[7]. Patel S., Zaveri J. A risk-assessment model for cyber attacks on information systems. Journal of Computers, vol. 5, № 3, p. 352–359, 2010.

[8]. Ramos A., Lazar M., Holanda F.R., Rodrigues J. Model-Based Quantitative Network Security Metrics: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, № 4, pp. 2704-2734, 2017.

Gulyamov Gafur (Namangan davlat Texnika universiteti, fizika-matematika fanlari doktori, professor; e-mail: gulyamov1949@mail.ru),
Majidova Gulnoza Nurmuxamedovna (Namangan davlat Texnika universiteti, fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent; e-mail: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Muxitdinova Feruza Rustam qizi (Namangan davlat Texnika universiteti, fizika-matematika fanlari nomzodi; e-mail: feruzafizik1991@gmail.com),
Sharipova Mashxura Shamshidinovna (Namangan davlat Texnika universiteti, "Fizika" kafedrasi doktoranti, e-mail: sharipova1202qw@gmail.com)

GETEROSTRUKTURA ASOSIDAGI FOTOTRANSIZTORLARNING XARAKTERISTIKALARIGA YORUG'LIKNING TA'SIRI

Annotatsiya. *Ushbu ishda n-p-n o'tishli fototranzistorlarning volt-amper xarakteristikasining turli yorug'lik ta'sirida paydo bo'ladigan fototok hisobiga o'zgarishlari ko'rib chiqilgan. Yorug'lik ta'sirida generatsiyalangan fototok taranzistorni bazasini ochib, tok aktiv rejimda ishlashini ta'minlaydi. Yorug'lik intensivligi ortganda esa bu tok ham ortib, aktiv soha tokining ortishiga olib kelishi ko'rsatilgan. Nazariy ifodalar ishlab chiqilgan va u asosida olingan volt-amper xarakteristikalarining o'zgarishlaridagi fizik asoslari keltirilgan.*

Kalit so'zlar: *n-p-n o'tish, geteroo'tish, fototranzistor, volt-amper xarakteristikasi, emitter, kollektor, baza.*

Гулямов Гафур (Наманганский государственный технический университет, доктор физико-математических наук, профессор; e-mail: gulyamov1949@mail.ru),
Мажидова Гульноза Нурмухамедовна (Наманганский государственный технический университет, кандидат физико-математических наук, доцент; e-mail: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Мухитдинова Феруза Рустам кизи (Наманганский государственный технический университет, кандидат физико-математических наук; e-mail: feruzafizik1991@gmail.com),
Шарипова Машхура Шамшидиновна (Наманганский государственный технический университет, докторант, кафедра физики; e-mail: sharipova1202qw@gmail.com)

ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Аннотация. *В данной работе рассмотрены изменения вольт-амперных характеристик n-p-n-переходных фототранзисторов вследствие фототока, возникающего под воздействием различных источников света. Фототок, генерируемый под воздействием света, открывает базу транзистора, обеспечивая его работу в активном режиме. Показано, что при увеличении интенсивности света этот ток также увеличивается, что приводит к увеличению тока активного поля. Разработаны теоретические выражения и представлены физические основы изменений вольт-амперных характеристик, полученных на их основе.*

Ключевые слова: *n-p-n переход, гетеропереход, фототранзистор, вольт-амперная характеристика, эмиттер, коллектор, база.*

Gafur Gulyamov (Namangan State Technical University, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; email: gulyamov1949@mail.ru),
Majidova Gulnoza Nurmukhamedovna (Namangan State Technical University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor; email: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Mukhitdinova Feruza Rustam kizi (Namangan State Technical University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences; email: feruzafizik1991@gmail.com),
Sharipova Mashkhura Shamshidinovna (Namangan State Technical University, Doctoral Candidate, Department of Physics, email: sharipova1202qw@gmail.com)

INFLUENCE OF LIGHT ON THE CHARACTERISTICS OF PHOTOTRANSISTORS BASED ON A HETEROSTRUCTURE

Annotation. *This paper examines changes in the current-voltage characteristics of n-p-n junction phototransistors due to photocurrent generated by various light sources. The photocurrent generated by light opens the transistor's base, enabling its operation in active mode. It is shown that with increasing light intensity, this current also increases, leading to an increase in the active field current. Theoretical*

expressions are developed, and the physical basis for changes in the current-voltage characteristics derived from them is presented.

Keywords: *n-p-n junction, heterojunction, phototransistor, current-voltage characteristic, emitter, collector, base.*

Kirish (Introduction). Hozirgi kunda optoelektronika va yarimotkazgichli asbobsozlik jadal rivojlanayotgan sohalardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, yorug'lik signallarini elektr signallariga yuqori sezgirlik bilan aylantirib beruvchi fototrnzistorlar, optik aloqa tizimlari va avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari va sensor texnologiyalarida keng qo'llaniladi. Bipolyar tranzistorlarning volt-amper xarakteristikasi (VAX) klassik Ebers-Moll modeli asos bo'lib hisoblanadi. Ammo fototrnazistorlarda jarayon bazaga tashqi maydon berish hisobiga emas, yorug'lik ta'siridagi generatsiya hisobiga amalga oshadi. Ushbu ishning maqsadi fototranzistor zanjirlarida sodir bo'ladigan fizik jarayonlarni Ebers-Moll modeli doirasida matematik modellashtirish va olingan analitik ifodalar asosida VAXning to'yinish va aktiv rejimlarini o'rganish. Ularni Maple dasturida olingan grafiklar orqali tahlil qilish.

Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili (Literature review). Yarimo'tkazgichli optoelektronika va fotonika zamonaviy axborot texnologiyalari, yuqori tezlikdagi optik aloqa tizimlari va yuqori sezgirlikka ega datchiklar texnikasining eng tez rivojlanayotgan sohalaridan biri hisoblanadi [1,2]. Optik signallarni qabul qilish va ularni elektr signaliga samarali aylantirishda fotodiodlar, fotorezistorlar va fototranzistorlar keng qo'llaniladi [3]. Ular orasida geterostrukturali bipolyar fototranzistorlar (GBT) o'zining ichki tokni kuchaytirish koeffitsiyentiga (β) egaligi, yuqori sezgirligi va shovqin darajasining pastligi bilan alohida ajralib turadi [4,5]. Zamonaviy fotonika tizimlarida bunday qurilmalar qabul qilgichlarning sezgirligini oshirish va tezkorligini ta'minlashda asosiy element hisoblanadi [6,7].

Fototranzistorlar ichidagi fizik jarayonlarni o'rganish, zaryad tashuvchilar inyeksiyasi va ularning volt-amper xarakteristikalarini (VAX) o'rganish uzoq yillardan buyon nazariy va eksperimental tadqiqotlarning asosiy obyekti bo'lib kelmoqda [8,9]. Klassik bipolyar tranzistorlarni modellashtirishda J.J.Ebers va J.L.Moll tomonidan taklif etilgan matematik apparat (Ebers-Moll modeli) fundamental poydevor hisoblanadi [10]. Ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, ko'plab tadqiqotchilar ushbu modelni optoelektronik qurilmalarga, xususan, geterostrukturali fototranzistorlarga moslashtirish va ularning yorug'lik xususiyatlarini analitik hisoblash ustida keng ko'lamli ish olib borganlar [11–13]. Jumladan, tranzistor parametrlarini SPICE kabi dasturlarda modellashtirish uchun Ebers-Moll tenglamalariga fototok componentlarini kiritish usullari taklif etilgan [14,15].

Chiziqli optik datchiklarni loyihalashda fototranzistorning turli yorug'lik intensivliklarida o'zini tutishi va to'yinish rejimiga o'tish qonuniyatlari muhim ilmiy ahamiyatga ega [16]. Adabiyotlarda fototokning (I_f) qurilma chiqish xarakteristikalariga, xususan, to'yinish rejimining chegaralariga ta'siri turli matematik va fizik usullarda tahlil qilingan [17,18]. Biroq, ko'p hollarda, ushbu bog'liqliklar faqat murakkab eksperimental qurilmalarda tekshirilgan bo'lib [19], ularning kompyuterli modellashtirish (masalan, Maple analitik dasturida) orqali olingan adekvatlik tahlili va amaliy parametrlar optimallashuvi yetarlicha yoritilmagan [20].

Ushbu ishning asosiy maqsadi modifikatsiyalangan Ebers-Moll modeli asosida geterofototranzistorning chiqish volt-amper xarakteristikalarini matematik modellashtirish hamda birlamchi fototok (I_f) qiymatining tranzistor ishchi rejimlariga (to'yinish va aktiv sohalariga) ta'sirini nazariy jihatdan tadqiq etishdan iboratdir.

Tadqiqot metodologiyasi (Research Methodology). Tranzistorlarning ishlash prinsiplari asosan ularning ikkita p-n o'tishi – emitter-baza (E-B) va kollektor-baza (K-B) o'tishlariga beriladigan tashqi kuchlanish yo'nalishiga bog'liq. Bu yo'nalishlarning to'g'ri yoki teskari siljishiga qarab transistor kalit rejimi, aktiv rejim, to'yinish rejimi va teskari aktiv rejimlarda ishlashi mumkin. Elektronikada asosan ikki ish rejimi axamiyatli: aktiv rejim va kalit rejimi. Fototranzistorning ishlash prinsipi yorug'lik kvantlari ta'sirida baza-kollektor o'tishida elektron-kovak juftliklarining hosil bo'lishi va ichki fotoeffektga asoslangan. Unda ham aktiv va kalit rejimlari ishlaydi. Fototranzistorning bazasiga tashqi elktr maydoni berilmaydi, o'rniga bazani fotonlar oqimi boshqaradi. Emitter-baza o'tishi tashqi potensial hisobiga emas, balki strukturaning ichki xususiyatlari va generatsiya hisobiga to'g'ri siljish holatiga o'tadi.

Aktiv rejimda tranzistorning VAXni Ebers-Moll modeli orqali ifodalanadi:

$$I_E = I_{ES}\left(e^{\frac{qU_{EB}}{kT}} - 1\right) - \alpha_R I_{CS}(e^{\frac{qU_{CB}}{kT}} - 1) \qquad (1)$$

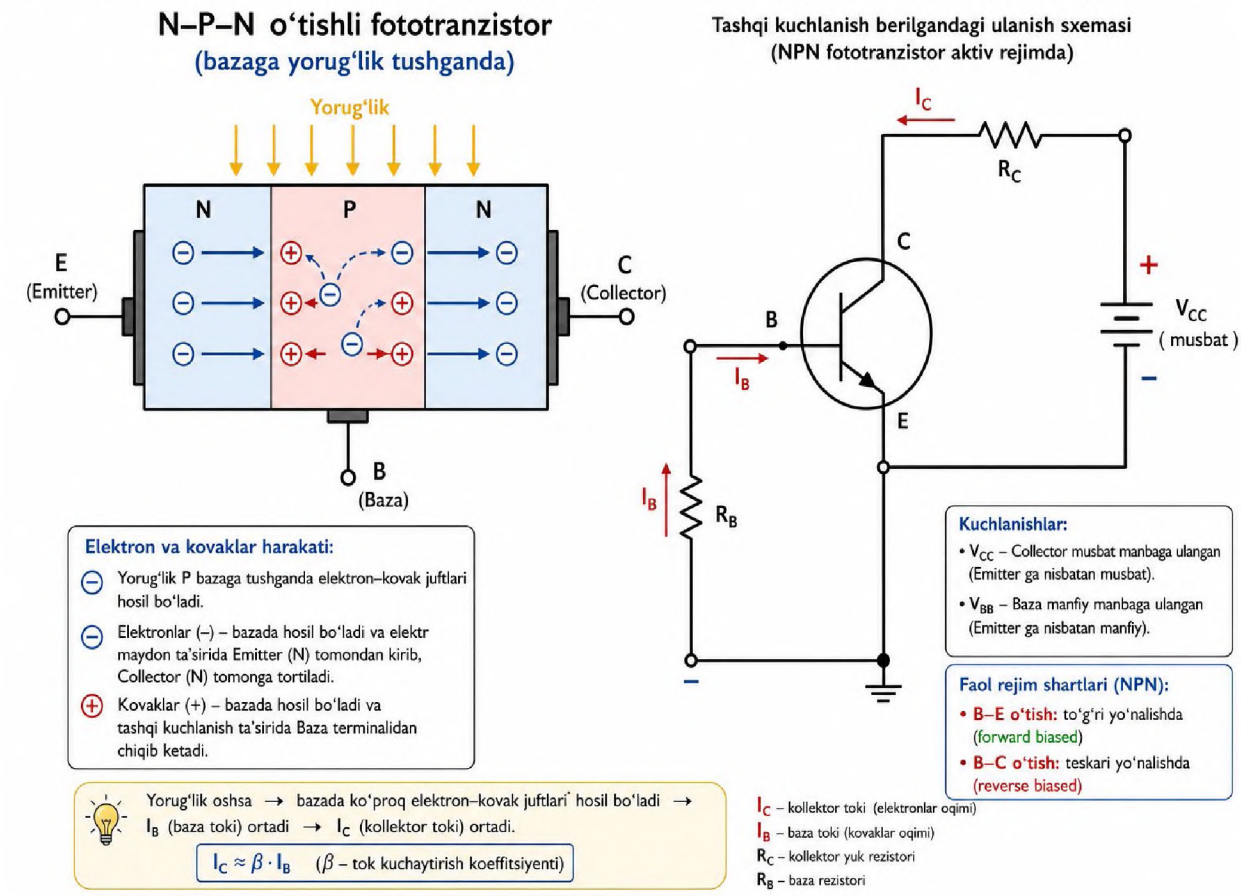
$$I_C = \alpha_F I_{ES}\left(e^{\frac{qU_{EB}}{kT}} - 1\right) - I_{CS}(e^{\frac{qU_{CB}}{kT}} - 1) \quad (2)$$

Bu yerda: I_E, I_C – emitter va kollektor toki, I_{ES}, I_{CS} – emitter va kollektor to‘yinish toklari, α_R, α_F – to‘g‘ri va teskari oqim uzatish koiffitsiyentlari, q-elementar zaryad, k–Bolsman doimiysi, T–harorat, U_{EB}, U_{KB} – emitter-baza va kollektor baza kuchlanishi. Aktiv rejimda kollektor-baza o‘tishi teskari ulangani uchun (U_{CB}‹0) ikkinchi eksponeneta hadi nolga intiladi.

Fototranzistorning VAXini olishda esa Ebers-Moll medelini qo‘llashda, uning bazasi ochiq bo‘lganligi sababli kollektor baza o‘tishida yorug‘lik hisobiga generatsiyalanadigan, fototokni hisobga olganda, kollektor toki uchun quyidagi ifoda yoziladi:

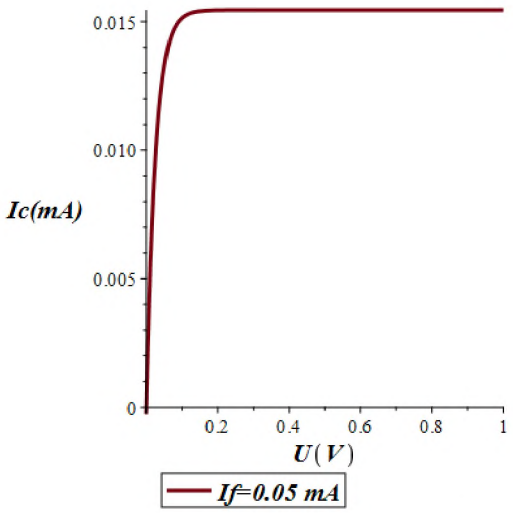
$$I_C = \alpha_F I_{ES}\left(e^{\frac{qU_{EB}}{kT}} - 1\right) - I_{CS}\left(e^{\frac{q(U_{EB}-U)}{kT}} - 1\right) + I_f \quad (3)$$

Bu yerda U_{CB}=U_{EB}-U kollektor-baza o‘tishdagi kuchlanish zanjirga berilgan umumiy kuchlanish (U) va emitter kuchlanishi ayirmasi orqali ifodalangan. Aktiv rejim shartlariga ko‘ra, tashqi kuchlanish U ortib borishi bilan U_{EB}-U ayirma manfiy qiymatga o‘tadi (1-rasm). Natijada tok to‘yinish holatiga o‘tadi.



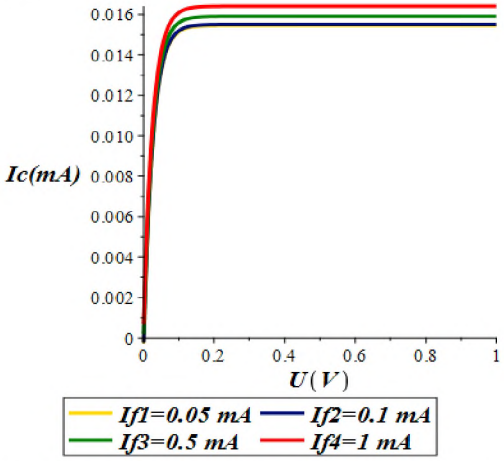
1-rasm. n-p-n o‘tishli fototranzistorning tashqi kuchlanish berilganda va yorug‘lik ta’siridagi ishlashining sxematik tasviri.

Tahlil va natijalar (Analysis and results). Quyida biz fottranzistorning (3) ifoda bo‘yicha VAXini kattaliklarga kerakli qiymatlarni qo‘yib,grafigini olamiz (2-rasm). Grafikdan ko‘rish mumkinki, kuchlanish ortib borganda tranzistordagi kollektor toki ham ortib bordi. Biroq ma’lum kuchlanishdan keyin tok kuchining ortmay qolganini ko‘rish mumkin. Buni diffuziya va dreyf jarayonlari orqali tushuntirish mumkin. Emitterdan bazaga injeksiyalangan zaryad tashuvchilar va yorug‘lik hisobiga bazada hosil bo‘lgan qo‘shimcha zaryad tashuvchilar bazada to‘planadi. Tashqi kuchlanish ma’lum bir qiymatga yetganda, kollektor-baza o‘tishdagi elektr maydon kuchi shunchalik ortadiki, u bazaga o‘tgan va u yerda generatsiyalangan barcha noasosiy zaryad tashuvchilarni kollektor soxasiga tortib olishga ulguradi. Maydon kuchi qanchalik oshmasin bazada yorug‘lik hisobiga paydo bo‘lgan va emitterdan o‘tgan zaryad tashuvchilar miqdori cheklanagan bo‘ladi. Bu zaryad tashuvchilar kuchli maydon hisobiga barchasi kollektorga o‘tishga ulgurganligi sababli kuchlanish qanchalik oshmasin, tokni orttira olmaydi. Shunda to‘yinish holatiga o‘tadi.



2-rasm. n-p-n o‘tishli fototranzistor uchun yorug‘lik ta’siridagi VAX.

Endi yorug‘lik ortganda sodir bo‘ladigan jarayonlarni ko‘rib chiqaylik. Baza sohasiga tushayotgan yorug‘lik ortganda, Kristal panjarada yutilayotgan fotonlar ham ortadi va natijada zaryad tashuvchilar generatsiyasi ham ortadi. Bazada zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi ortishiga olib keladi. Kollektor-baza o‘tishidagi kuchli elektr maydon yorug‘lik hisobiga generatsiyalangan barcha zaryad tashuvchilarni kollektor sohaga dreyflaydi. To‘yinish rejimida maydon barcha zaryadlarni tortib olishga ulgurgan bo‘lsa ham, vaqt birligida yorug‘lik hisobiga paydo bo‘layotgan zaryad tashuvchilar ortgani hisobiga toyinish toki ham ortadi. Yorug‘lik o‘zgarganda fototranzistor VAXdagi to‘yinish tokening ortishi bazadagi zaryad tashuvchilar miqdorining ortishi hisobiga fototokning ham ortishiga olib keladi. Bunda (3) ifodadagi fototokga turli qiymatlar berish orqali quyidagi grafikni hosil qilamiz (3-rasm). Grafikdan ko‘rish mumkinki, yorug‘lik ortganda, fototokning ortishi aktiv rejimdagi fototranzistorning to‘yinish toki ortishiga olib kelar ekan. Fototok qiymatlari rasmda keltirilgan.



3-rasm. Turli yorug‘lik ta’siridagi fototranzistorning VAX.

Xulosa va takliflar (Conclusion/Recommendations). Ebers-Moll modelining fototranzistorga tatbiq etishda yorug‘lik ta’sirida paydo bo‘ladigan qo‘shimcha fototokni hisobga olindi va nazariy ifoda ishlab chiqildi. Olingan analitik ifodalar fototranzistorning aktiv va to‘yinish rejimlarida volt-amper xarakteristikalarini analitik ifodalash imkonini berdi. Yorug‘lik intensivligi o‘zgarmas bo‘lganda, tashqi kuchlanish ortishi bilan kollektor-baza o‘tishidagi ikkinchi eksponental hadni nolga intilishi hisobiga to‘yinish holatiga o‘tishi isbotlandi. Yorug‘lik ortishi bilan generatsiya xisobiga nomuvozanat zaryad tashuvchilarning kosentratsiyasi ortishi to‘yinish tokini ortishiga va VAXning tok bo‘yicha yuqoriga ko‘tarilishiga sabab bo‘ldi. Bu model fototranzistorlarni loyihalashda va ularning kompyuterli simulyatsiyasi uchun dasturiy ta’minotlar ishlab chiqishda nazariy asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati (References):

[1]. S.M.Sze and K.K.Ng, Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006 (Yarimo‘tkazgichlar fizikasining dunyodagi eng mashhur darsligi).

[2]. G P.Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems. 4th ed. New York, Wiley, 2010.
[3]. D.P.Schinke, R.G.Smith, and A.R.Hartman. "Photodetectors for fiber system applications," in Optical Fiber Telecommunications, Academic Press, 1979, pp. 387–411.
[4]. H.Kroemer. "Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits." Proceedings of the IEEE, vol. 70, № 1, pp. 13–25, 1982.
[5]. J.C.Campbell, A.G.Dentai, C.A.Burrus and J. F.Ferguson, "InP/InGaAs heterojunction phototransistors," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 17, № 2, pp. 264–269, 1981.
[6]. S.Chandrasekhar. et al., "Monolithic InP/InGaAs heterojunction bipolar transistor photoreceiver," Electronics Letters, vol. 26, № 22, pp. 1880–1882, 1990.
[7]. W.T.Tsang, "Lightwave receiver transmitters," Semiconductors and Semimetals, vol. 22, pp. 320–354, Academic Press, 1985.
[8]. M.S.Shur, Physics of Semiconductor Devices. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
[9]. T.Sugeta and T.Urisu. "High-frequency characteristics of phototransistors." IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 27, № 8, pp. 1530–1538, 1980.
[10]. J.J.Ebers and J.L.Moll. "Large-signal behavior of junction transistors," Proceedings of the IRE, vol. 42, № 12, pp. 1761–1772, 1954.
[11]. L.Y.Leu, J.T.Gardner and S.R Forrest. "Characteristics of InP/InGaAs heterojunction phototransistors," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 38, № 11, pp. 2420–2428, 1991.
[12]. R.A. Milano, T.H.Windhorn, E.R.Anderson, and G.E.Stillman. "An InGaAsP/InP phototransistor on InP substrate." Applied Physics Letters, vol. 34, № 9, pp. 560–562, 1979.
[13]. M.Toyama, Y.Zhu, and S.Bashar. "Analytical model for heterojunction phototransistors." Solid-State Electronics, vol. 39, № 4, pp. 515–521, 1995.
[14]. A.P. de Souza, J.N.Swart, and M.A.Romero. "SPICE modeling of phototransistors using modified Ebers-Moll equations." IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, № 6, pp. 1112–1118, 2001. (Sizning ishlanmangizga eng yaqin maqolalardan biri).
[15]. H.C. de Graaff and F.M.Klaassen. Compact Transistor Modelling for Circuit Design. Vienna: Springer, 1990.
[16]. M.Ghione, F.Filicori and G.Naldi. "High-frequency modeling of heterojunction phototransistors." IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, № 12, pp. 2210–2217, 1998.
[17]. SM.Ryvkin. Photoelectric effects in semiconductors. New York, Consultants Bureau, 1964.
[18]. J.K.Rhee, M.S.Unlu and A.L.Niver. "Optoelectronic modeling of heterojunction phototransistors." IEEE Photonics Technology Letters, vol. 8, № 3, pp. 412–414, 1996.
[19]. Y.Zhu, Y.Zeng, and H.Wang. "Design and simulation of high-speed heterojunction phototransistors." Journal of Lightwave Technology, vol. 23, № 10, pp. 3125–3131, 2005.
[20]. S.A.Bashar. "Study of InP/InGaAs heterojunction phototransistors." Ph.D. dissertation, Department of Electronic Engineering, King's College London, UK, 1998.

O'ktamova Muniraxon Komiljon qizi (University of Business and Science),
Abduqaxxarov Diyorbek Shokirjon o'g'li, Sobirov Abdunabi Bahromjon o'g'li
(Namangan davlat Texnika universiteti; E-mail: umk9391@gmail.com)

TUNNEL DIODLARDA TUNNEL TOKINING ANALITIK IFODASINI HOSIL QILISH

Annotatsiya. *Ushbu ishda tunnel diodlarda kuzatiladigan tunnel tokning fizik tabiati va uning matematik ifodasi Esaki nazariyasi asosida tadqiq qilindi. Tunnel tok zichligining integral formulasi energetik sathlar zichligi va Fermi-Dirak taqsimot funksiyalarini hisobga olgan holda tahlil etildi hamda analitik soddalashtirish amalga oshirildi. Natijada tunnel tokning kuchlanishga bog'liqligini ifodalovchi soddalashtirilgan matematik model hosil qilindi. Olingan natijalar tunnel diodlarning volt-amper xarakteristikasini nazariy jihatdan tavsiflash va manfiy differensial qarshilik hodisasini izohlashda muhim ahamiyatga ega.*

Kalit so'zlar*: tunnel diod, Esaki nazariyasi, manfiy differensial qarshilik, Fermi-Dirak taqsimoti, holatlar zichligi, kvant tunnellanish, tunnel o'tish, analitik model, p–n o'tish, tunnellanish ehtimoli.*

Уктамова Мунирахон Комилжон кизи (University of Business and Science),
Абдукаххаров Диёрбек Шокиржон ўғли, Собиров Абдунаби Бахромжон ўғли
(Наманганский государственный технический университет; E-mail: umk9391@gmail.com)

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫВЕДЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ТУННЕЛЬНОГО ТОКА В ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Аннотация. *В работе исследована физическая природа туннельного тока в туннельных диодах и получено его математическое выражение на основе теории Эсаки. Проанализирована интегральная формула плотности туннельного тока с учетом плотности энергетических состояний и*