

YARIMKEÇİRİCİ NAZİK TƏBƏQƏLƏRDƏ İFRATKEÇİRİCİLİYİN ELEKTRON-FONON MEXANİZMİ

HACİYEVA VALİDƏ İBRAHİM qızı

Naxçıvan Dövlət Universiteti "Elektroenergetika mühəndisliyi" kafedrası
validehaciyeva@ndu.edu.az

İfratkeçiricilik effekti istər nəzəri və istərsə də praktik cəhətdən çox mühüm xüsusiyyətləri ilə fərqlənən və geniş təxini təbiiqlərə malik olan bir effektdir. Ona görə də istər metallarda və istərsə də yarımkeçiricilərdə bu effektin askar edilməsi və onun mexanizminin öyrənilməsi bərk cisimlər fizikasının mühüm problemlərindən biri hesab edilir.

Açar sözlər: ifratkeçiricilik, kriogen fizikası, böhran maqnit sahəsi, fonon, cırlaşmış yarımkeçirici.

Giriş

Nazik təbəqələrdə ifratkeçiriciliyin mexanizmini araşdırmadan əvvəl bu effektin kəşf olunma tarixinə qısaca nəzər salaq. Məlumdur ki, elmi ədəbiyyatda aşağı temperaturun fizikasına bəzən də kriogen fizikası deyilir. Kriogen yunanca "krio" sözündən götürülmüşdür və "soyuq" mənasını verir.

Qeyd edək ki, kriogen mayelərin alınması tarixi 1877-ci ildən başlayıb. Bu sahədə fransız tədqiqatçısı Kalyetin asetilenin, oksigenin və azotun soyudulması üzrə apardığı təcrübə tədqiqatları çox uğurlu nəticələr vermişdir. Sonralar polyak fizikləri Olmevski və Voroblevski maye azotu, ingilis fiziki Dyüar isə maye hidrogeni aldılar. 1908-ci ildə isə Leyden universitetinin fizika laboratoriyasında Komerling-Onnesin rəhbərliyi altında dünyada ilk dəfə olaraq maye helium alındı. Həmin vaxtdan başlayaraq fiziklər bərk cisimlərin aşağı temperatur oblastlarında müxtəlif fiziki xüsusiyyətlərinin tədqiqatı ilə məşğul olmağa başladılar və bir neçə yeni effektlər kəşf etdilər. Hansı ki, belə effektləri yuxarı temperatur oblastlarında müşahidə etməklə hələ də mümkün olmamışdır. Bəle effektlərdən biri də ifratkeçiricilik effektidir. Bu effekt 1911-ci ildə Komerling-Onnes tərəfindən maye helium temperaturunda cıvənin (Hg) müqavimətinin temperaturdan asılılığını ölçərkən askar edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, maye heliumun qaynama temperaturunda ($T = 4,2 \text{ K}$) cıvənin xüsusi elektrik müqaviməti (ρ) birdən-birə sıçrayışla sıfıra düşür. Müqavimət sıfır olduğundan elektrik keçiriciliyi ifrat dərəcədə artır. Ona görə də bu hadisəni ifratkeçiricilik hadisəsi adlandırmışlar. [1]

İfratkeçiricilik effekti istər nəzəri və istərsə də praktik cəhətdən çox mühüm xüsusiyyətləri ilə fərqlənən və geniş təxini təbiiqlərə malik olan bir effektdir. Ona görə də istər metallarda və istərsə də yarımkeçiricilərdə bu effektin askar edilməsi və onun mexanizminin öyrənilməsi bərk cisimlər fizikasının mühüm problemlərindən biri hesab edilir.

İfratkeçiricilik hadisəsini xarakterizə edən əsas parametrlər bunlardır: 1) ifrat-keçiricilik və ya böhran temperaturu (T_b), 2) böhran maqnit sahəsi (H_b) və 3) böhran cərəyanı (J_b).

Hər bir ifrat keçirici maddə konkret bir böhran temperaturuna, böhran maqnit sahəsinə və böhran cərəyanına malikdir.

Qeyd edək ki, ifrat keçiriciliyin mexanizmi (sirri) təxminən yarım əsrə qədər dəqiq müəyyənləşdirilə bilmədi. Yalnız 1957-ci ildə Bardin, Kuper və Şiffer

tərəfindən onun makroskopik nəzəriyyəsi (BKŞ nəzəriyyəsi) yaradıldı. Bu effektin təbiəti, onun əsas fərqləndirici xüsusiyyətləri və nəhayət onun kvant-mexaniki xarakterə malik olması askarlandı. Bu nəzəriyyədə aşkar edildi ki, ifrat keçiricilik effekti əsasən elektronların qarşılıqlı təsiri hesabına baş verir, yəni metalda elektronlar hərəkət edərkən qarşılıqlı təsir yaranır və bu elektronlar elektrik qüvvələrinin hesabına kristal qəfəsi deformasiyaya uğradırlar, daha doğrusu qəfil polyarlaşdırırlar. Beləliklə, qəfədə ionların yerdəyişməsi (müəyyən qədər sürüşməsi) digər elektronların halına təsir edir. Beləliklə, kristallik qəfəs sanki elektronlar arasındakı qarşılıqlı cazibə üçün bir-biri ilə əlaqə (cüt) yaradırlar, yəni elektron-foton mexanizmi yaranır. Daha dəqiq desək Kuper cütləri yaranır ki, bularda ifratkeçiriciliyin yaranmasına səbəb olur. Bir-biri ilə güclü qarşılıqlı təsirdə olan elektronlar əks impulsa və spinə malik olurlar. Yarımkeçiricilərdə ifratkeçiricilik hadisəsi ilk dəfə olaraq 1963-cü ildə Gete kristalında müşahidə edilmişdir ($T \approx 0,08 \text{ K}$).

İstər massiv və istərsə də nazik yarımkeçirici təbəqələrdə ifrat keçiriciliyin mexanizminin araşdırılması sahəsində 1965-ci ildən başlayaraq çox mühüm və ardıcıl işlər görülür.

Təqdim edilən bu işdə yarımkeçirici nazik təbəqələrdə ifratkeçiriciliyin elektron-tenon mexanizminin bəzi xüsusiyyətləri araşdırılır. Yarımkeçirici və yarım-metal nazik təbəqələrdə ifratkeçiricilik hadisəsi özünün kvant təbiətinə və bəzi xüsusiyyətlərinə görə massiv nqmunələrindən kəskin fərqlənir, Bu onunla əlaqədardır ki, nazik təbəqələrdə yükdaşıyıcıların hal sıxlığı (N_{tab}) təbəqəsinin qalınlığından (L) və Kuper cütlərinin xarakterindən asılıdır. Müəyyən edilmişdir ki, Kuper cütlərini əmələ gətirən elektronların hərəkət istiqaməti müstəvisinin (P) əksi istiqamətində yönəlmişdir və eyni bir S kvant ədədinə malik olmalıdır. [2] Başqa sözlə, eyni bir alt z_0 -nada yerləşdirilməlidir. Bu hal altzonalar arasındakı məsafə $\Delta \mathcal{E}_{s,s+1} \gg kT$ soltini odədikdə, yəni $L \leq 10^{-5}$ sm qiymətində dənildir. Verilmiş altzonada Kuper cütlərinin yaranması ilk noybədə bu altzonada yərləşən elektronların fononlar vasitəsilə bir-birini cəzb etməsi hesabına, ikincisi isə əlaqəli hissəciklərin başqa pedzonalara keçməsi hesabına yaranır. Müəyyən edilmişdir ki, [3] ifratkeçiricilik hadisəsinin bas verməsi üçün elektronların qısa dalğa uzunluqlu fononlarla qarşılıqlı təsiri daha mühüm rol oynayır. Bəle fononların dalğa uzunluğu təbəqənin qalınlığından çox-cox kiçik olur, yəni $\lambda \ll L$. Ona görə də sərbəst tə-

bəqələrdə fononların spektrini elə massiv nümunələrdəki fononların spektrləri kimi götürmək olar. $n < A \setminus L^3$ şərti ödəndikdə (bu sərtə konsentrasiya şərti də deyilir, n - elektronların konsentrasiyası; A -ölçüsüz əmsaldı və qiyməti $3\pi \setminus 2$ -yə bərabərdir) yəni, bir altzonanın olduğu hal üçün elektronların kvazimpulsunun proyeksiyası (P_z) təyin olunmalıdır və $\Delta P_z \sim \pi \setminus I$ olmalıdır. Ona görə də elektron - fonon qarşılıqlı təsirində əsasən o fononlar iştirak edəcəkdirlər ki onların kvazimpulsunun eninə proyeksiyaları ($-\pi \setminus I \div +\pi \setminus I$) intervalında dəyişmiş olsun.

Nazik təbəqələrdə bir altzonanın olduğu halda qadağan olunmuş zonanın eni yəni energetik yarıq və böhran temperaturu (T_b) əsasən Kuper təniyindən istifadə edilməklə təyin edilir. [3]

$$1 = \frac{g}{2V} \cdot \sum \frac{\varepsilon}{\varepsilon} \quad (1)$$

g -elektron-fonon qarşılıqlı təsir sabitidir və onun qiyməti [4]-də təyin edilmişdir. Düsturda cəmləmə iki ölçülü oblast üçün aparılır. Cırlaşmış yarımkəçiricilər və yarımmetallar üçün bu ifadə T_b – in təbəqənin qalınlığı L -dən eksponensial asılılığına gətirib çıxarır.

$$T_b = 1.14 \quad \hbar \omega_D \exp(-2\pi \hbar^2 / m^* L g) \quad (2)$$

$m^* L$ - yükdaşıyıcının nazik təbəqədəki effektiv kütləsi; ω_D - Debay tezliyidir, Kifayət qədər qalın təbəqələr üçün ($L \geq 10^5$ sm) böhran temperaturu T , massiv nümunənin böhran temperaturuna T_{bmas} . yaxınlaşır və demək olar ki, L -dən asılı olmur. Energetik yarıq isə aşağıdakı düsturla təyin edilir:

$$\Delta = 2\hbar \omega_D \exp\left(-\frac{1}{g \cdot N(L)}\right) \quad (3)$$

Düsturdan görüldüyü kimi Δ kəmiyyəti təbəqənin qalınlığından asılıdır, çünki $N(L) \sim 1 \setminus L$ -dir. Bu isə o deməkdir ki, təbəqənin qalınlığının azalması ilə Δ eksponensial olaraq artır. Δ -ın L -dən asılılığına həmçinin [5]-də baxılmışdır. Konsentrasiya şərti ödəndikdə Δ kəmiyyəti elektronların enerjisindən və konsentrasiyasından asılı olmur.

Mütləq sıfır temperatüründə ($T=0$) BKŞ nəzəriyyəsinə görə T_b , ilə Δ arasında aşağıdakı kimi əlaqə mövcuddur:

$$2\Delta = 3,52kT_b \quad (4)$$

(2) düsturundan görünür ki, əgər massiv şəkildə götürülmüş yarımkəçirici və ya yarımmetal ifratkeçiricidirsə, onda kifayət qədər kiçik qalınlıqlı nazik təbəqələrdə ifratkeçiricilik temperaturunu, yəni böhran

temperaturunun qiymətini daha da artırmaq olar. Nazik təbəqələrdə yalnız bir altzonanın olduğu hal üçün böhran temperaturunun qiyməti yükdaşıyıcıların konsentrasiyasından zəif asılı olur. Bu onunla əlaqədardır ki, Fermi səviyyəsi üzərində elektronların hal sıxlığı konsentrasiyadan asılı deyil və ω_D xarakterik fonon tezliyi ilə g Sabiti də o gədər güclü asılılıq yarada bilmir.

Müəyyən edilmişdir ki, yarımkəçirici nazik təbəqələrdə elektronların Kuper cütləri yaratması əsasən Debay tezliyindən kiçik tezliyə malik olan fononlar ilə və həmçinin Kulon qarşılıqlı təsir qüvvələrinin atomlar arası məsafədən böyük məsafələrdə zəifləməsi ilə əlaqədardır. Ona görə də, belə hesab olunur ki, dielektrik nüfuzluğu böyük olan yarımkəçiricilərdə ifratkeçiriciliyin yaranma ehtimalı da böyükdür. Böyük dielektrik nüfuzluğuna malik olan strukturlarda ümumi halda fotonun enerjisi $\hbar \omega_D$ qiymətə kiçik olur ki, bu da böhran temperaturunun qiymətinin azalmasına gətirib çıxarır

Energetik yarıq üçün verilmiş tənlili həll edərəkən belə bir nəticəyə gəlmək olar ki, cırlaşmış yarımkəçirici nazik təbəqələrdə böhran temperaturunun qiyməti aşağıdan və həm də yuxarıdan məhdudlaşır.

Deməli, energetik yarığın maksimum qiyməti $T = T_m$, oldugda alınır, yəni:

$$T_m = \frac{\pi \hbar^2 N(L)L}{2,7 \cdot m^* L} \quad (5)$$

Yarımkəçiricilərdə aşqar atomlarının konsentrasiyası artdıqda ifratkeçiricilik oblastı bir qədər də genişlənir. Konsentrasiyasının qiyməti 10^{16} sm^{-3} -a çatdıqda aşqar atomlarının səviyyəsi bir zona yaradır ki, bu da böhran temperaturunun azalmasına gətirib çıxarır.

Yuxarıda söylənilənlərin hamısı BKŞ modeli çərçivəsində təmiz nümunələr üçündür. Eksperimentdə alınan təbəqələr məlum məsələdir ki, ideal təmiz olurlar, yəni tərkiblərində müəyyən qədər aşqar atomları olur ki, bu da altzonaların bir-birinə nəzərən müəyyən qədər yerdəyişməsinə səbəb olur. Bu isə yükdaşıyıcıların yüyürüklükləri üçün sərt bir kriteriyaya gətirib çıxarır:

$$\mu_{tab} (\text{sm}^2 \cdot b^{-1} \cdot \text{san}^{-1}) > 160 \setminus S \quad (6)$$

Bu şərt isə nazik təbəqələrin kvant ölçü effektlərini müşahidə etmək üçün nə dərəcədə yararlı olub-olmamasını müəyyənləşdirməyə imkan verir. Nəticə olaraq onu söyləmək olar ki, massiv maddədən nazik təbəqəyə keçdikdə elektron-fonon mexanizminə əsasən böhran temperaturunun monoton olaraq artması müşahidə edilə bilər.

[1] *M. Zərbəliyev*. Yarımkəçiricilər fizikası, Bakı, 2008, 460s.
 [2] *B. Əsgərov*, Bərk cisimlər nəzəriyyəsi, BDU nəşriyyatı, Bakı, 2001, 154 s.
 [3] *V. Tahirov*. Yarımkəçiricilər fizikasının əsasları. "Maarif" nəşriyyatı, Bakı, 1984, 326 s.

[4] *M. Zərbəliyev*. Yarımkəçiricilərin elektrofiziki parametrlərinin ölçmə üsulları, SDU nəşriyyatı, Sumqayıt, 2004, 117 s.
 [5] *Ə. Abdinov, İ. Həsənov, T.X. Hüseyinov*. "elektron cihazları və emissiya elektronikasının əsasları". Bakı, 2011, 360 s.
 [6] *R. Hümbətov*. "Bərk cisim elektronikasını" Bakı, "Təhsil" nəşriyyatı, 2002, 172 s.

- [7] *E. Eyvazov* “Bərk cisimlərin fizikası” Bakı, “Təhsil” nəşriyyatı, 2003, 455 s.
- [8] *Ə. Abdinov, V. Səfərov* “Elektron texnikasının əsasları və nanotexnologiyanın əsasları”, “Təhsil” nəşriyyatı, 2010, 183s.
- [9] *A. Лебедев.* «Физика полупроводниковых приборов» Москва, физматлит, 2008, 487 с
- [10] *A.S. Abdinov, R.F. Babayeva, S.I. Amirova and R.M. Rzayev*, *Semiconductors* 47(8) (2013) 1013. [Crossref](#), [ISI](#), [ADS](#), [Google Scholar](#)
- [11] *H.B. Gasimov and R.M. Rzayev*, *Int. J. Mod. Phys. B* 35(8) (2021) 2150113. [Link](#), [ISI](#), [ADS](#), [Google Scholar](#)
- [12] *F.G. Agayev et al.*, *J. Supercond. Novel Magn.* 33 (2020) 2867. [Crossref](#), [ISI](#), [Google Scholar](#)
- [13] *A.S. Abdinov, R.F. Babaeva, A.T. Bagirova and R.M. Rzaev*, *Inorg. Mater.* 42(9) (2003) 937. [Crossref](#), [ISI](#), [Google Scholar](#)