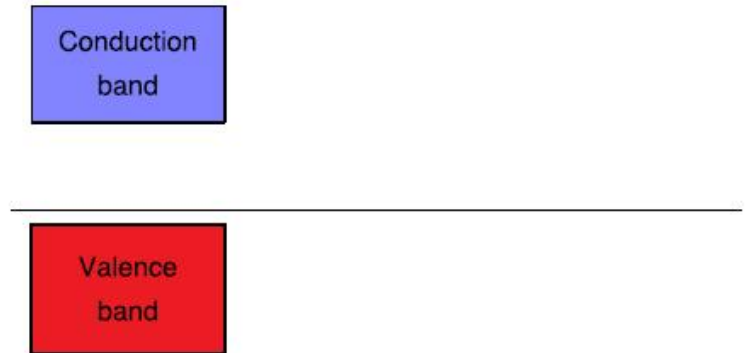
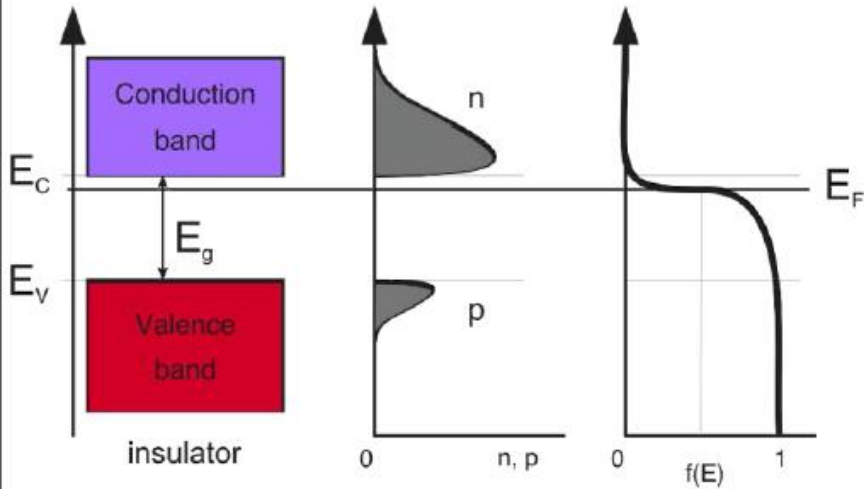
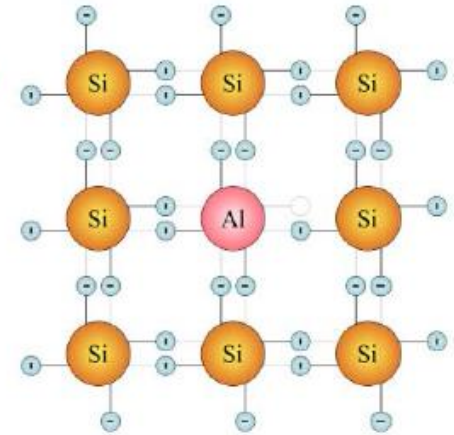
n-type:

- Dopants: Elements with 5 valence electrons, e.g. Phosphorus
- Donators
- Electron abundance



p-type:

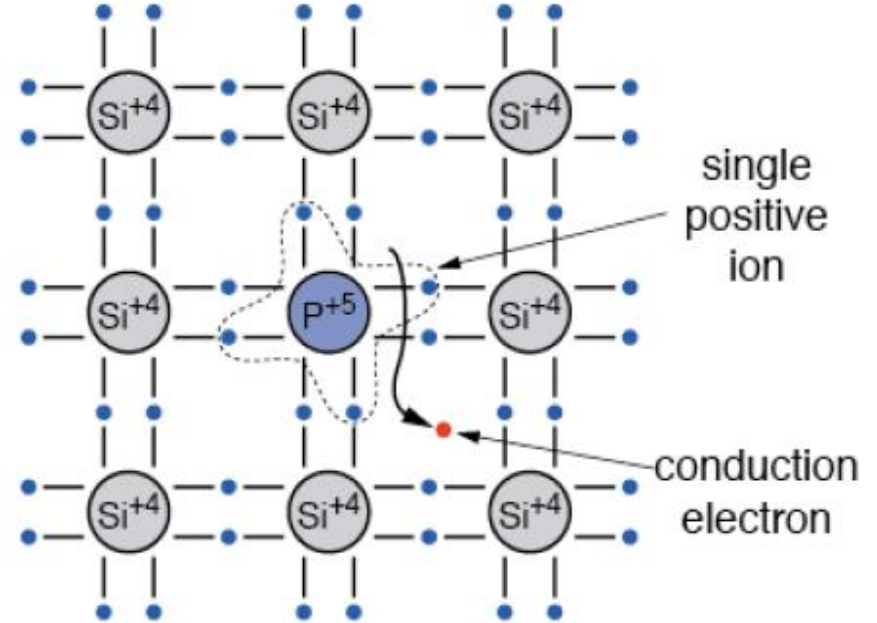
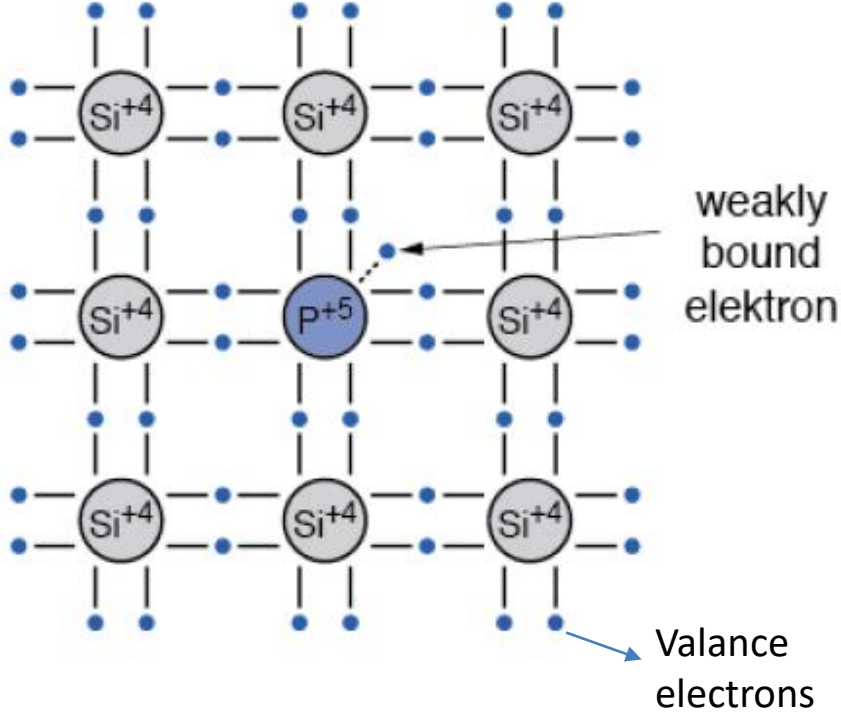
- Dopants: Elements with 3 valence electrons, e.g. Aluminum
- Acceptors
- Electron shortage



n TİPİ DEDEKTÖRLER

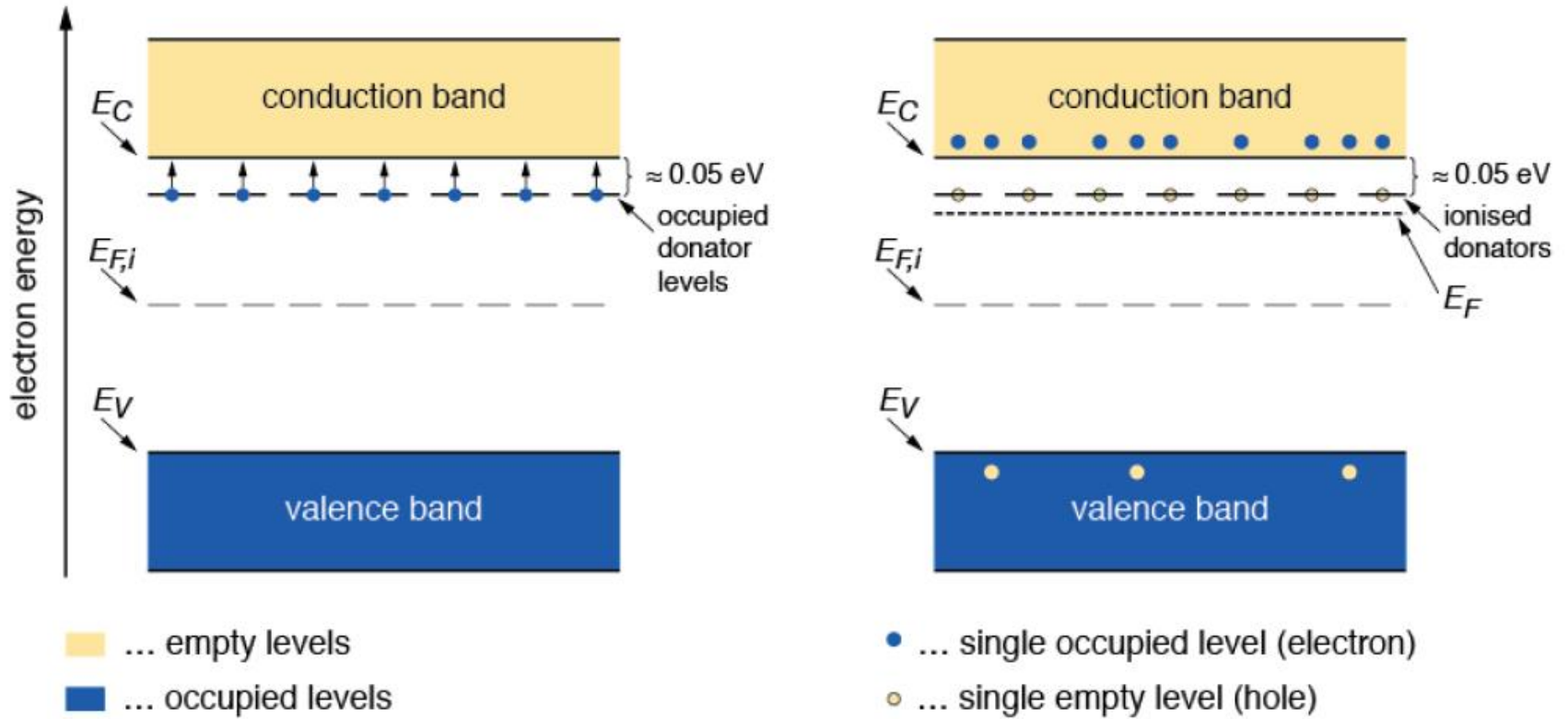
5 Atomlu element katkısında (P, As, Sb gibi), 5'ince değerlik elektronu atoma gevşek bağlı kalır

Katkı atomu verici (**donor**) atomu olarak adlandırılır



n TİPİ DEDEKTÖRLERDE ENERJİ BANDI

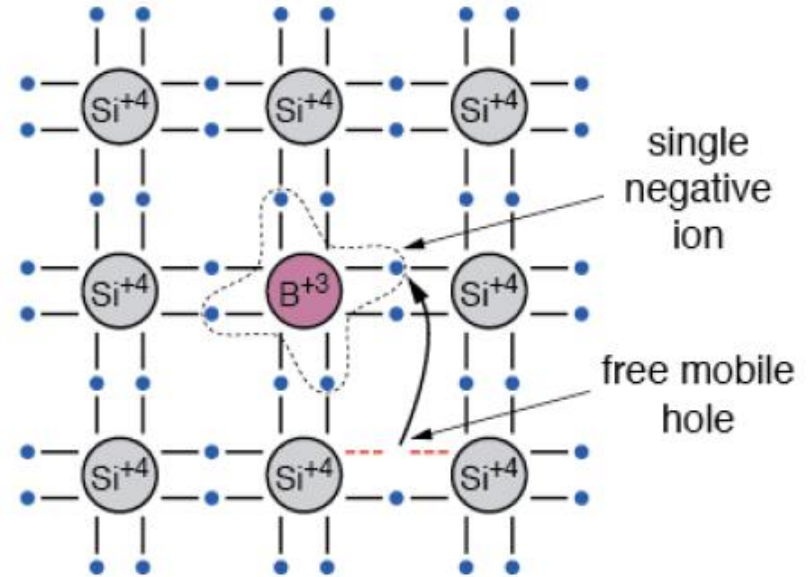
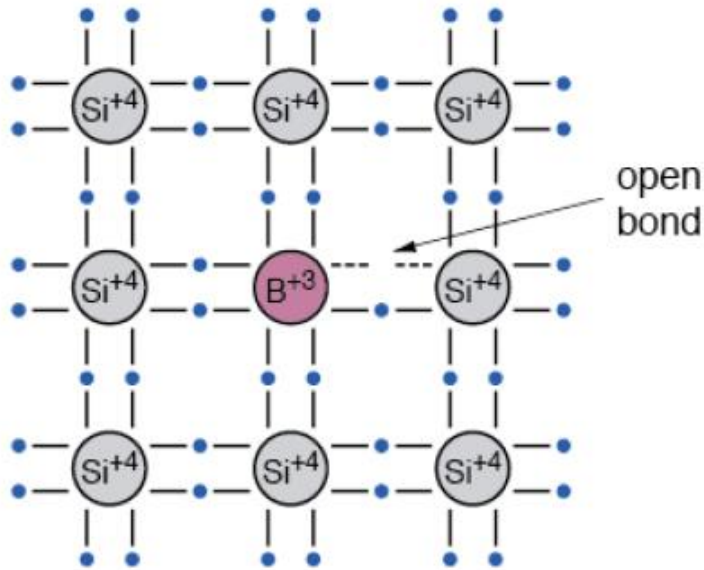
Donor atomunun enerji seviyesi iletkenlik bandının kenarının hemen altındadır. Oda sıcaklığında bu atomun elektronları iletkenlik bandına çıkar Fermi seviyesi E_F yükselir. Bu tür yarı iletkende elektron fazlalığı (çoğunluk taşıyıcılar) vardır.



p TİPİ DEDEKTÖRLER

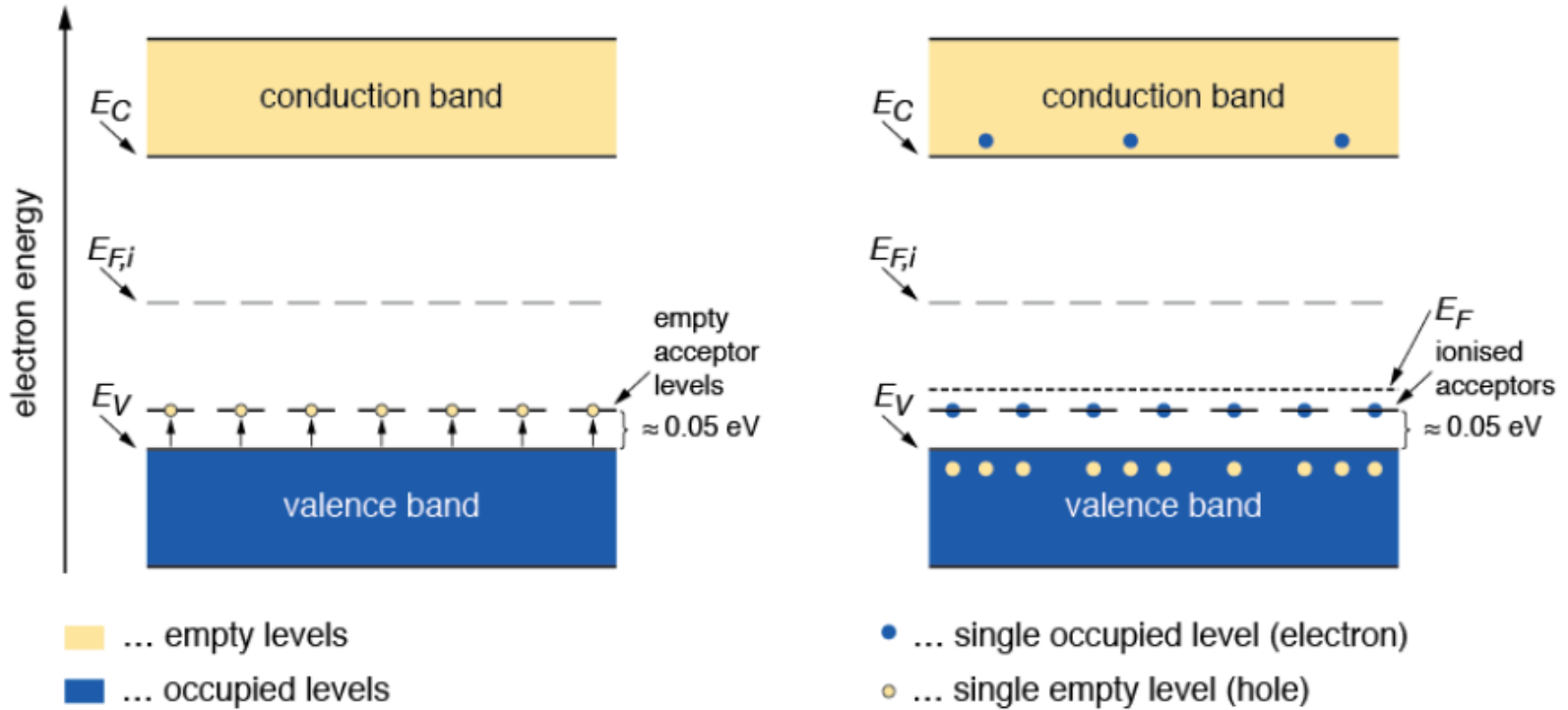
3 Atomlu element katkısında (**B**, **Al**, **Ga**, **In** gibi), bir değerlik bağı boşa kalır ve çevre atomlardan gelen elektron ile doldurulur

Katkı atomu alıcı (**akseptör**) atomu olarak adlandırılır



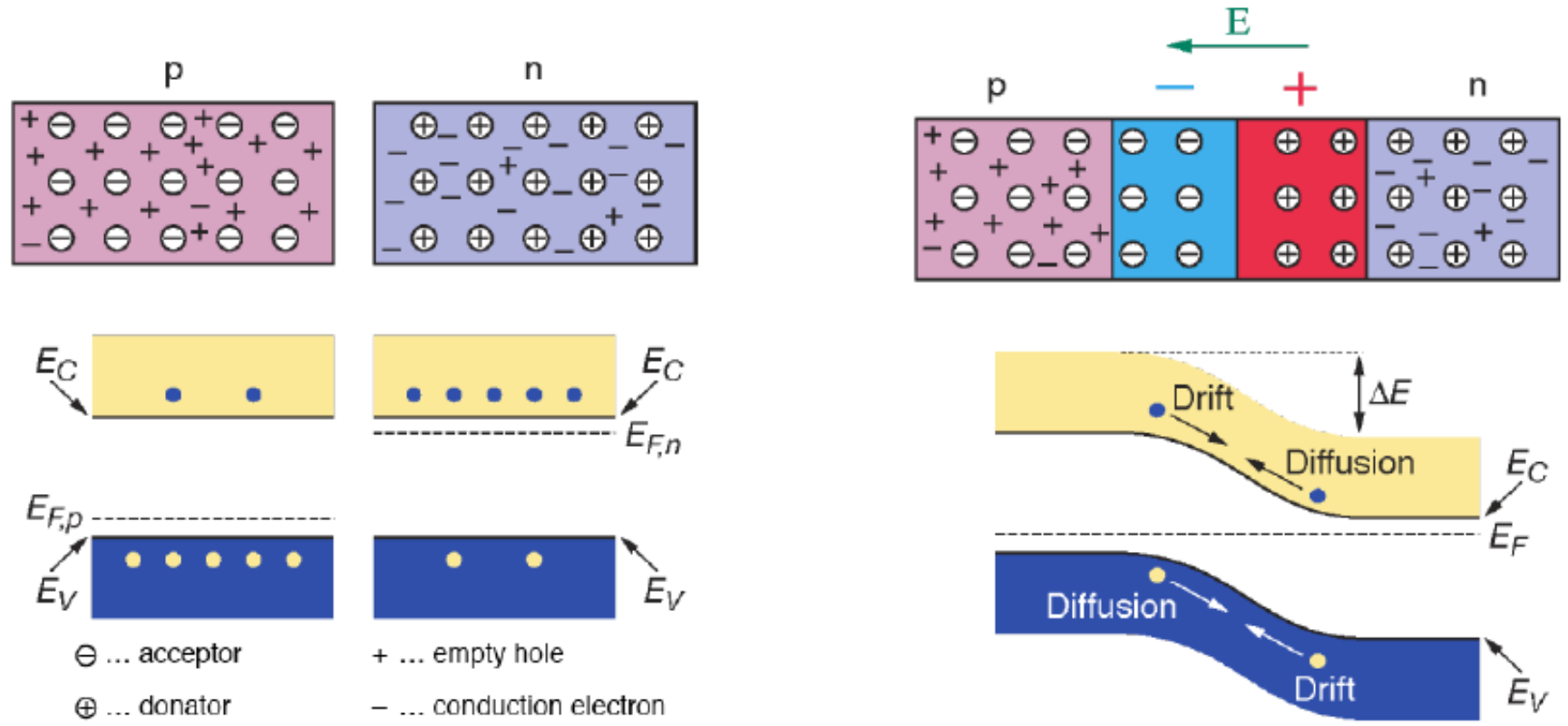
p TİPİ DEDEKTÖRLERDE ENERJİ BANDI

Akseptör atomunun enerji seviyesi değerlik bant kenarının hemen üzerindedir. Oda sıcaklığında değerlik bandındaki elektronlar geride deşikleri bırakarak bu seviyeye çıkarlar. Fermi level E_F aşağı kayar. Bu tip yarıiletkende deşik fazlalığı (çoğunluk taşıyıcılar) vardır.

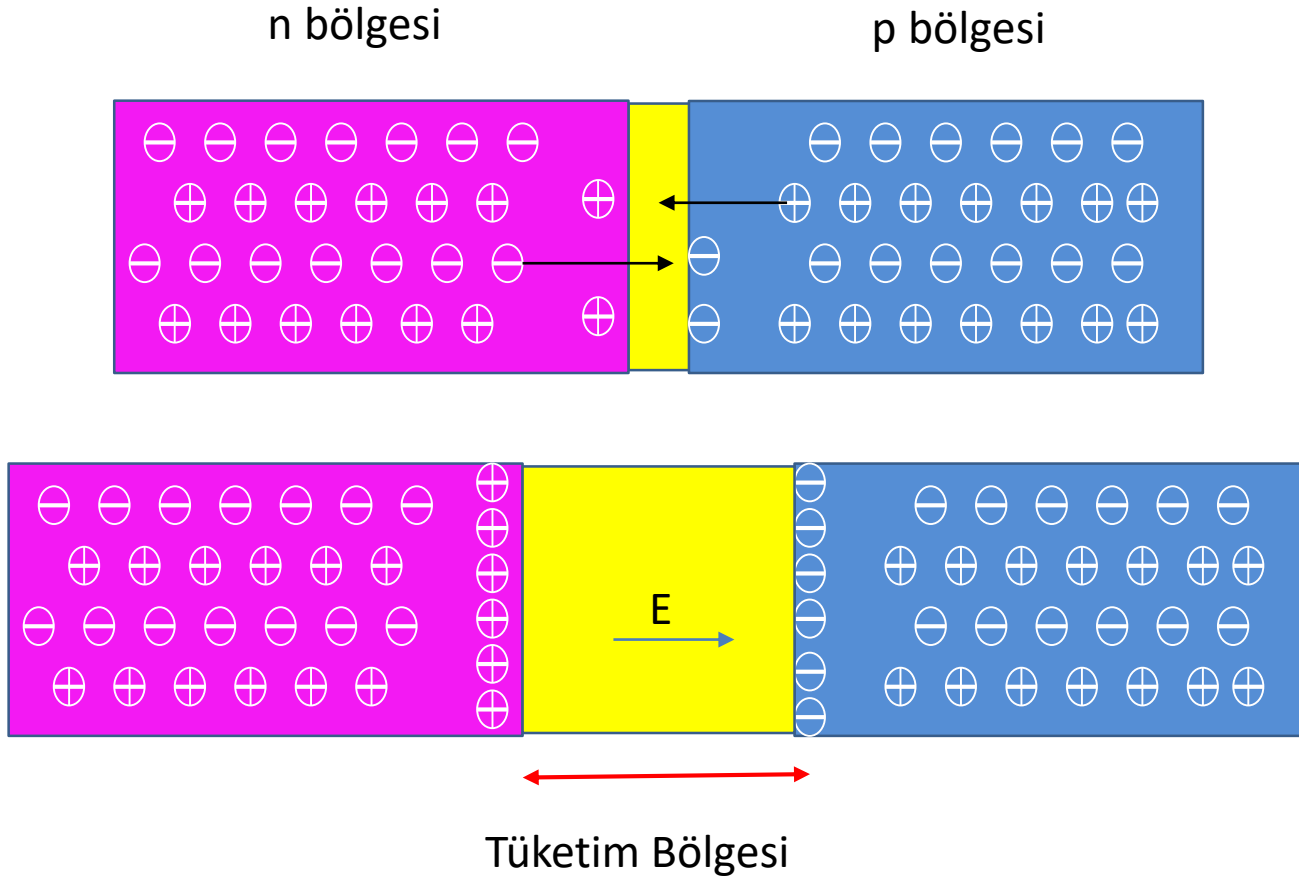


p – n EKLEMİN OLUŞTURULMASI

İki yarıiletken birleştirildiğinde Fermi seviyelerindeki farklılık nedeniyle çoğunluk taşıyıcılarının hareketi başlar; elektronlar n tarafından p tarafına, deşikler ise p tarafından n tarafına hareket ederler Bu yük difüzyonu iki tarafta termal eşitlik oluşuncaya kadar devam eder ve sonuçta uzay yükü bölgesi meydana gelir ve oluşan elektrik alan daha fazla difüzyonu engellerin. Bu bölgede serbest taşıyıcı bulunmaz ve tüketim bölgesi (**depletion zone**) olarak adlandırılır



p – n EKLEMİN OLUŞMASI

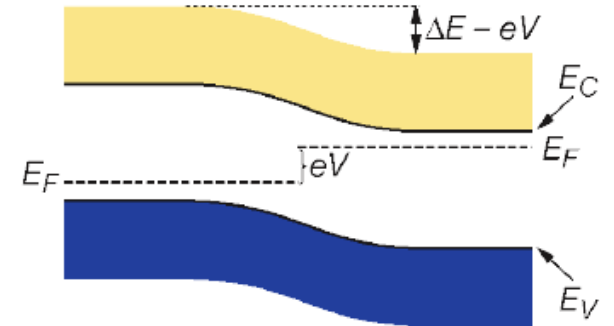
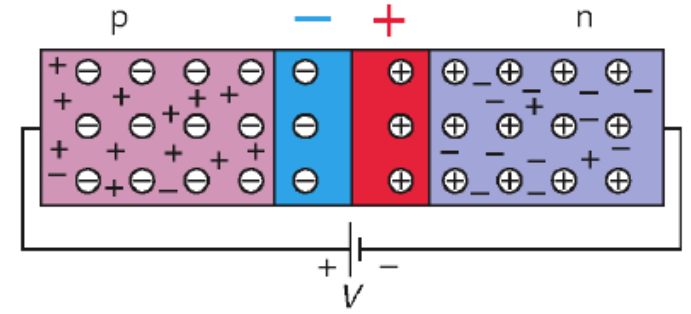


Serbest yük taşıyıcısı yok ama yük dengesi var

DÜZ BESLEMEDE p – n EKLEMİN ÇALIŞMASI

Harici bir voltajın n tarafına + p tarafına – olarak uygulanması durumunda tüketim bölgesi tekrar dolmaya başlar ve bölge boyutu azalır (düz besleme). Başlangıçtaki potansiyel farkı azalmaya başlar. Eklem boyunca difüzyon kolaylaşır ve akım artar.

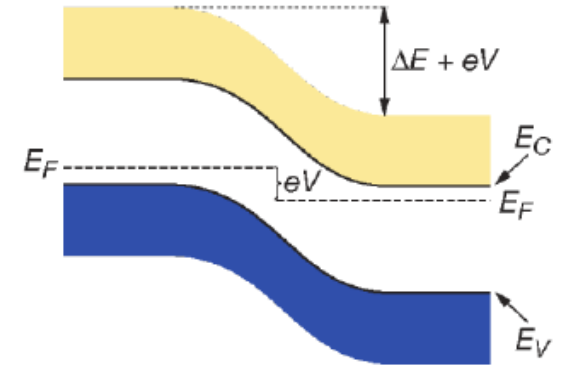
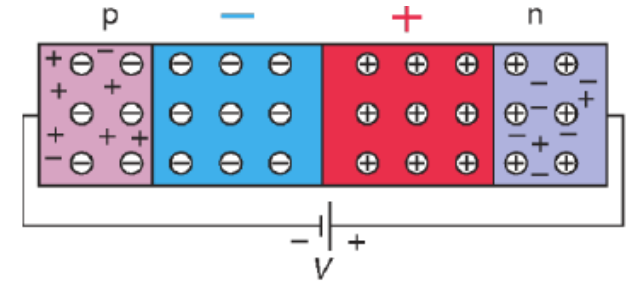
pn-eklemde düz besleme



TERS BESLEMEDE p – n EKLEMİN ÇALIŞMASI

Harici bir voltajın n tarafına- p tarafına + olarak uygulanması durumunda başlangıçtaki potansiyel farkı artmaya başlayarak tüketim bölgesini daha fazla büyötmeye başlar. Eklem boyunca difüzyon çok azalır ve akım sona erer , sadece kaçak akım söz konusudur(ters besleme).

pn-junction with reverse bias



➤ Yarıiletken dedektörler bu prensibe göre çalışırlar

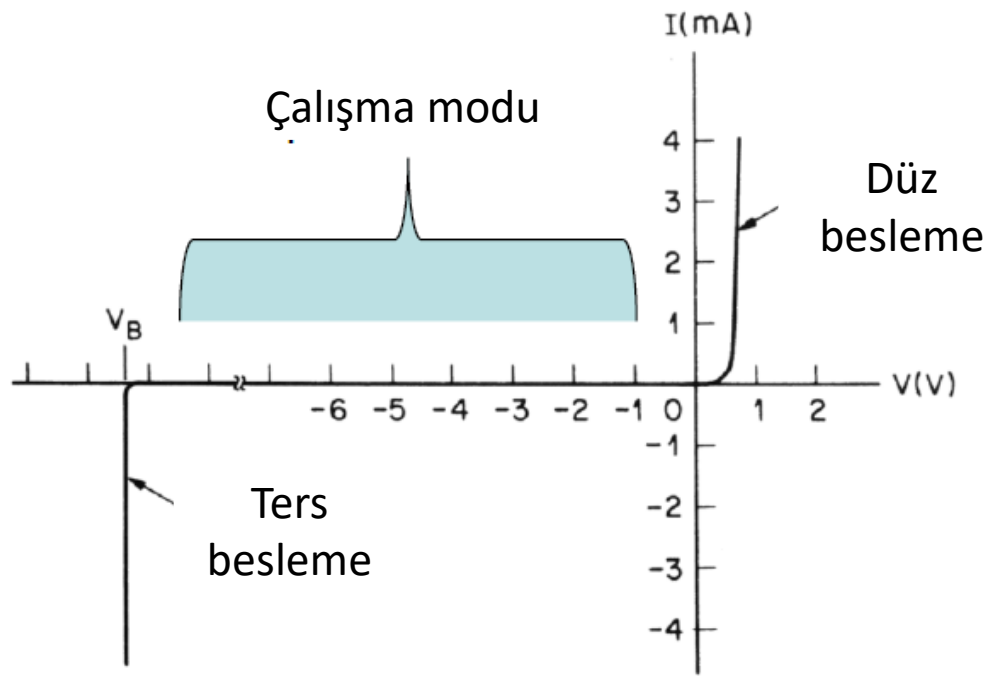
AKIM – VOLTAJ ÖZELLİKLERİ

Typical current-voltage of a p-n junction (diode): exponential current increase in forward bias, small saturation in reverse bias.

Ideal diode equation:

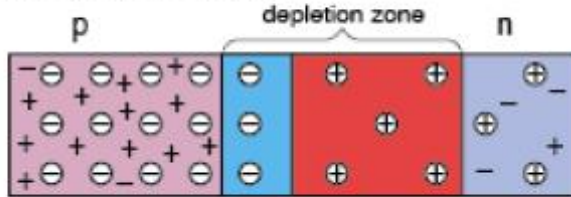
$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$

I_0 ... reverse saturation current

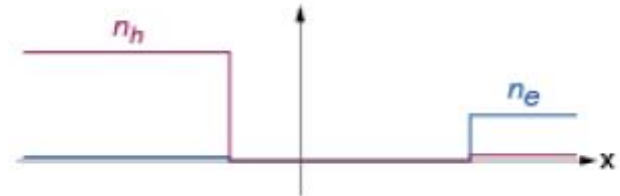


p – n EKLEMİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

pn junction scheme



concentration of free charge carriers

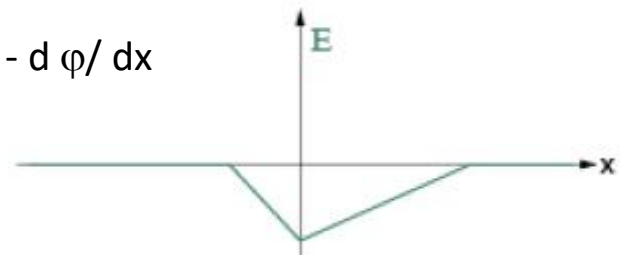


acceptor and donator concentration

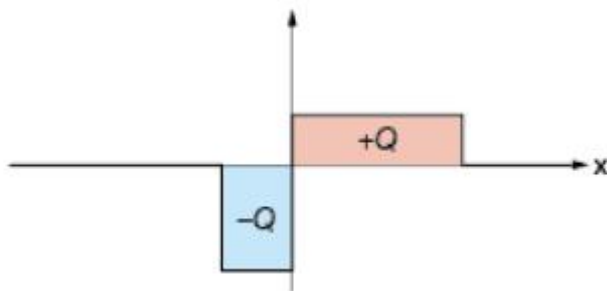


electric field

$$E(x) = -d\phi/dx$$

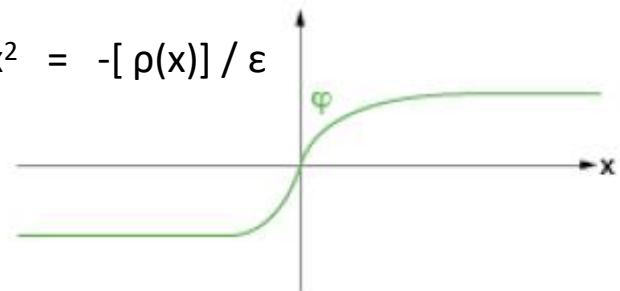


space charge density



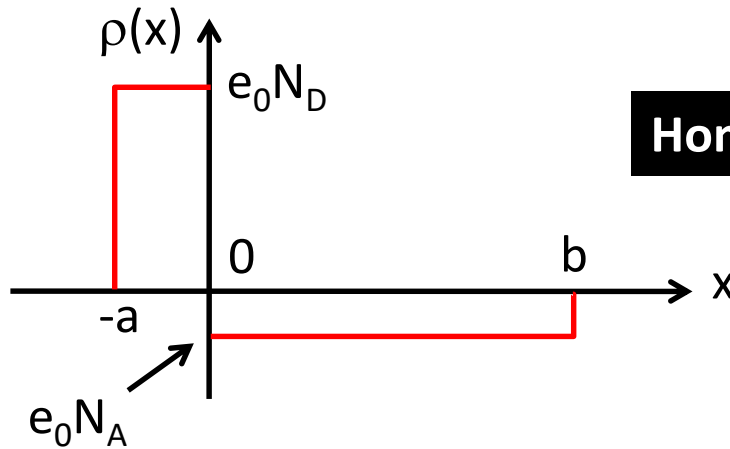
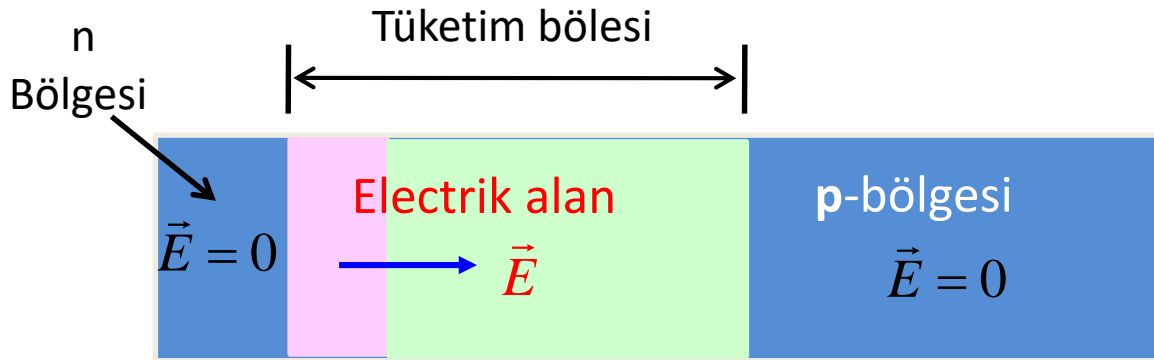
electric potential

$$d^2\phi/dx^2 = -[\rho(x)]/\epsilon$$



- ⊖ ... acceptor
- ⊕ ... donator
- + ... empty hole
- ... conduction electron

İDEAL P – N EKLEM



Homojen yük dağılımı varsayılır

$$\rho(x) = \begin{cases} e_0 N_D & (-a < x \leq 0) \\ -e_0 N_A & (0 < x \leq b) \end{cases}$$

Note: Yük dağılımı sadece tüketim bölgesindedir.

P – N EKLEM ÖZELLİKLERİ

Poisson's denklemi:

$$\nabla^2 \phi = -\rho / \varepsilon$$

$$\text{in 1-D: } \frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\rho(x) / \varepsilon$$

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \begin{cases} -\frac{e_0 N_D}{\varepsilon} & (-a < x \leq 0) \\ +\frac{e_0 N_A}{\varepsilon} & (0 < x \leq b) \end{cases}$$

Elektrik alan E :

$$E = -\nabla \phi \quad (\text{Gradient})$$

$$\text{in 1-D: } E(x) = -\frac{d\phi}{dx}$$

Kenarlarda:

$$E = d\phi / dx = 0$$

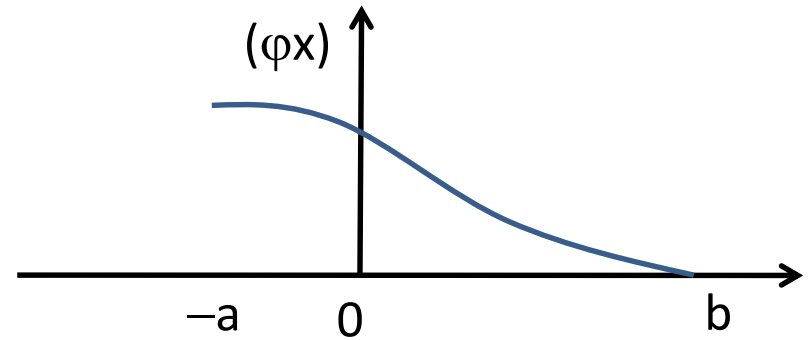
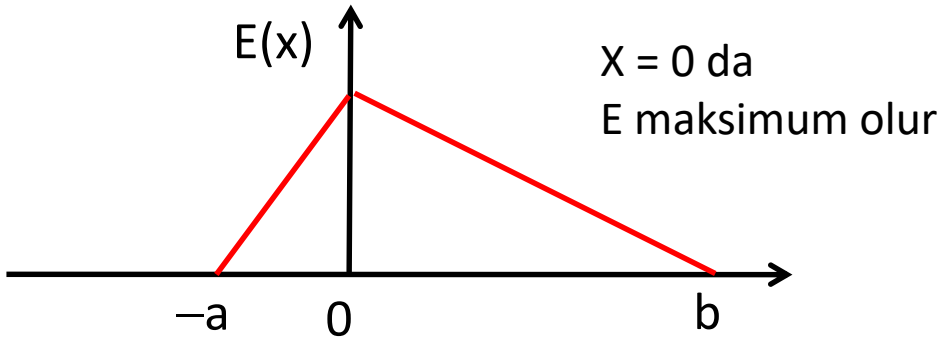
$$d\phi / dx (-a) = 0$$

$$d\phi / dx (b) = 0$$

ELEKTRİK ALAN ve POTANSİYELİ

$$E(x) = -\frac{d\varphi}{dx} = \begin{cases} \frac{e_0 N_D}{\varepsilon} \cdot (x+a) \geq 0 \\ -\frac{e_0 N_A}{\varepsilon} \cdot (x-b) \geq 0 \end{cases}$$

Sınır şartları ile ilk integral:
 $-a$ and $+b$ arasında $E = -d\varphi / dx = 0$
 (Elektrotlar arasında: $E = 0$)



Ters beslemede sınır şartları ile ikinci integral:

$$\varphi(-a) = V, \varphi(b) = 0 \Rightarrow \varphi(x) = \begin{cases} -\frac{e_0 N_D}{2\varepsilon} (x+a)^2 + V & (-a < x \leq 0) \\ +\frac{e_0 N_A}{2\varepsilon} (x-b)^2 & (0 < x \leq b) \end{cases}$$

TÜKETİM BÖLGESİNİN GENİŞLİĞİ

"Depletion width" $d = a + b$

Assume $N_D \gg N_A$, then $b \gg a$, $d \cong b$

$$d \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{e_0 N_A}}$$

N_A : Düşük konsantrasyondaki taşıyıcı için

Yol gösterme :

$$\varphi(x) \text{ at } x=0: -\frac{e_0 N_D a^2}{2\varepsilon} + V = \frac{e_0 N_A b^2}{2\varepsilon}$$

$$\text{rearranging terms: } N_A b^2 + N_D a^2 = \frac{2\varepsilon V}{e_0}$$

We know from charge conservation, $N_D a = N_A b$

$$(N_A b) \cdot b + (N_D a) \cdot a = \frac{2\varepsilon V}{e_0} \Rightarrow (a+b) \cdot b = \frac{2\varepsilon V}{e_0 N_A}$$

KAPASİTANS VE MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN

In general: $d = \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{e_0 N}}$

Düşük katkı
konsantrasyonu için

Capacitance **per unit area**:

$$C = \frac{\varepsilon}{d} = \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{e_0 N}{2\varepsilon V}} = \sqrt{\frac{e_0 \varepsilon N}{2V}}$$

Radyasyon dedeksiyonu
için kapasitansın
düşük olması istenir

The Maximum Electric field (see $E(x=0)$):

$$E_{\max} = 2V \cdot \sqrt{\frac{e_0 N}{2\varepsilon V}} = \frac{2V}{d}$$

$10^6 - 10^7$ V/cm'ye kadar ulaşabilir
(d azaldıkça N artar)

TÜKETİM BÖLGESİNİN GENİŞLİĞİ

Silikon dedektörde (p⁺-n eklem) tipik taşıyıcı konsantrasyonları:

- $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ in p⁺ region
- $N_d = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ in n bulk

Besleme yok:

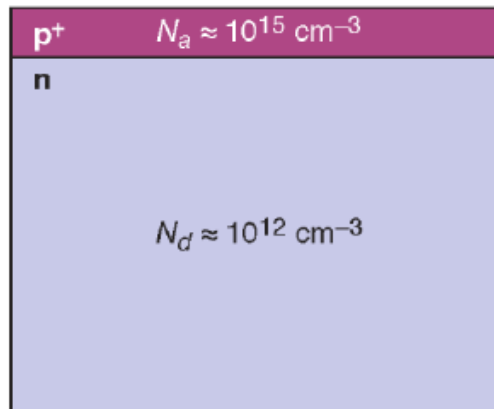
$$d_p = 0.02 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d_n = 23 \text{ } \mu\text{m}$$

Ters besleme 100 V:

$$d_p = 0.4 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d_n = 363 \text{ } \mu\text{m}$$



p+n junction

YARI İLETKEN DEDEKTÖRLER

Katı Ortamlı Gaz Odası Dedektörleri

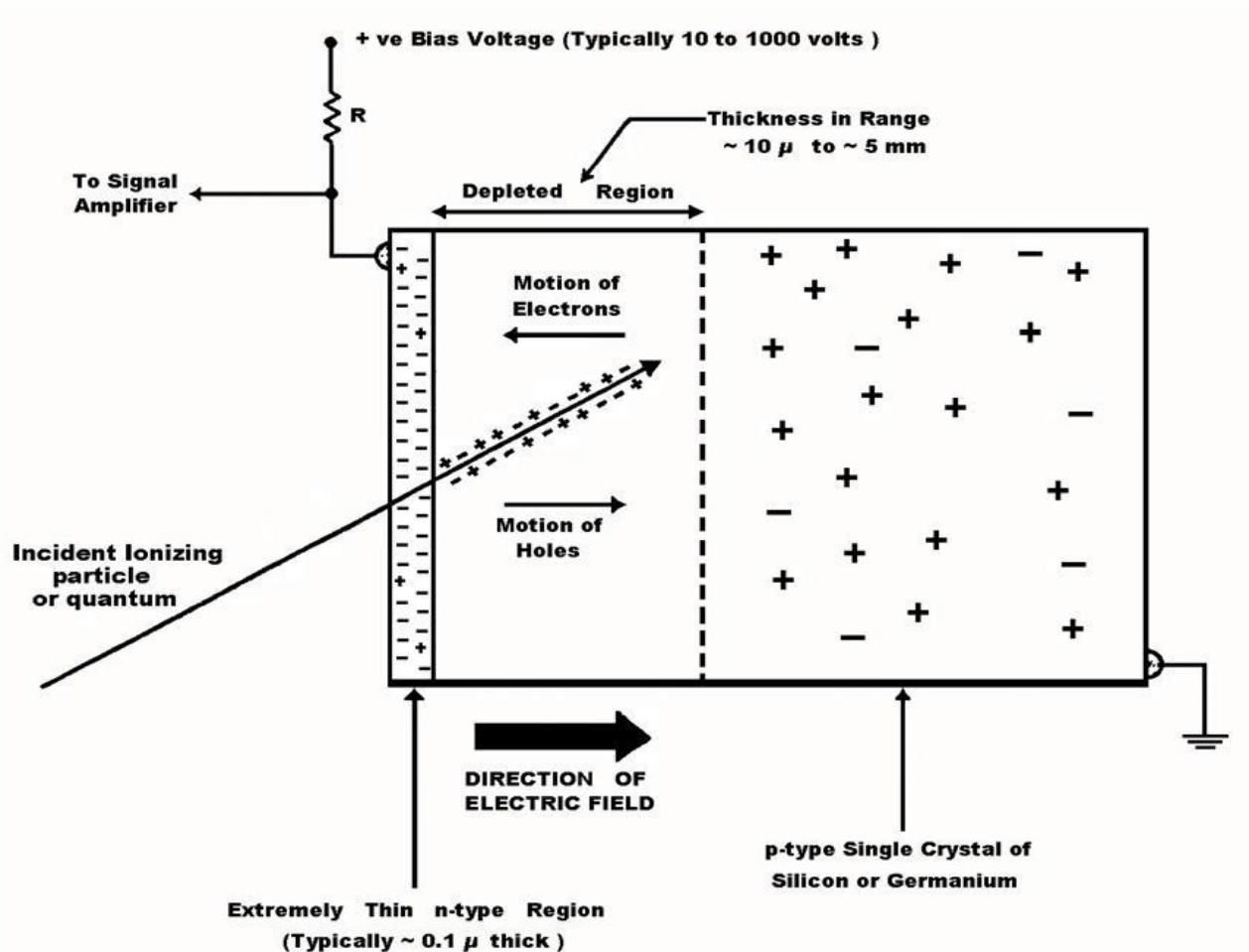
- Geniş bir enerji aralığında radyasyona karşı yanıtları (parçacık enerjisine karşın puls yüksekliği) doğrusaldır.
- Belirli bir boyut için etkinlikleri yüksektir, zira yapılarında yüksek yoğunlukta sert madde kullanılmaktadır.
- İyonizasyon enerjileri birkaç eV dur. (Gaz odalılarda 20 – 40 eV/i.ç, sintilatörlerde 40 – 1000 eV /Foton
- Farklı geometrik tasarımlarda yapılmaları mümkündür.
- Puls doğma zamanları hızlıdır (gaz detektörlerine göre).
- Vakum altında çalışırlar.
- Magnetik alanlara karşı hassas değildirler.
- Enerji ayırma güçleri son derece yüksektir.
- Zaman ve sıcaklık gibi dış etkilere karşı dayanıklıdırlar.

YARIİLETKEN DEDEKTÖRLERİN PRENSİPLERİ

Ekleme ters besleme yapılır ve gelen radyasyonun tüketim bölgesinde oluşturduğu eşit sayıda e^- ve boşluklar elektrik alanın etkisi ile ters yönde hareket ederek akımı oluştururlar.

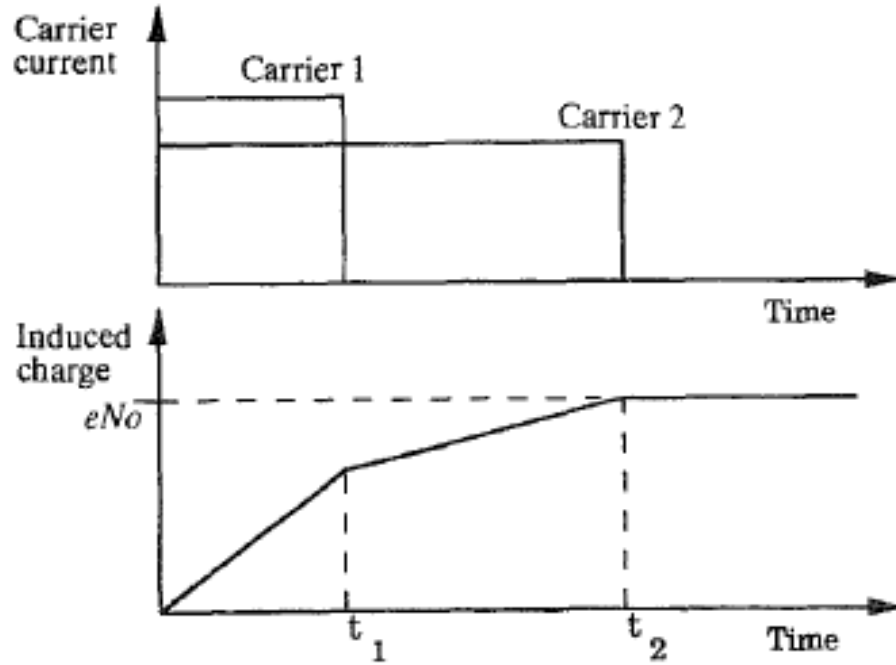
Bu akım tüm yükler tüketim bölgesinin sınırlarında toplanana kadar devam eder.

Bu yüklerin sayısı gelen radyasyonun enerjisi ile orantılıdır



YÜKLERİN TOPLANMASI

Elektronların mobilitesi deşiklerden 2 – 3 kat daha fazladır.
Toplam akım iki yük akımının toplamına eşittir



FARKLI YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER

Silicon detectors

Oda sıcaklığında çalışır, bir elektron deşik çifti oluşması için gerekli enerji 3.65 eV

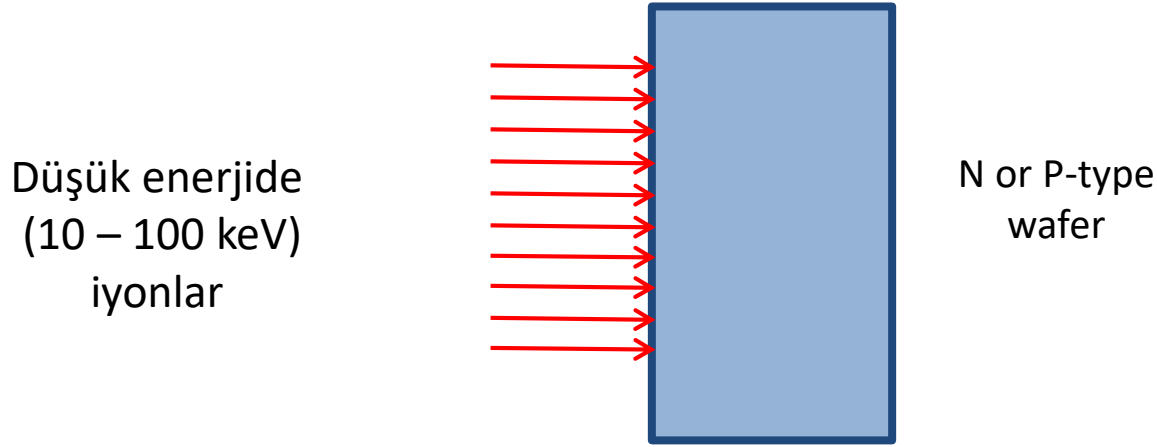
Band genişliği 1.12 eV

Yoğunluğu yüksektir, $Z = 14$

Taşıyıcıların mobiliteleri yüksektir, 30 nSn de yükler toplanır

Tüketim bölgesinin genişliği azdır (5 mm)i yüksek enerjili foton sayımı için uygun değildir.
Yüklü parçacıkların sayımı için uygundur

İYON İMPLAMANTASYON TEKNİĞİ



- Farklı iyonlar kullanılarak n^+ veya p^+ tabakalar elde edilir (fosfor, arsenic veya boron gibi)
- Tek enerjideki iyonların madde içerisindeki menzillerine göre katkı maddesinin kalınlığı ve konsantrasyonu belirlenir. Katkı konsantrasyonu iyon demetinin enerjisi ile değiştirilir

PASİFLEŞTİRİLMİŞ DÜZLEMSEL SİLİKON DEDEKTÖRLERİN TASARIMI

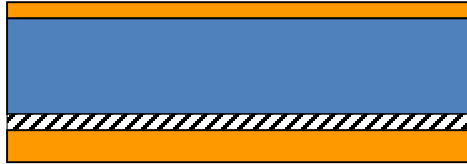
İyon implantasyon ve Fotolitografi Tekniği



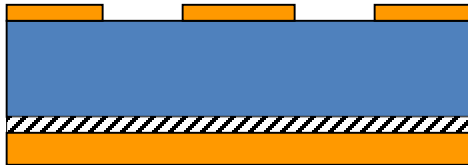
Yüksek saflıkta n tipi kristal ile başlanır



Alt yüzeyde fosfor difüzyonu ile yüksek konsantrasyonda n⁺ tipi bölge oluşturulur



Yüzey temizlenir ve yüksek sıcaklıkta oksit tabakası (SiO₂) ile kaplanır (pasifize edilir)

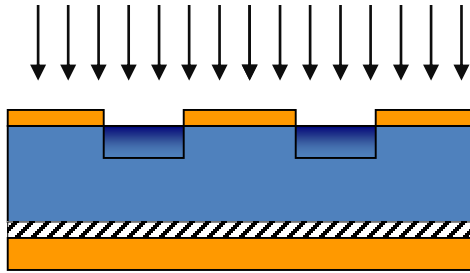


Oksidin bazı bölgeleri litografi tekniği ile kaldırılır.

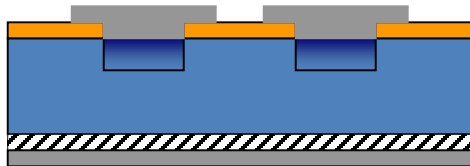
PASİFLEŞTİRİLMİŞ DÜZLEMSEL SİLİKON DEDEKTÖRLERİN YAPIMI

Boron implantasyonu

15 keV, $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

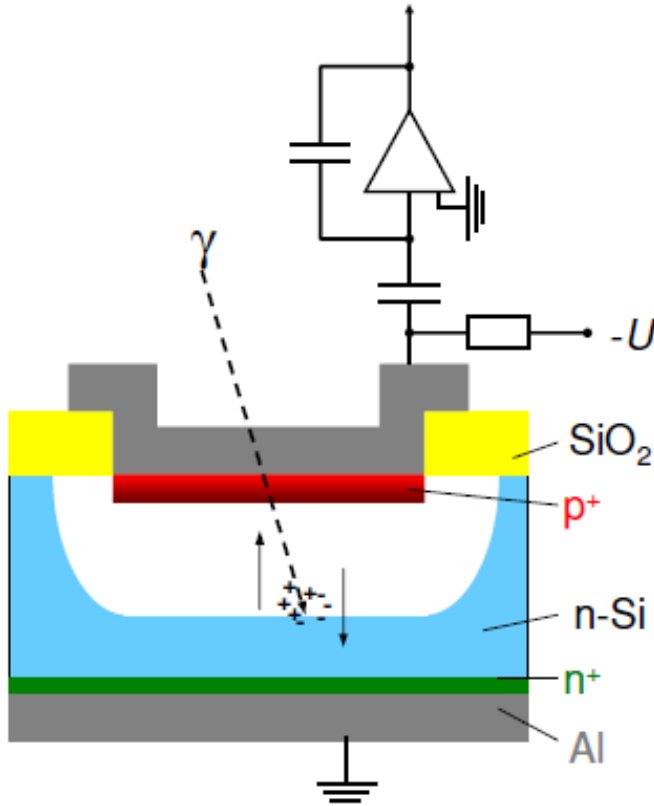


Bu bölgeler iyon implamantasyonu ile p tipine çevrilerek eklem elde edilir
İyon implantasyonu sonucu oluşan radyasyon hasarları yüksek sıcaklıktaki fırınlama ile kaldırılır.



Alt yüzeydeki oksit tabaka kaldırılır. Ön ve arka yüzeylere Alüminyum kaplanarak omik elektrik kontaklar elde edilir.

SİLİKON DEDEKTÖRLER



Kapasitans dedektörün aktif Alanı ile orantılı

Yüksek sayım hassasiyeti için Aktif alan büyük olmalı

Düşük gürültü için aktif Kapasitör düşük olmalı

Basit p-n dedektörlerin sorunları:

- Tüketim Bölgesinin küçük olması
- Kapasitansın fazla olması
- Yavaş yanıt süresi

SİLİKON DEDEKTÖRLERİN FARKLI TÜRLERİ

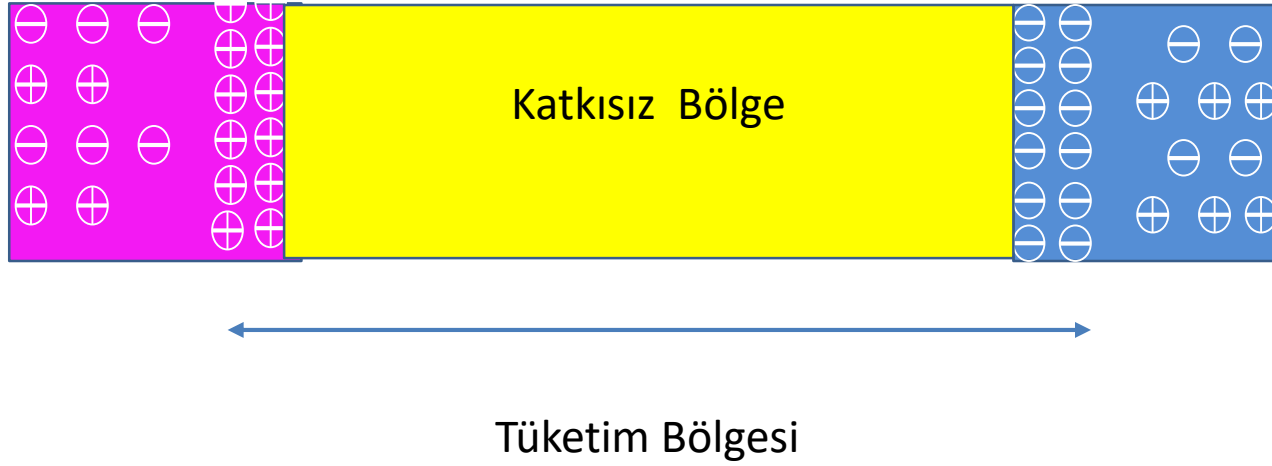
- PIN Diyotlar

Diffused Junction Diodes

- Surface Barrier Detector
- Ion-Implanted Diodes
- Lithium-Drifted Silicon Diodes – Si(Li) – p-i-n Diode
- Micro-Strip Detector

FARKLI YARI İLETKEN DEDEKTÖRLER

PIN DİYOTLAR



FARKLI YARI İLETKEN DEDEKTÖRLER

Diffused Junction Detectors

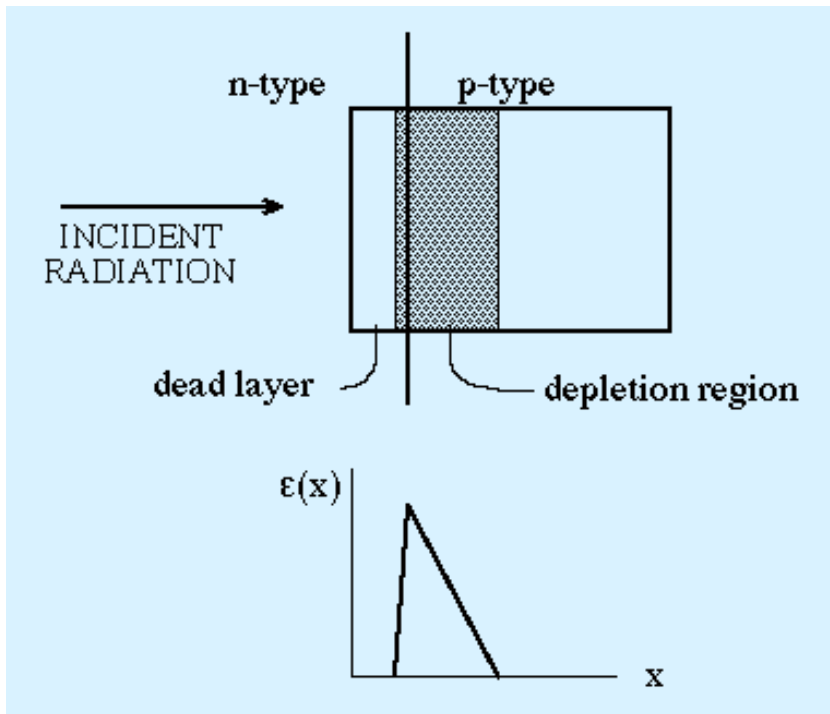
- Historically: first device for detection
- We have an homogeneous crystal of p type → diffusion at high T ($\approx 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) of n-type impurities (as phosphorous) → conversion of an area close of the surface into n type
- Very robust diode but surface very doped ($N_D \nearrow$) → extension of the depletion layer into the p-side → presence of a thick dead layer equivalent to the diffusion area ($\approx 1\text{ }^{\mu}\text{m}$)
- Embarrassing for the detection of charges particles → not used currently

Surface Barrier Detector (SSB)

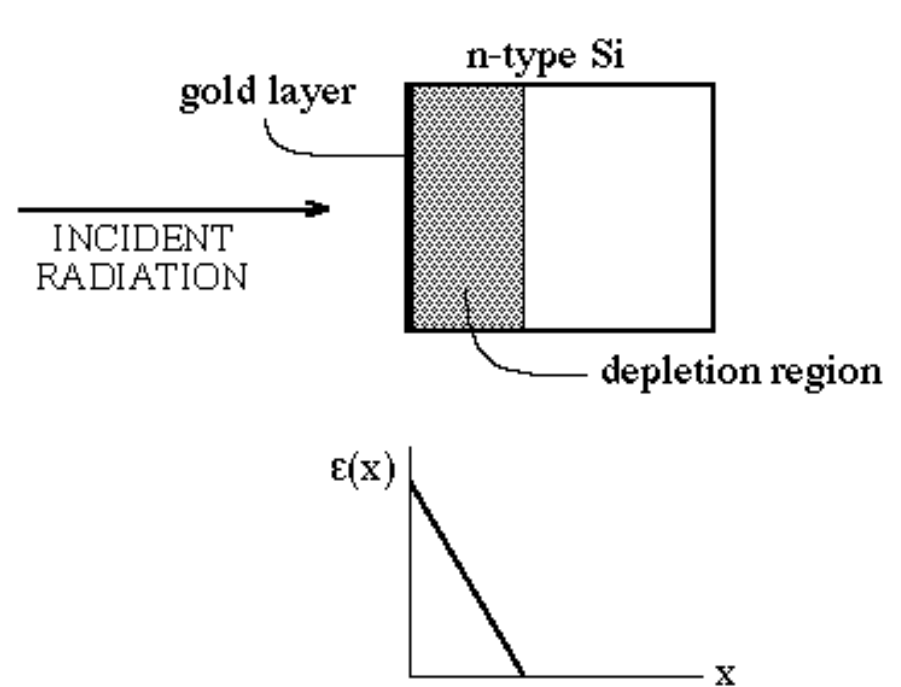
- Most used type of silicon detector
- Junction created between a semiconductor and a metal (generally → n type Si + Au or p type Si + Al)
- Due to the \neq between the Fermi levels of the 2 media → modification of the bands in the sc → formation of a Schottky barrier
- Depletion area which can reach $\approx 5\text{ mm}$
- Advantages: easy making process + small thickness dead layer » thickness of the metal » 20 nm
- Disadvantage: very light sensitive (metal thickness too small to stop light photons) → obligatory protection + fragile
- Remark: presence of an oxide layer at the interface

YARI İLETKEN DEDEKTÖRLERİN FARKLI TÜRLERİ

Diffused Junction Detectors



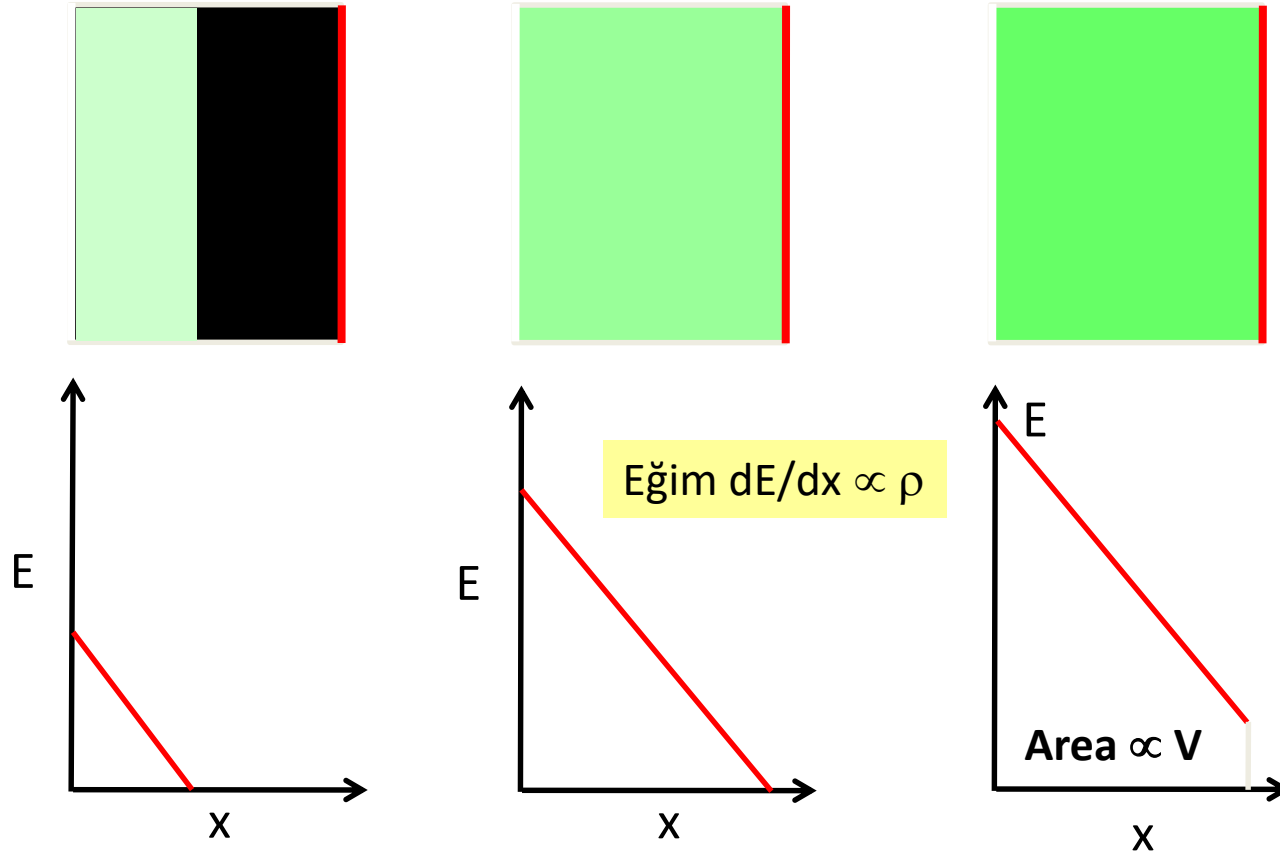
Surface Barrier Detectors



(A thin layer having high density electron traps (p-type) is formed between gold and Si, such as an oxidation layer)

SADECE TÜKETİM BÖLGELİ DEDEKTÖRLER

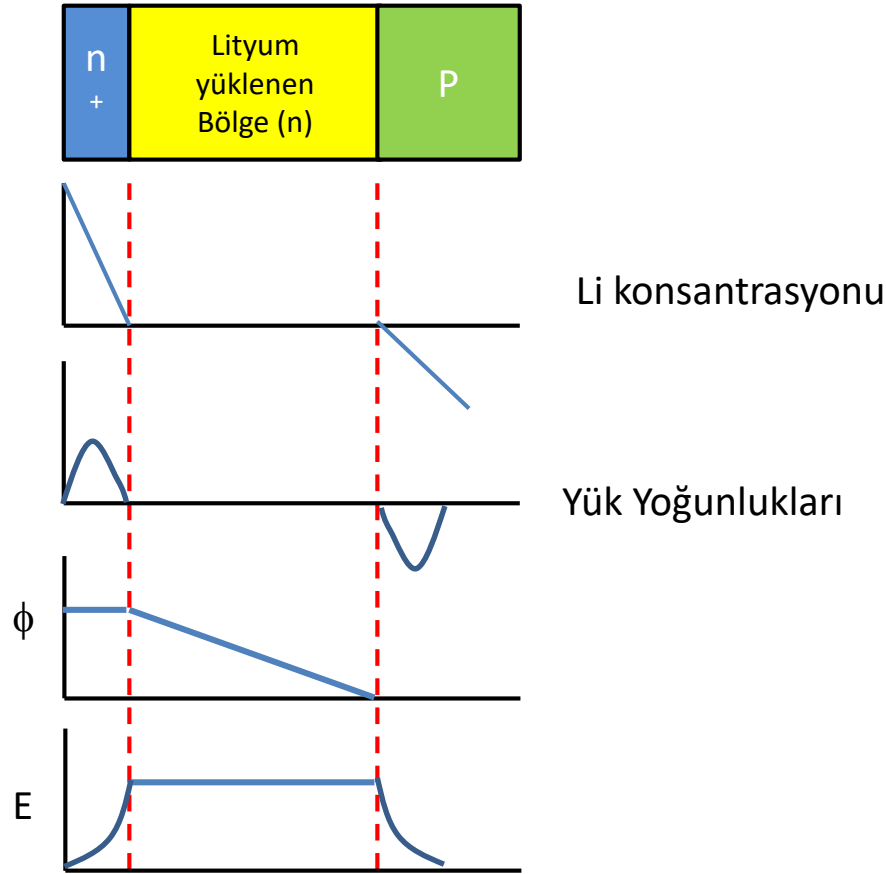
Artan besleme voltajı



$$\therefore d = \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{e_0 N}} \Rightarrow \text{The depletion voltage } V_{depletion} = \frac{e_0 N}{2\varepsilon} \cdot T^2 \text{ where } T = \text{Thickness}$$

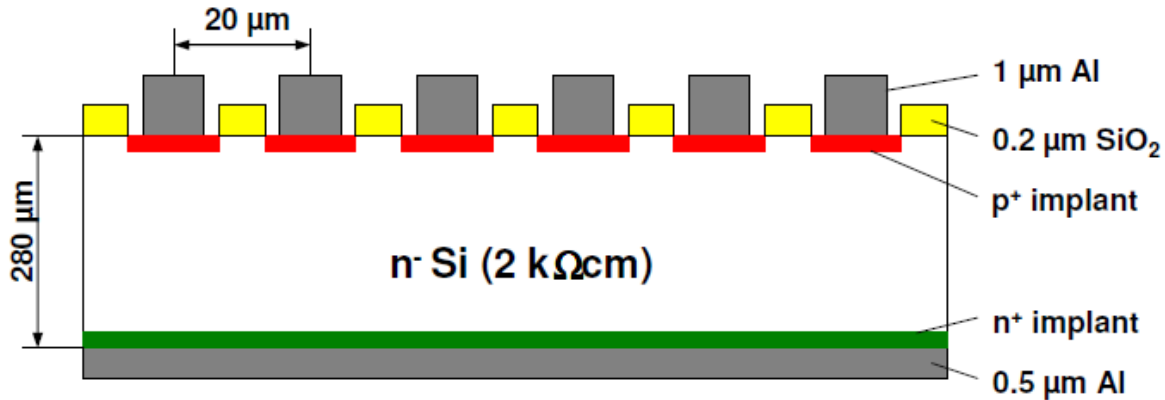
Lityum Birikimli Silikon Dedektörler

- p – n eklem oluşturulması
- Lityumun p tipi silikona Ters besleme ve sıcaklık ile (40°) yüklenmesi
- Aktif hacim 5 – 15 mm'ye kadar artırılır
- Beta parçacıkları ve düşük enerjide X –ışınlarının dedeksiyonu



MICRO-STRIP DETEKTOR

N tipi Silikon üzerine p tipi mikro şeritler halinde p tipi Silikon 20 μm aralıklarla oluşturulur ve üzerleri alüminyum kontak ile kaplanır.
Kontakta toplanan yükler gelen parçacığın izlediği yola bağlıdır



FARKLI YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER

Germanyum Dedektörleri

Çok dar band aralığı nedeniyle (0.7 eV) oda sıcaklığında çalıştırılmazlar.

Sıvı azot sıcaklığında bir elektron – deşik çiftinin yaratılması için gerekli enerji 2.96 eV'dir.

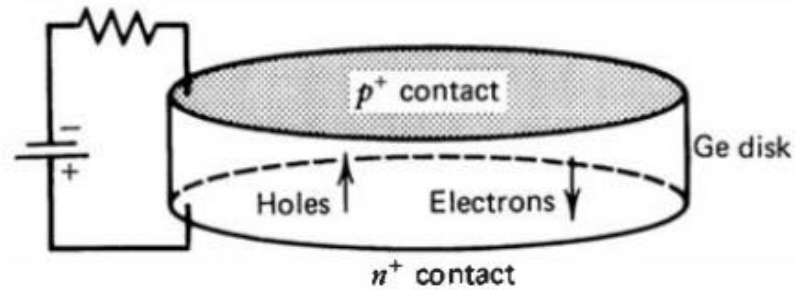
Yüksek atom numarası nedeniyle ($Z = 32$) fotoelektrik tesir kesiti çok büyüktür (Silikondan 60 kez fazla) ve gama ışınlarının spektroskopisinde kullanılır

Katkısız Germanyum kristali (HpGe) yapmak mümkündür ($< 10^{10}$ safsızlık atomu / cm^3)
Kalan az miktardaki safsızlığa göre kristal n veya p tipi olur.

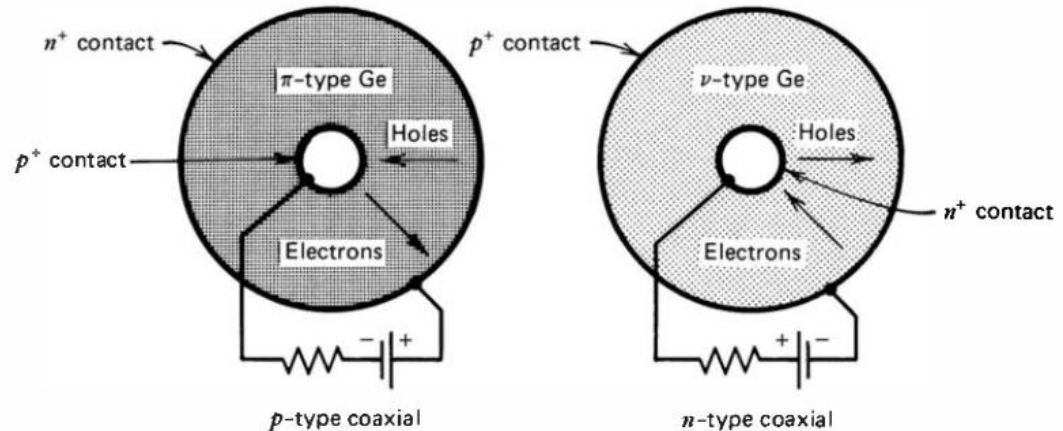
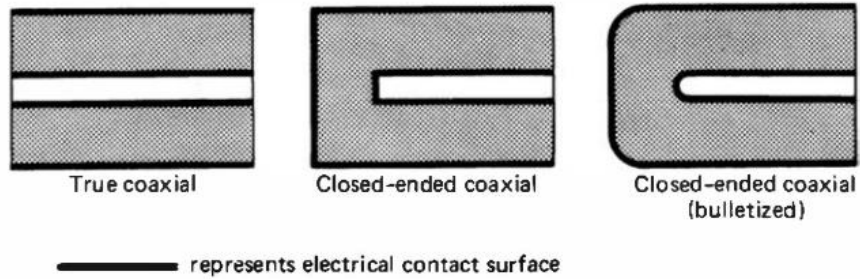
Pahalıdır

GERMENYUM DEDEKTÖRLERİN FARKLI TASARIMLARI

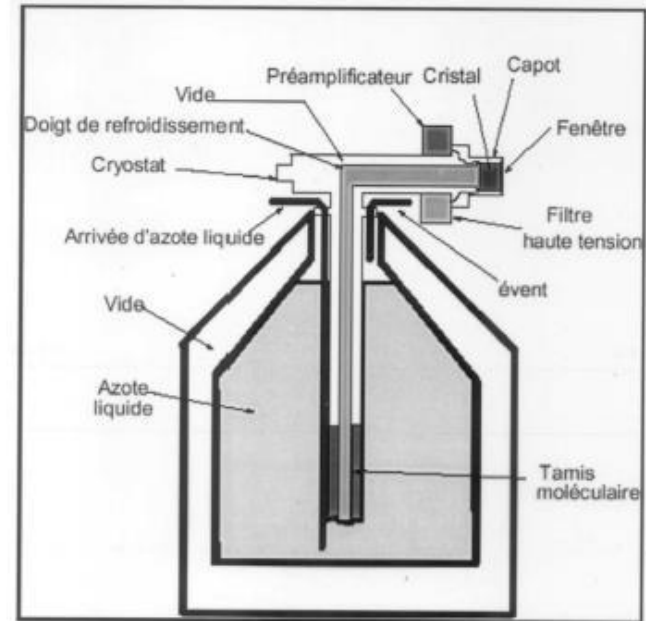
Planar configuration of HPGe



Coaxial configuration



Ge DEDEKTÖRÜ VE SOĞUTMA KABI (DEWAR)



DİĞER YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER

Malzeme	Atom numarası	Enerji aralığı	Çift oluşturmak için gerekli enerji (eV)
Si	14	1,106 (300 K)	3,65 (300 K)
Ge	32	0,67 (77 K)	2,96 (77 K)
CdTe	48 ve 52	1,47 (300 K)	4,43 (300 K)
Hgl ₂	80 ve 53	2,13 (300 K)	4,22 (300 K)
CdZnTe	48, 30 ve 52	1,64 (300 K)	5,0 (300 K)

DİĞER YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER

Cadmium telluride detectors (CdTe)

- High Z ($Z_{\text{Cd}} = 48$ and $Z_{\text{Te}} = 52$) → cross section for photoelectric effect 5 \times larger than for Ge
- Energy band gap large enough ($E_g = 1.52$ eV) → use at room temperature
- Poor collection efficiency of h^+ ↔ capture by traps → energy resolution less good than for Si or Ge
- Trapping of e^- by deep acceptor levels → accumulation of the charges → polarization variable in time → \searrow of the charge collection and \searrow of the thickness of the depletion region → efficiency \searrow
- Difficult transport of charges → limited volume
- Commercially available but expensive
- Used when the detection efficiency of high energy γ is essential

DİĞER YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER

Mercuric iodide Detectors (HgI_2)

- High Z ($Z_{\text{Hg}} = 80$ and $Z_{\text{I}} = 53$) \rightarrow cross section for photoelectric effect larger than for Ge \rightarrow 85% of a 100 keV photons beam is absorbed in 1 mm thick HgI_2 (for a equivalent percentage \rightarrow 10 mm Ge or 2.6 mm CdTe are needed)
- Large energy band gap ($E_g = 2.13$ eV) \rightarrow use at room temperature with a very small thermal background noise
- Problems: weak h^+ mobility, incomplete charge collection caused by h^+ trapping, polarization, deterioration of the surface with time \rightarrow limited resolution, limited volume, efficiency \searrow with time
- High price

DİĞER YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER

CZT detectors

- Use of ternary compound $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ (CZT) with $0.04 < x < 0.2$
- Energy band gap varying between 1.53 and 1.64 respectively
- At room temperature → very good energy resolution and large volume possible
- No polarization effect
- Difficulties to obtain a crystal without defect (such as metallic inclusions, grains boundary,...) → complex reproducibility
- Expensive

YARI İLETKEN DEDEKTÖRLERİN ÇALIŞMA ÖZELLİKLERİ

- Kaçak akım
- Dedektör Gürültüsü
- Dedektör Besleme Voltajındaki Değişiklikler
- Giriş Penceresi ya da Ölü Bölge
- Radyasyon Hasarı