



UDK: 621.315.592

Sobirjon BOYDEDAYEV,

Dotsent, f-m.f.n, Namangan davlat texnika universiteti, Namangan, O'zbekiston

Ahadjon TO'XTARALIYEV,

Tayanch doktorant, Namangan davlat texnika universiteti, Namangan, O'zbekiston

Muniraxon O'KTAMOVA,

PhD, dotsent, Namangan davlat texnika universiteti, Namangan, O'zbekiston

E-mail: umk9391@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7562-2677>

NamDPI dotsenti, PhD B.O'ktamaliyev taqrizi asosida

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TUNNELING NOISE MECHANISMS IN TUNNEL DIODES UNDER HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS

Annotation

This work is devoted to the theoretical investigation of noise characteristics in tunnel diodes under high-frequency electromagnetic fields. The study considers current fluctuations within the framework of quantum mechanics and shows that, under ideal conditions, the shot noise spectral density follows the relation $S=2qI$, exhibiting frequency-independent white noise behavior. However, in real devices, the noise spectrum is more complex and includes not only shot noise but also low-frequency $1/f$ noise associated with trap states and interface imperfections. The tunneling probability is described using the WKB approximation, while the influence of the internal electric field is incorporated through the Franz–Keldysh effect. The results demonstrate that an increase in the electric field leads to a narrowing of the potential barrier and an exponential enhancement of the tunneling probability. The tunnel current and noise characteristics are further analyzed using the Tsu–Esaki formalism, where their dependence on energy spectrum, density of states, and carrier distribution functions is expressed in an integral form.

Key words: Tunnel diode, tunneling, WKB approximation, Franz–Keldysh effect, Tsu–Esaki model, high-frequency electromagnetic field, electromagnetic modulation, resonant tunneling, noise spectral density

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ШУМОВ ТУННЕЛИРОВАНИЯ В ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация

Данная работа посвящена теоретическому исследованию шумовых характеристик туннельных диодов в условиях высокочастотного электромагнитного поля. Флуктуации туннельного тока рассматриваются в рамках квантово-механического подхода, при этом показано, что в идеальном случае спектральная плотность shot noise описывается соотношением $S=2qI$ и имеет характер «белого шума», не зависящего от частоты. Однако в реальных структурах шумовой спектр усложняется за счёт наличия низкочастотного $1/f$ шума, обусловленного ловушечными состояниями и дефектами интерфейса. Вероятность туннелирования описывается в приближении ВКБ с учётом влияния внутреннего электрического поля через эффект Франца–Келдыша. Показано, что увеличение электрического поля приводит к сужению потенциального барьера и экспоненциальному росту вероятности туннелирования. Туннельный ток и шумовые характеристики анализируются на основе формализма Цу–Эсаки, позволяющего учитывать энергетический спектр, плотность состояний и функции распределения носителей.

Ключевые слова: Туннельный диод, туннелирование, приближение ВКБ (Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна), эффект Франца–Келдыша, модель Цу–Эсаки, высокочастотное электромагнитное поле, электромагнитная модуляция, резонансное туннелирование, спектральная плотность шума

O'TA YUQORI CHASTOTALI ELEKTROMAGNIT MAYDON SHAROITIDA TUNNEL DIODLARDA TUNNELLANISH SHOVQINI MEXANIZMLARINI NAZARIY TADQIQ ETISH

Annotatsiya

Mazkur ish tunnel diodlarda tunnellanish jarayonlarining shovqin xususiyatlarini o'ta yuqori chastotali elektromagnit maydon sharoitida nazariy tahlil qilishga bag'ishlangan. Tadqiqotda tunnel tokidagi fluktuatsiyalar kvant mexanik yondashuv asosida ko'rib chiqilib, ideal holatda shot noise spektral zichligi $S=2qI$ qonuniyatiga bo'ysunishi va chastotaga bog'liq bo'lmagan oq shovqin xarakteriga ega ekanligi ko'rsatildi. Shu bilan birga, real qurilmalarda shovqin spektri shot noise bilan bir qatorda energiya tuzoqlari va interfeys noaniqliklari bilan bog'liq bo'lgan past chastotali $1/f$ shovqin komponenti bilan murakkablashishi aniqlandi. Tunnel ehtimoli WKB yaqinlashuvi asosida ifodalanib, ichki elektr maydon ta'siri Franz–Keldysh effekti orqali hisobga olindi. Natijalar elektr maydon ortishi bilan potensial to'siqning torayishi va tunnellanish ehtimolining eksponentsial ortishini ko'rsatadi. Tunnel toki va shovqin xususiyatlari Tsu–Esaki modeli asosida integral ko'rinishda ifodalanib, ularning energiya spektri va zaryad tashuvchilar taqsimotiga bog'liqligi tahlil qilindi.

Kalit so'zlari: Tunnel diod, tunnellanish, WKB yaqinlashuvi, Franz–Keldysh effekti, Tsu–Esaki modeli, o'ta yuqori chastotali maydon, elektromagnit modulyatsiya, rezonans tunnellanish, shovqin spektral zichligi.

Kirish. So'nggi yillarda yarimo'tkazgich qurilmalarida tunnellanish hodisalarini o'rganish GeSn va III–V guruh materiallari asosida faol rivojlanmoqda. Ushbu materiallar tor energiya bo'shlig'i va yuqori elektron harakatchanligi tufayli kvant tunnellanish jarayonlarini samarali amalga oshirish imkonini beradi. GeSn asosidagi qurilmalar bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarda bevosita tunnellanish jarayoni eksperimental tasdiqlangan. Xususan, Yang va boshqalar [1] GeSn asosidagi TFETlarda BTBT mexanizmini tajribaviy ko'rsatib, ushbu materialning yuqori samaradorlikka ega tranzistorlar yaratishda istiqbolli ekanligini asoslab bergan. Shu bilan birga, Liu va boshqalar [2] GeSn Esaki diodlarida xona haroratida yuqori tunnellanish tok zichligi va aniq manfiy differensial qarshilik (NDR) kuzatilishini ko'rsatgan, bu esa ularning amaliy qurilmalarda qo'llanilish imkoniyatlarini kengaytiradi. III–V guruh materiallari asosidagi tunnellanish qurilmalari ham keng o'rganilgan. Krishnamoorthy va hamkasblari [3] GaN/AlN geterotuzilmalarida rezonans tunnellanish diodlari (RTD) uchun yuqori tok zichligi va takrorlanuvchi NDR effektlarini eksperimental isbotlagan. Bu natijalar III–V materiallarida kvant tunnellanish mexanizmlarining yuqori samaradorligini ko'rsatadi. Feiginov va boshqalar [4] esa rezonans tunnellanish diodlari asosida THz diapazonida ishlovchi generatorlarni ishlab chiqib, yuqori chastotali elektronika rivojiga muhim hissa qo'shgan. Magnit maydon ta'sirida tunnellanish jarayonlarini o'rganish ham muhim yo'nalishlardan biridir. Weng va boshqalar [5] DBRTD (double-barrier RTD)larda magnit maydon ostida transport va shot-noise xususiyatlarini tadqiq qilib, kvant transport jarayonlarini chuqurroq tushuntirgan. Li va boshqalar [6] esa magnit maydon ta'sirida shot-noise kuchayishini aniqlab, bu hodisani qurilma barqarorligiga ta'sirini ko'rsatgan. Song va hamkasblari [7] InAs/AlSb RTDlarda Landau darajalari va magnit tunnellanish jarayonlarini spektroskopik usulda o'rganib, kvantlanish effektlarini chuqur tahlil qilgan. Tunnel qurilmalarda shovqin xususiyatlari alohida ahamiyatga ega. Safonov va boshqalar [8] RTDlarda shot-noise suppressiyasini kuzatib, shovqin darajasini kamaytirish imkoniyatlarini ko'rsatgan. Chen va boshqalar [9] InGaAs asosidagi qurilmalarda magnit maydon ta'sirida rezonans tunnellanishni aniqlab, nazariy va eksperimental natijalar o'rtasidagi moslikni tasdiqlagan. Umuman olganda, adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, tunnellanish qurilmalarining asosiy ustunliklari yuqori tezkorlik, past quvvat sarfi va kvant effektlar bilan boshqariladigan transport jarayonlari hisoblanadi. Biroq ushbu qurilmalarda shovqin jarayonlari, ayniqsa shot noise va $1/f$ shovqin, hali ham to'liq o'rganilmagan muammo bo'lib qolmoqda. Shu sababli tunnel diodlardagi shovqin mexanizmlarini kompleks o'rganish ushbu ishning dolzarb ilmiy vazifasi hisoblanadi.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. Ideal holda tunnel dioddagi shot noise quvvat spektral zichligi quyidagi ifoda bilan beriladi:

$$S_I^{\text{shot}}(f) = 2qI \quad (1)$$

bu yerda

- q — elektron zaryadi,
- I — tunnel dioddagi o'rtacha tok (tunnel toki).

Mazkur ifodadan ko'rinadiki, shot noise spektri chastotaga bog'liq emas, ya'ni barcha chastotalarda deyarli bir xil qiymatga ega. Shu sababli shot noise "oq shovqin" (white noise) sifatida tasniflanadi. Tunnel diodlarda shot noise ayniqsa yuqori chastotalarda dominant bo'ladi, chunki past chastota sohasida boshqa shovqin mexanizmlari ustunlik qiladi.

Real vaqtda elektronlar tunnellanish jarayonini tasodifiy paytlarda amalga oshiradi. Shu sababli tok vaqt bo'yicha fluktuatsiya qiladi:

$$I(t) = I_{\text{tunnel}} + \delta I(t) \quad (2)$$

$-\delta I(t)$ tunnel tokning fluktuatsion komponenti. Ushbu fluktuatsiyalar Poisson statistikasiga bo'ysunadi.

Past chastotali fluktuatsiyalar ($1/f$ shovqin), amaliy tunnel diodlarda yarimo'tkazgichdagi energiya tuzoqlari tufayli tunnellanish ehtimoli vaqt bo'yicha o'zgaradi:

$$T(E, t) = T_0(E) + \delta T(E, t) \quad (3)$$

Shuning natijasida tok:

$$I(t) = I_{\text{tunnel}} + \delta I_{\text{shot}}(t) + \delta I_{1/f}(t) \quad (4)$$

$\delta I_{\text{shot}}(t)$ — tezkor oq fluktuatsiya

$\delta I_{1/f}(t)$ — sekin, past chastotali fluktuatsiya ($1/f$ shovqin)

Umumiy spektral zichlik:

$$S_I(f) = 2qI_{\text{tunnel}} + \frac{AI_T^2}{f} \quad (5)$$

$S_I(f)$ — tok shovqinining quvvat spektral zichligi bo'lib birligi A^2/Hz bilan o'lchanadi.

Tunnel diodlarda zaryad tashuvchilarning o'tish ehtimoli to'siqning statik balandligi bilangina emas, balki p – n o'tish sohasida hosil bo'luvchi ichki elektr maydon bilan ham belgilanadi. Kuchsiz legirlangan o'tish qatlamida tashqi kuchlanish ta'sirida potensial profilning egilishi tunnel jarayonining ehtimollik xarakterini tubdan o'zgartiradi. Ushbu hodisa Franz–Keldysh effekti bilan chambarchas bog'liq bo'lib, elektr maydon mavjudligida energiya spektrining uzluksiz sohaga cho'zilishi va kvant mexanik tunnellanish ehtimolining oshishi bilan namoyon bo'ladi. Tunnel diod strukturasi uchun ichki elektr maydon quyidagi ifoda orqali baholanadi:

Tunnel diod strukturasi uchun ichki elektr maydon quyidagi ifoda orqali baholanadi:

$$F = \frac{V + V_{bi}}{d} \quad (6)$$

bu yerda V — tashqi kuchlanish, V_{bi} — ichki kuchlanish, d — qatlamining qalinligi. Mazkur maydon yarimo'tkazgich energetik zonalarining egilishiga olib kelib, elektron uchun samarali tunnel to'sig'ini kamaytiradi. Franz–Keldysh mexanizmini hisobga olgan holda tunnel shaffoflik koeffitsiyenti WKB yaqinlashuvi asosida quyidagicha yoziladi:

$$T(E, F) = \exp \left[-\frac{4\sqrt{2m^*}}{3\hbar q F} (E_g - E)^{3/2} \right] \quad (7)$$

bu yerda m^* — elektronning samarali massasi, E_g — tunnel to'sig'ining balandligi, E — elektron energiyasi. Ushbu ifodadan ko'rinadiki, tunnel ehtimoli elektr maydonga teskari proporsional bo'lgan eksponent ko'rinishda bog'langan. Maydon ortishi bilan potensial to'siq geometrik jihatdan torayadi va elektronlarning tunnellanish ehtimoli keskin ortadi.

Tadqiqot metodologiyasi.

WKB yaqinlashuvi va tunnellanish kvant mexanikada tunnel ehtimoli $T(E)$ –WKB (Wentzel–Kramers–Brillouin) yaqinlashuvi bilan ifodalanadi:

$$T(E) \approx \exp \left[-2 \int_{x_1}^{x_2} \kappa(x) dx \right] \quad (8)$$

bu yerda:

$$\kappa(x) = \frac{\sqrt{2m^*(U(x)-E)}}{\hbar} \quad (9)$$

$U(x)$ — to'siq potentsiali (energiya balandligi qatlam bo'ylab)

E — elektron energiyasi

x_1, x_2 — to'siqni kesib o'tadigan klassik chegaralar

Yuqoridagi integral elektron uchun "baryer ostidagi faza"ni o'lchaydi. To'siq chiziqli egilishli bo'lsa, Franz–Keldysh effekti paytida, ichki elektr maydon mavjud bo'lsa, to'siq potentsiali chiziqli tarzda egiladi:

$$U(x) = E_g - qFx \quad (10)$$

E_g — to'siqning maksimal balandligi (qattiq qatlam bo'yicha)

F — elektr maydon

x — tunnel qilingan masofa

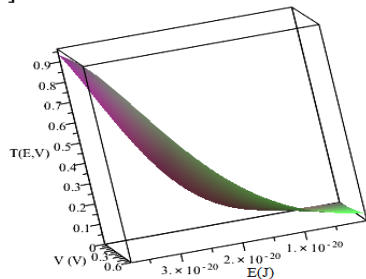
WKB integralini hisoblasak:

$$T(E, F) = A \int_0^{E_g/qF} \sqrt{E_g - qFx - E} dx \quad (11)$$

Integrallash natijasida $(E_g - E)^{3/2}$ paydo bo'ladi.

Ya'ni:

$$T(E, F) = \exp \left[-\frac{4\sqrt{2m^*}}{3\hbar qF} (E_g - E)^{3/2} \right] \quad (12)$$



1-rasm. Franz–Keldysh effekting ta'siri vaqtida, ichki elektr maydonning energiya va baryer shaffofligiga bog'liqlik grafigi.

Tahlil va natijalar. Tsu–Esaki formulasi (tok va shovqin) tunnel tok $-I$ va shovqin $-S_I$ quyidagicha yoziladi:

$$I = \frac{q}{h} \int_{-\infty}^{\infty} T(E, F) D(E) [f_1(E) - f_2(E)] dE \quad (13)$$

$$S_I = \frac{2q^2}{h} \int_{-\infty}^{\infty} T(E, F) [1 - T(E, F)] D(E) [f_1(E)(1 - f_1(E)) + f_2(E)(1 - f_2(E))] dE \quad (14)$$

$T(E, F)$ — Franz–Keldysh effekti bilan bog'langan tunnel shaffoflik koeffitsiyenti.

$D(E)$ — holatlar zichligi. Masalan, 3D yarimo'tkazgich uchun $D(E) \sim \sqrt{E - E_c}$.

$f_1(E), f_2(E)$ — Fermi–Dirak taqsimotlari (p–n qatlami yoki kontaktlar).

Shu integrallar orqali:

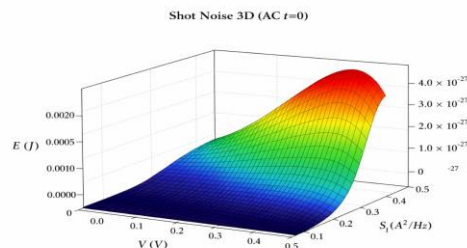
1. Tunnel ehtimoli faqat $T(E, F)$ ga emas, balki energiya spektri va elektron zichligi ga ham bog'liq bo'ladi.

2. Shot noise $T(E, F)(1 - T(E, F))$ bilan kamayadi, lekin holatlar zichligi va Fermi taqsimoti bilan modulyatsiyalanadi.

Endi, Franz–Keldysh effekti $T(E, F)$ ga qo'shsak, integral:

$$S_I(F) = 2qA \int_0^{\mu_n + \mu_p - qV} \exp \left(-\frac{\theta \frac{4\sqrt{2m^*}}{3\hbar qF} (E_g - qV + \mu_n + \mu_p)^{3/2}}{F} \right) \sqrt{\varepsilon(\mu_n + \mu_p - \varepsilon - qV)} \cdot \left(\frac{1}{\exp(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT})} - \frac{1}{\exp(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}) + 1} \right) d\varepsilon \quad (15)$$

Shu yondashuv bilan tunnel toki va shovqinning kuchlanish va energiyaga bog'liqligi yanada aniqroq bo'ladi. Elektr maydon ta'sirida tunnel jarayoni faollashadi, buning natijasida tunnel toki va unga mos shovqin spektri nolinear xarakter kasb etadi. Ayniqsa, kuchlanishning ma'lum qiymatlarida tunnel o'tish ehtimolining keskin o'zgarishi rezonans xarakterdagi fluktuatsiyalarni keltirib chiqaradi (2-rasm).



2-rasm. Tunnel shaffoflik ko'effitsiyentining energiya va kuchlanishga bog'liqligi uch o'lchovli sirt grafi

Bunday yondashuv tunnel diodlarida shovqinning kamayishi yoki kuchayish mexanizmini tushuntirishda muhim nazariy asos bo'lib xizmat qiladi.

Xulosa. O'ta yuqori chastotali elektromagnit maydon ta'sirida ichki elektr maydonning vaqt bo'yicha modulyatsiyasi hisobga olinib, tunnellanish ehtimolining dinamik o'zgarishi o'rganildi. Aniqlanishicha, yuqori chastotali signal mavjudligida tunnel shaffoflik ko'effitsiyenti vaqtga bog'liq bo'lib, shovqin spektrining nolinear modulyatsiyasiga olib keladi. Rezonans kuchlanish yaqinida tunnellanish ehtimolining keskin o'zgarishi shot noise amplitudasining kamayishi yoki kuchayishiga sabab bo'ladi. Olingan natijalar tunnel diodlarda kvant transport va shovqin mexanizmlarini chuqur tushunishga xizmat qiladi hamda yuqori chastotali, past shovqinli nanoelektron qurilmalarni loyihalash uchun muhim nazariy asos yaratadi.

ADABIYOTLAR

1. Yang X., Wang L., Chen Z., et al. Experimental demonstration of band-to-band tunneling in GeSn TFETs // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – Vol. 128. – No. 4. – P. 044502.
2. Liu Y., Zhang H., Li Q., et al. High current density and negative differential resistance in GeSn Esaki diodes at room temperature // *Applied Physics Letters*. – 2021. – Vol. 119. – No. 12. – P. 123501.
3. Krishnamoorthy S., Nath D.N., Rajan S., et al. High current density GaN/AlN resonant tunneling diodes // *IEEE Electron Device Letters*. – 2018. – Vol. 39. – No. 7. – P. 1020–1023.
4. Feiginov M., Sydlo C., Cojocari O., et al. Resonant tunneling diode oscillators operating at terahertz frequencies // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2019. – Vol. 9. – No. 3. – P. 330–337.
5. Weng Q., Liu H., Wang J., et al. Magnetotransport and shot noise in double-barrier resonant tunneling diodes // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 96. – No. 8. – P. 085302.
6. Li H., Zhou Y., Chen D., et al. Shot noise enhancement in resonant tunneling diodes under magnetic field // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – Vol. 124. – No. 16. – P. 164503.
7. Song J., Tsui D.C., et al. Landau levels and magnetotunneling spectroscopy in InAs/AlSb resonant tunneling diodes // *Physical Review Letters*. – 2016. – Vol. 117. – No. 3. – P. 036802.
8. Safonov S.S., et al. Shot noise suppression in resonant tunneling diodes // *Semiconductor Science and Technology*. – 2015. – Vol. 30. – No. 10. – P. 105012.
9. Chen L., Xu M., Zhang Y., et al. Magnetic field effects on resonant tunneling in InGaAs devices // *Applied Physics Letters*. – 2019. – Vol. 115. – No. 5. – P. 052101.