

Erkaboyev Ulug‘bek Inayatillayevich
Namangan davlat texnika universiteti, f.-m.f.d. professor
Qalandarova Shodiya G‘olibjon qizi
Namangan davlat texnika universiteti, magistranti
No‘monjonov Alimardon Alisher o‘g‘li
Namangan davlat texnika universiteti, magistranti
G‘ayratov Saydullo Iqboljon o‘g‘li
Namangan davlat texnika universiteti, magistranti
Boltaboyev Rahmatjon Omonboy o‘g‘li
Namangan davlat texnika universiteti, magistranti
Tel: 90-697-13-07 e-mail: shodigalibjanovna@gmail.com

YARIMO‘TKAZGICHLARNING TA‘QIQLANGAN ZONA KENGLIGINI HARORATGA BOG‘LIQLIGIGA EFFEKTIV MASSANING TA‘SIRI.

Annotatsiya: *Ushbu maqolada yarimo‘tkazgichlarning taqiqlangan zona kengligining haroratga bog‘liqligiga ($E_g(T)$) elektronlarning effektiv massasini harorat bo‘yicha o‘zgarishini ($m_n^*(T)$) ta‘siri tadbiq etilgan. Feyn usuli yordamida yarimo‘tkazgichli materiallarning ta‘qiqlangan zona kengligini haroratga bog‘liqligini hisoblashning yangi analitik formulasi keltirib chiqarilgan. Taklif etilayotgan model tajriba natijalarini tushuntirishda yuqori haroratlar uchun o‘rinli ekanligi isbotlangan.*

Kalit so‘zlar: *effektiv massa, ta‘qiqlangan zona kengligi, Feyn metodi, Varshni metodi.*

Эркабоева Улугбек Инаятиллаевич
Наманганский государственный технический университет, ф.-м.ф.д.,
профессор
Гайратов Саидулло Икболжон угли
Наманганский государственный технический университет, магистрант
Нуманжонов Алимардон Алишер угли
Наманганский государственный технический университет, магистрант
Каландарова Шодия Галибжон кызы
Наманганский государственный технический университет, магистрант
Болтабоев Рахматжон Омонбой угли
Наманганский государственный технический университет, магистрант
Тел: 90-697-13-07
E-mail: shodigalibjanovna@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ НА ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Аннотация: В данной статье исследуется влияние изменения эффективной массы электронов ($m_n^*(T)$) с температурой на зависимость ширины запрещенной зоны полупроводников ($E_g(T)$) от температуры. С помощью метода Фейна получена новая аналитическая формула для расчета ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов в зависимости от температуры. Предлагаемая модель доказала свою применимость для объяснения экспериментальных результатов при высоких температурах.

Ключевые слова: эффективная масса, ширина запрещенной зоны, метод Фейна, метод Варшни.

Erkaboyev Ulugbek Inayatillayevich

Namangan State Technical University, DSc in Physics and Mathematics, Professor

Gayratov Saydullo Iqboljon ogli

Namangan State Technical University, Master's Student

No'monjonov Alimardon Alisher ogli

Namangan State Technical University, Master's Student

Qalandarova Shodiya G'olibjon qizi

Namangan State Technical University, Master's Student

Boltaboyev Rahmatjon Omonboy ogli

Namangan State Technical University, Master's Student

Tel: 90-697-13-07

E-mail: shodigalibjanovna@gmail.com

INFLUENCE OF EFFECTIVE MASS ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE BAND GAP WIDTH OF SEMICONDUCTORS

Abstract: This article examines the effect of the temperature-dependent change in the effective mass of electrons ($m_n^*(T)$) on the temperature dependence of the band gap width of semiconductors ($E_g(T)$). Using the Feyn method, a new analytical formula is derived to calculate the temperature dependence of the band

gap width in semiconductor materials. The proposed model has been proven to be applicable for explaining experimental results at high temperatures.

Keywords: *effective mass, band gap width, Feyn method, Varshni method.*

I.Kirish.

Yarimo'tkazgichlar - bu elektr toki o'tishini boshqarishda muhim ro'l o'ynovchi materiallardir. Ular, asosan, elektronika va yarim o'tkazgichli qurilmalar sanoatida keng qo'llaniladi. Yarimo'tkazgichlarning eng muhim xususiyatlaridan biri - ular o'z ichida elektr toki o'tishini nazorat qilish uchun maxsus ta'qiqlangan zona kengligidir. Bu zona, o'z navbatida, materialning elektron strukturasining bir qismidir va elektronlarning erkin harakatini cheklaydi.

Adabiyotlar tahlili

Ta'qiqlangan zona kengligi yarimo'tkazgichlarning fizika va elektron xususiyatlarini belgilaydigan muhim parametr hisoblanadi. Ta'qiqlangan zona kengligi materialning kimyoviy tarkibi, tuzilishi va atrof-muhit sharoitlariga, jumladan, haroratga bog'liq ravishda o'zgarishi mumkin. Shunday qilib, harorat o'zgarishlari yarim o'tkazgichlarning elektr xususiyatlarida sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin, bu esa ularning ishlashiga va samaradorligiga bevosita ta'sir qiladi [1].

Jumladan ta'qiqlangan zona kengligi $E_g(T)$ ning haroratga bog'liqligini tavsiflovchi eng keng tarqalgan formulalardan biri Varshni tenglamasidir. Ushbu tenglama yarimo'tkazgichlarda ta'qiqlangan zona kengligini haroratga bog'liq ravishda tavsiflaydi [2]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta} \quad (1)$$

Bu yerda, $E_g(T)$ – ta'qiqlangan zona kengligining haroratga bog'liqligi; $E_g(0)$ - nol haroratda taqiqlangan zona kengligi; α , β – eksperimental parametrlar; T - harorat.

Bu formulani ko'plab olimlar, masalan D. K. Biegelsen, L. F. Mattheiss, va M.L. Cohen o'zlarining GaAs va boshqa yarimo'tkazgichlar bo'yicha olib borgan tadqiqotlarida qo'llaganlar[2]. Ushbu tadqiqotlardan quyidagi muhim xulosalar kelib chiqqan:

- Haroratning o'sishi bilan ta'qiqlangan zona kengligi kamayadi.
- α va β parametrlarining qiymatlari materialga qarab farq qiladi.

Feyn metodi kvant mexanikasi va kvant maydonlar nazariyasida keng qo'llaniladi. Bu metod fizikaning turli tizimlarini tavsiflash uchun ishlatiladi va an'anaviy Shredinger tenglamasidan farqli ravishda, zarraning har bir mumkin bo'lgan yo'lini hisobga oladi. Feyn integral usuli bilan zarrachaning kvant holatini ifodalash uchun uning barcha mumkin yo'llarining superpozitsiyasi olinadi va bu usullarning har biriga fazoda amplitudali ehtimollik qismi bilan baho beriladi. Bu yondashuv, ayniqsa, qattiq jismlar fizikasi va yarimo'tkazgichlar bo'yicha tadqiqotlarda qo'llaniladi, chunki u fonon-elektron va boshqa turdagi o'zaro ta'sirlarni hisoblashda qulaylik beradi[1,3]. Ushbu adabiyotlardan foydalanib $E_g(T)$ ni aniqlashda Feyn metodi formulasi quyidagicha ifodalalanadi:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha * \theta_p}{2} * \left(\sqrt[p]{1 + \left(\frac{2 * T}{\theta_p} \right)^p} - 1 \right) \quad (2)$$

Bu yerda:

$E_g(T)$ -ta'qiqlangan zona kengligini haroratga bog'liqligi;

$E_g(0)$ -nol haroratda taqiqlangan zona kengligi;

α - $E_g(T)$ ning haroratga bog'liq o'zgarish tezligini ifodalovchi koeffitsiyent;

θ_p -Fononlarning o'rtacha energiyasiga bog'liq bo'lgan parametrlar;

P-nazariy model asosida tanlangan ta'sir koeffitsiyenti;

T-harorat.

Lekin, yuqoridagi (2) formuladan ko'rinib turibdiki, ta'qiqlangan zona kengligini haroratga bog'liqligida erkin elektronlar va kovaklarning effektiv massalarini haroratga bog'liqligi ta'siri ko'rib chiqilmagan. Vaholangki, zaryadli zarralarning effektiv massasining harorat bo'yicha o'zgarishi $m^*(T)$ ta'qiqlangan

zona kengligini haroratga bog'liqligiga mutanosib. Ya'ni quydagi munosabat o'rinli hisoblanadi[4]:

$$\frac{dE_g(T)}{dT} \approx \frac{dm^*(T)}{dT} \quad (3)$$

(3) formuladan ko'rinib turibdiki, yarimo'tkazgichli materiallarning $E_g(T)$ ni hisoblashda albatta $\frac{m^*(T)}{m(0)}$ ni ta'sirini etiborga olish kerak.

Ishning asosiy maqsadi, yarimo'tkazgichlarning ta'qiqlangan zona kengligining haroratga bog'liqligiga zaryadli zarralarning effektiv massasini o'zgarishi ta'sirini modelashtirishdan iborat.

II. Model

2.1 $E_g(T)$ ni aniqlashda Feyn metodini tadbiqu

Yarim o'tkazgichlarning taqiqlangan zona kengligi $E_g(T)$ ning haroratga bog'liqligini aniqlash materialshunoslik va qattiq jism fizikasi sohalarida muhim masalalardan biri hisoblanadi. Harorat oshishi yoki kamayishi natijasida kristall panjaradagi tebranishlarning kuchayishi, atomlararo o'zaro ta'sirlarning o'zgarishi va fononlarning ta'siri natijasida E_g ning dinamik o'zgarishi kuzatiladi.

Ushbu tadqiqotda Feyn integrali metodi (Feynman Path Integral) yordamida yarim o'tkazgichlarning ta'qiqlangan zona kengligining haroratga bog'liqligini tahlil qilishga harakat qilinadi. Mazkur yondashuv fononlarning kvant-mexanik o'zaro ta'sirini hisobga olishga imkon beradi va klassik Varshni formulasi bilan solishtirganda yanada aniqlangan natijalar olishga yordam beradi.

Feyn metodining qo'llanilishi orqali Ge, AlSb, CdTe, CdS kabi yarim o'tkazgich materiallari uchun past harorat sharoitida $E_g(T)$ ning o'zgarishi modelashtiriladi. Olingan natijalar esa yarim o'tkazgich materiallarining past haroratdagi fizikaviy xossalarini tushunishda muhim ahamiyat kasb etadi.

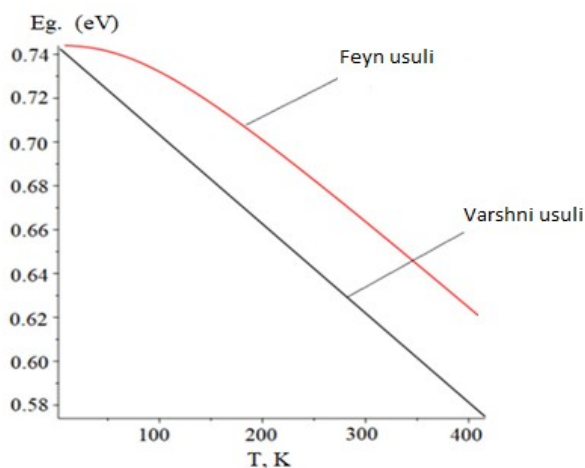
Oldingi tadqiqotlarda Feyn va Varshni metodlari yordamida yarimo'tkazgichlarning taqiqlangan zona kengligining haroratga bog'liqligi o'rganilgan bo'lsada, ushbu metodlar o'zaro bevosita solishtirilmagan. Masalan, Kardona va Peter Yu turli materiallar uchun empirik va nazariy usullar yordamida $E_g(T)$ ni tahlil qilgan, Krantz va Halperin esa kvant effektlarini hisobga olgan

model taklif qilgan. Shuningdek, Ziman fononlarning elektron tizimlarga ta'sirini o'rgangan[5-7].

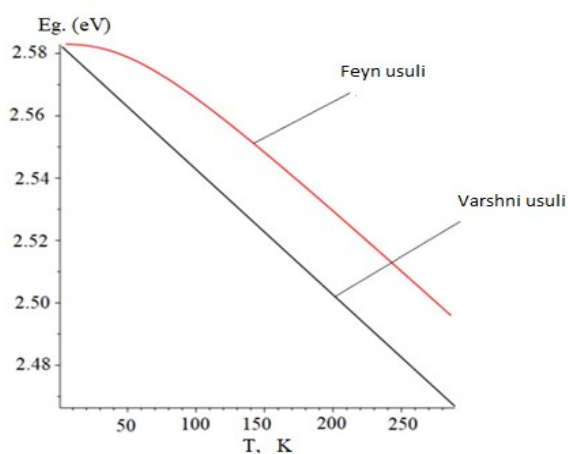
Biroq, ushbu ishlarning hech birida Feyn integrali metodi va Varshni formulasi o'zaro taqqoslanmagan hamda ularning natijalari Maple dasturi yordamida grafik tahlil qilinmagan. Ushbu ilmiy ish aynan shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan bo'lib, *Ge*, *AlSb*, *CdTe*, *CdS* kabi yarim o'tkazgichlarda Feynman va Varshni metodlari asosida hisoblangan $E_g(T)$ qiymatlarini solishtirish va ularning tafovutlarini aniqlashga qaratilgan.

Natijada, ushbu ish Feyn metodi natijalari Varshni formulasi bilan qanchalik mos kelishini aniqlash, haroratning past diapazonida fononlarning rolini yanada chuqurroq tushuntirish va bu metodlarning amaliy qo'llanilish imkoniyatlarini baholashga xizmat qiladi.

Quyida *Ge*, *AlSb*, *CdTe*, *CdS* yarimo'tkazgichlarining ta'qiqlangan zona kengligini haroratga bog'liqligini Varshni va Feyn metodlarida Maple dasturidan foydalanib solishtirilgan grafiklarini keltiramiz. Ushbu rasmlardan ikkala metodning farqlarini yaqqol ko'rishimiz mumkin (1-2-rasmlar). Ushbu rasmlardagi grafiklar (1) va (2) formulalar yordamida olingan.



1-rasm. Feyn va Varshni usullari yordamida *Ge* yarimo'tkazgichli materialning ta'qiqlangan zona kengligiga haroratni ta'siri.



2-rasm. Feyn va Varshni usullari yordamida *CdTe* yarimo'tkazgichli materialning ta'qiqlangan zona kengligiga haroratni ta'siri.

1–2-rasmlardan ko‘rinib turibdiki, Feyn va Varshni metodlari natijalari yarim o‘tkazgichlarning ta‘qiqlangan zona kengligining haroratga bog‘liqligida o‘zgarishi sezilarli ravishda ko‘rinmoqda. Ayniqsa, yuqori haroratlarda effektiv massaning ta‘siri muhim ekanligi grafiklardan ko‘rinib turibdi. Varshni metodi bo‘yicha, barcha yarim o‘tkazgichlarda harorat oshishi bilan ta‘qiqlangan zona kengligi uzluksiz ravishda kamayib boradi. Feyn metodida esa, past haroratlarda Eg ning sezilarli o‘zgarishi kuzatilmaydi, ya‘ni u nisbatan barqaror qoladi. Biroq, harorat muayyan chegaraga yetgandan so‘ng, ta‘qiqlangan zona kengligining pasayishi kuzatiladi. Bu esa fononlarning harorat ortishi bilan kuchayib borishi natijasida elektron holatlar bilan o‘zaro ta‘sirining oshishi bilan bog‘liq bo‘ladi (1–2-rasmlar).

Bundan tashqari, turli yarim o‘tkazgich materiallari uchun Feyn metodi natijalari turlicha bo‘lishi mumkin. Masalan, *Ge* va *GaAs* kabi materiallarda Feyn metodi bo‘yicha past haroratlarda ta‘qiqlangan zona kengligi deyarli o‘zgarmaydi, biroq *InP* va *AlSb* uchun bunday stabil holat nisbatan haroratning tor diapazonida kuzatiladi. Bu esa har bir material uchun panjara tebranishlari va ularning elektron energiya holatlariga ta‘siri turlicha ekanligini ko‘rsatadi.

Shuningdek, harorat ortishi bilan Feyn metodidagi natijalarning Varshni formulasi bo‘yicha hisoblangan qiymatlardan chetlanishi ham kuzatiladi. Bu tafovut, ayniqsa, yuqori haroratlarda aniq namoyon bo‘lib, Varshni modeli chiziqli tushish tendensiyasini namoyish etsa, Feyn metodi ba‘zi diapazonlarda noan'anaviy o‘zgarishlarni ko‘rsatishi mumkin. Bu esa Feyn metodining kvant mexanik ta‘sirlarni chuqurroq hisobga olish qobiliyatiga ega ekanligini anglatadi.

Ushbu farqlar shuni ko‘rsatadiki, yarim o‘tkazgichlarning ta‘qiqlangan zona kengligining haroratga bog‘liqligini aniqlashda Feyn metodi va Varshni formulasi bir-birini to‘ldiruvchi yondashuvlar bo‘lib, ularning kombinatsiyali qo‘llanilishi yanada aniq natijalarga olib kelishi mumkin.

2.2. Effektiv massaning ta‘qiqlangan zona kengligini haroratga bog‘liqligiga ta‘siri

Yarim o'tkazgichlarning ta'qiqlangan zona kengligi $E_g(T)$ ning haroratga bog'liqligi nafaqat fonon-elektron o'zaro ta'sirlariga, balki zaryad tashuvchilarning effektiv massasining o'zgarishiga ham bog'liqdir. Effektiv massa - bu elektronlarning kristall panjaradagi harakatini tavsiflovchi muhim parametr bo'lib, u panjara potensialining murakkab ta'sirini hisobga olib, zarraning inertligini ifodalaydi.

Effektiv massa harorat o'zgarishi bilan o'zgaradi, chunki kristall panjaradagi fononlarning faollashishi elektronlarning energiya spektriga ta'sir ko'rsatadi. Natijada, elektron va kovaklarning effektiv massalari harorat ortishi bilan ma'lum diapazonda o'zgarishi mumkin. Bu o'zgarish $E_g(T)$ ning haroratga bog'liqligini aniqlashda muhim rol o'ynaydi.

Ma'lumki, mavjud ilmiy adabiyotlarda zaryadli zarralarning effektiv massasini haroratga bog'liqligini eksperimental va nazariy jihatdan aniqlashda materialning fizik hossalari qarang, har xil yondashuvlar bo'lgan. Jumladan, effektiv massa $m^*(T)$ ning haroratga bog'liqligini quyidagi umumiy ko'rinishda ifodalash mumkin [8]:

$$M(T) = m(0) \cdot (1 + \gamma T) \quad (4)$$

Bu yerda,

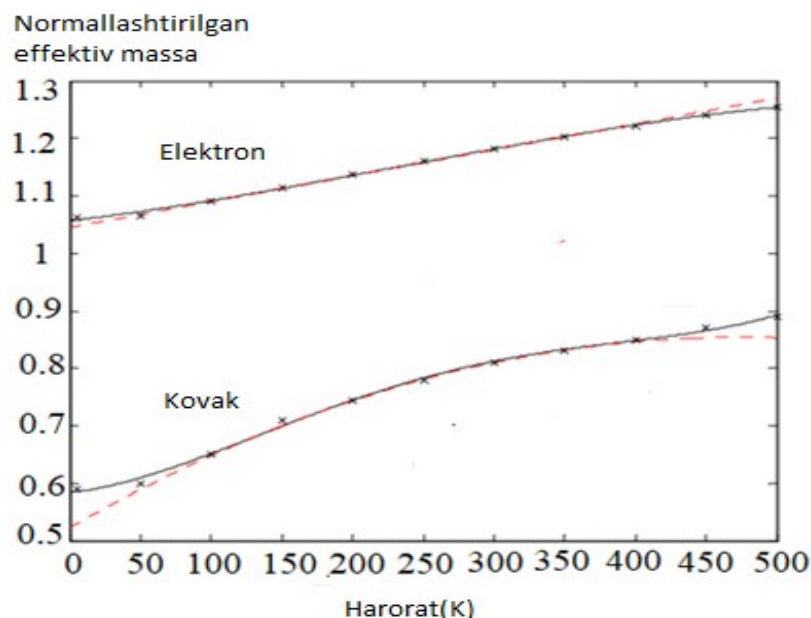
- $m(0)$ - nol haroratdagi effektiv massa;
- γ - material uchun eksperimental aniqlangan parametr;
- T - harorat.

Ta'qiqlangan zona kengligi $E_g(T)$ va effektiv massa $m^*(T)$ orasidagi bog'liqlikni keltirib chiqarish uchun olingan ma'lumotlardan foydalanib quyidagi munosabatni yozish mumkin:

$$E_g(T) \approx E_g(0) - C (dm(T)/dT) \quad (5)$$

Bu yerda, C - materialning kvant-mexanik tavsiflarini hisobga oluvchi eksperimental ko'rsatkich. Ushbu ifodadan ko'rinib turibdiki, harorat oshishi bilan effektiv massaning o'zgarishi ta'qiqlangan zona kengligining o'zgarishiga bevosita ta'sir qiladi.

[9-13] ishlarda Si yarimo'tkazgichning elektronlar va kovaklarni effektiv massalarini haroratga bog'liqligini ham tajribaviy ham nazariy jihatdan tadbiq etilgan (3-rasm).



3-rasm. Si yarimo'tkazgichning elektronlar va kovaklarni effektiv massalarini haroratga bog'liqligi [13].

Si yarimo'tkazgichning zaryadli zarralarining holatlar zichligi effektiv massasi (6) va (7) formulalarda berilgan bo'lib, Elektron va teshikning holat zichligi samarali massasi ifodasi tenglamalarda berilgan bo'lib, ular [9] dagi tajriba ma'lumotlari va nazariyasiga asoslangan holda keltirilgan. (6) va (7) formulalar tajriba natijalari asosida olingan bo'lib, ular 0 K dan 500 K gacha bo'lgan harorat oralig'iga to'g'ri keladi. Degenerativ valentlik quyi zonasining neparabolikligi va ajratilgan valentlik quyi zonasining hisobga olinishi kovakning effektiv massasini haroratga bog'liqligini hisoblash uchun ko'zda tutilgan [9]. Elektronlar uchun $m_n^i(T)$ va kovaklar uchun $m_p^i(T)$ formulalar quyidagiga teng [9, 11]:

$$m_n^i = (-1.084 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 7.580 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2.862 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.057) \cdot m_0 \quad (6)$$

$$m_p^i = (1.872 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 1.969 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 5.857 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 2.712 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0.584) \cdot m_0 \quad (7)$$

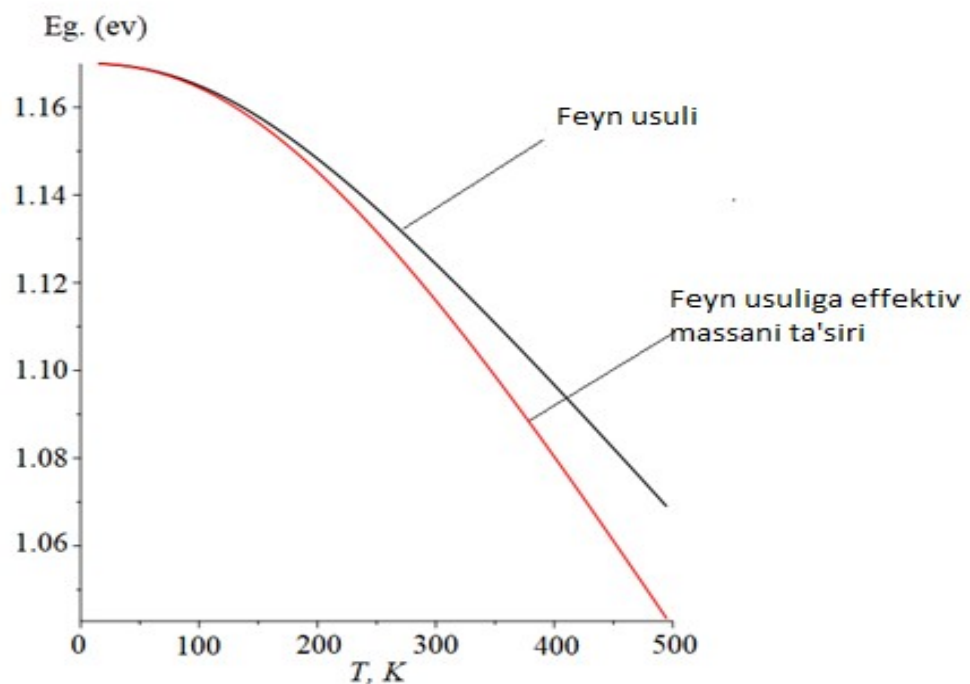
[9] va [10] ishlarda zaryadli zarralarni effektiv massalarini haroratga bog'liqligini aniqlash ifodalari uchun boshqa nazariy takliflar ham keltirilgan. Lekin bu ishlardagi nazariy hisoblar juda past va juda yuqori haroratlarda tajriba

natijalariga mos kelmagan. Shuning uchun tadqiqot natijalarimizni olishda (6) va (7) formulalarni o'rganish yetarli.

U holda (6) va (7) ifodalarni (2) ga qo'yishimiz natijasida quydagi umumlashgan $E_g(m^*(T), T)$ yangi analitik (emperik) formula kelib chiqadi:

$$E_g(m^*(T), T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot \theta_p}{2} * \left(\sqrt[1+p]{1 + \left(\frac{2 \cdot T}{\theta_p} \right)^p} - 1 \right) \cdot (-1.084 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 7.580 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2.862 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.057) \quad (8)$$

Ushbu keltirib chiqarilgan (8) formula bir qator tajriba natijalarini tushuntirishga imkon beradi. 4-rasmda (2) va (8) formulalar asosida Si yarimo'tkazgichli material uchun $E_g(T)$ hamda $E_g(m^*(T), T)$ bu rasmdan ko'rinib turibiki $E_g(T)$ va $E_g(m^*(T), T)$ grafiklar farqi $T=250K$ dan boshlab yaqqol ko'rinmoqda masalan ushbu sonli tahlilni quyidagi jadvalda keltirishimiz mumkin:



4-rasm. Si yarimo'tkazgichli materialining ta'qiqlangan zona kengligini haroratga bog'liqligiga effektiv massani ta'siri.

T, K	$E_g(T), eV$	$E_g(m^*(T), T), eV$	$\frac{m^*(T)}{m^*_0}$ ning ta'siri, %
5	1.1700	1.1700	0.00
30	1.1697	1.1697	0.00
55	1.1687	1.1685	0.02
80	1.1669	1.1666	0.03
105	1.1644	1.1638	0.05
250	1.1369	1.1316	0.46
300	1.1242	1.1159	0.74
350	1.1108	1.0803	2.74
400	1.0967	1.0803	1.49
450	1.0822	1.0611	1.95
500	1.0675	1.0414	2.44

1-jadval

1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, past haroratlarda $\frac{m^*(T)}{m^*_0}$ ning $E_g(T)$ ga ta'siri deyarli sezilmayapti. Lekin harorat $T=250$ K dan boshlab, ta'qiqlangan zona kengligining qiymati $T=250$ K da 0.46% ga, $T=300$ K da 0.74% ga, $T=350$ K da 2.74% ga, $T=400$ K da 1.49% ga, $T=450$ K da 1.95% ga, $T=500$ K da 2.44% ga o'zgarishini kuzatish mumkin. Bundan kelib chiqadiki biz taklif qilayotkan model yuqori haroratlar uchun o'rinli ekan.

Xulosa

Mazkur ilmiy maqolada yarimo'tkazgich materiallarning ta'qiqlangan zona kengligining haroratga bog'liqligi va unga effektiv massaning ta'siri chuqur o'rganildi. Yarimo'tkazgichlarning fizik va elektron xususiyatlarini belgilovchi asosiy parametr bo'lgan $E_g(T)$ funksiyasi turli metodlar asosida tahlil qilindi. Tadqiqotda Feyn integral metodi va Varshni formulasi asosida hisoblashlar olib borilib, ularning natijalari solishtirildi hamda ta'qiqlangan zona kengligining haroratga bog'liq o'zgarishlari tahlil qilindi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Varshni, (1967). *Temperature dependence of the energy gap in semiconductors*.
2. Biegelsen, Mattheiss, Cohen, M. L. (1974). *Electronic Properties of GaAs and Other Semiconductors*. Physical Review
3. R.P.Hibbs (1965). *Quantum Mechanics and Path Integrals*. New York: McGraw-Hill.
4. И.М. Цидильковский. Электроны и дырки в полупроводниках. изд. "Наука". 1972. Стр.320.
5. P. Y. Yu, M. Cardona, "*Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*", Springer, 4th Edition, 2010.
6. M. C. Krantz, B. I. Halperin, "*Temperature dependence of the energy gap in semiconductors*", Physical Review B, 1985.
7. J. M. Ziman, "*Principles of the Theory of Solids*", Cambridge University Press, 2nd Edition, 1972.
8. Simon M. Sze, Kwok K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition"
9. H.D. Barber. Effective mass and intrinsic concentration in silicon. *Solid-State Electronics*. Vol. 10, pp. 1039-1051, 1967.
- 10.F.H. Gaensslen and R.C. Jaeger. Temperature dependent threshold behavior of depletion mode mosfets. *Solid-State Electronics*. Vol. 22, pp. 423-430, 1979.
- 11.Gulyamov G., Abdulazizov B. T., Baymatov P. J. Three-Band Simulation of the g-Factor of an Electron in an InAs Quantum Well in Strong Magnetic Fields // Journal of Nanomaterials. 2021. Vol. 2021, Article ID 5542559, 4 p.
- 12.Abdulazizov, B. T. Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. 2022. Vol.6, pp.32-37.
- 13.A. Caiafa, X. Wang, J.L. Hudgins, E. Santi, and P.R. Palmer. Cryogenic study and modeling of IGBTs. Institute of Electrical and Electronics Engineers. pp.1-7. 2003. [10.1109/PESC.2003.1217742](https://doi.org/10.1109/PESC.2003.1217742)