

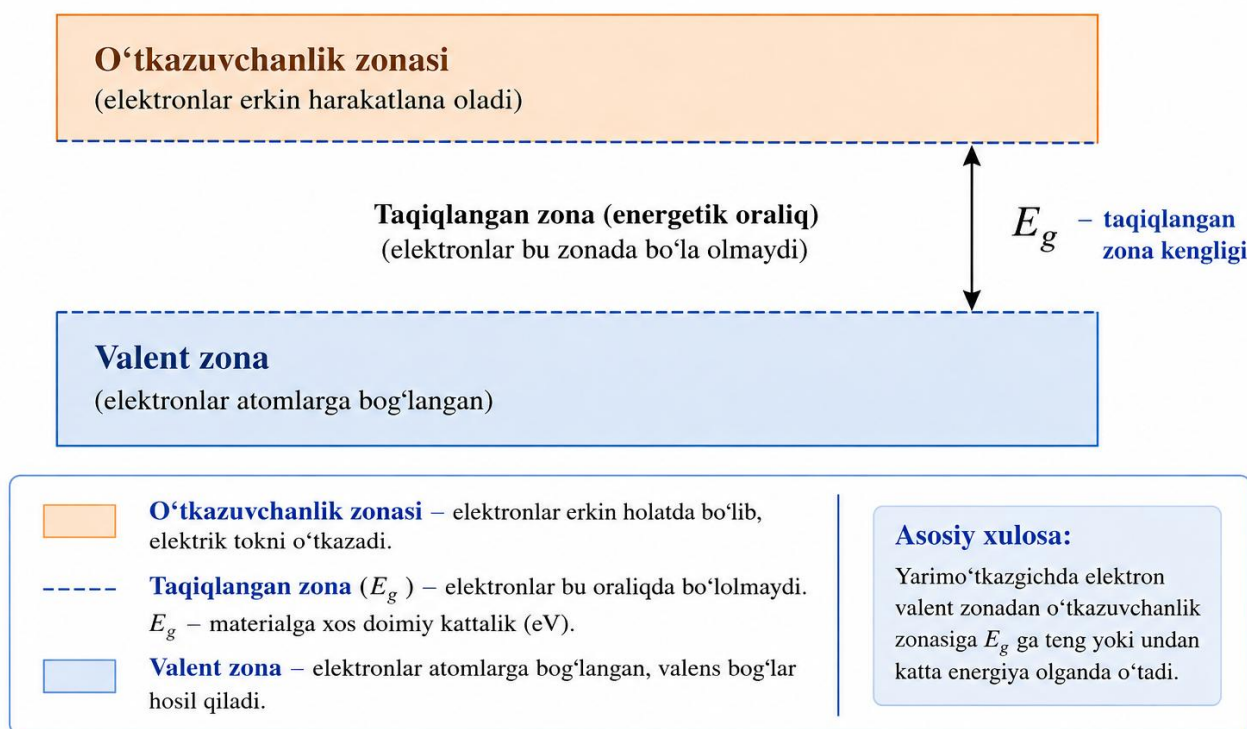
YARIMO'TKAZGICHLAR VA ULARNING ELEKTR O'TKAZUVCHANLIGI. SOF VA ARALASHMALI O'TKAZUVCHANLIK

Yarimo'tkazgichlar elektr o'tkazuvchanligi metallarnikidan kichik, dielektriklarnikidan esa katta bo'lgan va o'tkazuvchanligi temperatura, yoritilish, elektr maydon hamda aralashmalar konsentratsiyasiga juda sezgir materiallardir. Kremniy, germaniy va ayrim birikmali yarimo'tkazgichlar zamonaviy mikroelektronika, energetika, sensorika va optoelektronikaning asosini tashkil etadi. Ularning eng muhim xususiyati - elektr tokida ikki xil zaryad tashuvchi: elektron va kovaklarning qatnashishi hamda aralashma atomlari yordamida tashuvchilar konsentratsiyasini boshqarish imkoniyatidir.

Darsning maqsadi

Yarimo'tkazgichlarning energetik zonalar tuzilishini, sof yarimo'tkazgichda elektron-kovak juftlarining hosil bo'lishini, tok zichligi va o'tkazuvchanlik formulalarini, temperaturaning ta'sirini, donor va akseptor aralashmalar orqali n-tip va p-tip o'tkazuvchanlikning shakllanishini ilmiy asosda tushuntirish.

Yarimo'tkazgichning energetik zonalar modeli



1-rasm. Yarimo'tkazgichning energetik zonalar modeli

Material turi	Energetik xususiyat	Elektr xususiyati
Metall	Fermi sathi o'tkazuvchan zonada yoki zonalar ustma-ust	Yuqori o'tkazuvchanlik
Yarimo'tkazgich	Taqiqlangan zona nisbatan kichik	Boshqariladigan o'tkazuvchanlik

Dielektrik	Taqiqlangan zona katta	Juda kichik o'tkazuvchanlik
------------	------------------------	-----------------------------

1. Yarimo'tkazgichlarning fizik tabiati

Kristall qattiq jismlarda alohida atomlarning diskret energetik sathlari ko'p sonli atomlar o'zaro ta'sirlashganda energetik zonalarga ajraladi. Valent zona odatda bog'lanishda qatnashuvchi elektronlar bilan to'lgan bo'ladi, o'tkazuvchanlik zonasi esa erkin harakatlana oladigan elektron holatlarini o'z ichiga oladi. Ular orasidagi energiya oralig'i taqiqlangan zona E_g deyiladi.

$$E_g = E_C - E_V$$

0 K ga yaqin ideal sof yarimo'tkazgichda valent zona to'la, o'tkazuvchanlik zonasi esa bo'sh bo'lishi mumkin. Temperatura oshishi bilan ayrim valent elektronlar E_g energetik to'siqni yengib o'tkazuvchanlik zonasiga o'tadi. Valent zonada qolgan bo'sh holat kovak deb ataladi va u musbat zaryad tashuvchidek harakat qiladi.

Kremniy uchun xona temperaturasida taqiqlangan zona taxminan 1.12 eV, germaniy uchun esa taxminan 0.66 eV. Taqiqlangan zona kichikroq bo'lsa, bir xil temperaturada termik generatsiya odatda kuchliroq bo'ladi.

1-misol

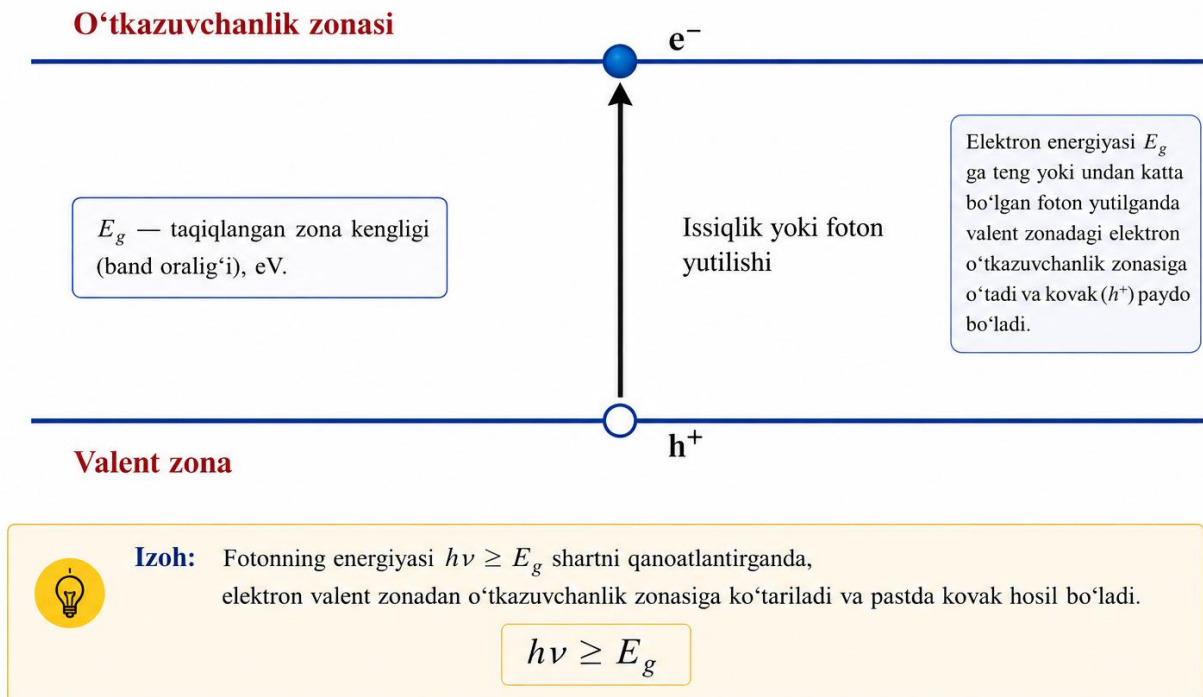
Kremniyda $E_g = 1.12$ eV bo'lsa, taqiqlangan zona energiyasi joullarda $E_g = 1.12 \times 1.602 \times 10^{-19} \approx 1.79 \times 10^{-19}$ J.

Kattalik	Belgi	Mazmun
O'tkazuvchanlik zona cheti	E_C	Erkin elektron holatlarining quyi chegarasi
Valent zona cheti	E_V	Valent holatlarning yuqori chegarasi
Taqiqlangan zona	E_g	$E_C - E_V$
Fermi sathi	E_F	Elektron holatlarining to'lish ehtimolini belgilovchi energiya

2. Sof yarimo'tkazgich va elektron-kovak juftlari

Kimyoviy jihatdan toza va ideal kristall tuzilishga yaqin yarimo'tkazgich sof yoki xususiy yarimo'tkazgich deyiladi. Unda o'tkazuvchanlik termik yoki optik ta'sir natijasida hosil bo'lgan elektron-kovak juftlari hisobiga yuzaga keladi. Har bir o'tkazuvchanlik zonasiga ko'tarilgan elektron valent zonada bitta kovak qoldiradi.

Sof yarimo'tkazgichda elektron–kovak juftining hosil bo'lishi



2-rasm. Sof yarimo'tkazgichda elektron-kovak juftining generatsiyasi

$$n = p = n_i$$

Bu yerda n - o'tkazuvchanlik elektronlari konsentratsiyasi, p - kovaklar konsentratsiyasi, n_i - xususiy tashuvchilar konsentratsiyasi. Elektr maydonda elektronlar maydonga qarama-qarshi, kovaklar esa maydon yo'nalishida drift qiladi. Shartli tok yo'nalishiga ikkala tashuvchi ham musbat hissa qo'shadi.

$$j_n = e n \mu_n E$$

$$j_p = e p \mu_p E$$

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

Shuning uchun yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi:

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

2-misol

Sof materialda $n=p=1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $\mu_n=0.14 \text{ m}^2/(\text{V s})$, $\mu_p=0.05 \text{ m}^2/(\text{V s})$ bo'lsa, $\sigma=e n(\mu_n+\mu_p) \approx 3.04 \times 10^{-4} \text{ S/m}$.

3. Yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligi

Metallardan farqli ravishda sof yarimo'tkazgichlarda temperatura ortishi bilan o'tkazuvchanlik odatda keskin ortadi. Asosiy sabab - termik energiya ta'sirida o'tkazuvchanlik zonasiga o'tadigan elektronlar va hosil bo'ladigan kovaklar sonining eksponensial ko'payishidir.

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp[-E_g/(2 k_B T)]$$

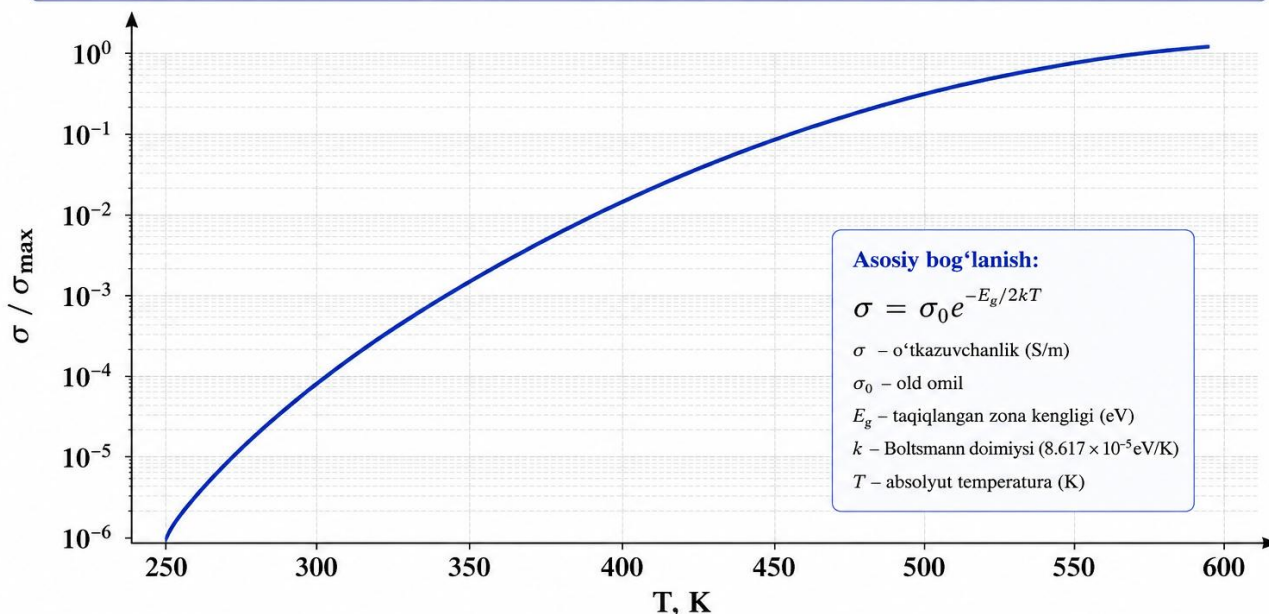
Bu yerda N_C va N_V - mos ravishda o'tkazuvchanlik va valent zonalarining effektiv holatlar zichligi. Soddalashtirilgan holda:

$$\sigma_i \propto \exp[-E_g/(2 k_B T)]$$

Sof yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligi

Temperatura ortishi bilan sof yarimo'tkazgichda o'tkazuvchanlik σ eksponensial oshadi.

Buning sababi – valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga o'tadigan elektronlar sonining ortishidir.



Izoh: Grafikdan ko'rinadiki, temperatura oshishi bilan σ tez ortadi (eksponensial qonun bo'yicha). Bu xulosa yarimo'tkazgich asboblarning temperatura rejimlarini tahlil qilishda muhimdir.

3-rasm. Sof yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligining temperaturaga kuchli bog'liqligi

Temperatura oshishi tashuvchilar harakatchanligini sochilish sababli kamaytirishi mumkin, ammo xususiy sohada tashuvchilar konsentratsiyasining eksponensial ortishi ustun keladi. Shu bois qarshilik kamayadi.

3-misol

Bir yarimo'tkazgichda temperaturaning oshishi natijasida tashuvchilar konsentratsiyasi 20 marta, harakatchanlik esa 0.8 marta o'zgarsa, $\sigma = e(n \mu_n + p \mu_p)$ mazmunidan o'tkazuvchanlik taxminan 16 marta ortishi mumkin.

Bu xususiyat termistorlar va temperatura sezgir yarimo'tkazgich datchiklarida qo'llanadi.

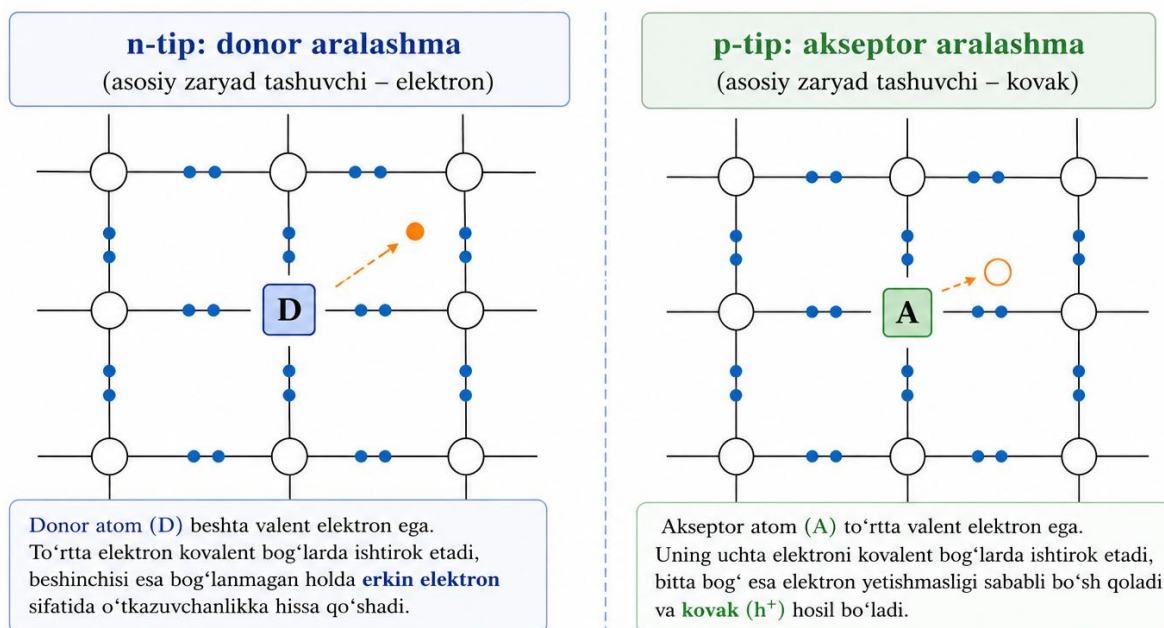
4. Aralashmali o'tkazuvchanlikning mohiyati

Sof yarimo'tkazgichga juda kichik miqdorda maxsus aralashma atomlari kiritish legirlash deyiladi. Legirlash natijasida taqiqlangan zonada qo'shimcha energetik sathlar paydo bo'lib, elektron yoki kovaklarni hosil qilish uchun zarur energiya sezilarli kamayadi. Shu sababli aralashma konsentratsiyasi juda kichik bo'lsa ham elektr o'tkazuvchanlik keskin o'zgarishi mumkin.

Kremniy to'rt valentli element. Besh valentli fosfor, mishyak yoki surma kabi atom kiritilsa, to'rtta valent elektron kovalent bog'lanishda qatnashadi, beshinchi elektron esa nisbatan kuchsiz bog'langan bo'ladi. Bunday aralashma donor deyiladi.

Uch valentli bor, alyuminiy yoki galliy kiritilganda bitta bog'lanish uchun elektron yetishmaydi va kovak hosil bo'lishiga sharoit yaratiladi. Bunday aralashma akseptor deyiladi.

Aralashmali yarimo'tkazgichlarda asosiy zaryad tashuvchilar



Belgilar: ○ Si atom (kristall panjara) ● Kovalent elektron (bog'lovchi e⁻) ● Erkin elektron (erkin e⁻) ○ Kovak (h⁺) D Donor atom (5 valent e⁻) A Akseptor atom (4 valent e⁻)

Xulosa: n-tipda asosiy zaryad tashuvchi – elektronlar (erkin e⁻), p-tipda esa asosiy zaryad tashuvchi – kovaklar (h⁺) hisoblanadi.

4-rasm. Donorli n-tip va akseptorli p-tip yarimo'tkazgichlar

Aralashma	Tip	Asosiy tashuvchi	Noasosiy tashuvchi
Donor	n-tip	Elektron	Kovak
Akseptor	p-tip	Kovak	Elektron

4-misol

Agar n-tip kremniyda donorlar deyarli to'liq ionlashgan va $N_D = 10^{21} \text{ m}^{-3}$ bo'lsa, xususiy tashuvchilar konsentratsiyasi bundan ancha kichik sharoitda $n \approx N_D$ deb olish mumkin.

5. n-tip yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi

Donor atomining ortiqcha elektroni o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishi uchun sof yarimo'tkazgichdagi E_g ga nisbatan ancha kichik energiya talab qilinadi. Donor elektronini bergach, kristall panjarada musbat ionlangan donor qoladi, lekin u panjaraga bog'langan va tok tashimaydi. Tokni asosan o'tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar tashiydi.

$$n \gg p$$

$$\sigma_n = e(n \mu_n + p \mu_p) \approx e n \mu_n$$

Termik muvozanatda elektron va kovak konsentratsiyalari massalar ta'siri qonuniga bo'ysunadi:

$$np = n_i^2$$

Shuning uchun n-tip materialda n katta bo'lsa, $p = n_i^2/n$ kichik bo'ladi. Kovaklar noasosiy tashuvchilar hisoblanadi.

5-misol

$n=2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ va $\mu_n=0.12 \text{ m}^2/(\text{V s})$ bo'lsa, kovak hissasi e'tiborga olinmaganda $\sigma \approx e n \mu_n \approx 38.4 \text{ S/m}$. Solishtirma qarshilik $\rho=1/\sigma \approx 0.026 \text{ ohm m}$.

Elektr maydon $E=10 \text{ V/m}$ bo'lsa, tok zichligi $j=\sigma E \approx 384 \text{ A/m}^2$.

n-tipdagi jarayon	Natija
Donor ionlanadi	O'tkazuvchanlik zonasiga elektron beradi
Elektronlar soni ortadi	n keskin oshadi
Kovaklar noasosiy	$p=n_i^2/n$
Fermi sathi	O'tkazuvchanlik zonasiga yaqinlashadi

6. p-tip yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi

Akseptor atom valent zonadan elektron qabul qilib, manfiy ionga aylanishi mumkin. Valent zonada elektron yetishmaydigan bo'sh holat - kovak paydo bo'ladi. Elektr maydon ta'sirida valent elektronlar ketma-ket bo'sh holatlarni to'ldirishi natijasida kovakning maydon yo'nalishidagi samarali harakati kuzatiladi.

$$p \gg n$$

$$\sigma_p = e(n \mu_n + p \mu_p) \approx e p \mu_p$$

p-tip materialda asosiy tashuvchilar kovaklar, elektronlar esa noasosiy tashuvchilardir. Termik muvozanatda $n=n_i^2/p$.

6-misol

$p=5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ va $\mu_p=0.045 \text{ m}^2/(\text{V s})$ bo'lsa, $\sigma \approx e p \mu_p \approx 36.0 \text{ S/m}$. Solishtirma qarshilik $\rho \approx 0.0278 \text{ ohm m}$.

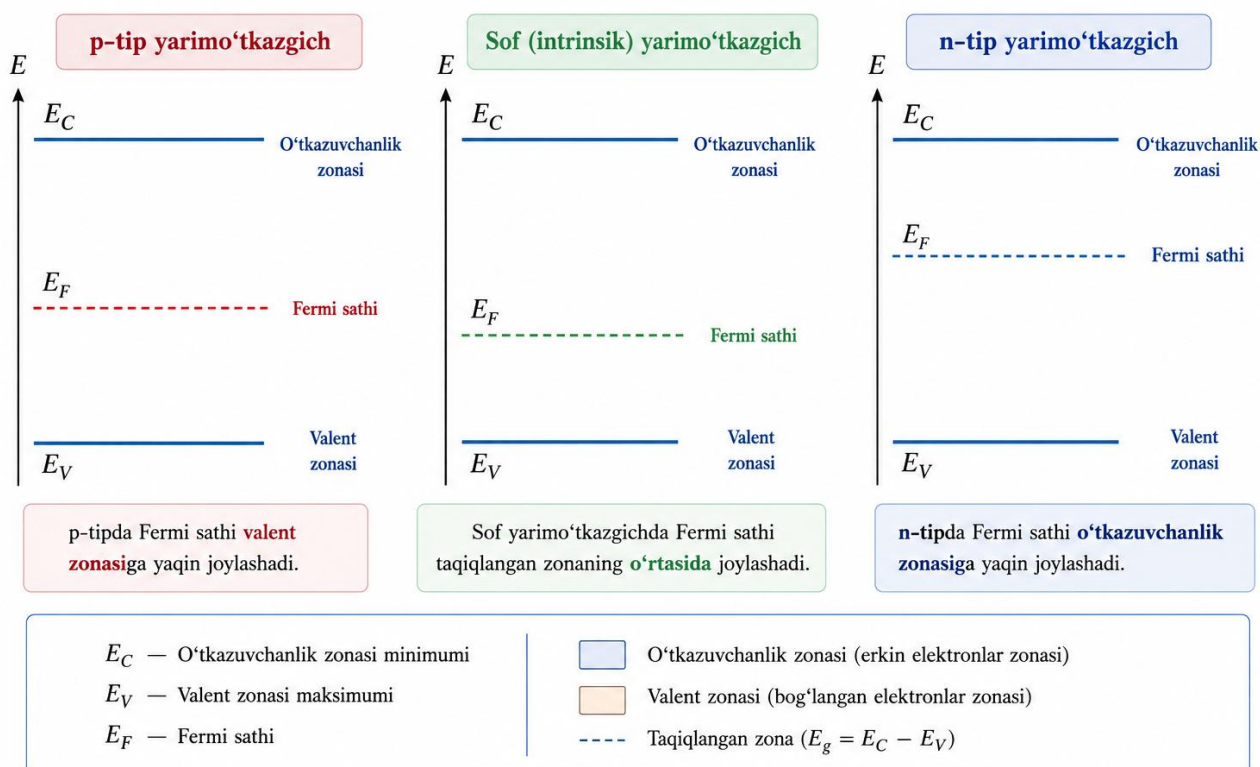
Kesim yuzi $S=1 \text{ mm}^2$ va uzunligi $l=2 \text{ cm}$ bo'lgan namunada $R=\rho l/S \approx 556 \text{ ohm}$.

Elektron va kovak harakatchanligi

Bir xil materialda elektronlar va kovaklarning harakatchanligi odatda teng emas. Kremniyda xona temperaturasida elektron harakatchanligi kovaknikidan kattaroq bo'lishi mumkin. Shu sababli bir xil tashuvchilar konsentratsiyasida n-tip va p-tip materiallarning o'tkazuvchanligi farq qiladi.

7. Fermi sathi va sof-aralashmali yarimo'tkazgichlarni taqqoslash

Fermi sathining sof, p-tip va n-tip yarimo'tkazgichlarda joylashuvi



5-rasm. Fermi sathining p-tip, sof va n-tip materiallarda sxematik joylashuvi

Sof yarimo'tkazgichda Fermi sathi odatda taqiqlangan zonaning o'rtalariga yaqin joylashadi. Donorlar kiritilganda elektron holatlarning to'lish ehtimoli o'zgarib, Fermi sathi o'tkazuvchanlik zonasi tomon siljiydi. Akseptorlar kiritilganda esa valent zona tomon siljiydi. Fermi sathi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini statistik tavsiflashda markaziy tushunchadir.

Xususiyat	Sof	n-tip	p-tip
Asosiy tashuvchi	Elektron va kovak teng	Elektron	Kovak
n va p	$n=p=n_i$	$n \gg p$	$p \gg n$
Aralashma	Yo'q yoki juda kam	Donor	Akseptor
Fermi sathi	Zona o'rtasiga yaqin	E_C tomon	E_V tomon
O'tkazuvchanlik	Temperaturaga kuchli bog'liq	Donorlar bilan boshqariladi	Akseptorlar bilan boshqariladi

7-misol: massalar ta'siri qonuni

Agar ma'lum temperaturada $n_i=10^{16} \text{ m}^{-3}$ va n-tip materialda $n=10^{20} \text{ m}^{-3}$ bo'lsa, $p=n_i^2/n=10^{12} \text{ m}^{-3}$. Demak, elektronlar kovaklardan 10^8 marta ko'p.

8-misol: ikki tashuvchili o'tkazuvchanlik

$n=4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $p=2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $\mu_n=0.13$ va $\mu_p=0.05 \text{ m}^2/(\text{V s})$ bo'lsa, $\sigma=e(n\mu_n+p\mu_p) \approx 0.993 \text{ S/m}$. Elektron hissasi kovak hissasidan katta.

8. Mavzuni darsda tushuntirish algoritmi va amaliy bog'lanishlar

Bosqich	Metodik mazmun
1	Metall, yarimo'tkazgich va dielektriklarni o'tkazuvchanlik bo'yicha qiyoslash.
2	Energetik zonalar: E_V , E_C va E_g ni rasm orqali tushuntirish.
3	Sof materialda elektron-kovak juftining termik generatsiyasini ko'rsatish.
4	$j=e(n\mu_n+p\mu_p)E$ formulasi orqali ikki tashuvchili tokni izohlash.
5	Temperatura oshganda n_i va σ ning ortishini grafikda tahlil qilish.
6	Donor va akseptor legirlash orqali n-tip va p-tipni shakllantirish.
7	Fermi sathi, asosiy/noasosiy tashuvchilar va $n_p=n_i^2$ bog'lanishini mustahkamlash.
8	Hisoblash misollarini diod, tranzistor, termistor va fotoelementlar bilan bog'lash.

Amaliy qo'llanishlar

n-tip va p-tip yarimo'tkazgichlarning boshqariladigan o'tkazuvchanligi p-n o'tish, diod, tranzistor, integral mikrosxema, quyosh elementi, fotodiod, LED, termistor va turli sensorlarning ishlashiga asos bo'ladi. Mikroelektronikada legirlash darajasini fazoviy boshqarish orqali bir kristallning o'zida turli elektr xususiyatli sohalar yaratiladi.

Muammoli savollar

Nima uchun sof yarimo'tkazgichning qarshiligi temperatura oshganda kamayadi? Kovak real musbat zarrachami yoki samarali kvazizarrachami? Nima uchun donor atomining musbat ioni tok tashimaydi? n-tip materialda kovaklar qayerdan paydo bo'ladi? Aralashma miqdori juda kichik bo'lsa ham nega o'tkazuvchanlik keskin o'zgaradi? Fermi sathining siljishi tashuvchilar konsentratsiyasi bilan qanday bog'langan?

Ko'p uchraydigan xatolar

Yarimo'tkazgichni doimo 'yomon o'tkazgich' deb baholash; kovakni kristall bo'ylab mustaqil musbat ion deb tasavvur qilish; n-tip materialni manfiy zaryadlangan deb hisoblash; p-tip materialni musbat zaryadlangan deb hisoblash; donor va akseptor ionlarini erkin tok tashuvchi deb olish. n-tip va p-tip kristall umumiy holda elektr neytral bo'lib qoladi.

9. Asosiy formulalar, mustaqil topshiriqlar va yakuniy xulosa

Formula	Mazmuni
$E_g=E_C-E_V$	Taqiqlangan zona kengligi
$n=p=n_i$	Sof yarimo'tkazgich

$j=e(n\mu_n+p\mu_p)E$	Umumiy tok zichligi
$\sigma=e(n\mu_n+p\mu_p)$	Elektr o'tkazuvchanlik
$\rho=1/\sigma$	Solishtirma qarshilik
$n_i=\sqrt{N_C N_V}\exp[-E_g/(2k_BT)]$	Xususiy tashuvchilar konsentratsiyasi
$n_p=n_i^2$	Massalar ta'siri qonuni
$\sigma_n\approx en\mu_n$	n-tip uchun yaqinlashuv
$\sigma_p\approx ep\mu_p$	p-tip uchun yaqinlashuv

Mustaqil topshiriqlar

1. $n=p=2\times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $\mu_n=0.12$ va $\mu_p=0.04 \text{ m}^2/(\text{V s})$ bo'lsa sof materialning σ ni hisoblang.
2. n-tip materialda $n=10^{21} \text{ m}^{-3}$ va $n_i=10^{16} \text{ m}^{-3}$ bo'lsa p ni toping.
3. $p=3\times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ va $\mu_p=0.05 \text{ m}^2/(\text{V s})$ uchun p-tip o'tkazuvchanlikni hisoblang.
4. $E=20 \text{ V/m}$ va $\sigma=4 \text{ S/m}$ bo'lsa tok zichligini toping.
5. Donor va akseptor aralashmalarining energetik zonalar diagrammasidagi rolini tushuntiring.
6. Sof yarimo'tkazgichning temperaturaga bog'liq o'tkazuvchanligini metallniki bilan qiyoslang.

Yakuniy xulosa

Yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi energetik zonalar tuzilishi va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasiga bog'liq. Sof yarimo'tkazgichda termik yoki optik qo'zg'alish natijasida elektron-kovak juftlari hosil bo'ladi va $n=p=n_i$ shart bajariladi. Elektr tokiga elektronlar ham, kovaklar ham hissa qo'shib, o'tkazuvchanlik $\sigma=e(n\mu_n+p\mu_p)$ bilan aniqlanadi. Temperatura oshganda xususiy tashuvchilar konsentratsiyasi eksponensial ortgani uchun sof yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligi kuchayadi. Donor aralashmalar n-tip, akseptor aralashmalar esa p-tip o'tkazuvchanlikni shakllantiradi. n-tipda elektronlar, p-tipda kovaklar asosiy tashuvchilardir; noasosiy tashuvchilar esa $n_p=n_i^2$ qonuni bilan bog'langan. Legirlash orqali o'tkazuvchanlikni aniq boshqarish imkoniyati zamonaviy yarimo'tkazgich elektronikasi va mikroelektronikaning fundamental asosidir.

Tavsiya etiladigan adabiyotlar

1. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. Wiley.
2. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. Wiley.
3. Neamen D. A. Semiconductor Physics and Devices. McGraw-Hill.
4. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. Wiley.