(8). Loke M.H. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. 2000.
(9). Nikiforova K.V. Стратиграфия четвертичной системы. Москва, “Недра”, 1987.
(10). Reynolds J.M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester, John Wiley & Sons, 1997.
(11). Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. Applied Geophysics. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1990.
(12). Закиров А.Ш., Янбухтин И.Р., Мамарозиков Т.У., Мусаев У.Т., Отажонова Ш.Х. Неинвазивные методы физики в археологии Южного Узбекистана. Ташкент, 2024

Majidova Gulnoza Nurmuxamedovna (PhD, Namangan davlat Texnika unversiteti gmail:m.gulnoza.1985@gmail.com);
Davlataliyeva Navbahor Muhammadjon qizi (Namangan davlat Texnika unversiteti doktoranti; navbahor3098@mail.ru)

TRANSIZTORNING EMITTER VA KOLLEKTORDAGI TESHIK TOKLARIGA QIZIGAN ZARYAD TASHUVCHILARNING TA’SIRI

Annotatsiya. *Ushbu maqolada tranzistorlarning, xususan P-N-P strukturali bipolyar tranzistorlarning ishlash jarayonida emitter va kollektordagi zaryad tashuvchilarning, ayniqsa qizigan (yuqori energiyali) tashuvchilarning ta’siri o‘rganilgan. Zamonaviy elektronika va axborot texnologiyalarining jadal rivojlanishi sharoitida yarimo‘tkazgichli asboblar, jumladan, tranzistorlarning ahamiyati ortib bormoqda. Maqolada tranzistor parametrlarining temperatura, elektr maydon va zaryad tashuvchilarning energiya holatiga bog‘liq holda o‘zgarish qonuniyatlari tahlil qilingan. Shuningdek, qizigan zaryad tashuvchilar ta’sirida yuzaga keladigan fizik jarayonlar va ularning tranzistorlarning ish barqarorligi, ishonchliligi hamda tezkorligiga ta’siri ko‘rib chiqilgan. Nazariy formulalar orqali hisoblashlar amalga oshirilib, turli parametr qiymatlarida grafiklar olinib, ularning o‘zgarish qonuniyatlarini ko‘rsatilgan. Tadqiqot natijalari zamonaviy elektron qurilmalarni takomillashtirishda muhim ahamiyatga ega*

Kalit so‘zlar: *P-N-P tranzistor, bipolyar tranzistor (BJT), yarimo‘tkazgich, zaryad tashuvchilar, qizigan zaryad tashuvchilar, emitter toki, kollektor toki, temperatura ta’siri, elektr maydon, energiya holati.*

Мажидова Гульноза Нурмухамедовна (к.ф.-м.н.; Наманганский государственный Технический университет; gmail: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Давлаталиева Навбахор Мухаммаджон кизи (докторант Наманганского государственного технического университета; navbahor3098@mail.ru)

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ДЫРОЧНЫЕ ТОКИ В ЭМИТТЕРЕ И КОЛЛЕКТОРЕ ТРАНЗИСТОРА

Аннотация. *В данной статье исследуется влияние носителей заряда в эмиттере и коллекторе транзистора, особенно высокоэнергетических (горячих) носителей, в биполярных транзисторах структуры P-N-P. В условиях стремительного развития современной электроники и информационных технологий возрастает значение полупроводниковых приборов, в частности транзисторов. В работе проанализированы закономерности изменения параметров транзистора в зависимости от температуры, электрического поля и энергетического состояния носителей заряда. Также рассмотрены физические процессы, возникающие под воздействием горячих носителей, и их влияние на стабильность, надежность и быстродействие транзисторов. С использованием теоретических формул были выполнены расчёты, построены графики при различных значениях параметров и показаны закономерности их изменения. Результаты исследования имеют важное значение для совершенствования современных электронных устройств.*

Ключевые слова: *P-N-P транзистор, биполярный транзистор (BJT), полупроводник, носители заряда, горячие носители, ток эмиттера, ток коллектора, влияние температуры, электрическое поле, энергетическое состояние.*

Majidova Gulnoza Nurmuxamedovna (PhD, Namangan State Technical University; gmail: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Davlataliyeva Navbahor Muhammadjon qizi (Doctoral student at Namangan State Technical University; navbahor3098@mail.ru)

EFFECT OF HOT CHARGE CARRIERS ON HOLE CURRENTS IN THE EMITTER AND COLLECTOR OF A TRANSISTOR

Annotation. *This article studies the influence of charge carriers in the emitter and collector regions of transistors, particularly high-energy (hot) carriers, in P-N-P bipolar junction transistors. In the context of the rapid development of modern electronics and information technologies, semiconductor devices,*

especially transistors, are becoming increasingly important. The paper analyzes the dependence of transistor parameters on temperature, electric field, and the energy state of charge carriers. Additionally, physical processes caused by hot carriers and their impact on the stability, reliability, and speed of transistor operation are discussed. Calculations were carried out using theoretical formulas, graphs were obtained for different parameter values, and the patterns of their variation were demonstrated. The results of the research are important for improving modern electronic devices.

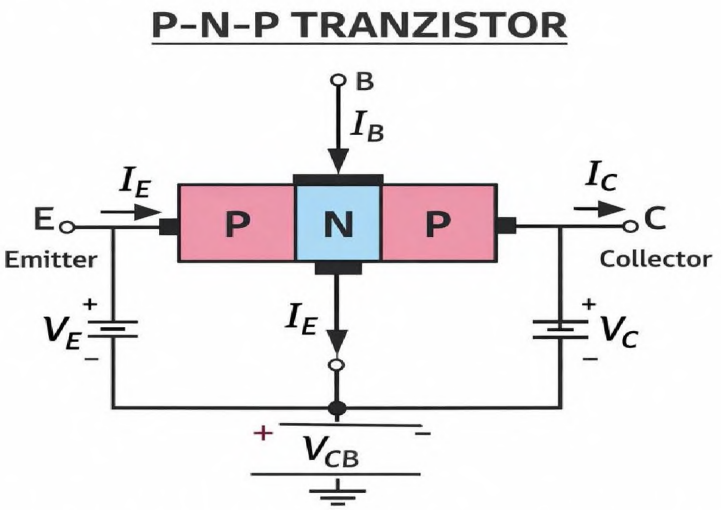
Keywords: *PNP transistor, bipolar junction transistor (BJT), semiconductor, charge carriers, hot carriers, emitter current, collector current, temperature effect, electric field, energy state.*

Kirish. Bilamizki, bugungi kunimizda zamonaviy elektronika va axborot texnologiyalarining jadal rivojlanishida yarimo'tkazgichli asboblar ham katta ahamiyat kasb etadi. Xususan, tranzistorlarning ahamiyatini ham alohida o'rin tutadi. Tranzistorlar turli xil elektron qurilmalarning asosiy elementi bo'lib, ular signalni kuchaytirish, qayta ishlash va boshqarish funksiyalarini bajaradi. Shu sababli ularning fizik xususiyatlari va ishlash samaradorligini chuqur o'rganish muhim ilmiy va amaliy masala hisoblanadi.

Ayniqsa, tranzistor parametrlarining temperatura, elektr maydon va zaryad tashuvchilarning energiya holatiga bog'liq holda o'zgarishi alohida e'tiborni talab qiladi. So'nggi yillarda yarimo'tkazgichlarda qizigan (yuqori energiyali) zaryad tashuvchilar ta'siri ostida yuzaga keladigan hodisalar keng o'rganilmoqda. Bu hodisalar tranzistorlarning ishlash barqarorligi, ishonchliligi va tezkorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

Biz bu ishda tranzistor parametrlarining qizigan zaryad tashuvchilar ta'siri ostida o'zgarish qonuniyatlari, ularning fizik mohiyati hamda zamonaviy tadqiqot yo'nalishlari tahlil qilimiz. Tranzistorning turlari juda ko'p bo'lib, P-N-P tranzistor uchun yuqoridagi ta'sirlarni ko'rib chiqaylik.

P-N-P tranzistor – bu bipolyar tranzistor (BJT) turi bo'lib, u ikki P va bitta N qatlamdan tashkil topgan, ya'ni P (Emitter) – N (Baza) – P (Kollektor).



Bu yerda Emitter (P) ko'p zaryad (kovaklar) beradi. Baza (N) juda yupqa va kam zaryadli va Kollektor (P) zaryadlarni qabul qiladi. Agar transistor aktiv rejimda ishlayotgan bo'lsa emitter o'tishga Emitter–baza (E-B) to'g'ri va baza bilan kollektor orasi esa Baza–kollektor (B-C) teskari yo'nalishda kuchlanish berilgan bo'ladi. O'tishlarning qarshiligi tranzistorning kvazineytral sohalarining qarshiligiga nisbatan ancha katta bo'lgani uchun tashqi berilayotgan kuchlanish faqat emitter va kollektor o'tishlarda bo'ladi. Qolgan qismlarda maydon nolga teng bo'ladi. Bu holatda zaryad tashuvchilar kvazineytral sohada diffuziya yo'li bilan boshqariladi. Deryf toki hisobga olinmaydi. Teshiklarni bazadagi taqsimotini (1) ifoda uzluksizlik tenglamasini ikkita chegaraviy shart qo'yib, yechim olamiz:

$$\frac{d^2p}{d^2x} = \frac{p-p_n}{L^2_p} \qquad (1)$$

Ya'ni, emitter va kollektor o'tishlarning kengligini hisobga olmay x=0 ga va kollektor o'tishga qo'yilgan kuchlanish teskari yo'nalishda bo'lgani uchun x=d ga teng deb chegaraviy shart qo'yib olamiz. Bu shartlarni hisobga olib bazadagi teshiklar taqsimoti hisoblasak (2) ifoda kelib chiqadi.

$$p - p_n = p_n(e^{\frac{eU_e}{kT}} - 1)\frac{sh\frac{d-x}{L_p}}{sh\frac{d}{L_p}} - p_n(1 - e^{-\frac{eU_k}{kT}})\frac{sh\frac{x}{L_p}}{sh\frac{d}{L_p}} \qquad (2)$$

Teshiklarni bazadagi taqsimotini bilgan holda, emitter va kollektordagi teshik tolarini aniqlaymiz. Bu toklar diffusion tenglama va (2) ifodaga, asosan, quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi.

$$j_{ep} = -CD_p(\frac{dp}{dx})_{x=0} = \frac{eD_pP_n}{L_p}[\left(e^{\frac{eU_e}{kT}} - 1\right)cth\frac{d}{L_p} + \left(1 - e^{-\frac{eU_e}{kT}}\right)csch\frac{d}{L_p}] \quad (3)$$

$$j_{kp} = -CD_p(\frac{dp}{dx})_{x=d} = \frac{eD_pP_n}{L_p}[\left(e^{\frac{eU_e}{kT}} - 1\right)csch\frac{d}{L_p} + \left(1 - e^{-\frac{eU_k}{kT}}\right)cth\frac{d}{L_p}]$$

(4) Bundan tashqari, tranzistorda elektron toki ham mavjud bo‘lgani uchun uni ham e’tiborga olishimiz lozim. Agar emitterning kengligi asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilaning diffuziyalanib, siljish uzunligi L_n dan katta bo‘lsa emitterdagi va kollektordagi eleektron toklari (5) va (6) ifoda ko‘rinishida bo‘ladi:

$$j_{kn} = \frac{eD_pn_p}{L_n}\left(e^{\frac{eU_e}{kT}} - 1\right) \quad (5)$$

$$j_{kn} = \frac{eD_nn_{kp}}{L_{kn}} \quad (6)$$

Yuqoridagi formulalardan foydalanib, emitter va kollektordagi to‘la tokni aniqlashimiz mumkin bo‘ladi. Agar biz tranzistorni effektiv rejimda ishlab turadigan vaqtdagi xususiy holga e’tibor bersak.

$$\frac{eU_e}{kT} \gg 1, \frac{eU}{kT} \gg 1, \exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right) = 0$$

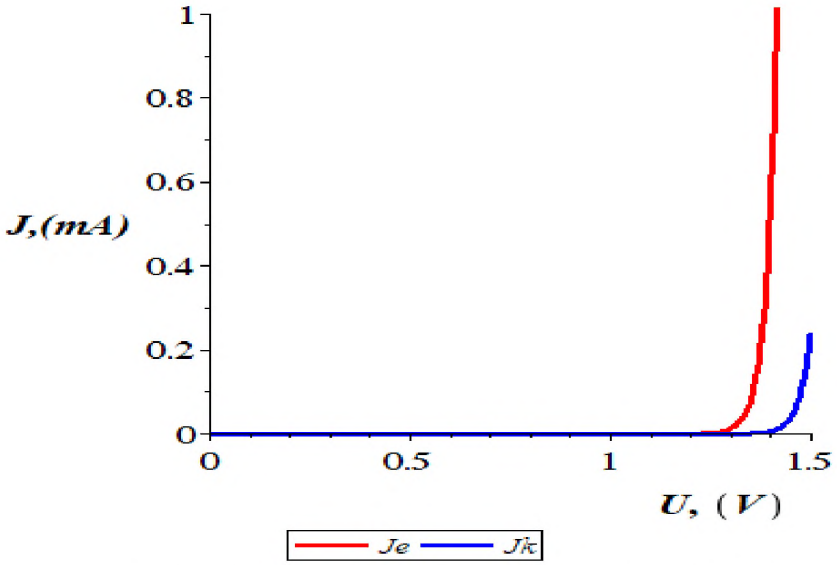
ga teng bo‘lib, d<<L_p bo‘lgani uchun emitter va kollektordagi teshik toklari (7) va (8) ifodaga keladi:

$$j_{ep} = \frac{eD_pp_n}{L_p}e^{\frac{eU_e}{kT}}cth\frac{d}{L_p} \quad (7)$$

$$j_{kp} = \frac{eD_pp_n}{L_p}e^{\frac{eU_e}{kT}}csch\frac{d}{L_p} \quad (8)$$

(7) va (8) ifodalarga tegishi qiymatlarni qo‘yish orqali grafik olamiz:

$q = 1.6 * 10^{-16}$, $k = 1.38 * 10^{-23}$, T=300, $n_p = 10^{17}$, $\mu_n = 1350 * 10^{-4}$, $L_p = 10^{-2}$, $d = 10^{-3}$, $p = 10^{17}$



1-rasm. Emitter va kollektordagi teshik toki uchun VAX.

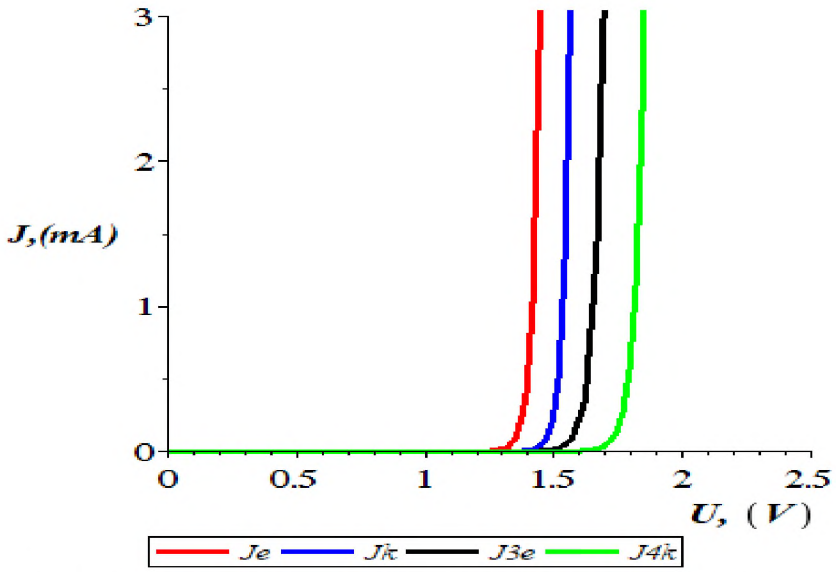
Agar zaryad tashuvchilarni o‘ta yuqori chastotali mikroto‘lqinlar ta’sirida qizishini hisobga olsak (7) va (8) ifodalar quyidagi ko‘rishga keldi:

$$j_{ep} = \frac{eD_pp_n}{L_p}e^{(\frac{q\varphi}{kT} - \frac{q(\varphi - U_e)}{kT_e})}cth\frac{d}{L_p} \quad (9)$$

$$j_{kp} = \frac{eD_pp_n}{L_p}e^{(\frac{q\varphi}{kT} - \frac{q(\varphi - U_e)}{kT_e})}csch\frac{d}{L_p} \quad (10)$$

Ushbu ifodalarga sonli qiymatlarni qo‘yib, 2-rasmdagi VAX siga ega bo‘lamiz:

$q = 1.6 * 10^{-16}$, $k = 1.38 * 10^{-23}$, T=300, $n_p = 10^{17}$, $\mu_n = 1350 * 10^{-4}$, $L_p = 10^{-2}$, $d = 10^{-3}$, $p = 10^{17}$, $T_e = 350$, φ=0.7



2-rasm. Emitter va kollektordagi teshik tokini tashqi ta'sirsiz va ta'sir mavjud hol uchun VAX.

2-rasmda keltirildan grafikdagi qizil va ko'k chiziqlar ta'sir mavjud emas hol uchun qora va zangor chiziqlar esa zaryad tashuvchilarni qizib ketishi hisobiga hosil bo'lgan VAXni namoyon etadi.

Bilamiz odatda temperatura oshsa, J_0(to'yinganlik toki) keskin ortadi. Shu sababli bir xil U da tok kattaroq bo'lib natijada hosil bo'lgan VAX chapga (oldinga) siljiydi. Lekin bizning grafikada esa aks jarayon namoyon bo'ldi. Buning sababini quyidagicha tushuntiramiz. Bu yerda tokni oshiruvchi emas, balki to'suvchi effekt ustunlik qilmoqda. Tok umumiy holda: $J = J_{diff} + J_{rec} + J_{gen}$ ga teng bo'lib, diffuziya toki (foydali tok) temperature ortganda to'yinish tokini va tok ortiradi va VAXni oldinga siljitadi. Rekombinatsiya toki esa zararli tok bo'lib, zaryad tashuvchilar yo'qotadi. Ayniqsa, baza va o'tish zonasida kuchli qizish bo'lsa, rekombinatsiya ortishi sababli foydali tok kamayadi. Tok chiqishi uchun yuqori kuchlanish kerak bo'ladi. VAX esa (orqaga) o'ngga siljiydi. Generatsiya tokida esa issiqlik sababli yangi zaryadlar hosil bo'ladi. Lekin bu ko'pincha teskari tokda kuchli bo'ladi. oldinga yo'nalishda rekombinatsiya bilan muvozanatda qoladi.

Xulosa. Shuning uchun qizish bo'lganda baza ichida tashuvchilar yashash vaqti kamaygan. Ko'proq rekombinatsiya bo'lgani uchun samarali tok kamaygan. Agar bir xil tok olish kerak bo'lsa, bu holda kuchlanishni oshirishimiz kerak bo'ladi. Bir so'z bilan aytganda, rekombinatsiya va yo'qotishlar ustun bo'lgani uchun VAX o'ngga siljishi kuzatiladi. Bu esa bizga transiztorlarni boshqarishda imkon yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

(1). M.A.Azizov. Yarimo'tkazgichlar fizikasi. "O'qituvchi", Toshkent, 1974.

(2). Liu C., Chen Y., Xie Y., Liu H., Cai Z. Electrical Properties and Reliability of AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor under RF Overdrive Stress at High Temperature. Micromachines 2024, 15, 1100.

(3). Tyaginov S., Bury E., Grill A., Kao E., DeKeersgieter A., Makarov A., Vandemaele M., Spessot A., Chasin A., Kaczer B. Incorporation of TemperatureImpactonHot-Carrier DegradationintoCompactPhysics Model. Micromachines, 2025, 16, 1424.

(4). Knap W., Rumyantsev S., Vitiello MS., Coquillat D., Blin S., Dyakonova N., Shur M., Teppe F., Tredicucci A., Nagatsuma T. Nanometer size field effect transistors for terahertz detectors. Nanotechnology, 2013, 24 (21).

(5). Шалимова К.В., Физика полупроводников. М., "Энергоатомиздат", 1985, с. 113.

(6). G.Gulyamov, G.N.Majidova, F.R.Mukhitdinova, S.Q.Madumarova. Influence of Temperature on Characteristics of a Diode with a p-n Junction in a Magnetic Field. e-Journal of Surface Science and Nanotechnology. 2024, Vol. 22, Issue 3, p. 256–260.

(7). G.Gulyamov, G.N.Majidova, F.R.Mukhitdinova. Changing the Voltage of the p-n Junction in a Magnetic Field. e-Journal of Surface Science and Nanotechnology. 2023, vol 21, p. 273–277.

(8). S.I.Vlasov, U.Q.Valiyev, K.A.Tursunmetov. Yarimo'tkazgichlar asboblar fizikasi.

(9). Ahter N., Pala N., Knap W., Shur M. Terahertz PlasmaField Effect Transistors Detectors, Fundamentals of Terahertz Devices and Applications, Wiley & Sons, 2021, p. 285–322.

(10). Boubanga-Tombet S., Knap W., Yadav D., Satou A., But D.B., Popov V.V., Gorbenko I.V., Kachorovskii V., Otsuji T. Room Temperature Amplification of THz Radiation by Grating-Gate Graphene Structures. Phys Rev. X 10, 031004 (2020).