



YARIMO‘TKAZGICHLARDA ENERGETIK SATHLAR VA TAQIQLANGAN ZONA KENGLIGINING HARORATGA BOG‘LIQIGI

Zarina Raxmatova,

Nizomiy nomidagi O‘zbekiston milliy pedagogika universiteti , magistr

E-mail: abdukarimovazarina143@gmail.com

Tel: (91) 204 34 99

Qo‘qon davlat universiteti Fizika va astronomiya kafedrasi dotsenti, f-m.f.f.d.,(Phd)

M.X.Qo‘chqorov.

Abstract. This article considers the energy structure of semiconductors, the valence band, the conduction band, and the physical content of the band gap width between them. The temperature dependence of the band gap width is analyzed. Changes in the electronic structure and electrical properties of a semiconductor as a result of temperature changes are theoretically studied. The relationship characterizing the temperature dependence of the band gap width is considered using the example of a semiconductor material such as silicon.

Keywords: semiconductor, energy level, valence band, conduction band, band gap, silicon, temperature, electron, hole, Drift current.

Аннотация. В данной статье рассматривается энергетическая структура полупроводников, валентная полоса, зона проводимости и физическое содержание ширины запрещенной зоны между ними. Анализируется температурная зависимость ширины запрещенной зоны. Теоретически изучаются изменения электронной структуры и электрических свойств полупроводника в результате изменения температуры. Рассматривается соотношение, характеризующее температурную зависимость ширины запрещенной зоны, на примере полупроводникового материала, такого как кремний.

Ключевые слова: полупроводник, энергетический уровень, валентная полоса, зона проводимости, запрещенная зона, кремний, температура, электрон, дырка, дрейфовый ток.

Annotatsiya. Ushbu maqolada yarimo‘tkazgichlarning energetik tuzilishi, valent zona, o‘tkazuvchanlik zonasi va ular orasidagi taqiqlangan zona kengligining fizik mazmuni ko‘rib

chiqilgan. Taqiqlangan zona kengligining haroratga bog‘liqligi tahlil qilinadi. Harorat o‘zgarishi natijasida yarimo‘tkazgichning elektron tuzilishi va elektr xossalari yuz beradigan o‘zgarishlar nazariy jihatdan o‘rganiladi. Kremniy kabi yarimo‘tkazgich materiallari misolida taqiqlangan zona kengligining haroratga bog‘liqligini tavsiflovchi munosabatlar ko‘rib chiqiladi.

Kalit so‘zlar: yarimo‘tkazgich, energetik sath, valent zona, o‘tkazuvchanlik zonasi, taqiqlangan zona, kremniy, harorat, elektron, kovak, Drift oqimi

Kirish. Yarimo‘tkazgich *monokristall* materialldir. Yarimo‘tkazgich-metall va izalyatorning orasidagi o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan material guruhi hisoblanadi. Davriy jadvalda yarimo‘tkazgichlarning joylashuvi quyidagicha:

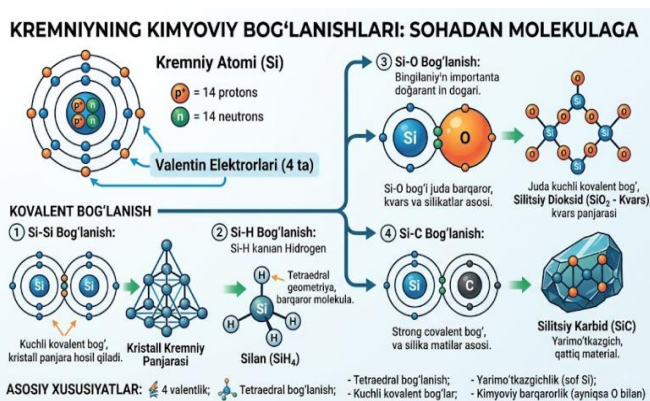
- 1) Yarimo‘tkazgichlar-IV elementlari.
- 2) Aralash yarimo‘tkazgichlar-III, V elementlar kiradi.

1.1-jadval Davriy sistemaning bir qismi			1.2-jadval Ba'zi yarim o'tkazgich materiallar ro'yxati	
III	IV	V	Oddiy (elementar) yarim o'tkazgichlar	
5 B Bor	6 C Uglerod		Si Kremniy	
			Ge Germaniy	
12	14	16	Murakkab (birkomponent) yarim o'tkazgichlar	
13 Al Aluminiy	14 Si Kremniy	15 P Fosfor	AlP Aluminiy fosfid	
			AlAs Aluminiy arsenid	
31 Ga Galiy	32 Ge Germaniy	33 As Mishyak	GaP Galiy fosfid	
			GaAs Galiy arsenid	
49 In Indiy		51 Sb Surma	InP Indiy fosfid	

1-jadval.

Kremniy (Si) asosiy yarimo‘tkazgich materialldir. Galiy arsenide (GaAs) esa aralash yarimo‘tkazgich hisoblanadi. Kremniy *kristall* tuzilishga ega .

1.1-rasm.



Kremniy yuzasida ajoyib mahalliy oksid (SiO_2) hosil bo‘lishi mumkin. Bun oksid MOSFET da darvoza izalyatori sifatida ham ishlatiladi. Kremniy hona haroratida oksidlanib, taxmin 25 Å yupqa parda tabiiy oksid hosil qiladi.

Yarim o‘tkazgichlarda *kimyoviy bog‘lanish* asosan kovalent bog‘lanish bo‘lganligi sababli hamma valent elektronlar kimyoviy bog‘lanishda to‘la qatnashadi. (*Kovalent*

bog‘lanish-kristalldagi qo‘shni atomlar qarama qarshi spinga ega bo‘lgan valent elektronlar 2 ta atom orasida umumiy bo‘lishi bilan elektron qobiqlar to‘lishiga aytiladi.) Demak, bunda materiallarda erkin elektronlar bo‘lmaydi. Erkin elektronlar bo‘lishi uchun, kimyoviy bog‘lanishda qatnashayotgan valent elektronlar kimyoviy bog‘lanishni uzishi va o‘z atomidan uzoqlashishi kerak. Buning uchun elektron ma’lum miqdorda bog‘lanish energiyasini uzishiga yetarli energiyani olishi lozim. Bu energiya issiqlik yoki yorug‘lik energiyasi bo‘lishi mumkin. O‘ta past haroratlarda valent elektronlar erkin elektronlar holatiga o‘tish ehtimolligi juda kam bo‘lganligi uchun yarim o‘tkazgich materiallar juda yaxshi hisoblanadi.

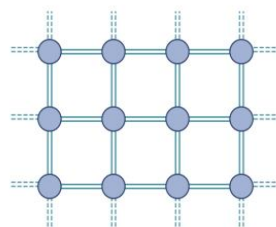
Endi bunday materiallarda o‘tkazuvchanlik bo‘lishi uchun kovalent bog‘lanishda ishtirok etayotgan valent elektronlar ozod etiladi va erkin elektronlar holatiga o‘tadi. O‘z atomidan uzoqlashgan erkin elektronlarni boshqa hech qanday atomlar yutib olishi mumkin emas. Chunki ularning tashqi elektron qobiqlari to‘lgan. Demak, yarim o‘tkazgichlarda valent elektronlarning ikki holati mavjud bo‘lar ekan. Bu kovalent bog‘lanishda qatnashgan bog‘langan elektron holat va bog‘lanishdan uzilgan erkin holat.

Elektronlarning bog‘langan holati *valent sohasi*, erkin holatini esa *o‘tkazuvchanlik sohasi* deb qabul qilingan. Chunki elektron faqat erkin holatdagina zaryad tashishda qatnashishi mumkin. Bu uning o‘tkazuvchanlik sohasida bo‘lishini anglatadi. Bog‘langan valent elektronlarni erkin holatga olib chiqish uchun zarur bo‘lgan energiya, ya’ni elektronning bog‘lanish energiyasini uzish uchun kerak bo‘lgan energiya *taqiqlangan soha kengligi* deb ataladi.

Demak, zaryad ko‘chmoqda degani, ya’ni *elektr toki* hosil qilindi degani. Shuning uchun, yarim o‘tkazgich materiallarda asosi atomlar musbat zaryadlangan va kovalent bog‘lanish buzilgan holatni kovak yangi turdagi musbat zaryadga ega bo‘lgan zaryad tashuvchilar deyiladi. Yani, kovaklarning tok tashishda qatnashishi bog‘langan elektronlar qo‘shni bo‘sh joylarga ketma-ket o‘tishi orqali bo‘lar ekan. Demak, yarim o‘tkazgichlarning metallardan asosiy farqi ikki xil zaryad tashuvchilar *elektron* (n) va *kovak* (p) lar mavjudligidadir. Shuning uchun ham bunday materiallarda elektr o‘tkazuvchanlik quyidagi ifoda yordamida aniqlanadi.

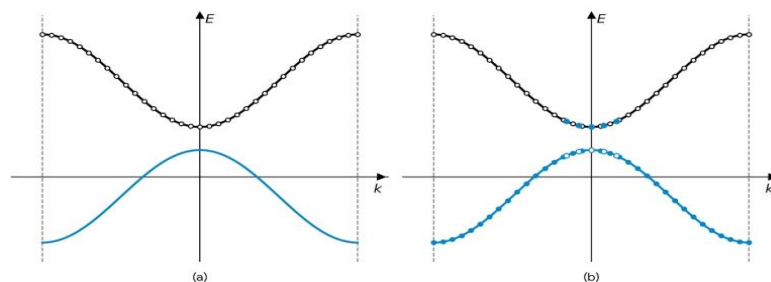
$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (1.1)$$

Bunda n – elektronlarning konsentratsiyasi, p – kovaklarning konsentratsiyasi, μ_n, μ_p - elektron va kovaklarning harakatchanligi, e – elektron zaryadi. Biz kirish qismida kremniyning kovalent bog‘lanishini muhokama qildik. 1.4-rasmda monokristalli kremniy panjarasidagi kovalent bog‘lanishning ikki o‘lchovli tasviri ko‘rsatilgan.



1.2-rasm. $T=0K$ da yarimo‘tkazgichda kovalent bog‘lanishning ikki o‘lchovli ta’siri

Shuningdek, biz bu bog‘lanishning uzilishi E va k energiya zonalarini bilan bog‘lashimiz mumkin. 1.3a-rasmda $T=0K$ da o‘tkazuvchanlik va valentlik zonalarining E va k diagrammasi ko‘rsatilgan. Valentlik zonasidagi energiya holatlari to‘liq to‘lgan va o‘tkazuvchanlik zonasidagi holatlar bo‘sh. 1.3b-rasmda $T=0K$ uchun xuddi shu zonalar ko‘rsatilgan, bunda ba’zi elektronlar o‘tkazuvchanlik zonasiga sakrash uchun yetarli energiya olgan va valentlik zonasida bo‘sh holatlarni qoldirgan. Biz bu nuqtada tashqi kuchlar qo‘llanilmaydi deb taxmin qilmoqdamiz, shuning uchun elektron va “bo‘sh holat” taqsimoti k bilan simmetrikdir.



1.3-rasm. (a) $T=0$ va (b) 70 K da yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanlik va valentlik polosalarining E va k diagrammasi.

Drift oqimi

Tok zaryadning sof oqimi tufayli yuzaga keladi. Agar bizda hajm zichligi N/cm^{-3} va o‘rtacha drift tezligi $v_d(cm/s)$, bo‘lgan musbat zaryadlangan ionlar to‘plami bo‘lsa, u holda drift oqimi zichligi

$$J=qNv_d \quad A/cm^2 \quad (1.2)$$

bo‘ladi. Agar o‘rtacha drift tezligini hisobga olish o‘rniga, individual ion tezligini hisobga olsak, drift oqimi zichligini quyidagicha yozishimiz mumkin

$$J=q \sum_{i=1}^N v_i \quad (1.3)$$

bu yerda v_i -ionning tezligi. (1.3) tenglamadagi yig‘indi birlik hajmga ega bo‘ladi, shunda J tok zichligi hali ham A/cm^2 birliklarida bo‘ladi.

Elektronlar zaryadlangan zarralar bo‘lgani uchun, o‘tkazuvchanlik zonasida elektronlarning sof drifti tok hosil qiladi. 1.3.b-rasmda ko‘rsatilgandek, o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektron taqsimoti tashqi kuch qo‘llanilmaganda k ning juft funksiyasidir. Eslatib o‘tamiz, erkin elektron uchun k impuls bilan bog‘liq, shuning uchun k qiymatiga ega

elektronlar soni qancha ko‘p bo‘lsa, shuncha ko‘p elektronlar mavjud bo‘lganligi sababli, bu elektronlar tufayli yuzaga keladigan sof siljish oqimi zichligi nolga teng. Bu natija, albatta, kutilmoqda, chunki tashqi kuch qo‘llanilmaydi.

Agar zarrachaga kuch qo‘llanilsa va zarracha harakatlansa, u energiya olishi kerak. Bu effekt

$$dE = Fdx = Fvdt \quad (1.4)$$

shaklida ifodalanadi, bu yerda F - qo‘llaniladigan kuch, dx - zarracha harakatlanadigan differensial masofa, v - tezlik va dE - energiyaning oshishi. Agar o‘tkazuvchanlik zonasidagi elektronlarga tashqi kuch qo‘llanilsa, elektronlar harakatlana oladigan bo‘sh energiya holatlari mavjud; shuning uchun tashqi kuch tufayli elektronlar energiya olishlari va elektronlar harakati tufayli drift oqimi zichligini quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$J = -e \sum_{i=1}^n v_i \quad (1.5)$$

bu yerda e - elektron zaryadining kattaligi va n - o‘tkazuvchanlik polosasida birlik hajmga to‘g‘ri keladigan elektronlar soni. Yana bir bor, yig‘indi birlik hajmga olinadi, shunda oqim zichligi hali ham A/cm^2 birliklarida bo‘ladi. (1.5) tenglamadan shuni ta’kidlashimiz mumkinki, oqim elektron tezligiga bevosita bog‘liq; ya’ni oqim elektronning kristalda qanchalik yaxshi harakatlanishiga bog‘liq.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili.

Yarimo‘tkazgich materiallarda haroratning taqiqlangan zona kengligi va zaryad tashuvchilar dinamikasiga ta’sirini o‘rganish yarimo‘tkazgichlar fizikasining muhim masalasidir.

Energetik zonalar: C. Kittel [7], V.L. Bonch-Bruevich [6] va K.V. Shalimova [8] tadqiqotlarida $T=0$ da valent zona to‘liq to‘lgan, o‘tkazuvchanlik zonasi esa bo‘sh bo‘lishi ko‘rsatilgan. Harorat oshishi bilan kovalent bog‘larning uzilishi va elektron-kovak juftliklarining hosil bo‘lishi D.A. Neamen [1] tomonidan atroflicha tahlil qilingan.

Haroratiy bog‘liqlik va model: Y.P. Varshni [2] taklif etgan empirik tenglama

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

panjara kengayishi hamda elektron-fonon o‘zaro ta’sirini e’tiborga olgan holda E_g ning harorat ortishi bilan kamayishini asoslaydi.

Kremniy va elektrofizik xossalar: S.M. Sze [4], S. Zaynobiddinov [3] hamda G.Gulyamov [5] tadqiqotlarida kremniy (Si) monokristallida taqiqlangan zona kengligi, zaryad tashuvchilar harakatchanligi va elektr o‘tkazuvchanlikning

$$\partial = en\mu_n + ep\mu_p$$

ifodasi bo‘yicha o‘zgarishi ko‘rib chiqilgan

Tadqiqotda quyidagi nazariy va analitik usullardan foydalanildi:

Energetik zona modeli: Taqiqlangan zona hamda $E(k)$ diagrammalari yordamida zaryad tashuvchilarning muvozanatli va tashqi elektr maydoni ta'siridagi holatlari tahlil qilindi.

Analitik modellash: Kremniy (Si) uchun Varshni tenglamasi ($E_g(0) = 1.17\text{eV}$, $\alpha = 4.73 \times 10^{-4} \text{eV/K}$, $\beta = 673\text{K}$) yordamida $E_g(T)$ hisoblandi. Drift

oqimi va elektr o'tkazuvchanlik tenglamalari orqali zaryad tashish jarayonlari baholandi.

Qiyosiy tahlil: Nazariy natijalar eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslanib, panjara kengayishi va elektron-fonon sochilishlarining ta'siri umumlashtirildi.

Tahlil va natijalar.

E_g ning haroratga bog'liqligi: Kremniyda harorat $T=0$ dan $T=300\text{K}$ gacha

ko'tarilganda taqiqlangan zona kengligi 1.17eV dan $1,12\text{eV}$ gacha monoton kamayadi. Bu panjara atomlarining issiqlik tebranishi va elektron-fonon ta'siri natijasidir. Bu natija Zaynobiddinov va Nazyrov [9] tomonidan olingan eksperimental ma'lumotlar bilan ham mos keladi.

Zaryad tashuvchilar va o'tkazuvchanlik: $T=0$ da erkin zaryad tashuvchilar bo'lmaydi $\partial = 0$ Harorat oshishi bilan bog'lar uzilib, elektron va kovaklar konsentratsiyasi hamda elektr o'tkazuvchanlik ∂ eksponensial ortadi.

Drift oqimi: Tashqi maydon bo'lmaganda elektronlar taqsimoti simmetrik bo'lib, sof drift oqimi nolga teng $J=0$. Tashqi elektr maydoni qo'llanilganda $E(k)$ taqsimot assimetrik ko'rinishga o'tib, sof drift oqimini $J = -e \sum n v_i$ hosil qiladi.

Takliflar va amaliy tavsiyalar.

1.Harorat kompensatsiyasi: Yarimo'tkazgichli asboblarni (MOSFET, bipolyar tranzistorlar) loyihalashda E_g ning haroratiy o'zgarishini hisobga oluvchi sxemalarni tatbiq etish.

2.Yuqori haroratli qurilmalar: Yuqori haroratda ishlovchi optoelektronik qurilmalar va quyosh elementlari uchun keng taqiqlangan zonali materiallardan (GaAs, GaN) foydalanish.

Eksperimental tadqiqotlar: Keng harorat oralig'ida kremniyning optik yutilishi va Xoll effektini birgalikda o'lchash bo'yicha kompleks tajribalarni o'tkazish.

Xulosa

Ushbu maqolada yarimo'tkazgichlarning energetik tuzilishi — valent zona, o'tkazuvchanlik zonasi va ular orasidagi taqiqlangan zona — nazariy jihatdan tahlil qilindi. Ko'rsatildiki, yarimo'tkazgichlarda kovalent bog'lanishning uzilishi natijasida erkin elektronlar va musbat zaryadli kovaklar hosil bo'ladi, bu esa ikki xil zaryad tashuvchining (elektron va kovak) mavjudligini ta'minlaydi va o'tkazuvchanlikning $\sigma = en\mu_n + ep\mu_p$ ifodasi

orqali baholanishini belgilaydi. $T = 0\text{K}$ da barcha valent elektronlar bog‘langan holatda bo‘lib, o‘tkazuvchanlik zonasi bo‘sh qoladi; harorat ortishi bilan valent elektronlar issiqlik energiyasi hisobiga bog‘lanishdan uzilib, o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tadi va valentlik zonasida bo‘sh holatlar (kovaklar) hosil bo‘ladi.

Taqiqlangan zona kengligining haroratga bog‘liqligini miqdoriy jihatdan ifodalash uchun amaliyotda ko‘pincha Varshni [2] empirik tenglamasidan foydalaniladi: $E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta)$, bunda $E_g(0)$ — $T = 0\text{K}$ dagi taqiqlangan zona kengligi, α va β — har bir material uchun tajribada aniqlangan doimiy kattaliklar. Kremniy uchun $E_g(0) \approx 1,17\text{ eV}$, $\alpha \approx 4,73 \times 10^{-4}\text{ eV/K}$, $\beta \approx 636\text{ K}$ bo‘lib, bu tenglama harorat ortishi bilan taqiqlangan zona kengligining monoton kamayib borishini ko‘rsatadi. Fizik nuqtayi nazardan bu hodisa panjaraning issiqlik kengayishi va elektron-fonon o‘zaro ta’siri kuchayishi bilan izohlanadi, natijada valent va o‘tkazuvchanlik zonalar orasidagi masofa qisqaradi.

Shuningdek, tashqi kuch qo‘llanilganda elektronlarning $E-k$ diagrammasidagi assimetrik taqsimlanishi tufayli sof drift oqimi yuzaga kelishi ko‘rsatildi. Olingan natijalar yarimo‘tkazgich asboblarning ishlash prinsiplarini, xususan haroratga bog‘liq elektr xossalarini tushunish uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi va kelgusida taqiqlangan zona kengligining haroratga bog‘liqligini tajribada o‘lchash bo‘yicha tadqiqotlar uchun poydevor yaratadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR.

[1] Neamen, D. A. Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles. – 4th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2012. – 768 p.

[2] Varshni, Y. P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors // Physica. – 1967. – Vol. 34, No. 1. – P. 149–154.

[3] Zaynobiddinov, S., Zaynabidinov, A. Yarimo‘tkazgichlar fizikasi. – Toshkent: O‘zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2012. – 320 b.

[4] Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. – 3rd ed. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 832 p.

[5] Gulyamov, G., Boysariyev, U. Yarimo‘tkazgichli materiallar va ularning elektrofizik xossalari. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2018. – 240 b.

[6] Бонч-Бруевич, В. Л., Калашников, С. Г. Физика полупроводников. – Москва: Наука, 1990. – 688 с.

[7] Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. – 8th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004. – 680 p.

[8] Шалимова, К. В. Физика полупроводников. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.

[9] Zaynobiddinov, S., Nazyrov, D. E. Temperature reliance of bandgap and carrier mobility in silicon crystal lattice // Journal of Physics and Electronics. – 2019. – Vol. 24, No. 3. – P. 112–118.