ФАЗОВИЙ ЗАРЯДЛАР СОҲАСИ СИРТИ ЯҚИНИДАГИ ЭЛЕКТРОН ЖАРАЁНЛАР

И.Н.Каримов, М.З.Носиров, М.Эргашева, Л.Мадумарова

Мақолада МДЯ тузилмалар сирт ҳолатларининг электрофизик хоссалари вольт-фарад характеристикаси усуллари асосида тадқиқ қилинган ҳамда яримўтказгич сирти соҳасида қўйилган кучланишга боғлиқ ҳолда бойитилган, камбағаллашган ва инверс қатламлари мавжуд бўлиши кўрсатиб берилган.

***Калит сўзлар**: Лаплас тенгламаси, фазовий зарядлар соҳаси, сиртий потенциал, заряд ташувчилар.*

В статье на основе методов вольт-фарадных характеристик исследованы электрофизические свойства поверхностных состояний МДП структур и показано появление обогащенного, обедненного и инверсного слоев в ОПЗ в зависимости от приложенного напряжения.

***Ключевые слова**: уравнение Лапласа, область пространственного заряда, поверхностный потенциал, носитель заряда.*

The electrophysical properties of the surface states of MDP structures are studied on the basis of the methods of volt-farad characteristics and the appearance of a deified, depleted and inverted layers in the SCF is shown, depending on the applied voltage.

***Keywords**: Laplace equation, space charge region, surface potential, charge carriers.*

Замонавий илмий тадқиқот ишларида яримўтказгичлар ва яримўтказгичли асбоблар параметрларини аниқлаш учун сиғим спектроскопия усуллари жадаллик билан ривожланмоқда. Бу усулларнинг бошқа усулларга нисбатан асосий афзаллиги уларнинг юқори даражадаги сезгирлиги ҳамда реал ҳолдаги асбобларни ўлчаш имконияти борлигидадир.

Металл-яримўтказгич, металл – диэлектрик – яримўтказгич (МДЯ) структуралар ёки p-n ўтишларнинг асосий параметрларини аниқлаш учун сиғим-кучланиш усулларидан кенг фойдаланилади. Легирловчи аралашмалар концентрациясини ўлчаш ишлари, чуқур сатҳлар ва уларнинг характеристикалари, мувозанатда бўлмаган заряд ташувчиларнинг генерация вақти, сиртий ҳолатлар зичлиги ва уларнинг энергиялар бўйича тақсимотлари бу усуллар ёрдамида аниқланади.

Яримўтказгичлар параметрларини ўлчаш учун фойдаланиладиган сиғим-кучланиш усули структура сиғимининг унга қўйилган кучланишга боғлиқлигига асосланган. Ўз навбатида сиғим эса яримўтказгичнинг сиртида жойлашган ҳажмий заряд ҳисобига ҳосил бўлади. Сиғим-кучланиш усулларининг асосини фазовий заряд соҳаси сиртидаги электрон жараёнлар назарияси ва сиртий дифференциал сиғим ташкил этади.

Яримўтказгич сирти соҳасида кучланишга боғлиқ ҳолда бойитилган, камбағаллашган ва инверс қатламлар мавжуд бўлади. Бу қатламларнинг физикавий хоссаларини аниқлаш учун термодинамик мувозанат ҳолатида бўлган идеал МДЯ структурани таҳлил қиламиз.

Бу ҳолат учун сирт соҳасида жойлашган фазовий зарядлар структурага қўйилган кучланиш ҳисобига ҳосил бўлади ва у металл электроддаги қарама-қарши белгили зарядга тенг. Аниқлик учун n-типдаги яримўтказгич сирти соҳасининг энергетик диаграммасидан фойдаланамиз (1-расм).

Диаграммага асосан электр потенциал ψ қуйидаги ифода билан аниқланади:

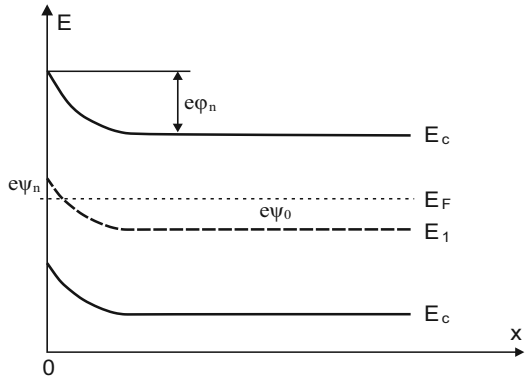
$$e\psi = E_F - E_i$$

E_F – яримўтказгичдаги Ферми сатҳи;

E_i – бир хил температурадаги хусусий яримўтказгичдаги Ферми сатҳига мос келувчи энергетик сатҳ. (Яримўтказгич тақиқланган зонасининг ўртасига мос келувчи энергетик сатҳ.)

Яримўтказгич сирти соҳасидаги энергетик зоналарнинг эгрилиги мавжуд бўлганда ўтказувчанлик E_c ва валент E_v зоналардаги энергетик сатҳлар x координатага боғлиқ бўлади, яъни x нинг функциясидир. E_i энергетик сатҳ ва энергетик потенциал ψ ҳам x координатага боғлиқдир: $E_i(x)$, $\psi(x)$.

Яримўтказгич сиртидан узоқликда, яъни яримўтказгич ҳажмида (энергетик эгрилаш бўлмаган масофада) E_i – энергетик сатҳ хусусий яримўтказгичнинг Ферми сатҳи билан мос тушади.



1-расм. *Электрон ўтказувчанликка эга бўлган яримўтказгич сирти соҳасининг энергетик диаграмаси*

Ихтиёрий *x* нуқтадаги потенциал потенциаллар йиғиндисига тенг бўлсин

$$\psi(x)=\psi_0+\varphi(x)$$

бу ерда ψ_0 – яримўтказгич ҳажмидаги потенциал (энергетик зоналар эгрилиги йўқ). Яримўтказгич сиртида эса $\psi_0=\psi_n$ тенг бўлади.

Яримўтказгич сиртидаги энергетик зоналарнинг эгилиши сирт соҳасидаги ҳажмий зарядларга боғлиқ ва ихтиёрий *x* нуқтада электростатик потенциал $\varphi(x)$ билан аниқланади. Бу электростатик потенциал ўз навбатида ҳажмий зарядларнинг электр майдони билан боғланган. Яримўтказгич сиртида потенциал $\varphi(0)=\varphi_n$ га тенг бўлади ва сирт электростатик потенциали билан мос тушади. Миқдор жиҳатдан $(-e\varphi_n)$ энергетик зоналарнинг сиртидаги эгрилигига тенг (1-расм). Сиртдан узоқдаги электростатик потенциал нолга тенг $\varphi = 0$.

Агар сиртдаги электростатик потенциал нолга тенг, яъни $\varphi = 0$ бўлса, у ҳолда энергетик зоналарнинг эгилиши бўлмайди. Ушбу шарт ясси зоналар шарти дейилади. Агар яримўтказгич сиртида потенциал $\psi_0=\psi_n=0$ га тенг бўлса, у ҳолда сиртда хусусий яримўтказгич шарти бажарилади. Сиртдаги Ферми сатҳи эса E_i энергетик сатҳ билан мос тушади.

Айнимаган яримўтказгичларда электронлар ва коваклар концентрациясини $\varphi(x)$ ва $\psi(x)$ потенциаллар орқали қуйидаги кўринишда ифодалаш мумкин:

$$n(x)=N_c\cdot e^{-\frac{E_c(x)-E_F}{kT}}=n_i\cdot e^{\frac{e\psi(x)}{kT}}=n_0\cdot e^{\frac{e\varphi(x)}{kT}}$$

$$p(x)=N_v\cdot e^{\frac{E_F-E_v(x)}{kT}}=n_i\cdot e^{\frac{e\psi(x)}{kT}}=p_0\cdot e^{\frac{e\varphi(x)}{kT}}$$

Яримўтказгичнинг сирт электростатик потенциали (φ_n) ҳамда ҳажмий потенциали (ψ_0)нинг қандай қийматлар ва ишоралар қабул қилишига қараб сирт қатлами учун бир нечта характерли шартларни кўриш мумкин.

Агар φ_n ва ψ_0 бир хил ишорали бўлса, у ҳолда яримўтказгич сирти яқинида асосий заряд ташувчиларга бойиган қатлам ҳосил бўлади (асосий заряд ташувчилар концентрацияси юқори даражада бўлади). Бу ҳолда ҳажмий заряд қатлами бойиган (тўйинган) дейилади.

Агар φ_n ва ψ_0 ҳар хил ишорага эга бўлса, у ҳолда икки ҳолатни кўриш мумкин. Сирт яқинида асосий ва асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси бир-биридан фарқ қилади. Агар бир вақтда асосий ва асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси асосий заряд ташувчиларнинг яримўтказгич ҳажмидаги концентрациясидан кичик бўлса, у ҳолда камбағаллашган қатлам ҳосил бўлади. Агар сирт қатламида асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси яримўтказгич ҳажмидаги асосий заряд ташувчилар концентрациясидан катта бўлса, у ҳолда яримўтказгич сиртида инверс қатлам ҳосил бўлади.

Яримчексиз ҳажмдаги яримўтказгич кристали мавжуд деб фараз қилайлик. У сиртда $x = 0$ координатага эга бўлсин (1-расм). Яримўтказгич N_d ва N_a концентрацияли донор ва акцепторга (мос ҳолда)

эга бўлсин. Энергетик зоналар эгилиши $e\varphi_n$ га мос келади. Сирт қатлами ψ_n ҳажм потенциали билан характерланади. Акцептор ва донорли аралашмалар бутунлай ионлашган деб фараз қилиб, ҳажмий зарядлар зичлиги тақсимотини аниқлаймиз.

Яримўтказгич ҳажмида (сиртдан етарлича узоқликда) электронейтраллик шарти бажарилади.

$$n_0\text{-}p_0=N_d\text{-}N_a \qquad (1)$$

Яримўтказгичнинг сиртида ушбу шарт бажарилмайди ва ҳажмий заряд зичлиги қуйидаги кўринишда ифодаланади.

$$\rho(x)=\text{-}e[n(x)+N_a]+e[p(x)+N_d]$$

ёки (1) шартни ҳисобга олсак,

$$\rho(x)=\text{-}e[n(x)\text{-}n_0]+e[p(x)+p_0]$$

кўринишда бўлади Агар ўлчамсиз катталикларни $\upsilon=e\psi/(kT)$ ва $\psi_s=e\varphi/(kT)$ киритсак, у ҳолда ҳажмий заряд зичлиги қуйидаги кўринишда бўлади.

$$\rho(x)=\text{-}en_0(e^{\upsilon}\text{-}1)+ep_0(e^{\text{-}\upsilon}\text{-}1)$$

Пуассон тенгламасини ечиш орқали электростатик потенциалнинг $\varphi(x)$ координатага боғлиқлигини ҳисоблаймиз.

$$\frac{d\varepsilon}{dx}=e\left[p\left(x\right)-p_0\right]-e[n\left(x\right)-n_0] \qquad (2)$$

Бу (2) ифодани ўлчамсиз ψ_s потенциал орқали қуйидаги кўринишда ёзамиз

$$\frac{d^2\psi_s}{dx^2}=-\frac{e^2}{kT\varepsilon\varepsilon_0}\left[p_0\left(e^{-\psi_s}-1\right)-n_0\left(e^{\psi_s}-1\right)\right]=-\frac{e^2\cdot n}{kT\varepsilon\varepsilon_0}[\lambda\left(e^{-\psi_s}-1\right)-\lambda\left(e^{\psi_s}-1\right)]$$

Бу ифодадаги λ қуйидаги кўринишга эга

$$\lambda=p_0/n_i=n_i/n_0=(p_0/n_0)^{1/2}=e^{\text{-}\upsilon 0}$$

$x\to\infty$ да $\frac{d\psi_s}{dx}=0$ чегаравий шартни ҳисобга олган ҳолда, тенгламанинг ҳар икки томонини $2\frac{d\psi_s}{dx}$ га кўпайтирсак ва интегралласак

$$\frac{d\psi_s}{dx}=\pm 2l_i^{-1}F(\lambda,\psi_s) \qquad (3)$$

тенглама келиб чиқади, бу ерда

$$F(\lambda,\psi_s)=[\lambda(e^{(-\psi_s)}+\psi_s-1)+\lambda^{-1}(e^{(\psi_s)}-\psi_s-1)]^{1/2}\geq 0$$

га тенг.

Агар $\psi_s>0$ бўлса, бу ифода мусбат белгиси билан ҳисобланади, $\psi_s<0$ бўлса, у ҳолда ифода манфий белгиси билан олинади. Энергетик зона пастга (қуйига) қараб эгилган бўлса, ψ_s катталик мусбат ҳисобланади ва аксинча бўлса, манфий ҳисобланади.

$$l_i=\left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0kT}{e^2n_i}\right)^{1/2}$$

ўлчамли катталик бўлиб, хусусий яримўтказгичдаги электр майдонини экранлашнинг Дебай узунлиги дейилади.

(3) тенглама ҳажмий заряд соҳасидаги электр майдон кучланганлигининг энергетик зоналар эгилишига боғлиқ эканини ифодалайди.

(3) ифодани интеграллаш орқали потенциалнинг координатага боғлиқлигини аниқлаш мумкин.

$$x\left(\psi_s\right)=\pm\frac{l}{2}\int_{\psi_n}^{\psi_s}\frac{d\psi_s}{F(\lambda,\psi_s)} \qquad (4)$$

(4) ифода аналитик кўринишда фақат хусусий ҳоллар учун ечимга эга.

Энди аралашмали электр ўтказувчанликка эга яримўтказгични кўриб чиқамиз.

Аралашмали яримўтказгичда бойитилган қатлам мавжуд бўлса, у ҳолда асосий заряд ташувчилар концентрацияси асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрациясидан жуда катта бўлгани сабабли

асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг ҳажмий зарядга таъсирини ҳисобга олмаса ҳам бўлади ва $F(\lambda,\psi_s)$ функция

$$F(\lambda,\psi_s)=[\lambda^{-1}(e^{\psi s}-\psi_s-1)]^{1/2}$$

кўринишга келади.

Агар энергетик зоналар етарлича катта эгилган $\psi_n \geq 3$ бўлса, у ҳолда $F(\lambda, \psi_s)=(\lambda^{-1}\cdot e\psi_s)^{1/2}$ га тенг бўлади ва (4) ифодани интеграллаш потенциаллар тақсимотини аниқлашга имкон беради.

$$x=ln(e^{-\psi s/2}-e^{-\psi n/2}) \qquad (5)$$

(5) ифодадан қуйидаги асосий ҳолатларни хулоса қилиш мумкин:

x координатанинг узайиши билан сирт потенциали камаяди ва $l_n=\left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 kT}{e^2 n_0}\right)^{1/2}$ қалинликдаги қатламда ҳажмий заряднинг асосий қисми жойлашган бўлади, бу ифодада l_n- аралашмали яримўтказгични экранлашнинг Дебай узунлиги ва у асосий заряд ташувчилар концентрацияси билан аниқланади (берилган ҳол учун электронлар).

Электр ўтказувчанликка эга яримўтказгичда энергетик зоналар $0>\psi_n>-2\upsilon_0$ интервалда (соҳада) эгилган бўлсин. У ҳолда яримўтказгич сирти яқинидаги асосий заряд ташувчилар концентрацияси мувозанатдаги заряд ташувчилар концентрациясидан n_0 етарлича кичик бўлади ва асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси етарлича катта эмас. Камбағаллашган соҳанинг ҳажмий заряди аралашмалар ионлари билан ҳосил қилинади.

Бу ҳол учун ψ_n<-3 бўлганда функция $F=[\lambda^{-1}(-\psi-1)]^{1/2}$ га тенг ва координата

$$x=ln[(-\psi_n-1)^{1/2}-(-\psi-1)^{1/2}] \qquad (6)$$

кўринишга эга бўлади.

Бу олинган ифодалар Шоттки барьерига мос келувчи электростатик потенциалнинг масофага боғлиқ бўлган параболик ўзгаришларини характерлайди.

Агар яримўтказгичнинг сирт қисмига яқин соҳада асосий бўлмаган заряд ташувчилар концентрацияси асосий заряд ташувчилар концентрациясидан катта бўлса, у ҳолда инверс қатлам ҳосил бўлади ва $F(l,\psi_s)$ функция $F=[\lambda e^{-\psi s}-\lambda^{-1}(\psi+1)]^{1/2}$ кўринишда бўлади. Потенциалнинг (ψ) катта қийматларида бу функция $F=(\lambda e^{-\psi s})^{1/2}$ (7) кўринишга эга бўлади.

Инверс қатламдаги потенциал тақсимоти (4) ва (5) ифодаларга мувофиқ ҳамда ψ_s нинг катта қийматларида қуйидагича ифодаланади:

$$x=l_p(e^{\psi s/2}-e^{\psi sn/2})$$

бу ерда

$$l_p=\left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\cdot kT}{e^2\cdot p_0}\right)^{1/2} \qquad (8)$$

F функция учун келтирилган ифодалар (2) тенгламанинг ечимларига мос тушади. Камбағаллашган қатламдан инверс қатламга ўтиш соҳаси бундан мустасно.

Бу ифодалар экспериментал ишлар таҳлилларида сиртий заряд ва унга мос ҳолдаги электр майдон кучланганлигини ҳисоблашларда қўлланилади.

Адабиётлар:

1. Зайнобидинов С., Акромов Х. Яримўтказгичлар параметрларини аниқлаш усуллари.- Т.: Ўзбекистон, 2001.- 318 б.

2. Зайнобидинов С., Тешабоев А. Яримўтказгичлар физикаси.- Т.: Ўқитувчи, 1999.- 24 б.

3. Колешко В.М., Каплан Т.Д. C-V методы измерения параметров МОП структуры. Обзоры по электронной технике. Сер.3. Микроэлектроника. вып.2/456/М. ЦНИИ, Электроника, 1977 г.

4. Каримов И.Н. Влияние внешних воздействий на свойства границы раздела полупроводник-диэлектрик МДП структур. Дисс... канд.физ.-мат.наук.- Баку, 1986.

Андижон давлат университети,
Наманган давлат университети
2018 йил 5 январда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. Р.Алиев)