



ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ

НАМАНГАН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

Физика-техника факультети

Физика йўналиши

5440100 - Физика йўналиши бўйича бакалаврият

босқичини битирувчи

АБДУЛАЗИЗОВ БАХРОМ ТОШМИРЗАЕВИЧНИНГ

АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРНИНГ КУБО-ГРИНВУРД

ФОРМУЛАСИНИ ЭРЕКТРОНЛАРНИ ОРТИК ЎТИШ

ТУРЛАРИГА МОСЛАШТИРИШ мавзусидаги

БИТИРУВ
МАЛАКАВИЙ
ИШИ

Илмий раҳбар:



доц. Р.Икромов

НАМАНГАН – 2010

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ
ВАЗИРЛИГИ**

НАМАНГАН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

Физика-техника факультети

Физика йўналиши

Қўлёзма ҳуқуқида

УДК 621.315.592

5440100 – Физика йўналиши бўйича бакалавриат босқичи битирувчиси

АБДУЛАЗИЗОВ БАХРОМ ТОШМИРЗАЕВИЧНИНГ

АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРНИНГ КУБО-ГРИНВУД ФОРМУЛАСИНИ
ЭЛЕКТРОНЛАРНИ ОПТИК ЎТИШ ТУРЛАРИГА МОСЛАШТИРИШ мавзусидаги

БИТИРУВ МАЛАКАВИЙ ИШИ

Илмий раҳбар физ.-мат.

фанлари номзоди, доцент



Р. ИКРАМОВ

НАМАНГАН-2010

МУНДАРИЖА

	бет
КИРИШ _____	3
1-БОБ. АДАБИЁТЛАР ТАҲЛИЛИ _____	5
1.1. Аморф яримўтказгичларда фотонларни фундаментал ютилиш соҳаси спектрлари _____	5
1.2. Фундаментал ютилиш соҳасининг чегарасида оптик ютилиш спектрлари _____	11
1.3. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари турлари ва зичлигининг тақсимотлари _____	17
1.4. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларда электронларни оптик ўтиш механизмлари ва турлари _____	21
2-БОБ. ГИДРОГЕНИЗАЦИЯЛАНГАН АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ОПТИК ЮТИЛИШ КОЭФФИЦИЕНТИ СПЕКТРАЛ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ ҲИСОБЛАШ _____	30
2.1. Кубо-Гринвуд формуласини ютилган фотонларнинг энергиясига ва электронларни оптик ўтиш турларига мослаштириш _____	30
2.2. Кубо-Гринвуд формуласини гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг электрўтказувчанлигини типига боғланишлари _____	33
НАТИЖА ВА ХУЛОСАЛАР _____	36
Фойдаланилган адабиётлар рўйхати _____	37
Чоп этилган илмий ишлар рўйхати _____	39

КИРИШ

Кейинги вақтларда аморф яримўтказгичларга бўлган қизиқишнинг бироз пасайганлигини сезиш мумкин. Буни асосий сабабларидан бири гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич пардаларининг фотоэлектрик характеристикаларини стабил эмаслигидир. Аммо гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлар кристалл бўлмаган яримўтказгичлар ичида энг кўп ўрганилган материал ҳисобланади. Шунинг учун уларни кристалл бўлмаган яримўтказгичлар учун модел сифатида қараш қабул қилинган. Бошқа томондан олганда барча кристалл бўлмаган яримўтказгичларни оптик хоссалари сифат жиҳатидан бир хил бўлиб, миқдор жиҳатидан ҳам катта фарқ қилмайди. Айниқса гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг оптик хоссаларини ўрганиш ҳозирги вақтда кенг тадқиқотлар олиб борилётган поли- ва микрокристалл яримўтказгичлар учун ҳам катта аҳамиятга эга. Бундан ташқари электронларни зоналараро ва киришмалардаги электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтишлар билан аниқланадиган оптик параметрлар барча яримўтказгичлар учун бир хил маънога эга. Юқоридагиларни ҳисобга олиб ушбу ишда аморф яримўтказгичларга хос бўлган оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаларини Кубо-Гринвуд формуласидан Дэвис-Мотт яқинлашиш усули билан ҳисоблашда гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни модел сифатида танланган.

Мавзунинг долзарблиги. Маълумки гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлар асосида бир қанча асбоблар тайёрланади. Уларни асосий қисмини оптоэлектроника қурилмалари ташкил қилади. Масалан: катта юзали куёш элементлари, тасвир узатиш қурилмасини (видикон) нишони, интеграл видеосенсорлар, электрофотографик фотоўтказгичлар ва ҳ.к. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни асосий оптик параметрларидан бири бўлган оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаларининг баъзи соҳалари (айниқса нуқсонларда ютилиш соҳаси) ташқи таъсирларга (температура, ёруғлик ва ҳ.к.) жуда сезгир бўлиб, улар таъсирида ўзгаришларга учрайди.

Ишнинг мақсади ва вазифаси. Ушбу ишда аморф яримўтказгичларга хос бўлган оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикасини Кубо-Гринвуд формуласидан ҳисоблашда, бу формулани электронларни оптик ўтиш турларига мослаштириш кўзда тутилган.

Ишнинг илмий янгилиги:

1. Биринчи марта аморф яримўтказгичларда оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаси учун «Кубо-Гринвуд формуласи»ни Дэвис-Мотт яқинлашиш усули билан ҳисоблашда уни ютилган фотонларни энергиясига боғлиқ ҳолда электронларни оптик ўтиш турларига мослаштириб олиш кераклиги кўрсатилди.

2. Биринчи марта ютилиш коэффициентининг қийматлари «Кубо-Гринвуд формуласи»даги интегрални чегарасига кучли боғлиқ бўлиши кўрсатилди ва спектрининг турли соҳалари учун уларини аниқловчи ифодалар келтириб чиқарилди.

Ишнинг илмий ва амалий аҳамияти. БМИ и аморф ярим ўтказгичларнинг оптик хоссаларини аниқловчи асосий параметрлардан бири бўлган оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаларини ҳисоблашга бағишланган. Бу ишда олинган натижаларни нафақат аморф яримўтказгичлар учун балки, барча яримўтказгич материаллар учун ҳам қўлланилиши мумкин. Олинган натижалардан қуйидагиларини илмий ва амалий аҳамияти катта деб ҳисоблайман.

1. Аморф яримўтказгичларнинг оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаларини Дэвис-Мотт яқинлашиш усули билан Кубо-Гринвуд формуласидан ҳисоблашда, электронларни оптик ўтишларини соҳаларга ва турларга ажратиб ўрганиш шарт эканлигини кўрсатилиши.

2. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларга хос бўлган электронларни барча оптик ўтишлари учун, бу ўтишларда иштирок этувчи электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти ва ютилиш коэффициенти спектрал характеристикалари орасидаги боғланишларни аниқланиши.

Ушбу ишда олинган натижалар оптоэлектроника асбобларини оптик хоссаларини яхшилашда кенг қўлланилиши мумкин.

БМИ ида қуйидаги муҳим илмий муаммоларни ҳал қилишга эришилди. Биринчи марта «Кубо-Гринвуд формуласи»ни Дэвис-Мотт яқинлашиши усули билан ҳисоблашда ундаги интегрални ютилган фотонларни энергиясига ва электрон ўтишларни турларига мослаб олиш кераклиги кўрсатилди.

1-БОБ. АДАБИЁТЛАР ТАҲЛИЛИ

Маълумки, кристалл бўлмаган яримўтказгичларда фотонларни оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикасини ўрганишда, уни ютилган фотонларнинг энергиясига боғланиши 1.1-расмдаги каби бешта соҳага ажратиб олинади [1]. 1-фундаментал ютилиш соҳаси бўлиб унда ютилган фотонларни энергияси ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигидан (E_g) катта бўлади. Бу соҳада ютилиш коэффициентининг қийматини асосан электронларни валент зонадан ўтказувчанлик зонасига оптик ўтишлари аниқлайди.

Ютилган фотонларнинг энергияси E_g га яқин бўладиган 2-соҳа фундаментал ютилиш чегараси деб номланади. Аморф яримўтказгичларнинг оптик ютилиш коэффициенти қийматларини ҳисоблаш мураккаб бўлган соҳалардан бири бўлиб, унда зоналараро электрон ўтишлари билан бирга, битта ҳолати рухсат этилган зоналарнинг «думлари»да жойлашган локаллашган, иккинчи ҳолати эса шу зоналардаги локаллашмаган ҳолатлар орасидаги электрон ўтишларини ҳам ҳисобга олиш керак бўлади [2].

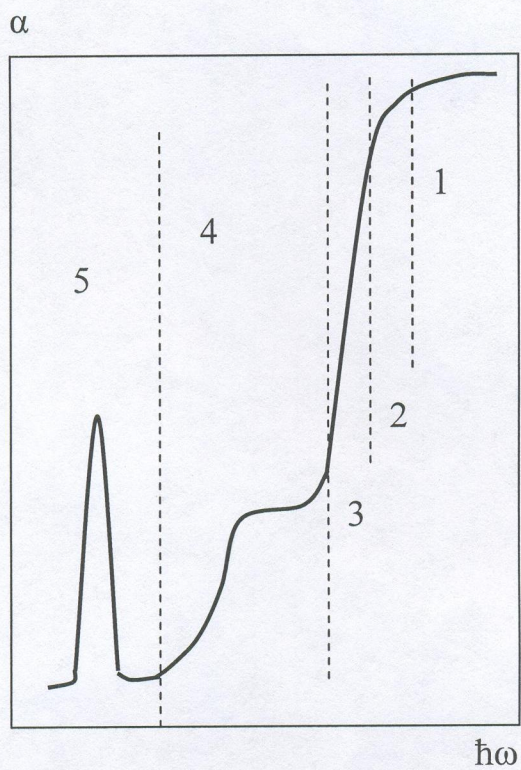
Фотонларнинг энергияси E_g дан кичик бўладиган 3-соҳани, экспоненциал ютилиш соҳаси деб номланади. Бу соҳада деярли барча аморф яримўтказгичлар учун Урбах қондаси бажарилади [3]. Ҳозирги пайтда адабиётларда Урбах қондаси бажарилишини рухсат этилган зоналарнинг «думлари»да жойлашган локаллашган электрон ҳолатлари зичлиғини энергияга боғланиши экспоненциал бўлиши билан тушунтирилади [4]. Чунки бу соҳада ютилиш коэффициенти қийматларини рухсат этилган зоналарнинг «думлари»даги электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимооти аниқлайди [5].

4-соҳа асосан кристалл бўлмаган яримўтказгичларга хос бўлиб, уни нуқсонларда ютилиш соҳаси деб номланади. Бу соҳада ютилиш коэффициенти қийматларини электронларни узилган боғланишлар (нуқсонлар, легирловчи киришмалар) ва рухсат этилган зоналардаги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлари аниқлайди. Бу спектрлардан фойдаланиб аморф яримўтказгичлардаги нуқсонларни концентрацияси аниқланади [6].

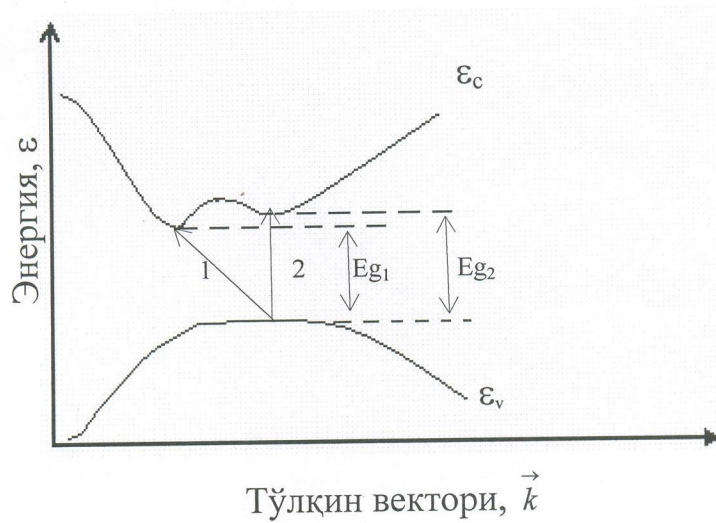
Аморф яримўтказгичларнинг ютилиш коэффициенти спектрларидаги инфрақизил ютилиш соҳасини эса (5-соҳа) асосан, чуқур энергетик сатҳли ва структура тўридаги радиацион нуқсонлар ҳамда рухсат этилган зоналардаги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлар аниқлайди [7]. Айрим намуналарнинг инфрақизил ютилиш соҳасида кучли ютилиш соҳалари ҳосил бўлиши мумкинлиги [8] ишларда тажриба натижаларига асосан кўрсатилган.

1.1. Аморф яримўтказгичларда фотонларни фундаментал ютилиш соҳаси спектрлари

Фундаментал ютилиш соҳасида зоналараро электрон ўтишлари билан бирга рухсат этилган зоналарнинг «думлари»да ётувчи локаллашган электрон ҳолатлари иштирок ётувчи оптик ўтишлар ҳам бажарилади. Аммо бу ўтишлар аниқлайдиган ютилиш коэффициенти спектрал характеристикалари локаллашмаган ҳолатлараро ютилишларникига нисбатан кичик бўлади ва улар Тауц қондасига бўйсинади [9]. Фундаментал ютилиш соҳасидаги фотонларни ютилиш коэффициенти спектрал характеристикасининг қийматларидан фойдаланиб, электронларни вертикал ва новертикал оптик ўтишлари (1.2-расм) учун ҳаракатчанлик тирқишининг (тақиқ зона) энергетик кенглиги аниқланади [10].



1.1-расм. Аморф яримўтказгичларнинг оптик ютилиш коэффиценти спектрал характеристикаларининг схематик кўриниши. 1-Фундаментал ютилиш соҳаси. 2-Фундаментал ютилиш соҳаси чегараси. 3-Экспоненциал ютилиш соҳаси. 4-Нуқсонларда ютилиш соҳаси. 5-Инфрақизил ютилиш соҳаси.



1.2-расм. Электронларни новертикал (1) ва вертикал (2) оптик ўтишлари.

Аморф яримўтказгичлар учун бу соҳадаги ютилиш коэффициенти спектрал характеристикасининг қийматларидан фойдаланиб, асосан электронларни новертикал ўтишлари учун ҳаракатчанлик тирқиши оптик кенглиги аниқланади. Вертикал ўтишлар учун ҳаракатчанлик тирқишининг оптик кенгликни аниқлашни кўрсатувчи тажриба натижалари [11] ишда келтирилган бўлиб, улар ҳам вертикал ўтиш шартларини тўла қаноатлантирмаслиги кўрсатиб ўтилган. Маълумки, бу қоида кристалл бўлмаган барча яримўтказгичлар учун ҳам ўринли бўлади [12].

Аморф яримўтказгичларда электронларни оптик ўтишлари билан аниқланадиган ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаларини «Кубо-Гринвуд формуласи»ни Дэвис-Мотт яқинлашиш усули учун ёзилган ифодасидан фойдаланиб аниқланади ва уни умумий кўринишда қуйидагича ёзилади [13].

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 \Omega}{(m^*)^2 n_0 c} \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} |D|^2 d\varepsilon \quad (1.1)$$

бу ерда e —электрон заряди, \hbar —Планк доимийси, m^* —заряд ташувчиларни эффектив массаси, Ω — ε энергияли электронни хусусий функцияси учун нормаллаштирилган ҳажм, ω —ютилган фотонни частотаси, n_0 —муҳитнинг синдириш кўрсаткичи, c —ёруғлик тезлиги, $g(\varepsilon)$ —оптик ўтишда иштирок этувчи электронларни фотон ютилишидан олдинги ва $g(\varepsilon + \hbar\omega)$ —кейинги ҳолатларининг зичлиги, ε_0 —оптик ўтишларда иштирок этиши мумкин бўлган электронларни энг юқори энергетик ҳолати. Бу формуладаги $|D|^2$ —электрон ўтишларининг матрица элементи дисперцияси бўлиб, Дэвис-Мотт яқинлашишига усулида ўзгармас деб олинади. Зоналараро ўтишлар учун, $\frac{m}{m^*} = 1$ ва

$k = \frac{\pi}{a}$ бўлганда (k —электронларнинг тўлқин сони, a —эса ўрганилаётган намунанинг

атомлари орасидаги ўртача масофа), $D = \pi \left(\frac{a}{\Omega} \right)^{1/2}$ кўринишда ёзиш мумкин [14]. Бундан фойдаланиб аморф яримўтказгичлар учун фотонларни зоналараро ютилишлари учун (1.1) ифодани қуйидагича ёзилади.

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{(m^*)^2 n_0 c \omega} \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon + \hbar\omega) d\varepsilon. \quad (1.2)$$

Бу ерда $g_V(\varepsilon)$ ва $g_C(\varepsilon + \hbar\omega)$ лар мос равишда валент ва ўтказувчанлик зоналаридаги электрон ҳолатлари зичликлари тақсимотлари. Шунини таъкидлаб ўтамизки, агар фотонларни ютилишида асосий ролни электронларни бошланғич ҳолати ўйнаса (1.1) ифода қуйидаги кўринишда ҳам ёзилиши мумкин

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 a}{(m^*)^2 n_0 c} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega)g_C(\varepsilon)}{\hbar\omega} d\varepsilon = A \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0 + \hbar\omega} \frac{g_V(\varepsilon - \hbar\omega)g_C(\varepsilon)}{\hbar\omega} d\varepsilon. \quad (1.3)$$

Бу ифодадаги $A = \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 a}{(m^*)^2 n_0 c}$ пропорционаллик коэффициенти бўлиб, бир хил аморф яримўтказгичдаги битта тур электрон ўтишлари учун ўзгармас катталиқ бўлади [15].

Тажриба натижаларини кўрсатишича фотонларнинг фундаментал ва уни чегарасидаги ютилиш соҳаларида ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаси даражали кўринишга эга бўлади.

[16] ишларда кўрсатилишича зоналараро электрон ўтишлари учун, рухсат этилган зоналардаги электрон ҳолатлари зичлигини энергияга боғланиши параболик кўринишга эга бўлганда, (1.3) формуладан ҳисобланган спектрлар куйидаги кўринишларда ёзилади.

$$\alpha \cdot \hbar\omega \sim (\hbar\omega - E_g)^n, \quad (1.4)$$

бу ерда, электронларни вертикал ўтишлари рухсат этилган бўлганда (ўтишлар учун квазиимпульсни сақланиш қонуни бажарилганда) даражани қиймати $n=1/2$ ва квазиимпульс сақланмайдиган, яъни рухсат этилмаган вертикал ўтишлар учун $n=3/2$ га тенг бўлади.

Новертикал оптик ўтишлар эса куйидаги ифода билан аниқланади

$$\alpha \cdot \hbar\omega \sim \frac{(\hbar\omega - E_g + \hbar\omega_{\text{фон}})^n}{\exp(\hbar\omega_{\text{фон}}/kT) - 1} + \frac{(\hbar\omega - E_g - \hbar\omega_{\text{фон}})^n}{1 - \exp(-\hbar\omega_{\text{фон}}/kT)}. \quad (1.5)$$

Бу ифодадаги $\hbar\omega_{\text{фон}}$ -новертикал оптик ўтишларда иштирок этадиган фононларни энергияси, даражанинг қийматлари рухсат этилган новертикал ўтишлар учун $n=2$, ўтишлар рухсат этилмаган бўлганда эса $n=3$ га тенг бўлади. (1.5) ифодани кўп ҳолларда тажриба натижаларига асосланиб куйидаги кўринишда ёзилади

$$\alpha \cdot \hbar\omega \sim C(\hbar\omega - E_g)^n. \quad (1.6)$$

Бу формулани келтириб чиқариш учун электронларни ўтишлари натижасида ҳосил бўладиган фононларнинг частотаси ютилган фотонларни частотасидан жуда кичик бўлади деб фараз қилсак ($\omega_{\text{фон}} \ll \omega$), куйидаги ифода ҳосил бўлади.

$$\alpha \cdot \hbar\omega \sim \left(\frac{1}{\exp(\hbar\omega_{\text{фон}}/kT) - 1} + \frac{1}{1 - \exp(-\hbar\omega_{\text{фон}}/kT)} \right) (\hbar\omega - E_g)^n. \quad (1.7)$$

Агар температура ўзгармас бўлганда (1.7) ни

$$\alpha \hbar\omega \sim (\hbar\omega - E_g)^n \quad (1.8)$$

ёки

$$\alpha \hbar\omega \sim C(T)(\hbar\omega - E_g)^n \quad (1.9)$$

кўринишда ёзилади. (1.4) ифодада фақат E_g гина температуранинг функцияси бўлса, (1.9) пропорционаллик коэффициенти $C(T)$ ҳам температуранинг функцияси бўлади [17].

Рухсат этилган зоналардаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти параболик ($g(\varepsilon) \sim \varepsilon^{1/2}$) бўлади деб Тауц томонидан зоналараро оптик ўтишлар учун [18] ишда куйидаги ифода олинган

$$\alpha(\hbar\omega) = \sigma_0 \frac{4\pi (\hbar\omega - E_g)^2}{n_0 c \hbar\omega}, \quad (1.10)$$

бу ерда $\sigma_0 = 2\pi^2 e^2 \hbar^3 a g^2(\varepsilon_c) / (m^*)^2$.

[19] ишда эса зоналардаги электрон ҳолатларини энергияга боғланиши чизикли бўлган ҳол учун ҳам (1.10) кўринишдаги формула келтириб чиқарилган. Аммо (1.1)

формуладан кўриш мумкинки, агар зоналардаги электрон ҳолатларини энергияга боғланиши чизиқли бўлса ($g(\varepsilon) \sim \varepsilon$)

$$\alpha \hbar \omega \sim (\hbar \omega - E_g)^3 \quad (1.11)$$

шарт бажарилиши кераклиги келиб чиқади. Кўп компонентали яримўтказгич материалларда (1.11) га ўхшаш кубик қонун билан аниқланувчи ютилиш коэффициенти спектрлари бўлиши мумкинлиги [20] ишларда тажрибаларда аниқланган. Бу ифодани эмпирик усулларда келтириб чиқаришда оптик ўтишларда иштирок этувчи электронларни ҳолатларидан бири локаллашган бўладиган ҳол ҳам ҳисобга олинган ва қуйидаги ифода келтириб чиқарилган

$$\alpha(\hbar \omega) = \frac{4\pi\sigma_0}{3n_0c} \frac{(\hbar \omega - E_g)^3}{\hbar \omega (\Delta E)^2}. \quad (1.12)$$

Аммо, ҳисоблашларни осонлаштириш учун рухсат этилган зоналарни «думлари»да жойлашган электрон ҳолатларини зичлигининг тақсимот функциясини чизиқли бўлади деб олинган. Бундан ташқари (1.12) ифодадаги ΔE нинг қиймати қандай аниқланиши ҳақида эса аниқ маълумот берилмаган.

«Кубо-Гринвуд формуласи»ни Дэвис-Мотт яқинлашиш усули билан ҳисоблаш орқали (1.6) ва (1.12) формулаларни келтириб чиқарилишини қараб чиқамиз [21]. Рухсат этилган зоналардаги локаллашмаган ҳолатлар зичликлари функциясини энергияга боғланиши даражали қонун бўйича ёзилади деб фараз қиламиз ва уларни қуйидаги кўринишларда танлаймиз. Валент зона учун $g_v(-\varepsilon) = \text{const}(\varepsilon^p)$, ўтказувчанлик зонаси учун эса $g_c(\varepsilon) = \text{const}(\varepsilon - E_g)^q$, бу ифодаларни ёзишда энергияни нол чегараси валент зонанинг юқори қисмидан бошланади деб олинди. Шунинг учун ўтказувчанлик зонасининг энг қуйи чегараси E_g энергияга тўғри келади. Буларни (1.2) формулага қўйсақ ва энергия бўйича интегралласак $\alpha \cdot (\hbar \omega) = \text{const}(\hbar \omega - E_g)^{p+q+1}$ кўринишидаги тенглик ҳосил бўлади. Бундан новертикал ўтишларда $n=2$ бўлиши учун рухсат этилган зоналардаги локаллашмаган ҳолатлар зичлиги тақсимооти параболик кўринишга эга бўлиши кераклиги, $n=3$ бўлиши учун эса чизиқли бўлиши кераклиги келиб чиқади. Агар худди шу усулда вертикал ўтишларни ҳисоблайдиган бўлсак $n=1/2$ ва $n=3/2$ қийматларни олиш учун рухсат этилган зоналардаги локаллашмаган электрон ҳолатлари зичлигини энергияга боғланишини кўриниши мураккаб бўлиши кераклигини айтиш мумкин.

Кўриниб турибдики, бу формулаларни келтириб чиқаришда биринчидан ҳисоблашлар фақат сифат жиҳатидан бажарилган бўлса, иккинчидан локаллашган ҳолатларнинг электрон ўтишларидаги иштироки ҳисобга олинмаган. Маълумки, ютилган фотонларни энергияси ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигидан катта бўлганда ҳам электронларни локаллашган ҳолатлардан локаллашмаган ҳолатларга оптик ўтишлари бажарилади. Бу ўтишлар икки хил: валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига ва валент зонадан ўтказувчанлик зонасининг «думи»га бўлиши мумкин.

[22] ишда умумий ютилиш коэффициенти турли хил оптик ўтишларига мос келувчи парциал ютилиш коэффицентларини йиғиндисидан иборат бўлиши кўрасатилган

$$\alpha = \sum_i \alpha_i \quad (1.13)$$

Шунинг учун фундаметал ютилиш соҳасида ҳам ютилиш коэффициенти қийматларини ҳисоблашда албатта, битта ҳолати локаллашган иккинчи ҳолати эса локаллашмаган электрон ўтишларини ҳисобга олиш керак. Аммо ҳозирги пайтгача бу ўтишлар билан аниқланадиган ютилиш коэффициентининг спектрларини аналитик кўринишлари келтириб чиқарилмаган.

Аморф яримўтказгичлар учун, электронларни вертикал ўтиш шартини ((1.4) формула) бажарилишини кўрсатувчи тажриба натижалари адабиётларда келтирилмаган. Бундай ўтиш шартлари нима учун бажрилмаслиги ҳозирги вақтгача асосланмаган. Шунинг учун аморф яримўтказгичларда электронларни вертикал оптик ўтишлари учун аниқланадиган ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенгликлари ҳақидаги аниқ маълумотлар деярли йўқ.

1.3-расмда кристалл яримўтказгичларнинг фундаментал ютилиш соҳасида электронларнинг вертикал ўтишлари учун ютилиш коэффициенти спектрлари графигини схематик кўриниши келтирилган бўлиб, ундаги 1- эгри чизик рухсат этилган ўтишларни, 2-эгри чизик эса рухсат этилмаган ўтишларни ифодалайди.

1.4-а. расмда PbS, PbSe ва PbTe кристалл яримўтказгичларининг фундаментал ютилиш соҳасининг графиклари келтирилган. Худди шу тажриба натижаларидан фойдаланиб электронларни вертикал рухсат этилган ўтишлари учун (1.4) формула орқали аниқланган E_g ни қийматлари келтирилган [23] (1.4-б расм.). Бундан ташқари шу ишни ўзида турли лабораторияларда тайёрланган кристалл кремний учун электронларнинг вертикал ўтишларидан аниқланган таққ зонанинг оптик кенглиги бири-бирдан катта фарқ қилишини (1,8 эВ дан 2,5 эВ гача) кўрсатиб ўтилган. Лекин буни сабаби ҳам номаълумлигича қолмоқда. [24] ишларда аморф селен намуналарида ўтказилган тажриба натижалари келтирилган. Уни натижаларидан фундаментал ютилиш соҳаси учун эмпирик усулларда

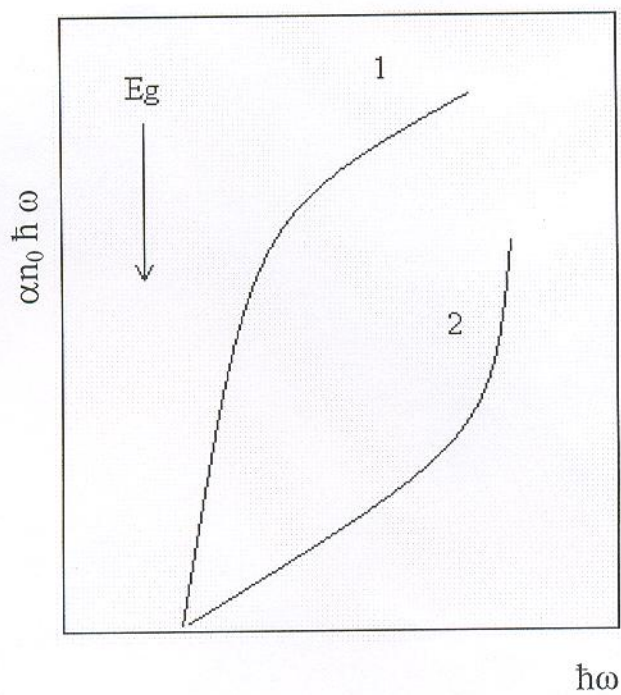
$$\alpha\hbar\omega \sim (\hbar\omega - E_g) \quad (1.14)$$

кўринишдаги боғланишлар олинган. Нима учун чизикли боғланиш ҳосил бўлишини эса тушунтирилмаган.

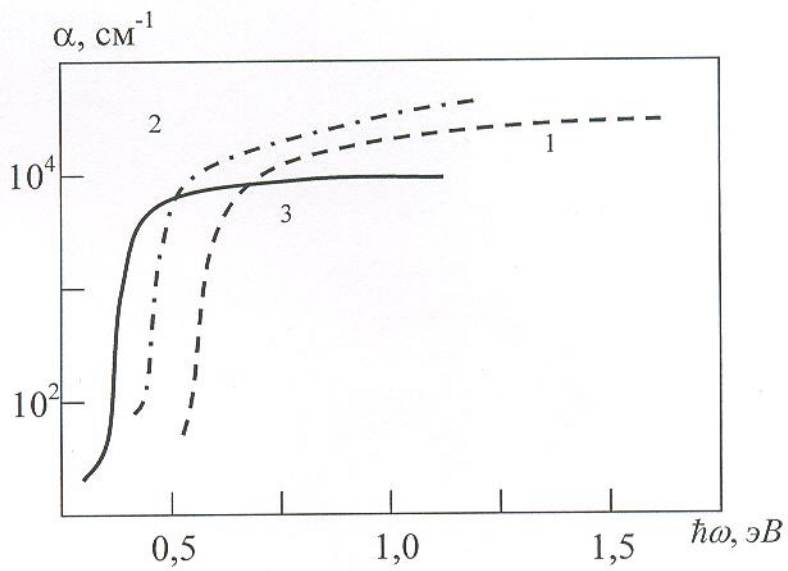
Аморф яримўтказгичларда электронларни рухсат этилган новертикал ўтишлари шартини бажарилишини кўрсатувчи 1.5-расмда $(\alpha\hbar\omega)^{1/2} \sim (\hbar\omega - E_g)$ қонунга бўйсинувчи ютилишлар билан аниқланадиган тажриба натижалари учун эгри чизикларнинг намуналари келтирилган. 1.6-расмда кўп компонентали юққа шиша пардаларининг $(\alpha\hbar\omega)^{1/3} \sim (\hbar\omega - E_g)$ формула билан аниқланувчи ютилиш коэффициенти спектрал характеристикалари келтирилган. Бу расмлардан кўринадики барча аморф яримўтказгичлар учун электронларни новертикал ўтиш шартлари бажарилар экан.

1.2. Фундаметал ютилиш соҳасининг чегарасида оптик ютилиш спектрлари

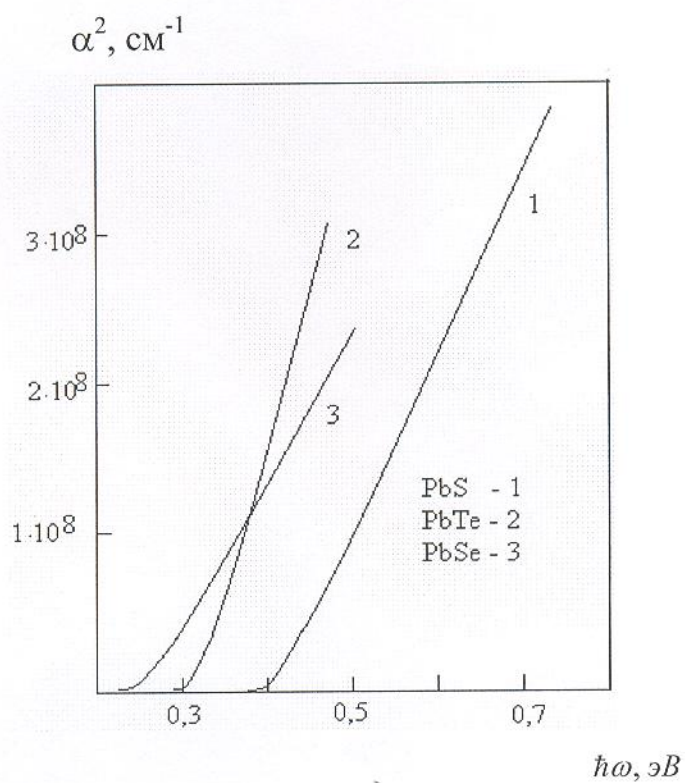
Маълумки, фундаметал ютилиш соҳасининг чегарасида ютилган фотонларни энергияси ҳаракатчанлик тикишининг энергетик кенглиги атофида бўлади. Бу соҳани алоҳида ўрганилишини асосий сабаби, ундаги барча электронларни оптик ўтиш турларига мос келувчи парциал ютилиш коэффициентларининг қийматлари бир-бирига тахминан тенг бўлиб қолади.



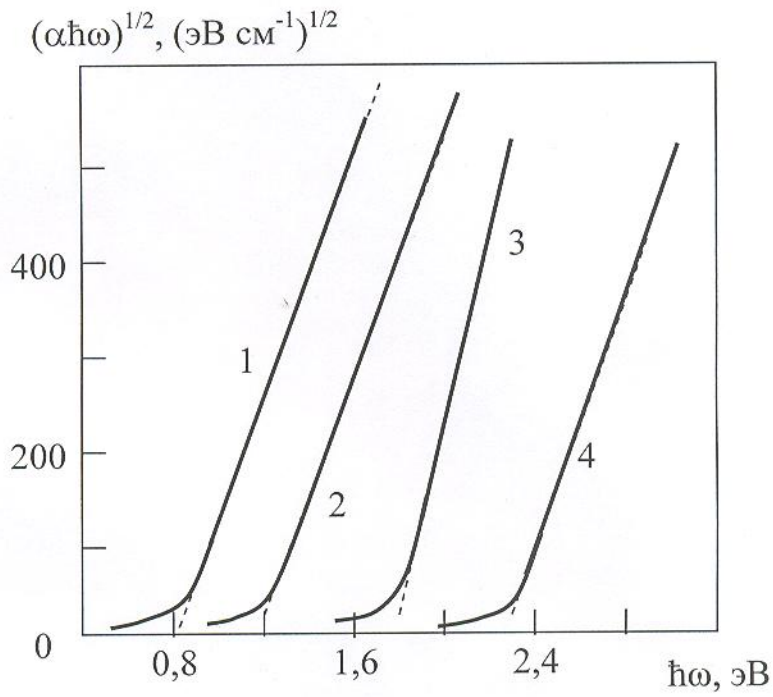
1.3-расм. Кристалл яримўтказгичларда электронларни вертикал рухсат этилган (1) ва вертикал рухсат этилмаган ўтишлари (2) билан аниқланадиган ютилиш коэффициентининг спектрлари.



1.4 а-расм. PbS (1), PbTe (2) ва PbSe (3) кристалл яримўтказгичларни фундаментал ютилиш соҳаларини спектрлари.

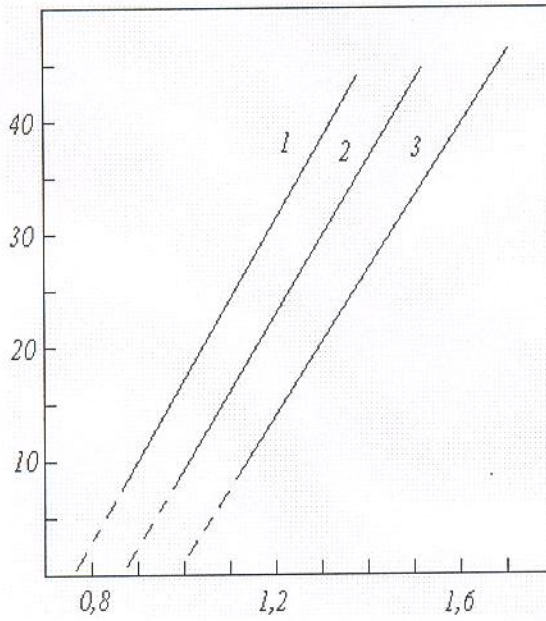


1.4 б-расм. PbS, PbSe ва PbTe кристалларида вертикал ўтишлари учун тақик зоналарнинг оптик кенглигини аниқланиши.



1.5-расм. Аморф яримўтказгичларда электронларни рухсат этилган новертикал оптик ўтиш шarti бажарилишини кўрсатувчи тажриба натижалари. 1-As₂Te₃. 2-Si. 3-AsSe₃. 4-As₂S₃.

$(\alpha, \hbar\omega)^{1/3}, (\text{эВ см}^{-1})^{1/3}$



$\hbar\omega, \text{эВ}$

1.6-расм. Кўп компонентали шиша пардаларида $\alpha\hbar\omega \sim (\hbar\omega - E_g)^3$ қонунга бўйсунувчи ютилиш спектрлари. 1- GeTe_2Sb_2 , 2- $\text{Si}_{11}\text{Ge}_{11}\text{As}_{35}\text{P}_3\text{Te}_{40}$, 3- $\text{Ge}_{16}\text{As}_{35}\text{Te}_{28}\text{S}_{21}$.

Маълумки, $\hbar\omega \leq E_g$ шарт бажарилганда зоналараро электрон ўтишларини бўлиши мумкин эмас. Бу соҳада битта ҳолати локаллашган иккинчи ҳолати локаллашмаган электрон ўтишлари билан бирга рухсат этилган зоналарнинг «думлари»да жойлашган локаллашган электрон ҳолатлари орасидаги электрон ўтишлари ҳосил бўлади (1.7-расм). Локаллашган ҳолатлараро электрон ўтишлари билан аниқланадиган ютилиш коэффициенти учун [27] ишда куйидаги формулани келтириб чиқарилган

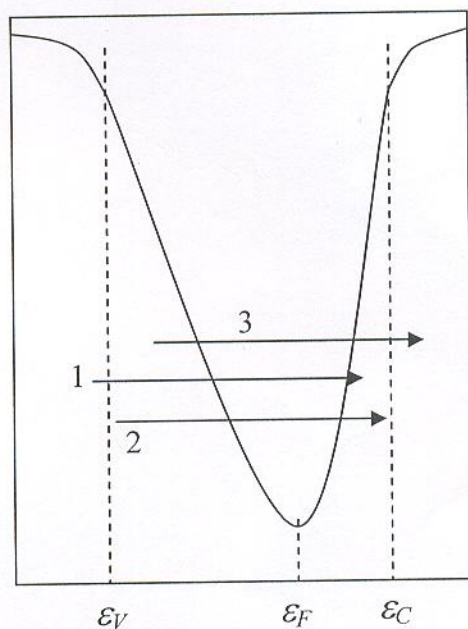
$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{8\pi^4 e^2 \hbar^2 a}{n_0 (m^*)^2 c} g(\varepsilon_c)^2 \left(\frac{kT}{\Delta E}\right)^2 \exp\left(-\frac{\varepsilon_A - \varepsilon_F}{kT}\right) \exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right). \quad (1.15)$$

Аммо бу формулани ҳисоблашда рухсат этилган зоналарнинг «думлари»даги электрон ҳолатларини тақсимот функцияси чизикли бўлади деб олинган ва уларни ўзида (1.15) ифода тажриба натижаларини тушунтира олмаслигини бу соҳадаги илмий изланишларни давом эттириш кераклигини кўрсатиб ўтилган. [28] ишда локаллашган ҳолатлараро ўтишлар учун ютилиш коэффициентини ҳисоблашда рухсат этилган зоналарнинг «думлари»да жойлашган электрон ҳолатлари зичлигини тақсимоти экспоненциал бўлади деб олинган, аммо Дэвис-Мотт яқинлашиш усулида «Кубо-Гринвуд формуласи»ни аналитик ечимларни келтириб чиқарилмаган. Ҳисоблашларни тақрибий усулларда бажарилган ва олинган натижалар тажрибаларни тушунтира олиши кўрсатилган. Аммо, электронларни турли оптик ўтишлари учун ютилиш коэффициентини қийматлари ҳисобланмаган. Юқорида айтиб ўтилдики бу соҳада, электронларни турли оптик ўтишлари аниқлайдиган парциал ютилиш коэффициентларининг қийматлари бир-бирига тенг бўлади. Шунинг учун умумий ютилиш коэффициенти қийматларини аниқлашда қайси ҳолларда қайси турдаги электрон ўтишларини ахамияти катта эканлигини аниқлаш муҳимдир. Маълумки, агар аналитик ечимларни олинмаса бу соҳадаги ютилиш коэффициентининг қийматларини аниқловчи юқорида келтирилган турли электрон ўтишларига мос келувчи парциал ютилиш коэффициентларини қийматларини аниқлаш имконияти бўлмайди. Чунки, тажрибалардан фақат умумий ютилиш коэффициентининг қийматлари аниқланади. Юқоридагилардан бу соҳада бажариладиган асосий илмий изланишлар ҳам ҳали олдинда эканлиги кўринади.

1.3. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари турлари ва зичлигининг тақсимотлари

Юқорида кўрдикки, гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари зичлигини тақсимотларини, уларни ҳаракатчанлик тирқишидаги энергетик ўринига қараб учта: валент ва ўтказувчанлик зоналаридаги локаллашмаган, бу зоналарни экспоненциал «думлари»даги локаллашган ва ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган структура тўридаги нуқсонлар (узилган боғланишлар, киришмалар) ҳосил қиладиган турларга ажратиш мумкин. Электрон ҳолатлари зичлигининг энергияга боғланиши рухсат этилган зоналарни чегараларида даражали, уларни «думлари»да экспоненциал, нуқсонлар ҳосил қиладиганлари эса Гаусс тақсимотига бўйсинишини кўриб чиқдик. Маълумки, бу тақсимотларни ифодаловчи боғланишлар гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари зичлигини аниқлаш бўйича ўтказилган тажриба натижаларига ва олдин адабиётларда келтирилган [29] муносабатларга мос келиши керак. Буларни ҳисобга олиб бу ишда гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари зичлигини энергияга боғланишларини ифодалари валент ва ўтказувчанлик зоналаридаги электрон

$g(\varepsilon)$



1.7-расм. Аморф яримўтказгичларда $\hbar\omega < E_g$ энергияли фотонлар ютилганда электронларни оптик ўтиш турлари. 1- Валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га, 2- Валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га, 3-Валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига.

ҳолатлари тақсимотлари учун мос равишда

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \left(\frac{\varepsilon_C - \varepsilon}{E_g} \right)^{n_1}, \quad \text{бу ерда } \varepsilon \leq \varepsilon_V \quad (1.16)$$

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_V}{E_g} \right)^{n_2}, \quad \text{бу ерда } \varepsilon_C \leq \varepsilon. \quad (1.17)$$

кўринишларда танланди. Улардаги $N(\varepsilon_V)$ -валент ва $N(\varepsilon_C)$ -ўтказувчанлик зоналаридаги электрон ҳолатлари зичлигини эффектив қийматлари, ε_V -валент зонанинг юқори ва ε_C -ўтказувчанлик зонасининг қуйи чегараси. Агар рухсат этилган зоналарнинг чегараларидаги электрон ҳолатлари зичлигини энергияга боғланиши ўзгармас, параболик ва чизикли бўлишини ҳисобга олсак, n_1 ва n_2 лар 0, $\frac{1}{2}$ ва 1 бўлган қийматларга эга бўлади.

Рухсат этилган зоналарнинг экспоненциал «думлари»даги электрон ҳолатлари тақсимотлари: валент зона «думи» учун

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_V) \exp(-\beta_1(\varepsilon - \varepsilon_V)), \quad \text{бу ерда } \varepsilon_V < \varepsilon < \varepsilon_0, \quad (1.18)$$

ўтказувчанлик зонаси «думи» учун эса

$$g(\varepsilon) = N(\varepsilon_C) \exp(\beta_2(\varepsilon - \varepsilon_C)), \quad \text{бу ерда } \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_C \quad (1.19)$$

кўринишларда ёзилди. Бу формулалардаги β_1 - ва β_2 - лар мос равишда валент ва ўтказувчанлик зоналарининг экспоненциал «думлари» эгрилигини аниқловчи параметрлар, ε_0 -валент ва ўтказувчанлик зоналарининг экспоненциал «думлари»ни кесишиш нуқтасини энергетик ўрни.

Бу ифодаларни ҳисоблашдан олинган натижалар 1.8-расмда келтирилган. Кўриниб турибдики, бу зона диаграммаси гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлардаги электрон ҳолатлари зичлиги учун [1, 2, 3] ишларда келтирилган моделларга ва [30] ишда олинган натижаларга мос келади.

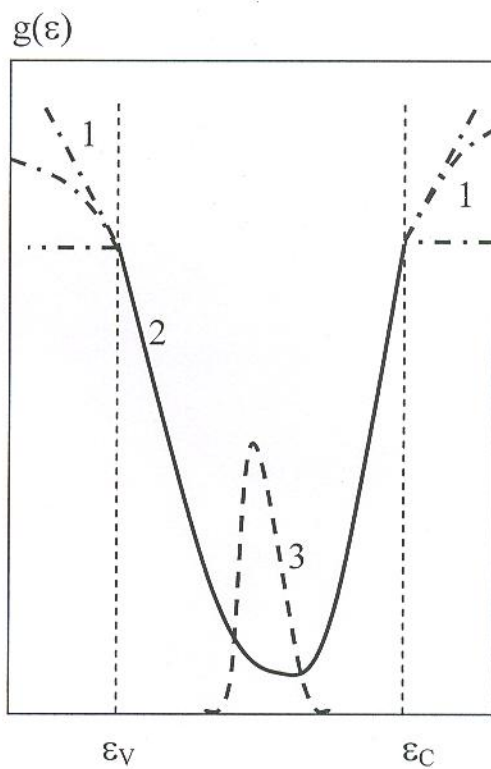
Энди гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган электрон ҳолатлари зичлигининг тақсимот функциясини қараб чиқамиз. Маълумки, Гаусс тақсимот функциясини интеграллаб аналитик ечимларни олиш мумкин эмас. Шунини ҳисобга олиб биз [31] ишларда ўзгариш ва аниқланиш соҳалари Гаусс тақсимотидан деярли фарқ қилмайдиган интегралланувчи гиперболиксеканс

$$g(\varepsilon) = \frac{g(\varepsilon_D)}{ch(b(\varepsilon - \varepsilon_D))} = \frac{2g(\varepsilon_D)}{\exp(b(\varepsilon - \varepsilon_D)) + \exp(-b(\varepsilon - \varepsilon_D))} \quad (1.20)$$

кўринишидаги функцияни гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган нуқсонлардаги электрон ҳолатлари тақсимоти учун ишлатиш мумкин эканлигини кўрсатиб ўтган эдик. Бу ерда $g(\varepsilon_D)$ -нуқсонлардаги электрон ҳолатлари зичлигининг максимал қиймати, ε_D -эса шу максимумни энергетик ўрни. Ҳисоблашларни бажаришда, бу иккала тақсимот билан аниқланадиган нуқсонларни концентрациялари тенг бўлиши талаб қилинса мураккаб бўлмаган ҳисоблашлардан кейин

$$a = \frac{b^2}{\pi} \quad (1.21)$$

ифодани олиш мумкин. Худди шу усулда бу функцияларни эффектив яримкенглиги тенг бўлиш шартини ҳисобланса қуйидаги ифода ҳосил бўлади



1.8-расм. Ушбу ишда аморф яримўтказгичлар учун тақиқланмаган зоналар (1), уларнинг экспоненциал «думлари» (2) ва нуқсонлардаги (3) электрон ҳолатлари учун танланган тақсимот функцияларидан қурилган зона диаграммасининг схематик кўриниши.

$$a = \frac{b^2 \ln 2}{\ln(2 + \sqrt{3})}. \quad (1.22)$$

1.9-расмда Гаусс тақсимоти ва (1.20) формулалар билан аниқланадиган функцияларни (1.21) ва (1.22) шартларга мос келувчи графиклари келтирилган. Ҳисоблашлардан, уларни алмаштириш натижасида йўл қўйиладиган хатолик 7% кичик бўлишини кўрсатилган [32]. Бу қиймат ютилиш коэффициентини аниқлаш учун ўтказиладиган тажрибаларни хатолигидан катта эмас. Шунинг учун бу ишда аналитик ечимларни олиш учун қўйилган масалаларни шартига қараб айрим ҳолларда Гаусс, айрим ҳолларда эса гиперболиксеканс кўринишидаги тақсимот функцияларидан фойдаланилди.

1.4. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларда электронларни оптик ўтиш механизмлари ва турлари

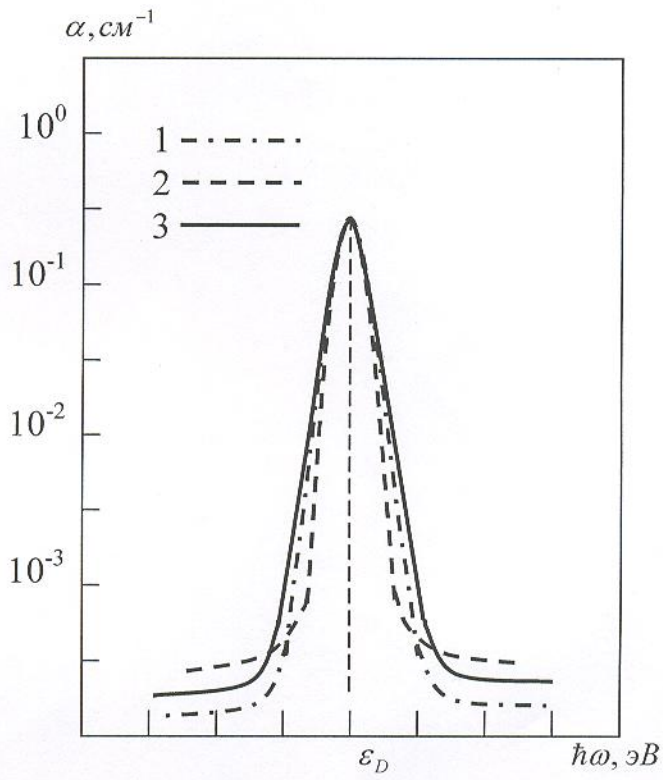
Умумий ютилиш коэффициентининг қийматлари турли электрон ўтишларига мос келувчи парциал ютилиш коэффициентлари қийматларини йиғиндисидан иборат бўлиши кўрсатиб ўтилган эди. Шунинг учун, Дэвис-Мотт яқинлашиши учун ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан ҳисобланадиган умумий ютилиш коэффициенти спектрал характеристикасини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин

$$\alpha(\hbar\omega) = \Sigma\alpha(\hbar\omega) = \Sigma \frac{8\pi^2 e^2 \hbar^3 \Omega}{(m^*)^2 n_0 c} \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} \frac{g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega)}{\hbar\omega} |D|^2 d\varepsilon. \quad (1.23)$$

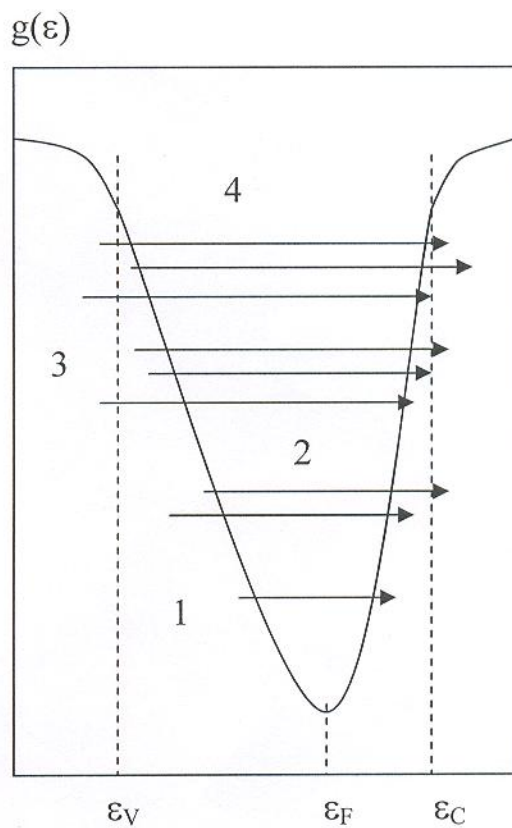
Агар гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган нуқсонларнинг концентрацияси жуда кичик бўлса, уларни Ферми сатҳига таъсирини эътиборга олмаслик мумкин бўлганлиги учун $\varepsilon_0 = \varepsilon_F$ шарт бажарилади. Шунинг учун, биз аввал легирланмаган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган нуқсонлардаги (узилган боланишлар) электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтишларни ҳисобга олмай (бундай намуналарни ютилиш коэффициенти спектрларини ҳисоблаш формулалари кейинроқ алоҳида қараб чиқилади), фақат рухсат этилган зоналар ва уларнинг экспоненциал «думлари»даги электрон ҳолатларидаги оптик ўтишларни қараб чиқамиз. Маълумки, легирланмаган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлар n-тип электрўтказувчанликка эга бўлади [33]. Чунки уларни валент зонаси «думлари»даги электрон ҳолатларини зичлигини қийматлари ўтказувчанлик зонасиникига қараганда каттароқ бўлади [34]. Буни ҳисобга олиб аввал электронли электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлардаги электрон ўтишлари билан аниқланувчи ютилиш коэффициентларини қараб чиқилди. Бундай гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич намуналари учун $\varepsilon_C - \varepsilon_F < \varepsilon_F - \varepsilon_V$ шарт бажарилади, чунки улардаги Ферми сатҳи ўтказувчанлик зонасига яқинроқ жойлашган бўлади.

1.10.-расмда легирланмаган аммо n-тип электрўтказувчанликка эга бўлган намуналарда юқорида танланган электрон ҳолатлари зичлигини тақсимот функциясига мос келувчи зона диаграммаси учун электрон ўтишларнинг турлари схематик равишда келтирилган. Расмдан фойдаланиб ютилган фотонлар ни энергиясига қараб, электронларни ўтишларини ҳисобга олган ҳолда оптик ўтишларни соҳаларга ажратилди ва ҳар бир соҳадаги электронларни ўтиш турларини қараб чиқилди.

1-ютилган фотонларни энергияси учун $0 < \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_F$ шарт бажариладиган соҳа. Бундай энергияли фотонлар электронларни фақат валент зонанинг экспоненциал «думи»даги локаллашган ҳолатлардан ўтказувчанлик зонасининг экспоненциал «думи»даги локаллашган ҳолатларга олиши мумкин (локаллашган ҳолатлараро ўтишлар).



1.9-расм. Гаусс ва шу ишда тақлиф қилинган гиперболиксеканс тақсимот функцияларини графиклари. Гаусс тақсимоти (1), нуқсонларни концентрациялари тенг (2) ва эффе́ктив яримкенгликларини тенг (3) бўлиш шартларини қаноатлантирувчи гиперболиксеканс.



1.10-расм. Легирланмаган n-тип электрўтказувчанликка эга бўлган аморф яримўтказгичларда электрон ўтишлари турларининг ютилган фотонларнинг энергиясига боғланишини схематик кўриниши. 1- $0 < \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_F$, 2- $\epsilon_C - \epsilon_F \leq \hbar\omega < \epsilon_F - \epsilon_V$, 3- $\epsilon_F - \epsilon_V \leq \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_V = E_g$, 4- $\epsilon_C - \epsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$.

2-соҳа. Бу соҳа $\varepsilon_C - \varepsilon_F \leq \hbar\omega < \varepsilon_F - \varepsilon_V$ энергия оралиғида ётувчи фотонлар ютилганда юз берадиган электронларни ўтишлари билан аниқланади. Ютилган фотонлар электронларни валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га ва валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига олади (битта ҳолати локаллашган иккинчи ҳолати эса локаллашмаган оптик ўтишлар), шунинг учун ютилиш коэффициентининг қиймати иккита компонентани йиғиндисидан иборат бўлади (1.10-расмдаги 2-тур ўтишлар).

3-соҳада ютилган фотонларни энергияси $\varepsilon_F - \varepsilon_V \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ оралиқда ётади. Бу соҳада содир бўладиган электрон ўтишларининг схематик кўриниши 1.10-расмдаги 3-тур ўтишларга мос келади. Ютилган фотонлар учун бу шарт бажарилганда электронлар: валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га, валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига, валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га ўтишлари мумкин. Ютилиш коэффициентининг қиймати учта компонентадан ташкил топади.

4-соҳада фотонларни энергияси учун $E_g = \varepsilon_C - \varepsilon_V \leq \hbar\omega$ шарт бажарилади ва ютилган фотонлар электронларни валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига, валент зонадан ўтказувчанлик зонасига (зоналараро ютилишлар) ва валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га олади. Кўриниб турибдики умумий ютилиш коэффициентининг қиймати яна учта ҳадни йиғиндисидан иборат бўлади.

Худди шу усулда легириланмаган аммо, Ферми сатҳи валент зона томонга яқинроқ жойлашган, $\varepsilon_C - \varepsilon_F > \varepsilon_F - \varepsilon_V$ (p-тип электрўтказувчанликка эга бўлган) гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич намуналари учун (масалан псевдолегириланган аморф яримўтказгичлар [35]) ютилиш коэффициенти спектрларини ютилган фотонларнинг энергиясига боғланиши билан аниқланадиган соҳалар тўрт хил бўлади (2.4-расм). Буларни ажратишда Ферми сатҳини энергетик ўрнини ҳисобга олиш керак бўлади.

1-соҳа. Бунда ютилган фотонларнинг энергияси $0 < \hbar\omega < \varepsilon_F - \varepsilon_V$ бўлиб, электронларни оптик ўтишлари фақат локаллашган ҳолатлараро бўлади.

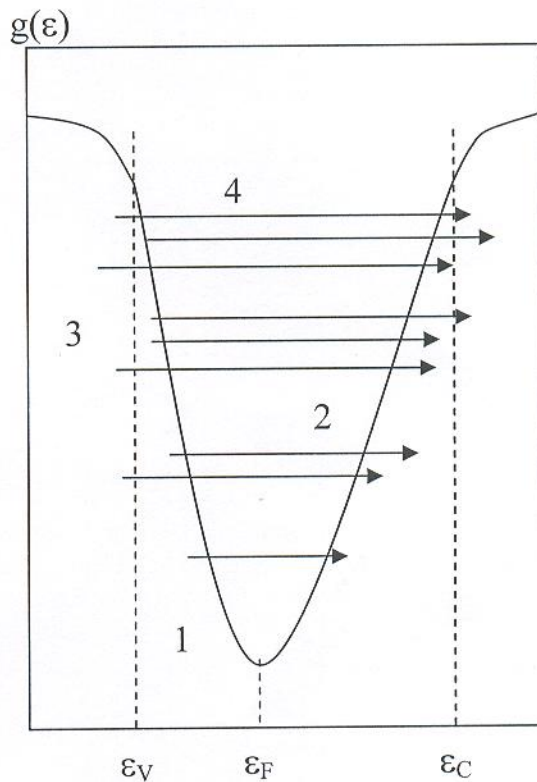
2-соҳада эса, ютилган фотонларнинг энергиялари учун $\varepsilon_F - \varepsilon_V \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_F$ шарт бажарилиши талаб қилинади. Шунинг учун оптик ўтишлар икки хил бўлиб, улар электронларни локаллашган ҳолатлараро ва валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га олувчи турларга ажралади.

3-соҳада ютилган фотонларнинг энергияси учун $\varepsilon_C - \varepsilon_F \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ шарт бажарилади ва электронлари оптик ўтиш турлари n-тип электрўтказувчанликка эга эга бўлган намуналарники билан бир хил бўлади.

4-соҳада эса ютилган фотонларга қўйиладиган шарт ҳам, оптик ўтишлар турлари ҳам n-тип электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларникидан фарқ қилмайди.

Энди хусусий $\varepsilon_C - \varepsilon_F \approx \varepsilon_F - \varepsilon_V \approx E_g/2$ гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич намуналарида электронларни оптик ўтиш турларини қараб чиқишга ўтамыз. 1.11-расмда бундай намуналарда юз берадиган электронларни оптик ўтиш турлари схематик кўринишда келтирилган. Бундай намуналарда оптик ютилиш спектрлари учта соҳага ажралади.

1-соҳа учун ютилган фотонларга қўйиладиган шарт $0 < \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_F = \varepsilon_F - \varepsilon_V = E_g/2$ кўринишда ёзилади. Бундай энергияли фотонлар ютилганда, улар электронлари фақат валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зона «думи»га олади (фотонларни локаллашган ҳолатлараро ютилишлари).



1.11-расм. Псевдодегирланган р-тип электрўтказувчанликка эга бўлган аморф яримўтказгичларда электрон ўтишлари турларининг ютилган фотонларнинг энергиясига боғланишини схематик кўриниши. 1- $0 < \hbar\omega < \epsilon_F - \epsilon_V$, 2- $\epsilon_F - \epsilon_V \leq \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_F$, 3- $\epsilon_C - \epsilon_F \leq \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_V = E_g$, 4- $\epsilon_C - \epsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$

2-соҳада эса, ютилган фотонларнинг энергиялари учун $E_g/2 \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ шарт бажарилади ва электронлар валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га, валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига ва валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га ўтишлари мумкин (n-тип ва p-тип электрўтказувчанликка эга бўлган намуналарни 3-соҳаси билан бир хил).

3-соҳа. Бу соҳадаги электрон ўтишлари n- ва p- тип электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич намуналаридаги оптик ўтишлар турлари билан аниқланувчи 4-соҳа билан бир хил бўлади.

Юқоридагилардан кўринадик, гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларда оптик ютилиш коэффициентини Кубо-Гринвуд формуласи бўйича ҳисоблашда нуқсонлардаги (узилган боғланишлар, киришмалар) электрон ҳолатлари иштирок этувчи электрон ўтишларини ҳисобга олинмаганда ҳам албатта ютилган фотонларни энергиясини аҳамияти катта бўлар экан. Чунки ютилган фотонларни энергияси ортиб борган сари, умумий ютилиш коэффициентини компоненталари биттадан учтагача ўзгариши мумкин экан.

Нуқсонлардаги (узилган боғланишлар, киришмалар) электрон ҳолатлари иштирок этувчи электрон ўтишлари билан аниқланадиган ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаси ҳам Кубо-Гринвуд формуласидан ҳисобланади. Буни амалга оширишда ҳам юқоридаги каби йўл тутиш керак. Аввал нуқсонлардаги электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтиш турларни ажратиб олайлик. Шунини таъкидлаб ўтамизки узилган боғланишларни (нуқсонлар, легирловчи киришмалар) тури қандай бўлишидан қатъий назар (акцептор ёки донор, D^- , D^+ , D^0 ва х. к.) улар барча электрон ўтишларида иштирок этади деб ҳисоблаш керак. Чунки ютилган фотонлар ҳаракатчанлик тирқиши ичидаги бир марта ионлашган сатҳлар билан ҳам таъсирлашади [36].

1. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган икки хил нуқсонлардаги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлар (нуқсонлараро оптик ўтишлар).

2. Валент зонанинг экспоненциал «думи»даги ва нуқсонлардаги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлар.

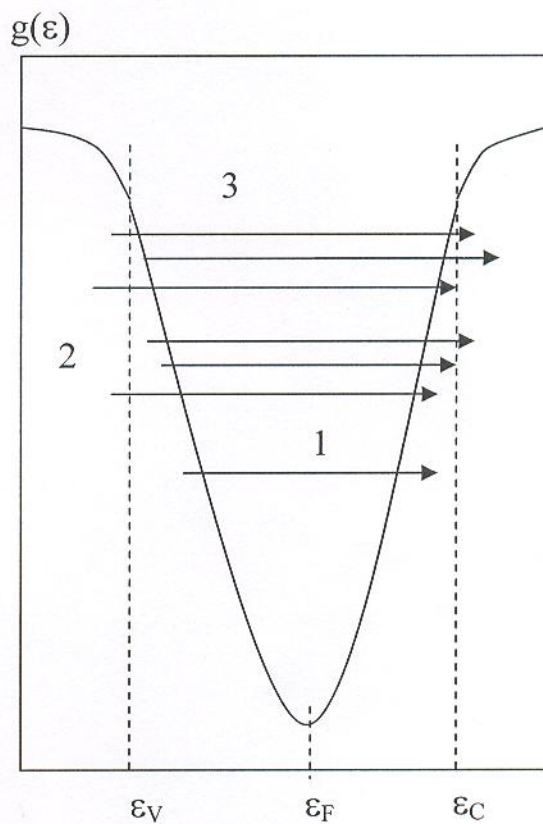
3. Нуқсонлар ва ўтказувчанлик зонасининг экспоненциал «думи»даги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлар.

4. Валент зона ва нуқсонлардаги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлар.

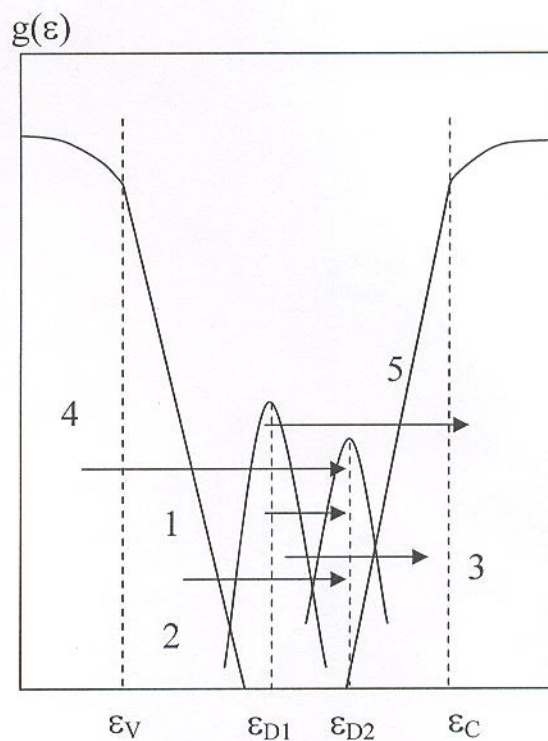
5. Нуқсонлар ва ўтказувчанлик зонасидаги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишлар. 1.2-расмда юқоридаги ўтишлар схемаси келтирилган.

(1.1) формуладан нуқсонлараро электрон ўтишлари билан (1-тур ўтишлар) аниқланадиган ютилиш коэффициенти спектрал характеристикасини ҳисоблашда ютилган фотонларни энергиясини $0 < \hbar\omega < E_g$ ораликда ўзгартириш етарли бўлади. [37] ишлардаги каби интеграл чегарасини чексизликка тенглаш шарт эмас. Чунки ютилган фотонларни энергияси ортиб борган сари ютилиш коэффициентини қиймати экспоненциал равишда камайиб боради. 1.13-расмдан кўринадик, 2-тур ўтишларнинг ютилиш коэффициентини ҳисоблашда ютилган фотонларнинг энергияси $0 < \hbar\omega < \varepsilon_0 - \varepsilon_V$ ораликда, 3-тур ўтишлар учун эса $0 < \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_0$ ораликда ўзгартириш кераклиги аниқланди. Бу ердаги ε_0 ни қийматлари; 2-тур ўтишлар учун валент зона «думи»даги ва нуқсонлардаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини, 3-тур ўтишлар учун эса нуқсонлардаги ва ўтказувчанлик зонаси «думи»даги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини кесишиш нуқтасининг энергетик ўринлари билан аниқланади.

Ютилган фотонларни энергияси учун $\varepsilon_0 - \varepsilon_V \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ шарт бажарилганда электронлар бир вақтни ўзида 2- ва 4- тур ўтишларда, $\varepsilon_C - \varepsilon_0 \leq \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ шарт бажарилганда эса 3- ва 5- тур ўтишларда иштирок этади. Шунинг учун, бу соҳада ютилиш



1.12-расм. i-тип электрўтказувчанликка эга бўлган (хусусий) аморф яримўтказгичларда электрон ўтишлари турларини ютилган фотонларнинг энергиясига боғланишини схематик кўриниши. 1- $0 < \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_F \approx \epsilon_F - \epsilon_V \approx E_g/2$, 2- $E_g/2 \leq \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_V = E_g$, 3- $\epsilon_C - \epsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$



1.13-расм. Нуқсонлардаги (узилган боғланишлар, легирловчи киришмалар) электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтиш турлари. 1-нуқсонлараро. 2-валент зона «думи»дан нуқсонга. 3-нуқсондан ўтказувчанлик зонасига. 4-валент зонадан нуқсонга. 5-нуқсондан ўтказувчанлик зонасига.

коэффициенти иккита компонентани йиғиндисидан иборат бўлади. Булардан кўринадикки нуқсонлардаги (узилган боғланишлар, легировчи киришмалар) электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтишлар билан аниқланадиган ютилиш коэффициенти спектрларини ҳисоблашда ҳам ютилган фотонларни энергиясига қараб соҳаларга ажратиб олиш керак бўлар экан.

2-БОБ. ГИДРОГЕНИЗАЦИЯЛАНГАН АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРДА ОПТИК ЮТИЛИШ КОЭФФИЦИЕНТИ СПЕКТРАЛ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИНИ ҲИСОБЛАШ

2.1. Кубо-Гринвуд формуласини ютилган фотонларнинг энергиясига ва электронларни оптик ўтиш турларига мослаштириш

Олдинги параграфда олинган натижалар асосида, ютилган фотонларнинг энергияси бўйича ажратилган соҳалар ва электронларни оптик ўтиш турларига Кубо-Гринвуд формуласини мослаштиришни қараб чиқамиз. Аввал легирланмаган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг рухсат этилган зоналари экспоненциал «думлари»ни кесишиш нуқтасининг энергетик ўрни Ферми сатҳида бўлиб, у ўтказувчанлик зонасига яқин жойлашган деб фараз қиламиз.

1. $0 < \hbar\omega \leq \varepsilon_C - \varepsilon_F$ соҳада ютилиш коэффициентини битта тур электрон ўтишлари аниқлаганлиги учун $\hbar\omega \gg kT$ шарт бажарилганда спектрал характеристикани (1.1) кўринишдаги формуладан тўғридан-тўғри ҳисоблаш мумкин. Акс ҳолда, яъни ютилган фотонларнинг энергияси жуда кичик бўлганда ютилиш коэффициентини

$$\alpha \sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \left\{ f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) - f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F + \hbar\omega}{kT}\right) \right\} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (2.1)$$

ифодадан аниқлаш керак бўлади. Бу ерда $f((\varepsilon - \varepsilon_F)/kT)$ -Ферми-Дирак тақсимоти. Тақрибий усуллардан фойдаланиб бажарилган ҳисоблашлардан ютилган фотонларни энергияси учун $\hbar\omega > 0,2$ эВ шарт бажарилганда (1.1) ва (2.1) ифодалардан олинадиган натижалар бир хил бўлишини кўрсатилган [38].

2. Олдинги параграфда кўрдикки $\varepsilon_C - \varepsilon_F < \hbar\omega \leq \varepsilon_F - \varepsilon_V$ соҳа учун ютилиш коэффициенти спектрал характеристикани ҳисоблашда Кубо-Гринвуд формуласини электрон ўтишларига мос ҳолда иккига ажратиб олиш керак бўлади. Чунки, бу соҳада $\alpha(\hbar\omega) = \alpha_1 + \alpha_2$ тенг бўлади.

$$\alpha(\hbar\omega) \sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (2.2)$$

бу формуладаги биринчи интеграл электронларни валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига, иккинчиси эса валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га оптик ўтишларини аниқлайди.

3. $\varepsilon_F - \varepsilon_V < \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ соҳада электрон ўтиш турлари уч хил бўлганлигидан ютилиш коэффициенти $\alpha(\hbar\omega) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ кўринишда ёзилади. Шунинг учун Кубо-Гринвуд формуласини ҳам электрон ўтишларига мослаштириб учга ажратиб олиш кераклигини ҳисобга олиб, уни қуйидаги кўринишда ёзамиз

яъни

$$\alpha(\hbar\omega) \sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega},$$

$$\alpha_1 \sim \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega},$$

$$\alpha_2 \sim \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega},$$

$$\alpha_3 \sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (2.3)$$

Бу формулалардаги: α_1 - валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига, α_2 - валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га, α_3 - эса валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га оптик ўтишлар билан аниқланадиган ютилиш коэффициентларини спектрларига мос келади. Фотонларни энергияси ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигидан кичик бўлгани учун зоналараро ўтишларни бўлиши мумкин эмас.

4. $\varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g \leq \hbar\omega$ соҳа. Ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигидан катта энергияли фотонлар ютилганда юз берадиган электрон ўтишларини ҳам учта турга ажратиш мумкинлигини кўриб ўтдик. Шунинг учун, умумий ютилиш коэффициенти электронларни: валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига, валент зонадан ўтказувчанлик зонасига ва валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га оптик ўтишлари билан аниқланадиган парциал ютилиш коэффициентларини йиғиндисидан иборат бўлади, яъни $\alpha(\hbar\omega) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$. Кубо-Гринвуд формуласини шу ўтишларга мослаб ажратамиз.

$$\begin{aligned} \alpha &\sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_1 &\sim \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_2 &\sim \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_3 &\sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Бу ифодалардаги α_1 - валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига, α_2 - рухсат этилган зоналараро ва α_3 - эса валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га электронларни оптик ўтишлари билан аниқланади. Бундай энергияли фотонлар ютилганда рухсат этилган зоналарнинг «думлари»даги локаллашган ҳолатлараро оптик ўтишлар содир бўлмайди.

Эслатиб ўтамизки, агар гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич намунасининг Ферми сатҳига ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган нуқсонлар, узилган боғланишлар ёки легирловчи киришмаларни таъсири сезиларли бўлса, юқорида келтирилган (1.23) ва (2.1-2.4) формулалардаги ε_F ўрнига валент ва ўтказувчанлик зоналарининг экспоненциал думларни кесишиш нуқтасининг энергетик ўрни ε_0 - ни олиш керак бўлади. Бу катталиқ учун мураккаб бўлмаган ҳисоблашлар ёрдамида

$$\varepsilon_0 \approx \frac{\beta_1 \varepsilon_C - \beta_2 \varepsilon_V}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2.5)$$

ифода олинди.

Энди гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган нуқсонлар, узилган боғланишлар ва легирловчи киришмалардаги электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтишлар билан аниқланадиган ютилиш коэффициенти спектрлари учун Кубо-Гринвуд формуласини мослаштиришни қараб чиқамиз.

1. Нуқсонлараро (узилган боғланишлар, легирловчи киришмалар) электрон ўтишларини ютилиш коэффициенти битта оптик ўтиш билан аниқланади. Шунинг учун, бу ўтишларга мос келувчи ютилиш коэффициенти спектрларини Кубо-Гринвуд формуласидан Дэвис-Мотт яқинлашиш усули билан ҳисоблашда [2,3] ишларнинг натижаларига кўра,

$$\alpha \sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \left\{ f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) - f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F + \hbar\omega}{kT}\right) \right\} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (2.6)$$

ифодадан ҳисобласа бўлади. Агар ютилган фотонларнинг энергияси учун $\hbar\omega > 0,2$ эВ шарт бажарилса, (1.1) формуладан фойдаланса бўлади.

(2.6) ва (1.1) формулалардаги интегрални чегараси ε_0 ни қиймати D_1 ва D_2 тур нуқсонларни электрон ҳолатлари зичлиги тақсимотларини кесишиш нуқтасининг энергетик ўрни бўлгани учун ҳисоблашлардан қуйидаги ифодаларни олиш мумкин [39]: электронларни нуқсонлардаги ҳолатлари зичлиги Гаусс тақсимоти бўйича ёзилганда

$$\varepsilon_0 = \frac{a_2\varepsilon_{D_2} - a_1\varepsilon_{D_1} + \sqrt{a_1a_2(\varepsilon_{D_2} - \varepsilon_{D_1})^2 + (a_1 - a_2)\ln\left(\frac{g(\varepsilon_{D_2})}{g(\varepsilon_{D_1})}\right)}}{(a_2 - a_1)}, \quad (2.7)$$

гиперболиксеканс тақсимоти билан ёзилганда эса

$$\varepsilon_0 = \frac{b_2\varepsilon_{D_2} + b_1\varepsilon_{D_1} + \ln\left(\frac{g(\varepsilon_{D_2})}{g(\varepsilon_{D_1})}\right)}{b_1 + b_2}. \quad (2.8)$$

2. Олдинги параграфда кўриб ўтдикки нуқсонлар ва рухсат этилган зоналарнинг экспоненциал «думлари»даги электрон ҳолатлари орасидаги оптик ўтишларни ютилиш коэффициентлари ҳам битта ҳад билан аниқланади. Шунинг учун ютилиш коэффициенти спектрларини аналитик ечимларини олиш учун ютилган фотонларни энергиясига боғлиқ ҳолда (2.6) ёки (1.1) формулалардан фойдаланилади. Спектрларни Гаусс тақсимоти бўйича ҳисобланганда ε_0 ни қиймати валент зона «думи»дан нуқсонларга оптик ўтишлар учун

$$\varepsilon_0 = \frac{2a\varepsilon_D - \beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 + 4a(\beta_1(\varepsilon_D - \varepsilon_V) + \ln\left(\frac{g(\varepsilon_D)}{N(\varepsilon_V)}\right))}}{2a}, \quad (2.9)$$

нуқсондан ўтказувчанлик зонаси «думи»га ўтишлар учун

$$\varepsilon_0 = \frac{2a\varepsilon_D - \beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + 4a(\beta_2(\varepsilon_C - \varepsilon_D) + \ln\left(\frac{N(\varepsilon_C)}{g(\varepsilon_D)}\right))}}{2a} \quad (2.10)$$

ифодалар олинди. Гиперболиксеканс тақсимоти ишлатилганда эса, валент зона «думи»дан нуқсонга ўтишлар учун

$$\varepsilon_0 = \frac{\beta_1\varepsilon_V + b\varepsilon_D + \ln\left(\frac{N(\varepsilon_V)}{2g(\varepsilon_D)}\right)}{\beta_1 + b}, \quad (2.11)$$

нуқсондан ўтказувчанлик зонасига ўтишлар учун эса

$$\varepsilon_0 = \frac{\beta_2\varepsilon_C + b\varepsilon_D + \ln\left(\frac{2g(\varepsilon_D)}{N(\varepsilon_C)}\right)}{\beta_2 + b}, \quad (2.12)$$

ифодаларини олинди [40].

3. Катта энергияли фотонларни нуқсонлардаги электрон ҳолатлари иштирокидаги ўтишлари билан аниқланадиган ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаларини ҳисоблаш учун Кубо-Гринвуд формуласини иккига ажратиш кераклигини олдинги параграфда кўриб ўтдик. Буни ҳисобга олиб (1.1) ифодани қуйидаги кўринишларда ёзилди. Валент зона ва уни «думи»даги ва нуқсонлар орасидаги электрон ўтишлари учун

$$\alpha \sim \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (2.13)$$

Агар (2.6) формуладан фойдаланилса ютилиш коэффициенти спектрларини

$$\alpha_1 \sim \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \left\{ f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) - f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F + \hbar\omega}{kT}\right) \right\} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}$$

$$\alpha_2 \sim \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad \alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (2.14)$$

ифодадан аниқланди. Бу формулалардаги α_1 - валент зонанинг «думи»дан нуқсонларга, α_2 - эса валент зонадан нуқсонларга электронларни оптик ўтишлари билан аниқланади. ε_0 ни ифодасини интегралланувчи функцияни танланишига мос ҳолда (2.9) ёки (2.10) кўринишларда ёзилди.

(1.1) формуладан электронларни нуқсонлардаги ҳолатлардан ўтказувчанлик зонаси ва унинг «думлари»даги ҳолатларга оптик ўтишлари учун ютилиш коэффициенти спектрларини ҳисоблашда

$$\alpha \sim \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (2.15)$$

ифодадан, (2.6) дан ҳисобланганда эса $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$

$$\alpha_1 \sim \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_0} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega},$$

$$\alpha_2 \sim \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \left\{ f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) - f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F + \hbar\omega}{kT}\right) \right\} \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \quad (2.16)$$

ифодалардан фойдаланилди. Булардаги α_1 - нуқсонлардан ўтказувчанлик зонасига, α_2 - эса нуқсонлардан ўтказувчанлик зонаси «думи»га электрон ўтишларини аниқлайди. Бу ердаги интеграл чегараси ε_0 ни ҳам интегралланувчи функцияга мослаб (2.11) ёки (2.12) кўринишларда ёзилди [41]. Эслатиб ўтимизки, ютилган фотонларни энергияси 0,2 эВ дан кичик бўлмаса (2.14) ва (2.15) формулаларни натижалари бир-биридан умуман фарқ қилмайди.

2.2. Кубо-Гринвуд формуласини гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг электрўтказувчанлигини типига боғланишлари

Биз юқорида n-тип электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларда оптик ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаларини ҳисоблашни қараб чиқдик. Агар гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни электрўтказувчанлигини типи ўзгарса ютилган фотонларни энергиясига боғлиқ ҳолда ютилиш соҳаларини ўзгариши мумкин эканлигини ҳам 1.4. параграфда кўрсатиб ўтилган эди. Ютилиш соҳаларини ўзгариши Кубо-Гринвуд формуласидаги интегрални чегараларини ҳам бир оз ўзгартиради. Кубо-Гринвуд формуласини ҳисоблашлар ютилиш коэффициентини қийматлари ундаги интеграл чегарасига жуда кучли боғлиқ бўлишини кўрсатди [42]. Шунинг учун, ҳисоблашларни бажаришда бу чегаралардаги ҳар қандай ўзгаришни албатта ҳисобга олиш керак. Булардан келиб чиқиб, олдин псевдолегирланган (яъни легирловчи киришмаларга эга бўлмаган) p-тип электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни ютилиш коэффициентлари спектрларини ҳисоблаш учун Кубо-Гринвуд формуласини мослаштиришни қараб чиқамиз.

1. $0 < \hbar\omega \leq \varepsilon_F - \varepsilon_V$ соҳадаги ютилиш коэффициенти спектрларини ютилган фотонларнинг энергияси кичик бўлганлиги учун (1.23) ёки (2.1) формулалардан ҳисоблаш мумкин. Ютилиш коэффициентининг қийматлари электронларни фақат локаллашган ҳолатлараро ўтишлари билан аниқланади.

2. $\varepsilon_F - \varepsilon_V < \hbar\omega \leq \varepsilon_C - \varepsilon_F$ соҳада электронларни валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га ва валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га оптик ўтишлари кузатилади. Шунинг учун Кубо-Гринвуд формуласидаги интегрални электронларни бу ўтиш турларга мослаб иккига ажратиб олинди

$$\alpha \sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \int_{\varepsilon_0 - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \quad (2.16)$$

Биринчи интеграл валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га, иккинчиси эса валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га электронларни оптик ўтишларига мос келади.

3. $\varepsilon_C - \varepsilon_F < \hbar\omega < \varepsilon_C - \varepsilon_V = E_g$ энергияли фотонлар ютилганда содир бўладиган электрон ўтишлари уч хил бўлганлиги учун, Кубо-Гринвуд формуласидаги интеграл ҳам учга ажратилди [43]. Электронларни оптик ўтиш турларини ҳисобга олган ҳолда, уни $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$

$$\begin{aligned} \alpha &\sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_1 &\sim \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_2 &\sim \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_3 &\sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

кўринишларда ёзилди. Бу ерда α_1 - валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига, α_2 - валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га, охириги α_3 - валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га оптик ўтишлар билан аниқланади.

4. $E_g < \hbar\omega$ соҳадаги электрон ўтишлари n-тип электрўтказувчанликка эга бўлган намуналар билан бир хил бўлганлиги учун ютилиш коэффициенти спектрал характеристикаси формуласининг кўриниши ҳам бир-бирига ўхшаш бўлади ва шунинг учун уни қуйидаги кўринишда ёзилди $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$

$$\begin{aligned} \alpha &\sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_1 &\sim \int_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_F} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_2 &\sim \int_{\varepsilon_C - \hbar\omega}^{\varepsilon_V} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}, \\ \alpha_3 &\sim \int_{\varepsilon_F - \hbar\omega}^{\varepsilon_C - \hbar\omega} g(\varepsilon)g(\varepsilon + \hbar\omega) \frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Бу ердаги интегралларни ўринлари ва электрон ўтишларига мос келиши ҳам n-тип электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич

намуналариники билан бир хил бўлади. Легирланган р-тип электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич намуналари учун спектрларни ҳисоблашда, улардаги Ферми сатҳи ўрнига (2.5) ифодадан аниқланадиган ϵ_0 ни ифода олинди.

Легирланмаган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичлар хусусий бўлиши учун $\beta_1 \approx \beta_2$ шарт бажарилиши, яъни Ферми сатҳи ҳаракатчанлик тирқишини ўртасида жойлашган бўлиши керак. Бундай намуналар учун ютилган фотонларни энергиясига боғлиқ бўлган соҳаларни сони учта бўлишини ҳисобга олиб, улардаги ютилиш коэффициенти спектрларини қуйидагича ҳисобланди.

1. $0 < \hbar\omega \leq \epsilon_C - \epsilon_F \approx \epsilon_F - \epsilon_V \approx E_g/2$ соҳа. Бу соҳада электронларни фақат валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонаси «думи»га оптик ўтишлари бажарилади. Шунинг учун, ютилиш коэффициенти спектрларини (1.23) ёки (2.9) ифодалардан ҳисобланди.

2. $\epsilon_C - \epsilon_F \approx \epsilon_F - \epsilon_V \approx E_g/2 < \hbar\omega < \epsilon_C - \epsilon_V = E_g$ бу соҳада юз берадиган электронларни оптик ўтишлари n- ва р-тип электрўтказувчанликка эга бўлган намуналарни учинчи соҳаси билан бир хил бўлганлиги учун улар билан аниқланадиган ютилиш коэффициенти спектрларини ҳисоблашда (2.3) ёки (2.17) лардан фойдаланилди. Дэвис-Мотт яқинлашиш усули билан Кубо-Гринвуд формуласини ҳисоблашда электрон ва ковакларни эффектив массалари бир-бирига тенг бўлганда, валент зона «думи»дан ўтказувчанлик зонасига ва валент зонадан ўтказувчанлик зонаси «думи»га оптик ўтишлари билан аниқланадиган ютилиш коэффицентларининг қийматлар тенг бўлади. Буларни ҳисобга олиб ютилиш коэффициенти спекрал характеристикасини қуйидаги ифодадан ҳам аниқланди

$$\alpha \sim \int_{\epsilon_F - \hbar\omega}^{\epsilon_F} g(\epsilon)g(\epsilon + \hbar\omega) \frac{d\epsilon}{\hbar\omega} = 2 \int_{\epsilon_C - \hbar\omega}^{\epsilon_F} g(\epsilon)g(\epsilon + \hbar\omega) \frac{d\epsilon}{\hbar\omega} + \int_{\epsilon_V}^{\epsilon_C - \hbar\omega} g(\epsilon)g(\epsilon + \hbar\omega) \frac{d\epsilon}{\hbar\omega}. \quad (2.19)$$

3. $\epsilon_C - \epsilon_V = E_g < \hbar\omega$ соҳа. Бу соҳадаги электрон ўтишлари ҳам n- ва р- тип электрўтказувчанликка эга бўлган гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларни 4-соҳаси билан бир хил бўлганлиги учун спектрларни ҳисоблаш усуллари ҳам бир хил бўлади.

НАТИЖА ВА ХУЛОСАЛАР

1. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг рухсат этилган зоналаридаги даражали ва уларнинг экспоненциал «думлари»даги электрон ҳолатлари зичлигини энергияга боғланишини аниқловчи функциялар учун тажриба натижаларига мос келувчи ифодалар аниқланди.

2. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган нуқсонлар, узилган боғланишлар ва легирловчи киришмалардаги электрон ҳолатлари зичлиги тақсимоти учун, ўзгариш ва аниқланиш соҳаси Гаусс тақсимотига яқин бўлган, интегралланувчи гиперболиксекас кўринишидаги тақсимот таклиф қилинди.

3. Рухсат этилган зоналардаги локаллашмаган ва уларни «думлари»даги локаллашган электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтишлар учун ютилиш коэффиценти спектрал характеристикаларини Кубо-Гринвуд формуласидан ҳисоблашда, уни ютилган фотонларни энергиясига боғлиқ ҳолда соҳаларга ажралиш шартлари аниқланди.

4. Бу соҳалар учун Дэвис-Мотт яқинлашиш усули билан Кубо-Гринвуд формуласини ҳисоблашда, уни электрон ўтиш турларига мослаштириш шартлари аниқланди.

5. Электронларни ўтиш турларига мослаштирилган Кубо-Гринвуд формуласи гидрогенизацияланган аморф яримўтказгич намунасининг электрўтказувчанлигининг типига ҳам боғлиқ бўлиши кўрсатилди.

6. Гидрогенизацияланган аморф яримўтказгичларнинг ҳаракатчанлик тирқишида жойлашган нуқсонлар, узилган боғланишлар ва легирловчи киришмалардаги электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтишлар билан аниқланадиган ютилиш коэффиценти спектрларининг ифодалари олинди.

7. Катта энергияли фотонларни ютилганда нуқсонлардаги электрон ҳолатлари иштирок этувчи оптик ўтишлар билан аниқланадиган ютилиш коэффиценти спектрларининг ифодалари учун Кубо-Гринвуд формуласини электрон ўтишларига мослаштирилди.

Фойдаланилган адабиётлар рўйхати

1. Аморфные полупроводники / под ред. М. Бродского - М.: Мир. 1982. - 419 с.
2. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах (2-е изд. переработан. и доп.). - М.: Мир. Т.1. 1982. - 368 с.
3. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах (2-е изд. переработан. и доп.). - М.: Мир. Т.2. 1982. - 663 с.
4. Киреев П.С. Физика полупроводников. - М.: Высшая школа. 1969. - 590 с.
5. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. - М.: Наука. 1990. - 688 с.
6. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. - М.: Гос. Изд. Физмат. Лит. 1963 - 494 с.
7. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. - М.: Изд. Инос. лит. 1962. - 558 с.
8. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. - М.: Наука. 1979. - 416 с.
9. Коугия К.В., Шлимак И.С., Косерев А.И. и др. Фотопроводимость аморфного гидрогенизированного кремния, полученного ВЧ - разложением силана. // ФТП. 1982. Т. 16. N 19. С. 1534-1537.
10. Phillips J.C. Tauc networks and Tauc edges. // J. non-cryst. Solids. 1992. V 141. N1-3. P.1-2.
11. Кулик И.О., Педан А.Г. Фазовый переход в модели «сверхпроводящего стекла». // ЖЭТФ. 1980. Т.79. В. 4(10). С. 1469-1481.
12. Голикова О.А., Кузнецова А.Н., Кудоярова В.Х. и др. Особенности структуры пленок аморфного гидрированного кремния, осажденных методом разложения силана на постоянном токе. // ФТП. 1997. Т.31. N7. С.816-819.
13. Basalis N., Economou E.N., Cohen M.H. Simple derivation of exponential tails in the density of states. // Phys. Rev. B: Condens. Mater. 1988. V 37. N 5. P. 2714-2717.
14. Tauc J. Band tails in amorphous semiconductors. // J. non-cryst. Solids. 1987. V 97-98. Pt.1. P. 149-154.
15. Pickin W., Alonco J.C., Mendoza D. On the constant photoconductivity method in amorphous semiconductors. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1987. V 20. N 16. P. 341-345.
16. Клогихин А.А., Оглобин С.Г. Правило Урбаха и сингулярность Лифшица в спектрах электронных состояний неупорядоченных сред. // ЖТЭФ. 1991. Т. 100. №6. С. 2026-2037.
17. Лигачев В.А., Филиппов В.А. О природе эффекта псевдолегирования в a-Si:H. // ФТП. 1992. Т. 26. №9. С. 1540-1546.
18. Голикова О.А., Сорокина К.Л. Состояния оборванных связей в псевдолегированном аморфном гидрированном кремнии a-Si:H. // ФТП. 1992. Т.26. №8. С. 1511-1513.
19. Aljishi S., Cohen J.D., Ley L. Energy distribution and thermal broadening of band tail states in doped and undoped hydrogenated amorphous silicon. // J. non-cryst. Solids. 1989. V 114. N 1. P. 247-299.
20. Park J.S., Han M.K. Effects of operating temperature on optical-absorption coefficient and optical band of hydrogenated amorphous silicon. // J. non-cryst. Solids. 1989. V 65. N 11. P. 4456-4458.
21. Theye M.L. Optical absorption in amorphous semiconductors. // Physics Scr. 1989. V 29. P. 157-161.
22. Khawaja E.E., Salim M.A, Khan M.A. at el. XPS, Auder electronical and optikal studies of Vanadium phosphate glasses doped with nikel oxide. // J. non- cryst. Solids. 1989. N 110. P. 33-43.

23. Fahs W., Sotiropoulos J. Optical characterization of amorphous semiconductor films. // 2nd Germ.-Greek Workshop Mater. Res. Inf. Technol. Julich, May 22-23, 1989. P. 54-60.
24. Demichelis J., Kanaiadakis G., Spagnolo R. at el. Tresso E. Urbach tail and gap state distribution in as-deposited and annealed a-(C-Si-Ge):H alloys. // Phil. Mag. B. 1989. V 60. N 5. P. 713-720.
25. Longeand C., Fournet G., Vanderhaghen R. Determination of the density of states of the conduction-band tail in hydrogenated amorphous silicon. // Phys. Rev. B. 1988. V 38. N 11. P. 7493-7510.
26. Abelson J. Photoconductivity of hydrogenated amorphous silicon. // J. non-cryst. Solids. 1989. V 114. N 2. P. 450-452.
27. Langford A. A., Fleet M. L., Nelson B. P. at el. Infrared absorption strength and hydrogen content of hydrogenated amorphous silicon. // Phys. Rev. B. 1992. V 45. N 23. P. 13367-13377.
28. Орлов А.Г. Спектральный анализ полупроводников. – Ленинград: Наука. 1971. - 170 с.
29. Аморфный кремний и родственные материалы. /Сб. обзор. под ред. Х. Фрицше - М.: Мир. 1991. - 542 с.
30. Барейкис В. А., Катилюс Р., Милюиште Р. Флуктуационные явления в неравновесных условиях. – Вильнюс: Моклас. 1989. - 218 с.
31. Уханов Ю.И. Оптика полупроводников. – Ленинград: Высшая школа. 1974. - 134 с.
32. Электронные свойства упорядоченных и неупорядоченных систем. / под ред. В. С. Бойденко. – Ярославль: ЯрГУ. 1979. - 175 с.
33. Джаксимов Е.Т. Элементы теории фотонных и фононных эффектов в полупроводниках. – Тошкент: Фан. 1979. - 175 с.
34. Розентур К.И. Флуктуации в полупроводниках со сложной зонной структурой.: Автореф. дис. на соиск. учен. степн. кан. физ.-мат. наук – М.: МГУ. 1972. - 14 с.
35. Винецкий В.Л., Холодаров Г.А. Статистическое взаимодействие электронов и дефектов в полупроводниках. – Киев: Наукова думка. 1979. - 187 с.
36. Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбулк Д.В. Оптические свойства полупроводников. – Киев: Наукова думка. 1987. 606 с.
37. Оптические свойства полупроводников и диэлектриков / под ред. И.А. Гусака. - Кишинев: Штинца. 1986. - 133 с.
38. Проблемы физики неупорядоченных систем. Оптические явления в полупроводниках (материалы X зимней школы ФТИ по физике полупроводников). – Ленинград: ЛИЯФ. 1982. - 233 с.
39. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. - М.: Мир. 1973. – 456 с.
40. Луквенчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. - М.: Радио и связь. 1990. - 294 с.
41. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твёрдые тела. - М.: Мир. 1986. - 556 с.
42. Nata N., Wagner S. A. comprehensive defect model for amorphous silicon. // J. Appl. Phys. 1992. V 72. N 7. P. 2857-2872.
43. Голикова О.А., Кузнецов А.Н., Кудаярова В.Х. и др. Особенности структуры пленок аморфного гидрированного кремния, осажденных методом разложения силана на постоянном токе в магнитном поле.// ФТП. 1997. Т 31. № 7. с. 816-819.
44. Градштейн И.С., Рьжик М.И. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. - М.: Гос. изд. физ. - мат. лит. 1963. -1100 с.

ЧОП ЭТИЛГАН ИЛМИЙ ИШЛАР РЎЙХАТИ

1. Икрамов Р.Г., Жалалов Р.М., Абдулазизов Б.Т., Ёқуббаев А.А. “Спектры коэффициента поглощения фотонов малых энергий в аморфных полупроводниках” НамДУ илмий ахбороти, 2008, № 2, 23-26 бетлар.
2. Зайнобиддинов С., Икрамов Р.Г., Нуритдинова М.А., Абдулазизов Б.Т., Ёқуббаев А.А. “Плотность нелокализованных электронных состояний и оптическая ширина щели подвижности аморфных полупроводников” Известия Опшского технологического университета, 2008, №1, 225-230 бетлар
3. Турсунов М.Н., Рахимов Н., Муродов М., Абдулазизов Б.Т. “Домашняя фотоэлектрическая система с аккумулятором”, “Табиий фанлар ва экологияга оид айрим муаммолар”, Илмий мақолалар тўплами, НамДУ, 2009, 3-7 бетлар.
4. Турсунов М.Н., Рахимов Н., Муродов М., Абдулазизов Б.Т. «Свойства аккумуляторов домашних фотоэлектрических систем», “Табиий фанлар ва экологияга оид айрим муаммолар”, Илмий мақолалар тўплами, НамДУ, 2009, 7-9 бетлар.
5. Абдуллаев Б.Т., Жалалов Р.М., Абдулазизов Б.Т., Абдуллаев У. “Назарий механикадан муаммоли маърузалар”, “Табиий фанлар ва экологияга оид айрим муаммолар”, Илмий мақолалар тўплами, НамДУ, 2009, 28-32 бетлар.
6. Жалалов Р.М., Икрамов Р.Г., Абдулазизов Б.Т., Ёқуббаев А.А., Мамажонова М.И., Сайфуддинов Р.С. “Псевдолегирланган аморф кремний пардаларида ютилиш коэффициенти спектрларидан нуқсонларни концентрациясини аниқлаш усули хақида”, “Табиий фанлар ва экологияга оид айрим муаммолар”, Илмий мақолалар тўплами, НамДУ, Наманган, 2009, 32-37 бетлар.
7. Абдулазизов Б.Т. “Ўқитиш жараёнида тахлилий фикрлашни ташкил этиш” “Меҳнат ва касб таълими бакалавриат йўналишларида муҳандислик фанларини ўқитишнинг долзарб масалалари” Республика илмий-амалий конференция материаллари, НамДУ, Наманган, 2009, 45-47 бетлар.
8. Абдуллаев Х.О., Жалалов Р.М., Абдулазизов Б.Т., Абдуллаев У. “Назарий механикадан маърузаларда муаммоли вазиятлар”, “Меҳнат ва касб таълими бакалавриат йўналишларида муҳандислик фанларини ўқитишнинг долзарб масалалари” Республика илмий-амалий конференция материаллари, НамДУ, Наманган, 2009, 67-68 бетлар.
9. Захидов И.О., Рафиқов А., Атабеков Б., Абдулазизов Б., Собитова М., Шайназарова Д., Шерматова Н. “Касб-хунар коллежларининг физика курсида электр бўлимидан лаборатория машғулотларини ўтказишда техника хавфсизлиги”, “Меҳнат ва касб таълими бакалавриат йўналишларида муҳандислик фанларини ўқитишнинг долзарб масалалари” Республика илмий-амалий конференция материаллари, НамДУ, Наманган, 2009, 57-59 бетлар.
10. Рахимов Н., Муродов М., Абдулазизов Б.Т., Каландаров Б. Турсунов М.Н. «Свойства аккумуляторов домашних фотоэлектрических систем», “Кадрлар тайёрлаш сифатини оширишда замонавий педагогик технологияларни роли: тажриба ва истиқболлар”, Республика илмий-амалий конференция материаллари, НамМПИ, Наманган, 2009, 301-302 бетлар.
11. Рахимов Н., Муродов М., Турсунов М.Н., Абдулазизов Б.Т. “Домашняя фотоэлектрическая система с аккумулятором”, “Кадрлар тайёрлаш сифатини оширишда замонавий педагогик технологияларни роли: тажриба ва истиқболлар”, Республика илмий-амалий конференция материаллари, НамМПИ, Наманган, 2009, 300-301 бетлар.