УЎК 537.311.322:535.34

КУБО-ГРИНВУД ФОРМУЛАСИ АСОСИДА АМОРФ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРНИНГ ЭКСПОНЕНЦИАЛ ОПТИК ЮТИЛИШ КОЭФФИЦИЕНТИ СПЕКТРЛАРИНИ ТАҲЛИЛ ҚИЛИШ

Икрамов Рустамжон Ғуломжонович,
Наманган давлат техника университети
Fizika kafedrasi professori (DSc)
rgikramov@mail.ru
Мўминов Хуршидбек Адхамжон ўғли,
Наманган давлат техника университети
Fizika kafedrasi dotsenti (PhD)
xamuminov@mail.ru
Умаров Сарвар Савриддин ўғли,
Наманган давлат техника университети
Fizika kafedrasi tayanch doktoranti
DrSavridinovich@gmail.com

Аннотация. *Ушбу ишда Дэвис – Моот яқинлашиш усулига кўра ёзиладиган Кубо – Гринвуд формуласини иккала кўринишидан экспоненциаль оптик ютилиш коэффициенти спектрларини ҳисоблашда, бу формуладаги интегрални аниқ интеграл кўринишда ёзиш кераклиги кўрсатилди. Шу билан бирга Кубо – Гринвуд формуласини аморф яримўтказгичларда энергияси ҳаракатчанлик тирқишини (тақиқланган зона) энергетик кенглигидан кичик энергияли фотонлар ютилганда юз берадиган электронларни оптик ўтишларига мос ҳолда ажратиб ёзиш кераклиги кўрсатилди. Фақат шу ҳолда Кубо – Гринвуд формуласини икки хил кўринишдаги ифодасидан олинадиган аналитик ечимлар бир хил кўринишга эга бўлиши кўрсатилди.*

Калит сўзлар: *аморф яримўтказгичлар, Дэвис – Моот яқинлашиш усули, Кубо –Гринвуд формуласи, экспоненциаль ютилиш спектрлари.*

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ ФОРМУЛЫ КУБО-ГРИНВУДА

Аннотация. *В данной работе показано, что при вычислении спектров экспоненциального коэффициента оптического поглощения формулы Кубо-Гринвуда в обеих формах, записанных согласно приближению Дэвиса-Мута, интеграл в этой формуле следует записывать в точной интегральной форме. Одновременно показано, что формулу Кубо-Гринвуда следует записывать отдельно для аморфных полупроводников, соответствующих оптическим переходам электронов, происходящим при поглощении фотонов с энергией меньше ширины запрещенной зоны подвижности (запрещённой зоны). Только в этом случае показано, что аналитические решения, полученные из двух форм формулы Кубо-Гринвуда, будут иметь одинаковую форму.*

Ключевые слова: *аморфные полупроводники, приближение Дэвиса-Мута, формула Кубо-Гринвуда, спектры экспоненциального поглощения.*

ANALYSIS OF EXPONENTIAL OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF AMORPHOUS SEMICONDUCTORS BASED ON THE KUBO-GREENWOOD FORMULA

Abstract. *This paper demonstrates that when calculating the exponential optical absorption coefficient spectra of the Kubo-Greenwood formula in both forms written using the Davis-Muth approximation, the integral in this formula should be written in exact integral form. It is also shown that the Kubo-Greenwood formula should be written separately for amorphous semiconductors corresponding to electron optical transitions occurring upon absorption of photons with energies smaller than the band gap. Only in this case is it shown that the analytical solutions obtained from the two forms of the Kubo-Greenwood formula will have the same form.*

Keywords: *amorphous semiconductors, Davis-Muth approximation, Kubo-Greenwood formula, exponential absorption spectra.*

Кириш. Маълумки, аморф яримўтказгичларни ютилиш коэффициенти спектрларни ҳисоблашда Дэвис – Моот яқинлашиш усулига кўра ёзиладиган Кубо-Гринвуд формуласидан фойдаланилади [1]. Бу формулани қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$\alpha(\hbar\omega) = A\int g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \tag{1}$$

Бу ерда $g_V(\varepsilon)$ - ва $g_C(\varepsilon)$ – лар мос равишда оптик ўтишларда иштирок этадиган электронларни бошланғич ва охирги ҳолатлари зичликларини тақсимотлари, $\hbar\omega$ – ютилган фотонларни энергияси.

Бу формуладан аналитик ечимни олиш учун [2] ишда ундаги интегрални аниқ интеграл кўринишда ёзиш кераклиги кўрсатилган. Шунинг учун (1) формулани қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$\alpha(\hbar\omega) = A\int\limits_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \tag{2}$$

Бу ерда ε_0 – валент ва ўтказувчанлик зоналарини экспоненциал думларнини кесишиш нуқтасини энергетик ўрни.

Агар аморф яримўтказгичларда энергияси ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигидан кичик энергияли фотонлар ютилса улар бир вақтни ўзида электронларни оптик ўтишлари: валент зона думидан ўтказувчанлик зонасига, валент зона думидан ўтказувчанлик зонасининг думига ва валент зонадан ўтказувчанлик зонасининг думига юз беради. Шунинг учун (2) формулани юқоридаги электронларни оптик ўтишларига мослаб учга ажратиш керак:

$$\begin{aligned}\alpha(\hbar\omega) &= A\int\limits_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A\int\limits_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \\ &+ A\int\limits_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} + \\ &+ A\int\limits_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_V} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \alpha_1(\hbar\omega)+\alpha_2(\hbar\omega)+\alpha_3(\hbar\omega)\end{aligned} \tag{3}$$

Бу ерда $\alpha_1(\hbar\omega)$ – электронларни валент зона думидан ўтказувчанлик зонасига, $\alpha_2(\hbar\omega)$ – валент зона думидан ўтказувчанлик зонаси думига, $\alpha_3(\hbar\omega)$ – валент зонадан ўтказувчанлик зонаси думига оптик ўтишлари коэффициентларини спектрлари.

(3) формуладаги $\alpha_1(\hbar\omega)$ –, $\alpha_2(\hbar\omega)$ – ва $\alpha_3(\hbar\omega)$ – ларни аналитик ечимларини олиш учун валент ва ўтказувчанлик зонаси, ҳамда уларни экспоненциал думларидаги ҳолат зичликлари тақсимотларини билиш керак. Одатда аморф яримўтказгичларнинг рухсат этилган зоналаридаги локаллашмаган электрон ҳолатлари зичликларини тақсимоти параболик ёки чизиқли, бу зоналарни экспонциаль думларидаги локаллашган ҳолат зичликларини тақсимоти экспоненциал боғланишга эга бўлади деб олинади [3, 4, 5]. Шунинг учун биз бу ҳолат зичликларини қуйидаги кўринишларда танлаймиз:

Валент зона учун: $g_V(\varepsilon) = N(\varepsilon_V)\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_C}{E_g}$. (4)

Ўтказувчанлик зонаси учун: $g_C(\varepsilon) = N(\varepsilon_C)\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_V}{E_g}$. (5)

Валент зонани думи учун: $g_V(\varepsilon) = N(\varepsilon_V)\exp(-\beta_1(\varepsilon-\varepsilon_V))$. (6)

Ўтказувчанлик зонасини думи учун: $g_C(\varepsilon) = N(\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon-\varepsilon_C))$. (7)

(3) формуладаги ҳар бир ҳадни алоҳида-алоҳида ҳисоблаймиз:

$$\alpha_1(\hbar\omega) = A\int\limits_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = A\int\limits_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} N(\varepsilon_V)\exp(-\beta_1(\varepsilon-\varepsilon_V))N(\varepsilon_C)\frac{\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_V}{E_g}\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} =$$

$$= \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega E_g}\exp(\beta_1\hbar\omega)\int\limits_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_0}\exp(-\beta_1(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_V))(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_V)d(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_V)d(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_V) \tag{8}$$

[6] ишда (8) кўринишдаги интегралларни ҳисоблаш учун қуйидаги кўринишда ёзиш кераклиги кўрсатилган:

$$\int x\exp(ax)dx = \frac{\exp(ax)}{a^2}(ax-1)\,. \tag{9}$$

(9) дан фойдалансак, (8) қуйидаги кўринишга келади:

$$\alpha_1(\hbar\omega) = \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}\exp(\beta_1\hbar\omega)\left[\exp(-\beta_1(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)\right]_{\varepsilon_C-\hbar\omega}^{\varepsilon_0} =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}\exp(\beta_1\hbar\omega)(\exp(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)-$$

$$-\exp(-\beta_1(\varepsilon_C-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_C-\varepsilon_V)-1))$$

Бу формулада $B=AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)$ ва $\varepsilon_C-\varepsilon_V = E_g$ бўлганлигидан қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$\alpha_1(\hbar\omega) = \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}\exp(\beta_1\hbar\omega)(\exp(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)-$$

$$-\exp(-\beta_1E_g)(-\beta_1E_g-1)) = \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}(\exp(-\beta_1(\varepsilon_0-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)-$$

$$-\exp(-\beta_1E_g-\hbar\omega)(-\beta_1E_g-1))$$

$$\alpha_1(\hbar\omega) = \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}(\exp(-\beta_1(\varepsilon_0-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)- \tag{10}$$

$$-\exp(-\beta_1(E_g-\hbar\omega))(-\beta_1E_g-1))$$

Энди электронларни валент зона думидан ўтказувчанлик зонаси думига оптик ютилиш коэффициенти спектрини ҳисоблашни қараб чиқамиз:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A\int\limits_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega} g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}$$

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A\int\limits_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega} N(\varepsilon_V)\exp(-\beta_1(\varepsilon-\varepsilon_V))N(\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_C))\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} =$$

$$= \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega}\int\limits_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega}\exp(-\beta_1(\varepsilon-\varepsilon_V))\exp(\beta_2(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_C))d\varepsilon = \frac{B}{\hbar\omega}\times$$

$$\times\int\limits_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega}\exp(\beta_1\varepsilon_V)\exp(-\beta_1\varepsilon)\exp(\beta_2(\hbar\omega-\varepsilon_C))\exp(\beta_2\varepsilon)d\varepsilon =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega}\exp(\beta_1\varepsilon_V)\exp(\beta_2(\hbar\omega-\varepsilon_C))\int\limits_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega}\exp((\beta_2-\beta_1)\varepsilon)d\varepsilon$$

$$\alpha_2(\hbar\omega)=\frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}\exp(\beta_1\varepsilon_V)\exp(\beta_2(\hbar\omega-\varepsilon_C))(\exp((\beta_2-\beta_1)\varepsilon))\Big|_{\varepsilon_V}^{\varepsilon_C-\hbar\omega}=$$

$$=\frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}\exp(\beta_1\varepsilon_V)\exp(\beta_2(\hbar\omega-\varepsilon_C))(\exp((\beta_2-\beta_1)(\varepsilon_C-\hbar\omega)-\exp((\beta_2-\beta_1)\varepsilon_V))=$$

$$=\frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}(\exp(-\beta_1(\varepsilon_C-\hbar\omega-\varepsilon_V))-\exp(\beta_2(\varepsilon_V+\hbar\omega-\varepsilon_C)))=$$

$$=\frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}(\exp(-\beta_1(E_g-\hbar\omega))-\exp(-\beta_2(E_g-\hbar\omega)))$$

$$\alpha_2(\hbar\omega)=\frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}(\exp(-\beta_1(E_g-\hbar\omega))-\exp(-\beta_2(E_g-\hbar\omega))) \quad (11)$$

(3) формуладаги учинчи ҳадни ҳисоблашни қараб чиқамиз:

$$\alpha_3(\hbar\omega)=A\int_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_V}g_V(\varepsilon)g_C(\varepsilon+\hbar\omega)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}=\frac{A}{\hbar\omega}\int_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_V}N(\varepsilon_V)\frac{\varepsilon-\varepsilon_C}{E_g}N(\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_C))d\varepsilon=$$

$$=\frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{E_g\hbar\omega}\int_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_V}(\varepsilon-\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon+\hbar\omega-\varepsilon_C))d\varepsilon=$$

$$=\frac{B}{E_g\hbar\omega}\exp(\beta_2\hbar\omega)\int_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_V}(\varepsilon-\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon-\varepsilon_C))d(\varepsilon-\varepsilon_C)=$$

$$=\frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}\exp(\beta_2\hbar\omega)(\exp(\beta_2(\varepsilon-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon-\varepsilon_C)-1)\Big|_{\varepsilon_0-\hbar\omega}^{\varepsilon_V}=$$

$$=\frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}\exp(\beta_2\hbar\omega)(\exp(\beta_2(\varepsilon_V-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_V-\varepsilon_C)-1)-$$

$$-\exp(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C)-1))=$$

$$=\frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}(\exp(\beta_2(\hbar\omega-E_g))(-\beta_2E_g-1)-\exp(\beta_2(\varepsilon_0-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C)-1))$$

$$\alpha_3(\hbar\omega)=\frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}(\exp(\beta_2(\hbar\omega-E_g))(-\beta_2E_g-1)-\exp(\beta_2(\varepsilon_0-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C)-1)) \quad (12)$$

Энди Кубо-Гринвуд формуласини иккинчи кўринишда ёзилишини қараб чиқамиз. Бу формула қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$\alpha(\hbar\omega)=A\int g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}$$

Бу формуладаги интегрални ҳам аниқ интеграл кўринишида ёзамиз:

$$\alpha(\hbar\omega)=A\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0+\hbar\varepsilon\omega}g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} \quad (13)$$

(12) формулани ҳам, электронларни оптик ўтиш турларига мослаб учга ажратамиз:

$$\alpha(\hbar\omega)=A\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_0+\hbar\omega}g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}=A\int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega}g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}+$$

$$+A\int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C}g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}+A\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega}g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega}=\alpha_1(\hbar\omega)+\alpha_2(\hbar\omega)+\alpha_3(\hbar\omega)$$

(14)

Юқоридаги усулда (14) формуладаги ҳар бир ҳадни алоҳида – алоҳида ҳисоблаймиз:

$$\alpha_1(\hbar\omega) = A\int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} == \frac{A}{\hbar\omega}\int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} N(\varepsilon_V)\exp(-\beta_1(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_V))N(\varepsilon_C)\frac{\varepsilon-\varepsilon_V}{E_g}d\varepsilon =$$

$$= \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega E_g}\int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega}\exp(-\beta_1(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_V))(\varepsilon-\varepsilon_V)d\varepsilon =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega E_g}\exp(\beta_1\hbar\omega)\int_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega}\exp(-\beta_1(\varepsilon-\varepsilon_V))(\varepsilon-\varepsilon_V)d(\varepsilon-\varepsilon_V) =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega E_g}\exp(\beta_1\hbar\omega)(\exp(-\beta_1(\varepsilon-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon-\varepsilon_V)-1)\Big|_{\varepsilon_C}^{\varepsilon_0+\hbar\omega} =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}\exp(\beta_1\hbar\omega)((\exp(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)-$$

$$-(\exp(-\beta_1(\varepsilon_C-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_C-\varepsilon_V)-1)) = \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}((\exp(-\beta_1(\varepsilon_0-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)-$$

$$-(\exp(-\beta_1(\varepsilon_C-\hbar\omega-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_C-\varepsilon_V)-1)) = \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}((\exp(-\beta_1(\varepsilon_0-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)-$$

$$-(\exp(-\beta_1(E_g-\hbar\omega))(-\beta_1E_g-1))$$

$$\alpha_1(\hbar\omega) = \frac{B}{\hbar\omega E_g\beta_1^{\,2}}((\exp(-\beta_1(\varepsilon_0-\varepsilon_V))(-\beta_1(\varepsilon_0+\hbar\omega-\varepsilon_V)-1)-(\exp(-\beta_1(E_g-\hbar\omega))(-\beta_1E_g-1)) \quad (15)$$

Энди иккинчи ҳадни ҳисоблашни қараб чиқамиз:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = A\int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C} g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{A}{\hbar\omega}\int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C} N(\varepsilon_V)\exp(-\beta_1(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon-\varepsilon_C)d\varepsilon =$$

$$= \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{\hbar\omega}\int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C}\exp(-\beta_1(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_V)\exp(\beta_2(\varepsilon-\varepsilon_C)d\varepsilon =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega}\exp(\beta_1(\varepsilon_V+\hbar\omega))\exp(-\beta_2\varepsilon_C)\int_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C}\exp((\beta_2-\beta_1)\varepsilon)d\varepsilon =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}\exp(\beta_1(\varepsilon_V+\hbar\omega))\exp(-\beta_2\varepsilon_C)(\exp((\beta_2-\beta_1)\varepsilon)\Big|_{\varepsilon_V+\hbar\omega}^{\varepsilon_C})$$

$$\alpha_2(\hbar\omega) == \frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}\exp(\beta_1(\varepsilon_V+\hbar\omega))\exp(-\beta_2\varepsilon_C)(\exp((\beta_2-\beta_1)\varepsilon_C)-\exp((\beta_2-\beta_1)(\varepsilon_V+\hbar\omega))) =$$

$$= \frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}(\exp(-\beta_1(\varepsilon_C-\varepsilon_V-\hbar\omega))-\exp(\beta_2(\varepsilon_V+\hbar\omega-\varepsilon_C))) =$$

$$\alpha_2(\hbar\omega) = \frac{B}{\hbar\omega(\beta_2-\beta_1)}(\exp(-\beta_1(E_g-\hbar\omega)-\exp(\beta_2(\hbar\omega-E_g)) \quad (16)$$

(13) формуладаги учинчи ҳадни ҳисоблаймиз:

$$\alpha_3(\hbar\omega) = A\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} g_V(\varepsilon-\hbar\omega)g_C(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\hbar\omega} = \frac{A}{\hbar\omega}\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega} N(\varepsilon_V)\frac{\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_C}{E_g}N(\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon-\varepsilon_C))d\varepsilon =$$

$$= \frac{AN(\varepsilon_V)N(\varepsilon_C)}{E_g\hbar\omega}\exp(\beta_2\hbar\omega)\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega}(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_C)\exp(\beta_2(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_C))d(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_C) =$$

$$= \frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}\exp(\beta_2\hbar\omega)((\exp(\beta_2(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon-\hbar\omega-\varepsilon_C)-1))\Big|_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_V+\hbar\omega}) =$$

$$= \frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}\exp(\beta_2\hbar\omega)((\exp(\beta_2(\varepsilon_V-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_V-\varepsilon_C)-1)-$$

$$-\exp(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C)-1) =$$

$$= \frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}(\exp(\beta_2(\hbar\omega-E_g))(-\beta_2E_g-1)-\exp(\beta_2(\varepsilon_0-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C)-1))$$

$$\alpha_3(\hbar\omega) = \frac{B}{E_g\hbar\omega\beta_2^{\,2}}(\exp(\beta_2(\hbar\omega-E_g))(-\beta_2E_g-1)-\exp(\beta_2(\varepsilon_0-\varepsilon_C))(\beta_2(\varepsilon_0-\hbar\omega-\varepsilon_C)-1))$$

(17)

Бу формулалардан кўриш мумкинки, (10) ва (15), (11) ва (16) ҳамда (12) ва (17) формулалар бир хил кўринишга эга.

Хулоса. Булардан кўринадики, Дэвис – Моот яқинлашиш усулига кўра ёзиладиган Кубо – Гринвуд формуласини иккала кўринишидан экспоненциал оптик ютилиш коэффициенти спектрларини ҳисоблашда, бу формуладаги интегрални аниқ интеграл кўринишда ёзиш керак экан. Шу билан бирга Кубо –Гринвуд формуласини аморф яримўтказгичларда энергияси ҳаракатчанлик тирқишини (тақиқланган зона) энергетик кенглигидан кичик энергияли фотонлар ютилганда юз берадиган электронларни оптик ўтишларига мос ҳолда ажратиб ёзиш керак экан. Шунда Кубо – Гринвуд формуласини икки хил кўринишдаги ифодасидан олинадиган аналитик ечимлар бир хил кўринишга эга бўлар экан.

АДАБИЁТЛАР:

1. Зайнобидинов С., Икрамов Р.Г., Жалалов Р.М. Энергия Урбаха и плотность состояний аморфных полупроводников. // Журнал прикладной спектроскопии. 2011, Т. 78, Н.2, стр. 243-247.

2. Ikramov R.G., Mamaxanov A.A., Nuriddinova M.A., Jalalov R.M., Muminov Kh. M., Sultonov D.Q. Calculation of the interband absorption spectra of amorphous semiconductors using the Kubo-Greenwood formula. Journal of Applied Engineering. 2022 V.25, pp. 767-772.

3. Redfield D. Energy-band tails and optical absorption edge the case of a-Si:H. Solid State Communication. 2014, V.44, pp. 1347-1349.

4. O'Leary S.K. On The relationship between the distribution of electronic states and the optical absorption spectrum in amorphous semiconductors. Solid State Communications. 1999, V.109, pp. 589-594.

5. Моот Х., Девис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах - М., Мир, 1982, - 368 с.

6. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М., Наука, Гл. Ред. Физ. Мат. Лит., 1966, с. 544.*