YARIMO‘TKAZGICHLARDA O‘TA O‘TKAZUVCHANLIK ENERGETIK TIRQISHINING TOK TASHUVCHILAR KONSENTRATSIYASI VA HARORATGA BOG‘LIQLIGI

Maxmudov Saloxiddin Beshim o‘g‘li
Buxoro davlat universiteti
Fizika kafedrasi 2-kurs magistri
Saidov Qurbon Sayfullayevich
Buxoro davlat universiteti Fizika kafedrasi
dotsenti, fizika-matematika fanlari nomzodi
https://doi.org/10.5281/zenodo.23629919

Annotatsiya. Degeneratsiyalangan yarimo‘tkazgichlarda o‘ta o‘tkazuvchan fazaning energetik xossalari bir zonali, uch o‘lchamli parabolik dispersiyali va kuchsiz bog‘lanishli Bardeen–Cooper–Schrieffer (BKSh) modeli doirasida nazariy-hisoblash usuli bilan o‘rganildi. Avvalgi tadqiqotdagi konsentratsiyaga bog‘liq kritik harorat ifodasi asosida nol haroratdagi energetik tirqish hamda uning nisbiy harorat bo‘yicha o‘zgarishi baholandi. Namunaviy parametrlar uchun elektronlar konsentratsiyasi ortishi bilan tirqish kattalashishi, shu bilan birga normallashtirilgan tirqish egri chiziqlarining universalligi ko‘rsatildi. Natijalar muayyan yarimo‘tkazgichda o‘lchangan eksperimental ma’lumotlar emas, modelning farazlari va qo‘llanish chegaralari muhokama etildi.
Kalit so‘zlar: yarimo‘tkazgich, o‘ta o‘tkazuvchanlik, energetik tirqish, tok tashuvchilar konsentratsiyasi, BKSh nazariyasi, juftlashish, kritik harorat.

Аннотация. В рамках однозонной трёхмерной модели с параболической дисперсией и слабой связью БКШ теоретически исследована зависимость сверхпроводящей энергетической щели в вырожденных полупроводниках от концентрации носителей и температуры. На основе ранее полученной зависимости критической температуры рассчитаны щель при нулевой температуре и её изменение с приведённой температурой. При модельных параметрах щель возрастает с концентрацией, а нормированные температурные зависимости совпадают. Представленные численные значения не являются экспериментальными измерениями конкретного вещества; обсуждены ограничения модели.
Ключевые слова: полупроводник, сверхпроводимость, энергетическая щель, концентрация носителей, теория БКШ, критическая температура.

Abstract. The superconducting energy gap in degenerate semiconductors is examined theoretically within a single-band, three-dimensional parabolic-band weak-coupling BCS model. Building upon a previously derived carrier-concentration dependence of the critical temperature, we estimate the zero-temperature gap and its reduced-temperature dependence. For illustrative parameter values, the gap increases with carrier density, while the normalized temperature profiles collapse onto a common curve. These calculations are model illustrations

rather than measurements of a particular semiconductor; underlying assumptions and applicability limits are discussed.

Keywords: semiconductor, superconductivity, energy gap, carrier concentration, BCS theory, pairing, critical temperature.

KIRISH

Yarimo‘tkazgichlarda o‘ta o‘tkazuvchanlikning kuzatilishi tok tashuvchilar soni, zona tuzilishi va kollektiv kvant holatlarning o‘zaro aloqasini o‘rganish imkonini berdi. $SrTiO_3$ da o‘ta o‘tkazuvchanlik 1964-yilda aniqlangan [1]; kuchli legirlangan olmos va kremniyda ham o‘ta o‘tkazuvchanlik kuzatilgan [2, 3]. Elektr qarshiligining yo‘qolishi bilan birga qo‘zg‘alishlar spektridagi energetik tirqish ham hosil bo‘ladi. Bu tirqishning qiymati Kuper juftlari energetik masshtabini ifodalaydi; u yarimo‘tkazgichning valent va o‘tkazuvchanlik zonalari orasidagi taqiqlangan zona kengligi bilan aynan bir kattalik emas [1–3].

Oldingi maqolamizda konsentratsiya oshganda holatlar zichligi va kritik haroratning o‘zgarishi sodda BKSh modeli asosida tekshirilgan [4]. Ushbu ishning maqsadi mazkur yondashuvni energetik tirqishga tatbiq etib, $\Delta(0,n)$ va $\Delta(T,n)$ bog‘lanishlarini miqdoriy tavsiflash, normallashtirishning fizik ma’nosini aniqlash va modeldan chiqadigan xulosalarni uning chegaralaridan ajratishdan iborat.

ADABIYOTLAR TAHLILI

BKSh nazariyasi fonon vositasidagi effektiv tortishish sharoitida elektronlar juftlashishi, qo‘zg‘alish energiyasi va kritik harorat orasidagi bog‘lanishni beradi [5]. Kuchsiz bog‘lanishli izotrop s-to‘lqinli holatda $2\Delta(0)/(k_B T_c) \simeq 3.52$ universal nisbat hosil bo‘ladi. Koonce va hammualliflar $SrTiO_3$ uchun kritik haroratning konsentratsiyaga nomonoton bog‘liqligini aniqlagan [6]. Bu fakt real yarimo‘tkazgichlarda juftlashish kuchi, ekranlash va elektron zona tuzilishi konsentratsiya bilan o‘zgarishi mumkinligini eslatadi. Shu sababli doimiy effektiv tortishish potensialiga asoslangan hisoblashlar materialga xos tajriba bashorati emas, balki nazariy boshlang‘ich yaqinlashuvdir.

NAZARIY MODEL VA HISOBLASH METODIKASI

Uch o‘lchamli izotrop parabolik zonada bir spin uchun Fermi sathidagi holatlar zichligi $N(0,n) \propto n^{1/3}$ bo‘ladi. Effektiv juftlashtiruvchi potensial V, Debay harorati Θ_D va effektiv massa konsentratsiyaga bog‘liq emas, deb qabul qilamiz. Bog‘lanish parametri va kritik harorat [4, 5] quyidagicha yoziladi:

$$\lambda(n) = \lambda_0 \left(\frac{n}{n_0}\right)^{1/3} \qquad (1)$$

$$T_c(n) = 1.14\,\Theta_D \exp\left[-\frac{1}{\lambda(n)}\right] \qquad (2)$$

Izotrop kuchsiz bog‘lanishli BKSh nisbati $2\Delta(0,n) = 3.52 k_B T_c(n)$ bo‘lgani uchun: [5]

$$\Delta(0,n) = 1.76\, k_B T_c(n) \qquad (3)$$

$$\Delta(0,n) = 2.0064\, k_B \Theta_D \exp\left[-\frac{1}{\lambda_0 (n/n_0)^{1/3}}\right] \qquad (4)$$

Temperaturaviy o‘zgarishni tavsiflash uchun BKSh tirqishining keng ishlatiladigan yaqinlashtiruvchi ifodasidan foydalanildi (aniq integral tenglamaning bevosita sonli yechimi emas): [5]

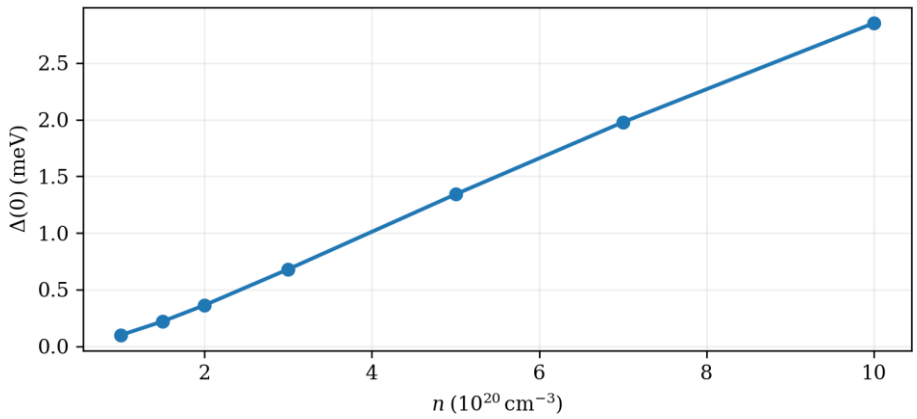
$$\Delta(T,n) \approx \Delta(0,n)\tan\left[1.74\sqrt{\frac{T_c(n)}{T}-1}\right], \quad 0 < T < T_c(n) \qquad (5)$$

Bunda $T = 0$ da (3) tenglamadagi limit olinadi; $T \geq T_c$ bo‘lganda model doirasida $\Delta = 0$. Hisoblash parametrlari: $\Theta_D = 300$ K, $n_0 = 10^{20}$ cm^{-3}, $\lambda_0 = 0.16$ va $m^* = 0.5m_e$. Elektronlar konsentratsiyasi $n = (1-10)\times 10^{20}$ cm^{-3} oralig‘ida tanlandi. Energiya birligi uchun $k_B = 0.0861733$ meV/K ishlatildi. Parametrlar muayyan materialga moslashtirilmagan.

NATIJALAR VA MUHOKAMALAR

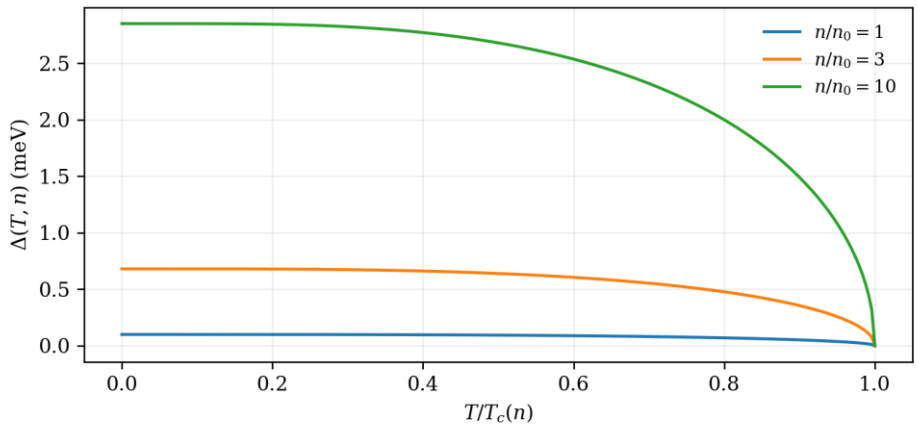
1-jadval. Namunaviy BKSh parametrlarida kritik harorat va energetik tirqishning hisoblangan qiymatlari. Oxirgi ikki ustun mos ravishda $T/T_c = 0.50$ va 0.90 nuqtalaridagi (5) tenglama bo‘yicha natijalardir.

n/n_0	$\lambda(n)$	T_c, K	$\Delta(0)$, meV	$\Delta(0.5T_c)$, meV	$\Delta(0.9T_c)$, meV
1	0.1600	0.660	0.100	0.094	0.052
1.5	0.1832	1.455	0.221	0.207	0.115
2	0.2016	2.397	0.364	0.342	0.190
3	0.2308	4.488	0.681	0.640	0.356
5	0.2736	8.844	1.341	1.261	0.702
7	0.3061	13.034	1.977	1.858	1.034
10	0.3447	18.799	2.851	2.680	1.491



1-rasm. Nol haroratdagi energetik tirqishning tok tashuvchilar konsentratsiyasiga bog‘liqligi (nazariy model).

Jadval va 1-rasmga ko‘ra, tok tashuvchilar konsentratsiyasi n_0 dan $10n_0$ gacha ortganda $\Delta(0)$ qiymati taxminan 0.100 meV dan 2.851 meV gacha oshadi. Bunga (1) tenglamadagi $\lambda(n)$ ning ortishi va (4) tenglamadagi eksponensial bog‘lanish sabab bo‘ladi. Mazkur o‘sishning monotonligi doimiy V va o‘zgarmas fonon masshtabi farazlaridan kelib chiqadi [4, 5].



2-rasm. Turli konsentratsiyalarda energetik tirqishning normallashtirilgan haroratga bog‘liqligi (nazariy yaqinlashuv).

Ikkinchi rasmda $T/T_c(n)$ bir xil bo‘lsa, konsentratsiya katta namunada absolyut energetik tirqish ham kattaroq bo‘lishi ko‘rinadi. Ayni vaqtda $\Delta(T,n)/\Delta(0,n)$ nisbati (5) tenglama doirasida faqat $T/T_c(n)$ ga bog‘liq: barcha hisoblangan egri chiziqlar shu normallashtirilgan koordinatalarda ustma-ust tushadi. Masalan, $T/T_c = 0.50$ da nisbat taxminan 0.94, $T/T_c = 0.90$ da esa 0.52 ga teng. Bu ko‘rinish bir xil izotrop BKSh mexanizmining universal temperaturaviy profili sifatida izohlanadi, lekin turli haqiqiy materiallarda parametrlarning o‘zgarishini avtomatik ravishda tasdiqlamaydi [5].

Modelni fizik talqin qilishda uch chegaraga e’tibor qaratiladi. Birinchidan, yarimo‘tkazgichning odatiy zona tirqishi E_g bilan Kuper juftlarini uzishga bog‘liq 2Δ energetik masshtabi butunlay boshqa tushunchalardir. Ikkinchidan, haqiqiy $SrTiO_3$ singari tizimlarda konsentratsiyaga bog‘liq ekranlash, fonon modalar va ko‘p zonalilik $T_c(n)$ va $\Delta(n)$ ni nomonoton qilishi mumkin [6]. Uchinchidan, BKSh yaqinlashuvida Fermi energiyasi juftlashish uchun xarakterli fonon energiyasidan yetarlicha katta bo‘lishi nazariy asoslarning biri hisoblanadi; juda kam tashuvchili tizimlarda bu shartni alohida tekshirish kerak.

Shuningdek, yuqorida qo‘llanilgan $\Delta(T)$ ifodasi o‘ta o‘tkazuvchan faza shakllangan holatdagi spektral tartib parametrini tavsiflaydi. U o‘z-o‘zidan Meyssner effektining yoki global faza kogerentligining barcha shartlarini tekshirmaydi. Shuning uchun energetik tirqishning mavjudligi va to‘laqonli makroskopik o‘ta o‘tkazuvchanlikni aniqlash vazifalari tajribada qo‘shimcha o‘lchovlarni talab etadi [5].

XULOSA

Degeneratsiyalangan yarimo‘tkazgichning bir zonali izotrop BKSh modeli doirasida energetik tirqishning tok tashuvchilar konsentratsiyasiga va haroratga bog‘liqligi hisoblandi. Tanlangan namunaviy parametrlar uchun $n/n_0 = 1$ dan 10 gacha oshganda $\Delta(0)$ sezilarli ortdi; bu holat effektiv bog‘lanish parametrining $n^{1/3}$ qonun bo‘yicha o‘sishi va kritik haroratga eksponensial kirishi bilan izohlandi. Nisbiy energetik tirqish $\Delta(T,n)/\Delta(0,n)$ ning $T/T_c(n)$ bo‘yicha konsentratsiyadan mustaqil bo‘lishi model universalligini ifodalaydi. Natijalar muayyan material uchun tajribaviy prognoz emas; kelgusi tadqiqotlar uchun real yarimo‘tkazgichning fonon spektri, samarali bog‘lanish kuchi va elektron tuzilishini hisobga olish talab etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Schooley J. F., Hosler W. R., Cohen M. L. Superconductivity in Semiconducting $SrTiO_3$ // Physical Review Letters. 1964. Vol. 12. P. 474–475. DOI: 10.1103/PhysRevLett.12.474.
2. Ekimov E. A. et al. Superconductivity in diamond // Nature. 2004. Vol. 428. P. 542–545. DOI: 10.1038/nature02449.
3. Bustarret E. et al. Superconductivity in doped cubic silicon // Nature. 2006. Vol. 444. P. 465–468. DOI: 10.1038/nature05340.
4. Maxmudov S. B., Saidov Q. S. Yarimo‘tkazgichlarda o‘ta o‘tkazuvchanlik kritik haroratining tok tashuvchilar konsentratsiyasiga bog‘liqligi // Mingyillik tadqiqot jurnali: Kelajakka yo‘l. 2026. 2-jild. 2-son. B. 451–457.
5. Bardeen J., Cooper L. N., Schrieffer J. R. Theory of Superconductivity // Physical Review. 1957. Vol. 108. P. 1175–1204. DOI: 10.1103/PhysRev.108.1175.
6. Koonce C. S. et al. Superconducting Transition Temperatures of Semiconducting $SrTiO_3$ // Physical Review. 1967. Vol. 163. P. 380–390. DOI: 10.1103/PhysRev.163.380.